

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur

Et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de la Technologie

Département de Génie civil



Mémoire de fin d'études

En vu d'obtention du diplôme de Master en Génie civil

Option : matériaux et structures

Sous le thème :

Valorisation des boues de dragage dans les bétons et mortiers

Réalisée par :

M^{lle} : HAMMOUCHE Nassima

M^{lle} : BOUBEKEUR Liza

Encadré par :

M^{me} : S. ATILL

Soutenu devant le jury :

Mr : A. TAHAKOURT

M^{me} : A. SELLAMI

Promotion : 2015-2016

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier en premier lieu, notre seigneur Dieu, le tout puissant qui nous a donné la patience, le courage et grâce auxquels nous avons pu achever ce mémoire.

On tient tout d'abord à remercier notre promotrice M^{me} S ATTIL, pour ses précieux conseils, son aide tout au long de ce projet, son suivi et ses orientations.

Nous remercions aussi M^{me} N BOUZIDI pour nous avoir Co-encadrés avec patience. Merci pour sa disponibilité et sa rigueur scientifique.

On tient à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner ce mémoire et pour leur bienveillante attention.

Un grand merci pour M^r D ZOUBIRI, pour son soutien et son aide au laboratoire.

Merci à M^r BOUZEKRI, M^r MEKKI et à toute l'équipe technique du laboratoire LTP-Est de Bejaia.

Nous tenons à remercier chaleureusement toutes les personnes qui nous ont soutenus jusqu'au bout.

Dédicace

Je dédie ce travail en témoignage de mon profond amour :

A toi papa

Aucun mot ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts et les sacrifices que tu as fournis jour et nuit pour mon bien être.

Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consenti pour mon éducation et ma formation.

A toi maman

Tu représentes pour moi le symbole de la bonté, de la sagesse et de la tendresse par excellence.

Tes prières et tes encouragements m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études, à garder espoir et marcher toujours sur le droit chemin.

Que Dieu tout puissant, te protège et t'accorde santé, longue vie et bonheur à toi et à papa.

A toi mon petit frère, YANI. ayafrokh je te souhaite un avenir radieux.

A vous mes petites sœurs chéries : DISSA, SARAH et ZOUINA, je vous aime très très fort.

Atoi TCHICOU, BEAU BRUN, ZI3QUCHE et HMIMOUCHE

A toi jida LOUIZA, khali KRIMOU et a ta petite famille.

A toi khalti DALILA, khali IDRIS, RIAD, NASSIM, FAOUZI, ANOUAR et GHILES.

A vous mes oncles: ABDELLAH, SEDIK ET ELHADJ.

A mes chères amies : NASSIMA, ZINEB et RACHIDA. Merci pour les instants joyeux passés ensemble.

A mes chers amis : SYPHAX, DJILLALI, NABIL, FILAS et LOCIF.

A une personne de valeur, MERZOUK, merci d'avoir été toujours là, dans les bons et les mauvais moments, de m'avoir réconforté et soutenu dans les moments les plus délicats.

Merci pour ta patience, ton aide et ta bonne humeur et pour avoir rendu chaque jour encore plus beau qu'il ne l'était. (^_^)

A toutes les personnes qui ont fait de mon parcours une merveilleuse histoire.

LIZA

Dédicace :

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,

L'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que

Je dédie ce mémoire :

A mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

A mes grandes mères

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

A mes sœurs aimables Katia et Cylia.

A mon frère que j'adore Mustapha.

Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

Une spéciale dédicace à cette personne qui compte énormément pour moi, une personne à qui je porte beaucoup de tendresse et de respect, et qui a été à mes côtés et m'a toujours soutenu et encouragé.

A toi NAÏMI.

A tous les membres de ma famille, petits et grands.

A toutes mes amies : Amina, Silia, Kahina, Samar...

A mon binôme LIZA et sa famille.

NASSIMA

Résumé :

Le dragage est une opération nécessaire pour maintenir l'activité et la sécurité navale dans les structures portuaires. Cette opération génère des quantités importantes de matériaux, d'où la nécessité d'une réflexion pointue pour la gestion de ces matériaux qui fait appelle à des moyens humains et matériels considérables.

Dans cette logique, la valorisation des sédiments de dragage s'avère une solution convenable, dans plusieurs domaines (agriculture, génie civil...etc.), et elle doit d'avantage prendre en compte les enjeux environnementaux et sociaux.

Pour atteindre l'objectif visé, nous avons envisagé d'incorporer une boue de dragage dans la formulation des mortiers à différente teneur en boue et dans la confection des bétons avec ajout de cette dernière.

Le but de cette étude est d'utiliser cette boue comme substitution d'une partie de ciment (5% ,10%,15%,20%) dans les mortiers et comme ajout dans les bétons à (2,5% ; 5% ; 7 ,5% ; 10%). en vue d'améliorer les caractéristiques (physiques et mécaniques) des bétons et mortiers contenant cette boue.

Mots clés: boue, mortier, béton, résistance, durabilité, retrait.

Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des notations	
Introduction générale.....	1
Etude bibliographique	
Chapitre I: Généralités sur les bétons et mortiers	
I.1. Constituants des bétons et mortiers.....	3
I.1.1. Définition.....	3
I.1.2. liants.....	3
I.1.3. Eau de gâchage	4
I.1.4. Les granulats.....	4
I.1.5. Les ajouts.....	5
I.1.6. Les adjuvants	5
I.2. Mortiers	6
I.2.1. Utilisation des mortiers.....	6
I.2.2. Caractéristiques principales des mortiers	7
I.3. Bétons.....	9
I.3.1. Utilisation des bêtons.....	9
I.3.2. Les différents types de béton	9
I.3.3. Caractéristiques des bétons.....	9
I.3.4. Durabilité du béton	12
I.3.5. La dégradation du béton	12
Chapitre II: Généralités sur les boues	
II.1. Définition de la boue.....	14

II.2. Les types de boue.....	14
II.2.1. Les boues d'épuration	14
II.2.2. Boues de forage	14
II.2.3. Boue de curage	15
II.2.4. Les boues de dragage	15
II.3. Dragage	15
II.4. Type de dragage	15
II.4.1. Dragage d'entretien	15
II.4.2. Dragage d'approfondissement.....	16
II.4.3. Dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires	16
II.5. Prétraitement des boues de dragage	16
II.5.1. La déshydratation	16
II.5.2. Injection de produits dans les boues draguées.....	17
II.6. Classification des boues	18
II.6.1. Les boues de classe A.....	18
II.6.2. Les boues de classe B	18
II.7. Procédés de traitement et de dépollution des boues de dragage	18
II.8. Stockage des boues de dragage	19
II.8.1. Boues de classe A.....	19
II.8.2. Boue de classe B	19
II.9. Valorisation des boues :	19
II.9.1. Le dragage et le génie civil.....	20
II.9.1.1. Utilisation en remblai routier.....	20
II.9.1.2. Utilisation en remblai pour support de construction	20
II.9.1.3. Utilisation dans la fabrication de matériau	20
II.9.2. Le dragage et l'agriculture	22
II.9.2.1. Pouvoir agronomique des sédiments de dragage.....	22

II.9.2.2. Valorisation des boues de dragage dans l'agriculture	22
II.10. Impacts du dragage sur l'environnement	23
II.11. Impacts potentiels sur l'environnement et le milieu social.....	23
II.11.1. Milieu terrestre	24
II.11.2. Problèmes sociaux et culturels	24
II.12. Quelques recherches effectuées sur le dragage des boues	25
II.12.1. Boues de dragage et boues d'épuration : Comparaison multicritère et étude de la faisabilité technique d'une filière de valorisation	25
II.12.2. Etude de formulations d'un béton de sable à base de sable de dragage.....	25

Etude expérimentale

Chapitre I: Caractérisation et identification des matériaux

I.1. Echantillonnage et prélèvement (NF P 18-533).....	27
I.1.1.Extraction et préparation de la matière.....	29
I.2. Analyse granulométrique (NF P 18-560).....	31
I.2.1. Analyses granulométriques des gravillons	34
I.2.2. Analyses granulométrique du sable 0/4.....	35
I.3. Mesure du coefficient d'aplatissement des granulats (NF EN 933-3)	37
I.3.1. Calcul du coefficient d'aplatissement « A » pour les gravillons.....	41
I.4. Détermination de la propreté superficielle	42
I.4.1. Calcul de la teneur en impureté pour les gravillons (NF P 18-591).....	42
I.4.2. Détermination de la propreté de sable (équivalent de sable) (NF EN 933-8)	45
I.5. Essai au bleu de méthylène	51
I.6. Détermination des masses volumiques (NF P 18-555)	56
I.6.1. Détermination de la masse volumique absolue (ps)	57
I.6.1.1. La méthode de l'éprouvette graduée.....	57
I.6.1.2. La méthode de pycnomètre	58
I.6.2. Détermination de la masse apparente (pp).....	60

I.7. Mesure de la compacité C	62
I.8. Mesure de la porosité P	63
I.9. Mesure de la teneur en eau W de la boue.....	63
I.10. Résistance au choc (Essai Los Angeles) (NF P 18-573).....	64
I.11. Classification des granulats (XP P 18-540).....	68
I.12. Méthodes d'analyses chimiques.....	72
I.12.1. Résultats des analyses chimiques de la boue de dragage	72
Tableau I.29 : Les analyses chimiques de la boue de dragage.....	72
I.12.2. Diffraction des rayons X (DRX)	73
I.12.3. Microscopie électronique à balayage MEB.....	76
I.12.4. Infrarouge IR	78

Chapitre II: Confection et formulation des bétons et mortiers

II.1. Mortiers.....	80
II.1.1. Les matériaux utilisés.....	80
II.1.2. Dosage ou pesés des constituants.....	83
II.1.3. Formulation des mortiers.....	86
II.2. Bétons	93
II.2.1. Composition et dosage du béton	93
II.2.2. Quelques méthodes de composition de béton	93
II.2.3. Méthode de DREUX-GORISSE	93
II.2.3.1. Dosage en ciment	95
II.2.3.2. Dosage en eau	95
II.2.3.3. Dosage des granulats	96
II.2.5. Dosage des granulats en (litre/m ³)	98
II.2.6. Récapitulation de la composition du béton	99
II.2.7. Confection des éprouvettes	102
II.2.8. Récapitulation de la composition des différentes gâchées	107

Chapitre III: Essai sur les bétons et mortiers

III.1. Essais sur les mortiers	109
III.1.2. Mesure du retrait et du gonflement (NF P 15-433).....	109
III.1.2. Mesure de la variation de masses	112
III.1.3. Essais de résistances mécaniques	112
III.1.3.1. Résistance à la traction par flexion	113
III.1.3.2. Résistance à la compression	114
III.1.4. Diffraction par rayons X (DRX) du mortier à 5% de boue.....	116
III.1.5. Microscopie électronique à balayage MEB	117
III.2. Essais sur les bétons	118
III.2.1. Essais sur les bétons frais	118
III.2.1.1. Essai de consistance (affaissement au cône d'Abrams) NF P18-451	118
III.2.1.2. Essai du contrôle du volume d'air entrainé (Aéromètre)	120
III.2.1.3. Mesure des masses volumiques fraîches ρ	121
III.2.2. Essais sur les bétons durcis	122
III.2.2.1. Mesure des masses volumiques.....	122
III.2.2.2. Essai de compression	123
III.1.4. Essai de durabilité	126
III.1.4.1. milieu neutre	127
III.1.4.2. Attaque des sulfates.....	128
III.1.4.3. Attaque des chlorures	130
III.4.4.4. Mesure de pH	132
III.4.4.5. Mesure de la conductivité électrique	133
III.4.4.6. Résistance à la compression	133

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.1. Résultats et interprétation des essais sur les mortiers	134
IV.1.1. Mesure de retrait et gonflement.....	134

IV.1.1.1. Retrait de dessiccation	134
IV.1.1.2. Gonflement.....	136
IV.1.2. Comportement mécanique (résistance à la compression et à la flexion).....	138
IV.2. Résultats et interprétation des essais sur les bétons	139
IV.2.1. Affaissement au cône d'Abrams.....	139
IV.2.2. Mesure de l'air occlus dans le béton (aéromètre).....	140
IV.2.3. Les masses volumiques fraîches	141
IV.2.4. La résistance à la compression	142
IV.3. Résultats et interprétation des essais sur la durabilité	143
IV.3.1. Variation de la masse	143
IV.3.2. Mesure du Ph	144
IV.3.3. Mesure de conductivité électrique	145
IV.3.4. La résistance à la compression	147
Conclusion généra.....	148
Références	
Annexes	

Liste des figures

Partie I : Etude bibliographique.		
Chapitre I: Généralités sur les bétons et mortiers.		
Figure I.1	Appareillage pour la mesure du retrait.	8
Chapitre II: Généralités sur les boues.		
Figure II.2	Carbonatation du béton.	13
Figure II.1	Utilisation des boues de dragage dans les remblais routiers	20
Figure II.2	Utilisation des boues de dragage dans la fabrication de brique.	21
Figure II.3	Utilisation des boues de dragage dans la fabrication du sable	21
Figure II.4	Épandage des boues de dragage.	23
Partie II : Etude Expérimentale.		
Chapitre I: Caractérisation et identification des matériaux.		
Figure I.1	Prélèvement d'un échantillon sur le tas.	28
Figure I.2	Opération de quartage	29
Figure I.3	Boue de dragage fraîche.	30
Figure I.4	Boue de dragage.	30
Figure I.5	Colonne des tamis.	33
Figure I.6	Analyse granulométrique des granulats	36
Figure I.7	Forme d'un granulats.	38
Figure I.8	Grille à fente.	40
Figure I.9	Propreté superficielle.	44
Figure I.10	Equivalent de sable.	48
Figure I.11	Machine agitatrice.	48
Figure I.12	Equivalent de sable après lavage des échantillons.	49
Figure I.13	Mesure de la hauteur du sable.	50
Figure I.14	Préparation de la solution de bleu de méthylène.	52
Figure I.15	Essai au bleu de méthylène.	53
Figure I.16	Les résultats de l'essai à la tache du gravier 15/25.	54
Figure I.17	Les résultats de l'essai à la tache du gravier 8/15.	54
Figure I.18	Les résultats de l'essai à la tache du sable 0/4.	55
Figure I.19	Les résultats de l'essai à la tache de la boue de dragage.	55

Figure I.20	Mesure de la masse volumique au pycnomètre.	59
Figure I.21	Mesure de la masse volumique apparente.	61
Figure I.22	Principe de l'essai Los Angeles.	65
Figure I.23	Appareil de Los Angeles.	67
Figure I.25	Spectre DRX de la boue de dragage.	74
Figure I.26	Spectre DRX du sable normalisé.	75
Figure I.27	Spectre DRX du ciment.	76
Figure I.28	Observation microscopique de la boue de dragage.	77
Figure I.29	Spectre EDX de la boue de dragage.	77
Figure I.30	Spectre infrarouge de la boue de dragage.	79
Chapitre II: Confection et formulation des bétons et mortiers		
Figure II.1	Ciment portland CPA-CEM 1/ 42.5 R.	80
Figure II.2	Composition granulométrique du sable de référence CEN.	82
Figure II.3	Sable normalisé.	82
Figure II.4	Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 0% de boue de dragage.	83
Figure II.5	Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 5% de boue de dragage.	84
Figure II.6	Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 10% de boue de dragage.	85
Figure II.7	Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 15% de boue de dragage.	85
Figure II.8	Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 20% de boue de dragage.	86
Figure II.9	Plots de mesure.	87
Figure II.10	Les moules prismatiques 4×4×16 cm ³ .	87
Figure II.11	Malaxeur.	89
Figure II.12	Confection des éprouvettes.	90
Figure II.13	Table à chocs.	90
Figure II.14	Les mortiers après démoulage.	91
Figure II.15	Conservation des éprouvettes dans l'eau distillée.	92
Figure II.16	Conservation des éprouvettes à l'air libre.	92

Figure II.17	Les pourcentages des différentes fractions granulaires.	95
Figure II.18	Courbe de mélange selon DREUX-GORISSE	101
Figure II.19	Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 0% de boue de dragage.	104
Figure II.20	Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 2.5% de boue de dragage.	105
Figure II.21	Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 5% de boue de dragage.	105
Figure II.22	Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 7.5% de boue de dragage.	106
Figure II.23	Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 10% de boue de dragage.	107
Figure II.24	Confection des éprouvettes 16×32 cm ² .	108
Chapitre III: Essais sur les bétons et mortiers		
Figure III.1	Etalonnage de l'appareil de mesure du retrait et gonflement.	110
Figure III.2	Appareil de mesure du retrait et gonflement.	111
Figure III.3	Essai de résistance à la flexion.	113
Figure III.4	Essai de résistance à la compression.	114
Figure III.5	Rupture des éprouvettes prismatiques soumise à la flexion.	115
Figure III.6	Spectre DRX du mortier à 5% de boue.	115
Figure III.7	Observation microscopique du mortier à 5% de boue.	116
Figure III.8	Spectre EDX du mortier à 5% de boue.	117
Figure III.9	Cône d'Abrams.	118
Figure III.10	Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.	119
Figure III.11	Affaissement au cône d'Abrams.	120
Figure III.12	Aéromètre à béton.	121
Figure III.13	Conservation des éprouvettes dans l'eau.	122
Figure III.14	Pesé des éprouvettes.	123
Figure III.15	Presse pour béton.	124
Figure III.16	Surfaçage des éprouvettes.	125
Figure III.17	Fissuration des éprouvettes.	126
Figure III.18	Conservation dans le milieu neutre.	127

Figure III.19	Mesure de la masse et les dimensions des cubes.	127
Figure III.20	Prélèvement des solutions.	128
Figure III.21	Sulfate de sodium Na ₂ SO ₄	129
Figure III.22	Agitation de la solution de sulfate de sodium.	129
Figure III.23	Conservation dans un milieu sulfaté.	130
Figure III.24	Acide hydrochlorique HCl.	131
Figure III.25	Conservation dans un milieu acide.	131
Figure III.26	Résultats des cubes conservés dans différents milieu à 28 jours.	132
Figure III.27	Appareil de mesure de PH et la conductivité.	133
Chapitre IV: Résultats et discussions		
Figure IV.1	Variation de retrait.	134
Figure IV.2	Variation de la masse à l'air libre.	135
Figure IV.3	Variation du gonflement	136
Figure IV.4	Variation de la masse dans l'eau.	137
Figure IV.5	Les résistances mécaniques des mortiers à 28 jours.	138
Figure IV.6	Variation de l'affaissement des différentes séries du béton.	138
Figure IV.7	Pourcentage d'air occlus dans le béton.	140
Figure IV.8	Variation des masses volumiques.	141
Figure IV.9	La résistance à la compression à 28 jours.	142
Figure IV.10	Variation de la masse en fonction du temps.	143
Figure IV.11	Evolution du Ph dans les milieux neutre et sulfaté.	144
Figure IV.12	Evolution du Ph (milieu acide).	145
Figure IV.13	Mesure de la conductivité électrique (milieu neutre).	145
Figure IV.14	Mesure de la conductivité électrique (milieu sulfaté).	146
Figure IV.15	Mesure de la conductivité électrique (milieu acide).	146
Figure IV.16	La résistance à la compression des cubes.	147

Liste des tableaux

Partie I : Etude bibliographique.		
Chapitre I: Généralités sur les bétons et mortiers.		
Tableau I.1	Désignation des classes d'affaissement au cône d'Abrams	10
Tableau I.2	Consistances cibles pour différents types d'ouvrages et de mises en places.	11
Partie II : Etude Expérimentale.		
Chapitre I: Caractérisation et identification des matériaux.		
Tableau I.1	Dimensions nominales des tamis.	32
Tableau I.2	Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 15/25.	34
Tableau I.3	Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15.	34
Tableau I.4	Résultats de l'analyse granulométrique du sable 0/4.	35
Tableau I.5	Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées.	39
Tableau I.6	Détermination du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25.	41
Tableau I.7	Détermination du coefficient d'aplatissement pour le gravier 8/15.	42
Tableau I.8	Teneur en impureté des gravillons 15/25, 8/15.	44
Tableau I.9	Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/4.	46
Tableau I.10	Résultats d'équivalent de sable pour le sable 0/4.	50
Tableau I.11	Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène.	56
Tableau I.12	Résultats de la masse volumique absolue de la boue par la méthode de l'éprouvette graduée.	58
Tableau I.13	Récapitulatif des résultats de la masse volumique absolue des gravillons.	60
Tableau I.14	Résultats des masses volumiques apparentes.	62
Tableau I.15	Mesure de la compacité (C) et la porosité (P).	63
Tableau I.16	Mesure de la teneur en eau de la boue d dragage.	64
Tableau I.17	Charges des boulets correspondants à chaque classe granulaire.	65
Tableau I.18	Mesure d coefficient de Los Angeles du gravier 8/15.	67

Tableau I.19	Résultats des différents essais effectués au laboratoire sur les granulats.	68
Tableau I.20	Los Angeles.	68
Tableau I.21	Granularité des gravillons.	69
Tableau I.22	Résultats de la granularité des graviers.	69
Tableau I.23	Coefficient d'aplatissement.	70
Tableau I.24	Granularité du sable.	70
Tableau I.25	Résultats sur la granularité du sable 0/4.	71
Tableau I.26	Module de finesse.	71
Tableau I.27	Teneur en fines.	71
Tableau I.28	Equivalent de sable ou valeur au bleu.	72
Tableau I.29	Les analyses chimiques de la boue de dragage.	72
Chapitre II: Confection et formulation des bétons et mortiers		
Tableau II.1	Résultat d'analyse granulométrique de sable normalisé.	81
Tableau II.2	Analyses chimiques du sable normalisé.	81
Tableau II.3	Proportions des matériaux utilisées pour les mortiers.	86
Tableau II.4	Opération pour déterminer le mortier normal.	88
Tableau II.5	Récapitulatif de la composition du béton.	99
Tableau II.6	les valeurs des tamisats (%) de la courbe de mélange.	100
Tableau II.7	Récapitulatif de la composition des gâchées.	107
Chapitre III: Essais sur les bétons et mortiers		
Tableau III.1	Les classes de consistance.	117

Liste des notations

E/C : Rapport eau/ciment.

CPA : Ciment portland artificiel.

NF P : Norme française.

EN: Norme européenne.

LCPC: Laboratoire central des ponts et chaussés.

BAP: Béton autoplaçant.

BHP: Béton haute performance.

BFUP: Béton fibré ultra performance.

G/S: Rapport graviers/sables.

MF: Module de finesse.

ESP: Equivalent de sable par piston.

VB: Valeur au bleu.

DRX: Diffraction par rayons X.

MEB: Microscopie électronique à balayage.

IR: Infrarouge.

TLM: Test de lixiviation monolithe.

SAA: Spectrométrie d'absorption atomique

INTRODUCTION GENERALE

Dans le monde industriel actuel, l'écologie et le recyclage ne peuvent plus être négligés. Les aspects environnementaux doivent être intégrés dans le développement de nouveaux projets. Le domaine de la construction évolue sans cesse et prend de plus en plus en compte ces notions environnementales importantes.

Le matériau béton, est irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Le compromis trouvé entre résistance mécanique, économie, esthétique et facilité de mise en œuvre, offre à ce matériau la première place dans la construction au niveau mondial. Au niveau régional et national le béton est le matériau de construction utilisé par excellence au sein de tous les chantiers, aussi bien dans les secteurs du bâtiment que ceux des travaux publics. Ses performances ne cessent de s'améliorer, en l'occurrence les résistances mécaniques et la durabilité. Hier c'était le béton aujourd'hui ce sont les bétons, grâce au développement technologique et à la recherche scientifique de nouveaux types de bétons qui ont été créés et employés.

Cette étude résulte de l'évolution de mentalité au sein du secteur de la construction, et de la nécessité croissante de trouver une solution aux problématiques liées aux boues en général, et la boue de dragage en particulier.

Les boues de dragage font de plus en plus l'objet d'étude d'impact sur l'environnement. Ainsi, plusieurs études, recherches et réglementations ont été élaborées afin de caractériser, traiter, voire valoriser ces sédiments.

Le but de ce travail est de voir l'influence de ces boues de dragage sur les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques des bétons et mortiers.

Notre travail s'inscrit principalement pour contribuer à la valorisation de la boue de dragage dans les mortiers et bétons, utilisée comme substitut au ciment ou ajout au béton, dans le cadre de la confection de nouveaux bétons structurels, qui ont pour but de:

- ✓ Contribuer à préserver l'environnement par la réduction des dépôts des sédiments de dragage.
- ✓ Répondre à la demande croissante en granulats (utilisation d'un sable de dragage).
- ✓ Contribuer à mettre en valeur un déchet (un rejet).

✓ Contribuer aux études menées sur l'emploi de cette boue dans les bétons en substitution des ciments ou ajout.

Ce travail est consacré aux essais d'identification (caractérisation), et aux essais d'étude. Il est divisé en deux grandes parties :

1. Partie théorique ou bibliographique composée de deux chapitres :

Le premier chapitre est une présentation générale des connaissances actuelles des mortiers et bétons et ces constituants de base (ciment, graviers, sable et eau).

Le deuxième chapitre présente des généralités sur les boues de dragage.

2. Partie expérimentale divisée à son tour en quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est consacré à la caractérisation et l'identification des matériaux utilisés.
- ❖ Le deuxième chapitre expose la méthode de formulation et confection des mortiers et béton.
- ❖ Le troisième chapitre est consacré aux différents essais effectués sur mortier et béton.
- ❖ Le quatrième chapitre présente les résultats obtenu et aux interprétations.

Ce travail sera achevé par une conclusion générale de l'ensemble des résultats tout en suggérant de nouvelles perspectives de recherche afin de fortifier cette recherche.

Introduction :

Ce chapitre expose des généralités sur les bétons, ces composants (l'eau, les granulats et le ciment), et actuelles connaissances sur ces performances de durabilité, d'ouvrabilité et aussi les mortiers et leurs utilisations.

I.1. Constituants des bétons et mortiers :

I.1.1. Définition :

On appelle mortiers ou bétons, les matériaux obtenus en gâchant dans un malaxeur (ou manuellement) des proportions convenable de ciment, d'eau et de granulats (sable et gravillons) avec éventuellement un ou plusieurs adjuvants. Dans le cas du mortier, le granulat est composé d'un ou plusieurs sables. Dans le cas du béton, le granulat est composé de sables et de gravillons.

Les différents granulats forment le squelette granulaire du béton. Le ciment et l'eau et les adjuvants forment la pate liante. [1]

I.1.2. liants:

Le liant est un élément actif qui est mélangé avec de l'eau ou un autre lubrifiant, pour lier les granulats et donner du mortier ou du béton. Dans le cas courant, le liant utilisé est un liant hydraulique; c'est-à-dire un produit ayant la propriété de durcir au contact de l'eau et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il existe essentiellement deux types de liants hydrauliques: le ciment et la chaux hydraulique. Nous nous intéresserons au premier dans cette étude. [2]

✓ Types de liants [3] :

- Les ciments normalisés (gris ou blanc).
- Les ciments spéciaux (alumineux fondu,...).
- Les liants à maçonnerie.
- Les chaux hydrauliques naturelles.
- Les chaux éteintes.

I.1.3. Eau de gâchage :

Les dosages de l'eau et du ciment sont deux facteurs importants. En effet, l'ouvrabilité et la résistance sont grandement affectées par ces deux paramètres. Plus le rapport eau/ciment est grand, plus l'ouvrabilité sera grande. En effet, plus il y a d'eau, plus le béton aura tendance à remplir aisément les formes. Le rapport des masses E/C « moyen » est normalement fixé à 0,55. C'est ce rapport qui est le plus souvent utilisé, car le béton obtenu dispose d'une assez bonne ouvrabilité, tout en ayant une bonne résistance.

Le phénomène de ressuage est dû à un rapport eau sur ciment trop élevé. Il se manifeste par l'apparition d'une flaque au-dessus du béton frais. Au niveau des granulats, on observe la présence d'eau à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment. La résistance en est réduite, car l'eau s'évapore et il y a des vides entre le granulat et la pâte.

I.1.4. Les granulats :

Un granulat est composé d'un ensemble de grains minéraux qui, selon sa dimension, se situe dans une famille particulière. Les granulats sont donc triés selon leur granulométrie, c'est-à-dire selon leur diamètre, et peuvent donc appartenir, selon la norme **NF P 18-101**, à l'une des 5 familles suivantes:

- Les fines avec un diamètre compris entre 0 et 0,08 mm
- Les sables avec un diamètre compris entre 0 et 6,3 mm
- Les gravillons avec un diamètre compris entre 2 et 31,5 mm
- Les cailloux avec un diamètre compris en 20 et 80 mm
- Les graves avec un diamètre compris en 6,3 et 80 mm

Les granulats sont les principaux composants du béton (70 % en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier.

✓ Différents types de granulats [4] :

- Le granulat dit "Roulé", obtenu par criblage et lavage des matériaux alluvionnaires, généralement de forme arrondie.
- Le granulat dit "Concassé" obtenu par concassage de roches éruptives ou sédimentaires, généralement de forme plus ou moins anguleuse.
- Le granulat dit "Mixte" comporte à la fois des éléments roulés et concassés.

- Granulats naturels d'origine volcanique tels : la pierre ponce, la pouzzolane.
- Granulats artificiels sont des produits industriels tels : mâchefer laitier expansé, cendres volantes frittées...
- Granulats artificiels fabriqués spécialement : argile et schiste expansés, polystyrène expansé, verre expansé, etc...

✓ **Sable normalisé pour mortier [5] :**

Les sables normalisés sont des sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens, et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : ils réduisent la variation volumique, les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Les diamètres maximum des grains de ce sable est :

- Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1mm (en passoire).
- Fins : jusqu'à 1,6 mm.
- Moyens : jusqu'à 3,15 mm.
- Gros : jusqu'à 5 mm.

I.1.5. Les ajouts [5] :

Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers ou les bétons sont:

- poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice..);
- Fibres de différentes natures;
- Colorants (naturels ou synthétiques);
- Polymères.

I.1.6. Les adjuvants [5] :

Sont des produits chimiques incorporés au béton en faibles quantités afin d'en améliorer certaines propriétés. Les adjuvants les plus courants peuvent être organiques ou inorganiques. On distingue :

- Les accélérateurs ou retardateurs de prise.
- Les réducteurs d'eau (plastifiant) et hauts réducteurs d'eau (super plastifiants)
- Les hydrofuges.

- Les entraîneurs d'air.

Le dosage en adjuvants n'excède pas 5% de la masse de ciment.

I.2. Mortiers :

I.2.1. Utilisation des mortiers :

✓ **Les joints de maçonnerie [6]:**

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et répondre aux exigences d'étanchéité.

On a généralement intérêt à utiliser des mortiers « pas trop rigide », de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il liaisonne sans fissurer.

✓ **Les enduits :**

Les enduits traditionnels sont réalisés en trois couches. Afin d'augmenter le rendement, il se développe aujourd'hui, en enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants.

Les enduits aux mortiers de liants hydrauliques sont utilisés aussi bien pour les travaux neufs que pour la réfection de façades. Les enduits remplissent plusieurs rôles :

- un rôle de protection du gros œuvre contre les intempéries.
- un rôle d'imperméabilisation, tout en laissant « respirer » le support.
- un rôle esthétique (aspect et couleur).

Les enduits habillent le gros œuvre en le protégeant. Ils constituent la finition extérieure visible de la construction.

✓ **Les chapes :**

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface.

Les chapes peuvent constituer la finition : on y incorpore alors souvent des produits spécifiques. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol.

Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). Adhérente ou flottante, la chape peut également avoir une fonction thermique ou acoustique.

✓ **Les scellements et les calages :**

Des produits spécifiques à base de mortiers sont disponibles dans le commerce afin de répondre aux problèmes de scellement et de calage, par exemple : scellement d'éléments de couverture, scellement d'éléments de second œuvre, scellement de mobiliers urbains, scellement de regards de visite, assemblage d'éléments préfabriqués...

Afin de réaliser un bon scellement, le mortier doit être expansif pour provoquer un gonflement.

I.2.2. Caractéristiques principales des mortiers [5] :

Les caractéristiques principales des mortiers sont:

- Ouvrabilité
- Résistances mécaniques
- retraits et gonflements

Pour pouvoir évaluer les caractéristiques des mortiers on prend souvent comme référence le mortier 1/3 composé en poids de: une partie de ciment et de 3 parties de sable normalisé dont les grains s'échelonnent de 80 microns à 2 mm et 0,5 partie d'eau.

Ce mortier est malaxé et mis en place dans des moules métalliques suivant des méthodes normalisées. On effectue sur ce mortier des essais de gonflement, de retrait, et de résistance mécanique.

✓ **Ouvrabilité :**

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

- La table à secousses.
- Le maniabilimètre du LCPC.
- Le cône.

✓ **Retraits et gonflements :**

Les retraits se mesurent sur des prismes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et à 50 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ conservées dans l'eau à $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Ils sont en général assez faibles.

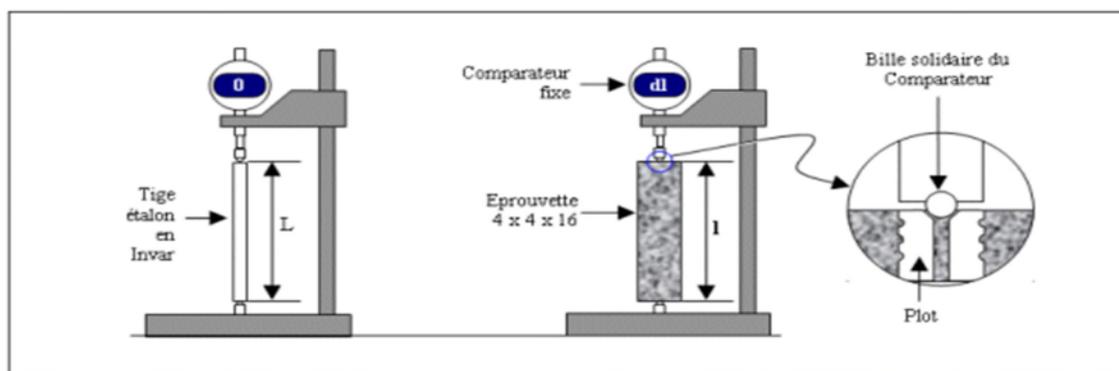


Figure I.1: Appareillage pour la mesure du retrait.

✓ **Résistances mécaniques :**

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ conservés dans l'eau à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs:

- Nature et dosage en ciment;
- Rapport E/C;
- Granulométrie et nature du sable;
- Énergie de malaxage et mise en œuvre;
- Protection les tous premiers jours.

I.3. Bétons :

I.3.1. Utilisation des bétons [6] :

✓ Dans le bâtiment :

Il est utilisé dans:

- Dans 80% des maisons individuelles et 90% des logements collectifs pour les murs ou structure.
- Presque exclusivement pour les planchers.
- Il assure le gros œuvre, avec jusqu'à 4 fonctions : structure, plancher, enveloppe, couverture.

✓ Dans les travaux publics :

Il est utilisé dans:

Les ponts, les tunnels, les barrages, les routes, l'assainissement, les ouvrages offshore.

I.3.2. Les différents types de béton :

- Béton armé.
- Béton précontraint.
- Béton fibré.
- Béton projeté.
- Béton autoplacant (BAP).
- Béton à haute performance (BHP).
- Béton fibré ultra performant (BFUP).

I.3.3. Caractéristiques des bétons [2] :

✓ Ouvrabilité :

L'aptitude du béton frais à bien se mouler dans les coffrages et autour des armatures tout en restant homogène, bref, à bien se mettre en place, est appelée ouvrabilité. L'ouvrabilité n'est pas en réalité une propriété du béton mais une façon commode de nommer l'objectif à atteindre; cela s'explique par le fait que sa définition fait intervenir, non pas des grandeurs, mais des jugements de valeur comme "bien se mouler" ou "rester homogène". En pratique on

considère qu'un béton est ouvrable s'il a la consistance (ferme, plastique, très plastique ou fluide) requise pour les conditions de mise en œuvre considérée.

L'ouvrabilité dépend en effet, de la plupart des qualités de l'ouvrage: compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, parements de belle apparence, étanchéité etc., c'est pourquoi l'ouvrabilité doit être considérée comme une qualité-aussi: importante que la résistance.

La mesure de la consistance peut s'effectuer avec différents dispositifs dont le plus répandu est le cône d'Abrams. Les tableaux I.1 et I.2 donnent les classes d'affaissement au cône d'Abrams et les valeurs de consistances ciblent pour différents types d'ouvrages et de mises en place.

Tableau I.1: Désignation des classes d'affaissement au cône d'Abrams.

Affaissement (cm)	Désignation de la consistance
0 à 4	Ferme
5 à 9	Plastique
10 à 15	Très plastique
≥16	Fluide

Tableau I.2: Consistances cibles pour différents types d'ouvrages et de mises en places.

Type d'ouvrage	Affaissement au cône (cm)
Bétons filés (séparateurs de voies, etc.), mise en place au tapis.	3
Poteaux, piles, tabliers, semelles.	>7
Mise en place à la benne (banches, planchers).	12
Béton de fondation (non vibré), mises-en place à la goulotte	> 14
Pieux, parois moulées	> 18
Bétons à hautes performances	> 18

✓ **Résistance :**

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton, mais nous avons insisté, à travers le paragraphe précédent, sur la qualité d'ouvrabilité et son importance pour pouvoir dire que la résistance est aussi une qualité importante; ouvrabilité et résistance sont d'ailleurs à étudier de pair car elles sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus qu'elles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton.

La résistance du béton est influencée par un bon nombre de paramètres, parmi lesquels nous pouvons citer:

- Le rapport E/C :

La résistance croît en même temps que le dosage en ciment C, et elle décroît en fonction du dosage en eau E, c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte le rapport E/C comme facteur global intervenant dans la résistance du béton.

- Le rapport G/S :

Le rapport G/S correspond au rapport des volumes absolus qui correspondent aux poids, si G et S ont même poids spécifique. L'influence de la composition granulaire du béton est relativement faible, tant en ce qui concerne les proportions relatives de sable et de gravier (rapport G/S) que la continuité ou discontinuité de la courbe granulométrique.

- L'adhérence mortier/ gravier :

Une part importante de la résistance (surtout en traction) est fonction de la plus ou moins bonne adhérence du mortier sur la surface des graviers. Cette qualité peut même être plus importante que la résistance et la dureté du gravier lui-même.

I.3.4. Durabilité du béton :

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers...etc) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible. [7]

I.3.5. La dégradation du béton

✓ Vieillessement

Selon sa composition (alcali-réaction ou réaction sulfatique interne), ses additifs et selon les conditions de sa préparation (température, etc.) ou de son coulage ou selon les contraintes qu'il a subies (attaques chimiques, séismes, vibrations, chocs thermiques, etc.), le béton vieillit plus ou moins bien. De nombreux tests et études portent sur la durabilité des bétons. En particulier, la caractérisation des matériaux par acoustique ultrasonore permet de détecter des changements structuraux du matériau.

Un des maux qui affectent le plus fréquemment le béton est sa carbonatation. Il s'agit d'une réaction chimique entre le CO_2 de l'atmosphère et le ciment du béton, qui attaque son alcalinité et le rend moins basique (passant de 12 à environ 9) ce qui est suffisant pour ne plus protéger les aciers. Lorsque l'acier n'est plus protégé par la barrière basique de 12, celle-ci se corrode et gonfle, ce qui fait éclater le béton les enrobant. Les armatures ne sont alors plus protégées et la résistance mécanique est compromise. [4]



Figure II.2 : Carbonatation du béton.

✓ **Les agressions chimiques :**

Les ouvrages en béton sont exposés à la pluie, à la neige, aux eaux souterraines, à l'eau de mer et à toutes solutions résultantes de la dissolution de sels et de gaz qui seront des agents agressifs vis-à-vis du béton. Les bétons sont des solides poreux qui ont un caractère basique très accentué dû à la nature de la pâte durcie qui renferme :

- 15 à 20% d'une base forte : la portlandite Ca(OH)_2
- Environ 70% de C-S-H $\text{Ca}_3\text{H}_2\text{Si}_2\text{O(OH)}_2$
- 10 à 15% d'aluminate et sulfoaluminate de calcium hydratés
- Une solution interstitielle, dans les pores et les capillaires, enrichie en alcalins (NaOH et KOH) dont le pH varie de 12,5 à 13,5.

La dégradation des ouvrages en béton provoquée par ces agents est due à la dissolution et l'érosion en cas des attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaques salines, en particulier sulfateuse. Le classement des causes de détérioration par ordre d'importance décroissant est : corrosion des armatures, action du gel, effet chimiques sur les pâtes de ciment hydraté. [3]

Conclusion :

Après avoir présenté dans ce chapitre en plus des mortiers, le béton, ces composants et ces différentes caractéristiques, le chapitre suivant consiste à la présentation de la boue de dragage, types de dragage, classification de cette boue et domaines de sa valorisation.

Introduction :

Ce chapitre est consacré aux généralités sur les boues de dragage : définition, traitement, stockage, valorisation, domaines d'application et à quelques recherches effectuées dans le but de valoriser cette boue.

II.1. Définition de la boue :

La boue est un mélange d'eau et de particules sédimentaires fines de limons et d'argiles. Les dépôts de boue anciens ou fossilisés se transforment en lutites par l'action du temps. Quand une boue est riche en matière organique et qu'elle sédimente au fond de l'eau, elle consomme de l'oxygène et devient anoxique. Elle peut néanmoins être aérée par des vers ou animaux fouisseurs.

La boue fournit un abri à de nombreuses espèces animales telles que les vers, les grenouilles, les serpents, les palourdes, les écrevisses, etc. D'autres animaux comme les porcs, les rhinocéros et les éléphants s'en servent pour refroidir leur corps et les protéger des rayons du soleil. Les êtres humains se sont servis (et se servent encore) de boue séchée dans des constructions, des œuvres d'art, ainsi que comme matériau étanche.

II.2. Les types de boue :

Les grandes catégories de boues sont:

- des boues urbaines.
- des boues industrielles. [8]

II.2.1. Les boues d'épuration :

Les boues d'épuration (urbaines ou industrielles) sont les principaux déchets produits par une station d'épuration à partir des effluents liquides. Ces sédiments résiduels sont surtout constitués de bactéries mortes et de matière organique minéralisée. Une installation moyenne produit environ un excès de 40 g de matière sèche par jour et par habitant.

II.2.2. Boues de forage :

Dans le domaine de la géotechnique, les boues de forage font partie des "fluides de forage». Les boues de forages ont plusieurs fonctions techniques essentielles dans la réussite d'un forage, notamment dans les forages profonds et forages dirigés. Elles sont notamment

utilisées dans les forages de pétrole et de gaz naturel, mais également pour des forages plus simples, destinés par exemple à produire de l'eau potable.

II.2.3. Boue de curage :

Les boues de curage d'égouts sont des déchets produits par les professionnels de l'assainissement dans le cadre de l'entretien des réseaux d'assainissement. [9]

II.2.4. Les boues de dragage :

L'appellation sédiments de dragage correspond aux boues formées par sédimentation dans les cours d'eau, les plans d'eau, les canaux, les barrages et les ports fluviaux ou maritimes. L'opération de dragage de ces ouvrages est le plus souvent nécessaire afin de rétablir un tirant d'eau pour la navigation ou pour prévenir les risques d'inondation.

De par cette définition, les sédiments de dragage sont des sables et des limons et argiles. Les sédiments marins sont essentiellement sableux en entrée de port, davantage limoneux et argileux en fond de darse. Les sédiments de canaux, au contraire, sont généralement plus fins. [10]

II.3. Dragage :

On appelle dragage l'opération qui consiste à extraire les matériaux situés sur le fond d'un plan d'eau. L'objectif est de réaliser des travaux de génie portuaire (creusement de bassins ou de chenaux), d'entretenir les chenaux fluviaux ou maritimes empruntés par les navires lorsqu'ils ont été comblés par les sédiments, d'effectuer des opérations de remblaiement pour reconstituer les plages ou gagner des terres sur la mer ou d'extraire des granulats marins pour répondre aux besoins du secteur de la construction.

II.4. Type de dragage [11]:

On distingue trois types de dragage selon la nature des sédiments à draguer et le type de travaux à réaliser :

II.4.1. Dragage d'entretien :

Le dragage d'entretien périodique est associé à l'enlèvement des sédiments accumulés d'un chenal afin de conserver la profondeur nominale des voies de navigation, des ports, des

marinas, des rampes, de mis à l'eau et des installations portuaires. Ce type de dragage s'effectue à intervalles réguliers aux fins de navigation (au moins une fois tous les cinq ans).

Habituellement, le dragage se fait par des moyens mécaniques, comme une benne à traction, une pelle à benne trainante ou une rétro-caveuse. Les dragages occasionnent le déplacement de volumes de sédiments souvent très importants. Ce déplacement engendre des modifications physiques et hydro sédimentaires des sites aménagés.

II.4.2. Dragage d'approfondissement :

Les dragages d'approfondissement sont entrepris lorsqu'il devient nécessaire d'adapter le seuil de navigation à la taille des navires. Ces travaux nécessitent de déplacer d'importants volumes de sédiments et demandent des moyens de dragage importants.

II.4.3. Dragage d'aménagement de nouvelles aires portuaires :

L'aménagement de nouvelles aires portuaires occasionne souvent le déplacement d'importants volumes de matériaux divers : roches, graviers, sables, terres, argiles ou vases. Ces matériaux peuvent également être utilisés pour créer les nouvelles aires.

II.5. Prétraitement des boues de dragage [12]:

Par définition, les procédés de prétraitements des sédiments sont utilisés pour préparer les matériaux de dragage en vue de leur transport, leur traitement ou leur mise en dépôt, voir leur valorisation.

II.5.1. La déshydratation :

La teneur en eau est différente selon la méthode de dragage utilisée : dans les sédiments fins, les matériaux excavés par des dragues hydrauliques ont en général un contenu de 50%, alors qu'avec les dragues hydrauliques le contenu en eau peut être supérieur à 90%. Or, les proportions d'eau jouent un rôle important dans certaines technologies de traitement.

Généralement, les déshydratations visent essentiellement à réduire le contenu en eau des sédiments pour une ou plusieurs des raisons suivantes :

- Faciliter la manutention des sédiments.
- Réduire les besoins en énergie lors de leur incinération.

- Réduire les coûts de traitement de la plupart des technologies, en particulier des technologies thermiques.
- Faciliter les dépôts des sédiments en milieu terrestre.
- Réduire les coûts de transport par réduction du volume et du poids.
- Réduire les volumes de matériaux à traiter ou à mettre en dépôt.

II.5.2. Injection de produits dans les boues draguées :

Dans le cas de projets de dragage hydraulique, l'injection de produits dans les boues prend avantage du processus de mélange disponible dans le pipeline utilisé pour le transport des matériaux de dragage. Les produits d'injection sont de natures chimiques différentes, et permettent :

- de conditionner les sédiments pour leur traitement.
- d'accélérer la sédimentation des particules au site de dépôt.
- d'améliorer la biodégradation des substances organiques dans ces mêmes sites de dépôt.

Prenant comme application la technologie de conditionnement qu'elle a de nature physique, chimique ou thermique et elle intervient par l'augmentation de la taille et de la densité des particules après modification des propriétés électriques, chimiques et structurelles.

On peut citer le conditionnement chimique :

- par flocculant minéraux : et surtout la chaux et les sels métalliques trivalents tel que le sulfate d'aluminium, les sulfates et les chlorures ferriques.
- Les flocculant minéraux sont bien adaptés à la déshydratation par filtre presse ou filtre sous vide.
- par poly-électrolytes de synthèse, les poly-électrolytes ont pour effet une floculation extrêmement marquée, et une très forte diminution de la résistance spécifique de la boue.

La quantité de matière sèche à déshydrater n'est donc pratiquement pas modifiée. Par charges inertes, ce sont des produits à faible valeur marchande, telles les cendres volantes de centrales thermiques ou d'usines d'incinération. Ces charges peuvent être incorporées à la boue avant filtration ou utilisées en pré-couches.

II.6. Classification des boues :**II.6.1. Les boues de classe A [8]:**

Les boues de classe A sont les seules à l'heure actuelle à être reconnues comme des matières valorisables. Il est également possible d'utiliser les boues de classe A pour l'épandage de terres agricoles (comme pratiqué avec les boues de station d'épuration) ou la réhabilitation de sites.

II.6.2. Les boues de classe B :

Les boues de classe B sont classées en tant que déchets dangereux. Cependant, il est possible après inertage chimique ou thermique et stabilisation, de les réutiliser. Les principales voies envisagées sont le recyclage en cimenterie ou le recyclage en produits de construction ou en nouveaux matériaux. Les débouchés de valorisation sont accrus lorsqu'il est possible après traitement de requalifier les boues de classe B en boues de classe A.

II.7. Procédés de traitement et de dépollution des boues de dragage :

Les études et les recherches appliquées sur les sédiments toxiques sont récentes, et ont presque les mêmes programmes que ceux concernant les sols contaminés.

La problématique sur les sédiments est dans l'ensemble plus complexe. Deux facteurs en sont à l'origine :

- D'une part, pour des nombreux sols contaminés, l'origine de la pollution est déterminée (ancienne activité industrielle, déversement accidentel). Sa nature est ainsi connue et les responsabilités sont plus facilement établies. Tandis que dans le cas des sédiments, la pollution provient la plupart du temps de rejets d'origines variées (industriels, urbains ou agricoles), mélangés entre eux et véhiculés par l'eau et les matières en suspension. Tous ces phénomènes, qui favorisent la dispersion et la transformation chimique des polluants, rendent la caractérisation nettement plus difficile.
- D'autre part, les caractéristiques physiques sont assez différentes et influent considérablement sur les procédés de traitement. Les polluants sont très souvent liés aux particules fines et une simple séparation granulométrie peut suffire à les récupérer. [12]

II.8. Stockage des boues de dragage :**II.8.1. Boues de classe A :**

Une installation de stockage de déchets non dangereux est une installation d'élimination de déchets non dangereux par dépôt ou enfouissement sur ou dans la terre, y compris Un site permanent (c'est-à-dire pour une durée supérieure à un an) utilisé pour stocker temporairement des déchets non dangereux, dans les cas :

- de stockage des déchets avant élimination pour une durée supérieure à un an.
- de stockage des déchets avant valorisation ou traitement pour une durée supérieure à trois ans en règle générale. [13]

II.8.2. Boue de classe B :

Le stockage de sédiments dangereux dépend des critères d'acceptation définis dans l'arrêté ministériel du 30 décembre 2002. Les règles de conception et d'exploitation d'une installation de stockage pour déchets dangereux sont également régies par cet arrêté. Les principales prescriptions sont les suivantes :

- le site doit être implanté hors zone inondable.
- la zone à exploiter doit être à plus de 200 m de la limite de propriété des citoyens.
- le contexte géologique et hydrogéologique doit constituer une barrière de sécurité passive.
- l'aménagement du site est réalisé de telle façon que cette barrière ne soit pas sollicitée. Un dispositif de drainage incluant à sa base une géo membrane constitue un niveau de sécurité active. [14]

II.9. Valorisation des boues :

Tout déchet devient moins contraignant s'il peut être réutilisé, et il l'est encore moins si cette réutilisation présente un avantage. Un déchet sans utilité doit être détruit ou entreposé dans de bonnes conditions. Ces opérations présentent des difficultés pratiques et sont coûteuses. Il est rare que la valorisation d'un déchet conduise à un gain réel, mais il y a gain relatif si les difficultés évoquées sont réduites et si les coûts sont diminués. [15]

II.9.1. Le dragage et le génie civil [16]:**II.9.1.1. Utilisation en remblai routier :**

Une chaussée routière est formée de plusieurs couches présentant chacune des propriétés particulières, et requiert des matériaux de qualités différentes. Pour certaines de ces couches, l'usage de déblais de dragage peut être envisagé après traitement.



Figure II.1.Utilisation des boues de dragage dans les remblais routiers

II.9.1.2. Utilisation en remblai pour support de construction :

En dehors des voies routières, les déblais de dragage peuvent être utilisés comme remblai dans le cadre de support de construction (terre-plein, plateforme, quai, murs de soutènement, comblement de bassin portuaire...)

II.9.1.3. Utilisation dans la fabrication de matériau :**✓ Fabrication de briques :**

La partie fine des déblais de dragage peut se substituer en partie à l'argile naturelle des briques. Pour cela un traitement au préalable est nécessaire.

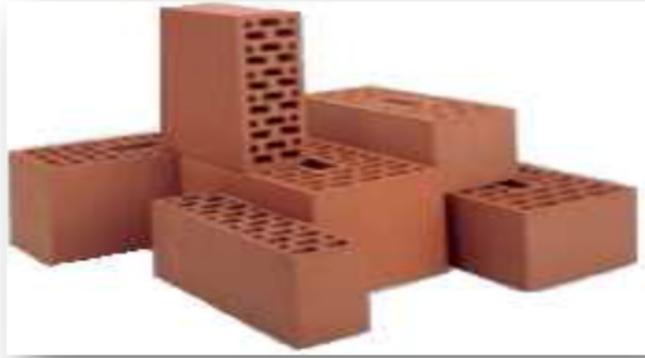


Figure II.2 : Utilisation des boues de dragage dans la fabrication de brique

✓ **Fabrication du béton :**

➤ **Ciment :**

En cimenterie, les déblais de dragage pourraient substituer une partie de l'argile entrant dans la fabrication du ciment qui est composé de deux matières premières :

- le calcaire (80%).
- l'argile (20%).

➤ **Sable :**

Les sédiments de dragage peuvent remplacer une partie du sable.



Figure II.3 : Utilisation des boues de dragage dans la fabrication du sable

II.9.2. Le dragage et l'agriculture :

II.9.2.1. Pouvoir agronomique des sédiments de dragage [17]:

Les terrains de dépôt retenus ont fait l'objet d'analyses complémentaires pour déterminer le pouvoir agronomique des sédiments c'est-à-dire leurs valeurs fertilisantes et restructurantes. Pour se développer, les plantes utilisent de l'eau, de la lumière, du carbone, de l'oxygène et des éléments minéraux. La fertilisation est le processus consistant à apporter à un sol, les éléments minéraux nécessaires au développement de la plante. L'objectif final de la fertilisation est d'obtenir le meilleur rendement possible des cultures. Parmi les autres facteurs qui participent à l'augmentation du rendement comme le climat, l'apport en eau, le potentiel génétique des cultures, la stabilité structurale du sol est primordiale pour résister notamment aux agents de dégradations.

II.9.2.2. Valorisation des boues de dragage dans l'agriculture :

Les sédiments de dragage pourront être valorisés selon deux scénarios :

- soit en tant qu'éléments fertilisants en substitution d'un apport chimique (engrais) par « Saupoudrage de sédiments »
- soit comme un élément restructurant d'un sol « squelettique » non stable, en apportant des quantités importantes de sédiments de dragage pour reconstituer la surface arable du sol

✓ Les sédiments de dragage sont utilisés comme « fertilisants » :

Afin de démontrer le pouvoir agronomique des sédiments de dragage de canaux, les teneurs en éléments nutritifs sont comparées avec un fumier de bovins. Pour la croissance d'une plante, ses principaux besoins en éléments nutritifs (azote, potassium et phosphore) sont connus. En fonction des résultats agronomiques obtenus sur les sédiments de dragage et sur le sol agricole, les quantités de sédiments de dragage à épandre pourront être calculées de façon à apporter les doses nécessaires en azote, potassium et phosphore indispensables pour la croissance des plantes cultivées.

✓ Les sédiments de dragage utilisés comme « restructurant » d'un sol :

Un sol agricole est considéré comme « riche » s'il possède des éléments fertilisants mais également une texture et une structure équilibrée. Pour restructurer un sol « squelettique »,

une couche de sédiments devra être déposée sur le sol. L'épaisseur de cette couche dépendra de la qualité des sédiments de dragage non contaminés et également des caractéristiques du sol support.



Figure II.4 Épandage des boues de dragage

II.10. Impacts du dragage sur l'environnement [18]:

Le dragage peut perturber l'équilibre écologique naturel par la destruction de la vie aquatique. Par exemple, on peut éliminer de la chaîne alimentaire les colonies d'huîtres dans les estuaires ou les organismes qui vivent au fond de l'eau, en eau douce, et dont se nourrissent les poissons. En déchargeant les débris directement dans l'eau, on peut tuer les organismes survivants, tandis que le limon ou les sédiments soulevés par le dragage peuvent ensevelir les endroits où se nourrissent et se reproduisent les poissons.

De plus, les contaminants s'accumulent lentement dans les sédiments. Ceux-ci pourraient contenir certaines substances toxiques (p. ex., le mercure) qui peuvent contaminer l'eau au moment du dragage.

II.11. Impacts potentiels sur l'environnement et le milieu social [19]:

Les impacts du développement maritime varient selon l'emplacement et les aspects géographiques, hydrologiques, géologiques, écologiques, l'industrialisation, l'urbanisation et le type de transport maritime. Le changement apporté aux eaux naturelles aussi bien que la construction d'ouvrages sont susceptibles d'avoir des impacts directs sur le cours d'eau ou le plan d'eau visé par l'aménagement, aussi bien que des impacts directs et indirects sur les écosystèmes et les communautés qui leur sont reliés dans les environs du projet. Les activités de dragage, l'évacuation des résidus, l'aménagement du rivage, l'intensification de la

circulation maritime et de la circulation interne au port peuvent être la cause de rejets, dans le milieu environnant, de polluants naturels ou artificiels. Les risques pour le milieu aquatique comprennent les écoulements d'hydrocarbures, les rejets de polluants provenant de la remise en suspension de sédiments, le ruissellement des eaux de surface, les émissions de sources ponctuelles, la destruction d'habitats, les changements de la composition chimique de l'eau et de son débit, les problèmes concernant la santé des travailleurs et du public et la sécurité des transports.

II.11.1. Milieu terrestre :

Le littoral situé à proximité immédiate du port subira les changements nécessaires à l'installation de nouvelles industries. Ces dernières peuvent être à l'origine de déplacements de villages, d'une intensification de la circulation automobile, d'émissions atmosphériques, de poussières générées par la circulation et les stocks de matières premières et de la pollution des eaux de ruissellement. Le problème croissant que posent la disparition des milieux humides et ses répercussions sur la structure et la fonction biologique et hydrologique des habitats semble devoir écarter l'idée de convertir les milieux humides en lieux d'élimination des matériaux de dragage. La création de ports accélère l'érosion côtière qui peut entraîner d'énormes dégâts.

II.11.2. Problèmes sociaux et culturels :

La construction ou l'agrandissement d'installations portuaires sont généralement accueillis favorablement dans la mesure où ce type de projets crée de nouveaux emplois et apporte une nouvelle source de commerce pour la région. Il reste, toutefois, que les projets d'amélioration, d'agrandissement, et d'industrialisation sont susceptibles de bouleverser les traditions culturelles et les valeurs historiques, morales et religieuses des populations. Détruire, par exemple, les pêches essentielles aux populations locales ou des plages, sources d'agrément, dans le but d'aménager des installations portuaires, peut avoir des répercussions économiques et culturelles qui ne sont pas souhaitables.

II.12. Quelques recherches effectuées sur le dragage des boues :**II.12.1. Boues de dragage et boues d'épuration : Comparaison multicritère et étude de la faisabilité technique d'une filière de valorisation :**

La présente recherche illustre une étude comparative entre une boue d'épuration et une boue de dragage.

En ce qui concerne l'orientation du type de valorisation en construction pour les boues de dragage, la filière de la brique en terre cuite (brique SB plus apparentée à un bloc de terre cuite) est la plus envisageable. Ceux qui suivent récapitulent les résultats de cette étude :

Les résultats de la campagne d'essais prouvent que la porosité du matériau va augmenter considérablement lorsque des boues de dragage sont introduites dans la composition. Cette augmentation de porosité s'accompagne de changements de propriétés. Certains changements sont bénéfiques. Les masses volumiques apparentes et absolues sèches diminuent, ce qui veut dire que les blocs pouvant être fabriqués avec une composition comprenant des boues de dragage seront allégés. Etant donné l'augmentation de la porosité, les vides seront plus présents et donc, en plus d'être allégé, le matériau aura un meilleur comportement d'isolant thermique. La porosité offre un avantage supplémentaire en termes d'adhérence du plâtre ou du mortier sur les blocs. Il est intéressant de mentionner que les polluants présents dans les fractions fines des boues, à savoir les métaux lourds, ne s'échappent pas des blocs une fois ceux-ci cuits. L'utilisation de blocs en céramique contenant des boues ne pose donc pas de problème pour la réalisation de parois comportant une protection (bardage, enduit, parement, murs doubles,...).

Ces résultats sont dans l'ensemble positifs. Cependant, une optimisation des taux d'incorporation des différents composants pourrait être étudiée. Cela permettrait de minimiser les points négatifs concernant les propriétés des briquettes réalisées avec des mélanges incorporant des boues de dragage. De plus, les essais réalisés pourraient être menés sur des échantillonnages plus vastes afin de confirmer les valeurs obtenues. [20]

II.12.2. Etude de formulations d'un béton de sable à base de sable de dragage :

La présente étude vise à valoriser ce matériau marin pour établir un nouveau matériau de construction, Il s'agit d'un béton de sable normalisé qui présente des caractéristiques mécaniques semblables aux bétons classiques. Ce matériau va permettre de recentrer économiquement la consommation de granulats alluvionnaires en exploitant les stocks de

sable de dragage abondants. De ce point de vue, l'intérêt est, non pas de remplacer les bétons traditionnels par ce matériau, mais de proposer une alternative à ces bétons pour certaines applications.

Les résultats de cette recherche sont clairement illustrés dans le paragraphe suivant :

La substitution des gros granulats du béton classique par ce matériau est envisageable pour certaines applications du domaine de la construction. La méthode de formulation adoptée répond parfaitement aux attentes souhaitées car elle permet de respecter les rapports exigés par la norme en termes de dosage entre l'ajout et le ciment ainsi que le rapport E/L fixé préalablement. Les résultats obtenus ont montré, d'une part, que le béton de sable à base de sable de dragage présente des résistances mécaniques performantes avec une maniabilité fluide à plastique et d'autre part, que le coefficient d'activité du laitier broyé est élevé par rapport aux autres ajouts. L'incorporation des ajouts dans les formulations a permis de réduire la quantité du ciment dans les mélanges en comparaison aux bétons traditionnels avec des résistances mécaniques très satisfaisantes. [21]

Conclusion :

Après avoir exposé dans ce chapitre les principales connaissances sur les boues de dragage vient la combinaison des deux matériaux : le béton et cette boue qui présente un avantage.

A cet effet, notre partie expérimentale consiste à ajouter ou à substituer les liants hydrauliques (ciment) par la boue de dragage, dans le but de réduire le volume de ce déchet dans la nature et améliorer les caractéristiques du béton.

Introduction :

Dans ce chapitre, nous décrivons tous le matériel et matériaux utilisés dans cette recherche. Ensuite, chaque dispositif expérimental ou mode opératoire sera présenté et analysé. Car avant la détermination des dosages des constituants qui rentrent dans la formulation du béton, il est recommandé de vérifier certaines propriétés et caractéristiques des matériaux composants le béton (granulats, ciment, eau, adjuvant), en les mesurant, par des méthodes et essais normalisés.

I.1. Echantillonnage et prélèvement (NF P 18-533) :

Afin d'effectuer des essais de laboratoire et de mesurer les paramètres caractéristiques des matériaux, on a fait un prélèvement de ce dernier de manière à ce que l'échantillon soit représentatif.

Le prélèvement s'est effectué en deux temps :

- Prélèvement au niveau de la carrière, à grande quantité.
- Prélèvement au laboratoire, quantité suffisante pour l'essai.

Les deux échantillonnages doivent donner un prélèvement représentatif du matériau.

✓ Prélèvement sur le tas :

Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

Dans le cas des matériaux de carrière, il faudra également prendre en compte l'hétérogénéité des différents bancs rocheux exploités. [1]

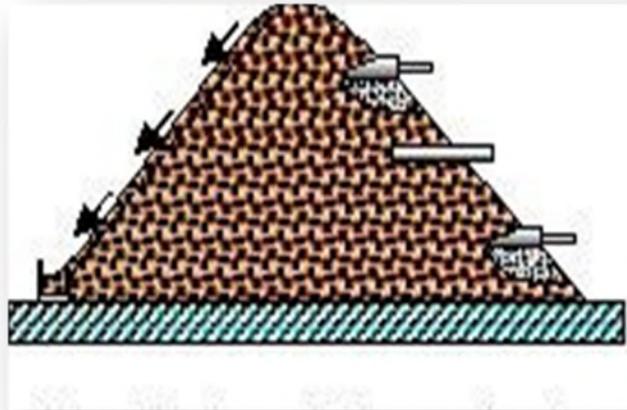


Figure I.1 : Prélèvement d'un échantillon sur le tas.

✓ **Prélèvement au laboratoire :**

Le passage de l'échantillon prélevé de la carrière à celui nécessaire pour l'essai s'est effectué par quartage.

➤ **Le quartage :**

Inventé par les mineurs de Cornouailles, il y a plusieurs siècles il consiste :

- à former un cône et à le mélanger (principe du cône d'éboulis),
- à l'aplatir en galette,
- à le diviser en quatre parts (d'où son nom).

L'opération consiste à diviser l'échantillon en quatre parties égales dont on retient la moitié qui est constituée des deux quarts opposés.

Si la quantité ($1/2$) est encore importante, on effectue un nouveau quartage en homogénéisant la sélection, l'opération peut se répéter plusieurs fois jusqu'à l'obtention de la quantité voulu de l'échantillon représentatif du matériau initial. [22]

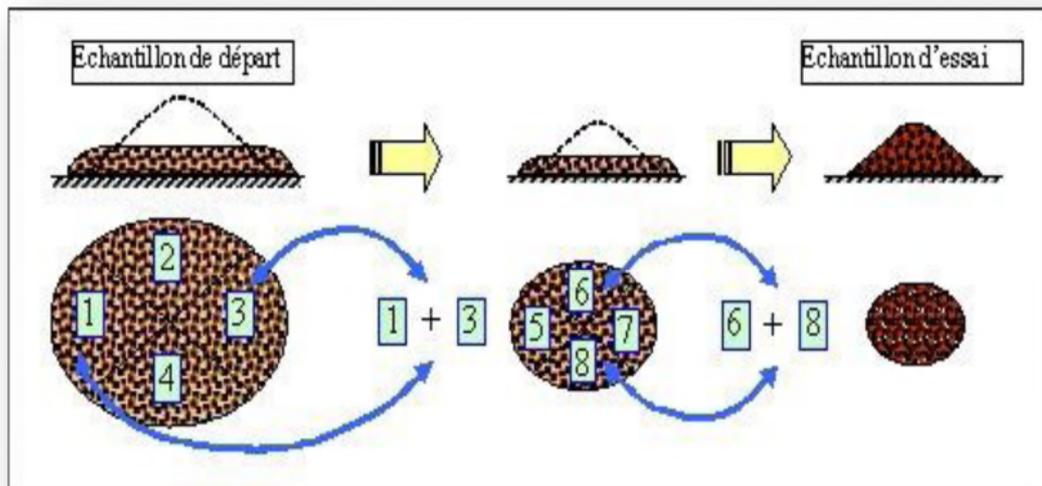


Figure I.2 : Opération de quartage.

I.1.1.Extraction et préparation de la matière :

La boue de dragage est extraite par l'opération de dragage du port de Bejaia qui a une situation géographique privilégiée qui est, en fait, un relais entre l'Est et le Centre du pays, ainsi qu'une zone d'ouverture sur la mer pour l'arrière-pays. Il dessert un hinterland important et très vaste. La ville et le port de Bejaïa disposent de dessertes routières reliant l'ensemble des villes du pays, de voies ferroviaires et d'un aéroport international, est délimité par :

- au nord par la route nationale RN 09 ;
- au sud par les jetées de fermeture et du large sur une longueur de 2 750 m ;
- à l'est par la jetée Est ;
- à l'ouest par la zone industrielle de Bejaïa.



Figure I.3 : Boue de dragage fraîche.

➤ **Préparation de la boue :**

- Etalé la boue fraîche à l'air libre pour le séchage, environ 3 à 4 jours.
- Mettre la boue à l'étuve à 105°C jusqu'à 24h, pour le séchage total.
- Broyage de la boue sèche.
- Tamisage de la boue broyé avec le tamis de 80µm.



Figure I.4 : Boue de dragage.

I.2. Analyse granulométrique (NF P 18-560) :**✓ But de l'essai :**

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le Module de finesse (Mf).

✓ Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres 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 ou celles des différents tamisât sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

✓ Matériel utilisé :

- Balance ;
- Etuve réglé à 105°C ;
- Des tamis a mailles carrées et métalliques ;
- Tamiseuse électrique ;
- Echantillon.

Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement selon la norme (NF P 18-560), sont les suivantes :

Tableau I.1 : Dimensions nominales des tamis.

Module	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Tamis (mm)	0.063	0.08	0.10	0.125	0.16	0.20	0.25	0.31	0.40	0.50	0.63
Module	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Tamis (mm)	0.80	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00
Module	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	/
Tamis (mm)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	/

✓ **Conduite de l'essai :**

➤ **Dimensions des tamis :**

Pour les graviers, on utilise les tamis d'ouvertures en (mm) :

4 - 5 - 6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 14 - 16 - 20 - 25 - 31,5

Pour les sables, on utilise les tamis d'ouverture en (mm) :

0,063 - 0,125 - 0,25 - 0,315 - 0,5 - 1,0 - 2,0 - 4,0 - 6,3.

➤ **Préparation de l'échantillon :**

L'échantillon est pris par quartage.

Prendre une masse suffisante pour l'essai. Selon la norme NF P 18-560, la masse utilisée sera tel que ; $M \geq 0,2D$ Sachant que :

M : masse de l'échantillon sec en kilogramme (kg).

D : diamètre du plus gros granulat en millimètre (mm).

D'où la masse des échantillons choisis pour l'essai sont :

Gravier 15/25 → $M \geq (0,2).25=5$ kg.

Gravier 8/15 → $M \geq (0,2).15=3$ kg.

Sable 0/4 → $M \geq (0,2).4=0.8$ kg.

➤ **Tamissage :**

- Peser les tamis vides.
- Verser le matériau après séchage à l'étuve à $T=105^{\circ}\text{C}$ pendant 24 heures dans le tamis supérieur de la colonne. Cette colonne est constituée par l'emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes sans oublier le fond afin de récupérer les fines, et le couvercle afin d'éviter la perte de matériau et la dispersion de la poussière.
- Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puisque cette répartition ne sera pas complète on prend chaque fois un tamis en adoptant un fond et un couvercle et donnant à la main des coups réguliers sur la monture.
- Une fois tamisage terminé, on passe à la pesée,
- Repeser chaque tamis plein (avec le refus) et noter.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé. Soit R_2 la masse du deuxième refus. La somme R_1+R_2 représente le refus cumulé sur le deuxième tamis.

Cette opération est poursuivie pour tout les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne.



Figure I.5: Colonne des tamis.

I.2.1. Analyses granulométriques des gravillons :

Les résultats des analyses granulométriques pour les gravillons 15/25, 8/15 sont représentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau I.2 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 15/25.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : Méch =5000g			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
31.5	0	0	100
25	150	3	97
20	2290	46	54
16	3875	78	22
14	4300	86	14
12.5	4450	89	11
10	4535	91	9
8	4585	92	8
6.3	4800	96	4
4	4950	99	1

Tableau I.3 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : Méch =3000g			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
20	0	0	100
16	255	9	91
14	715	24	76
12.5	1200	40	60
10	2065	69	31
8	2620	87	13
6.3	2880	96	4
5	2915	97	3

I.2.2. Analyses granulométrique du sable 0/4 :

Les résultats de l’analyse granulométrique du sable de la carrière (ALGRAN Sétif) sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Résultats de l’analyse granulométrique du sable 0/4.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : Méch =1465g			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
6.3	1	0	100
4	56	4	96
2	466	32	68
1	779	53	47
0.5	1036	71	29
0.315	1114	76	24
0.25	1158	79	21
0.125	1251	85	15
0.063	1292	88	12

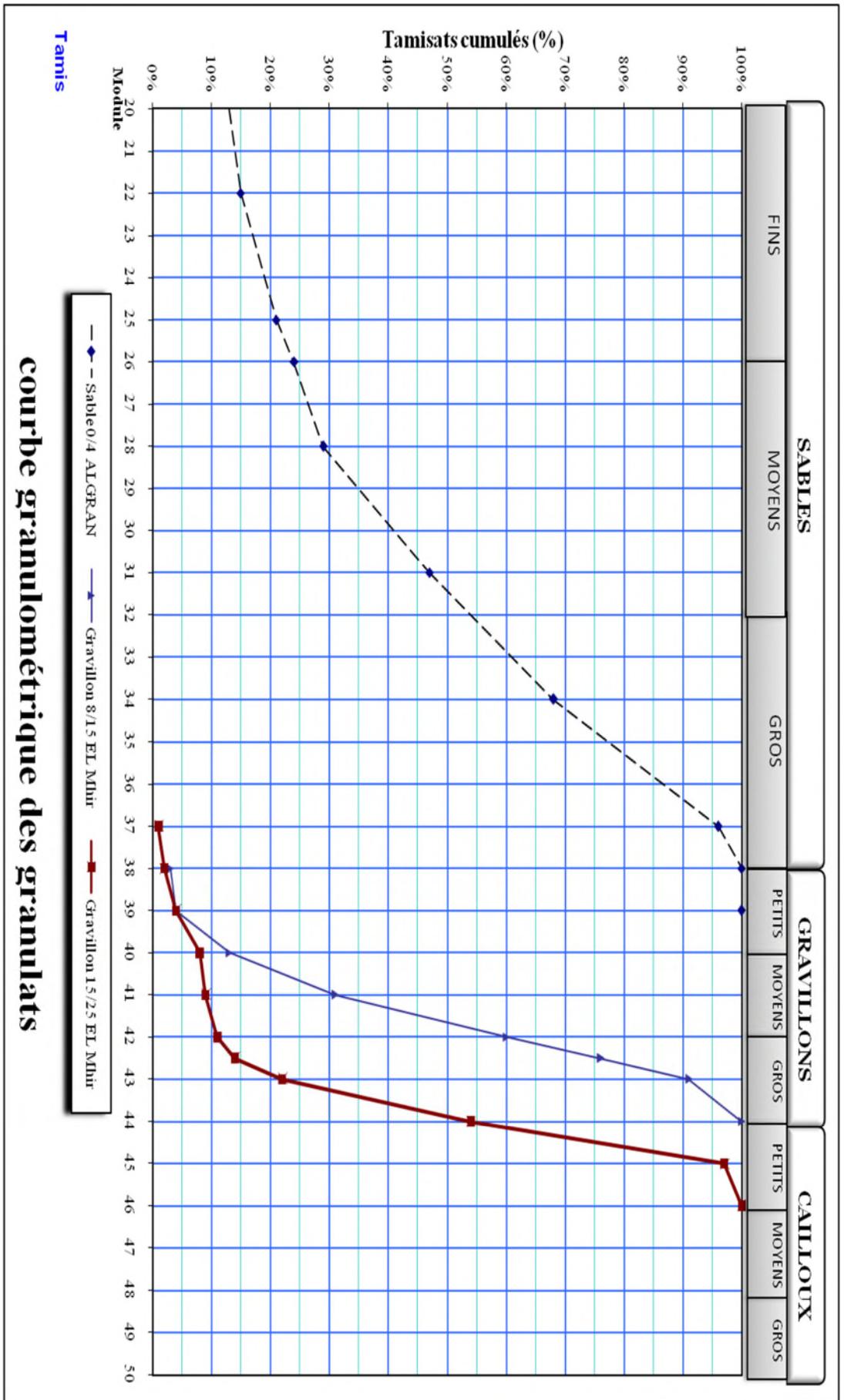


Figure I.6: Analyse granulométrique des granulats

✓ **Module de finesse (Mf) [23]:**

Est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse **Mf** compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

$$Mf = \Sigma RC / 100.$$

Rc : refus cumulé en (%) sous les tamis de module 23 à 38.

Dans le cas de la courbe granulométrique du sable présenté précédemment, son module de finesse est égale à :

$$Mf = \frac{3.82 + 31.8 + 53.17 + 70.71 + 79.04 + 85.39}{100} = 3.23$$

Mf = 3.23 > 2.8, donc c'est un sable grossier.

I.3. Mesure du coefficient d'aplatissement des granulats (NF EN 933-3):✓ **Définitions [1] :**

La forme d'un élément est définie par trois dimensions principales :

- **Longueur L** = le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles.
- **Épaisseur E** = le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles.
- **Grosueur G** = dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément.

Le coefficient d'aplatissement A d'un lot de granulats soumis à l'essai est, par définition, le pourcentage des éléments tels que :

$$\frac{G}{E} > 1,58$$

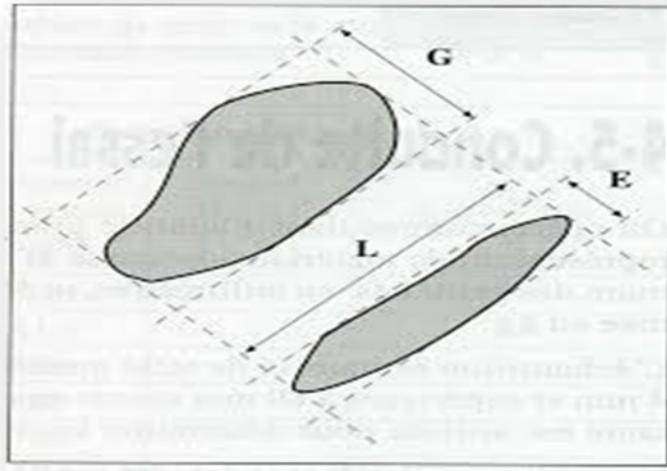


Figure I.7 : Forme d'un granulat.

✓ **But de l'essai :**

L'élaboration des bétons de ciment, ainsi que la réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessitent de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, ceux-ci ne permettent pas de réaliser un béton très compact, et, par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes. La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

✓ **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à effectuer une double opération de tamisage :

Le tamisage classique sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées afin de séparer les granulats en une succession de classes granulaires d/D dont les dimensions sont telles que $D = 1,25d$.

De ce fait, les classes de grosseurs G ainsi définies sont telles qu'elles suivent la progression géométrique des ouvertures des tamis utilisés au cours de l'analyse granulométrique.

Les différentes classes granulaires d/D ainsi isolées sont tamisées une à une sur une grille à fentes parallèles d'écartement $e = d/1,58$ (ce qui correspond aussi à : $E = d/2$).

On peut donc associer à chaque classe granulaire d/D un tamis à fente correspondant de largeur E, ce qui permet de définir des coefficients d'aplatissement A_i partiels. Il est ensuite possible de déterminer un coefficient d'aplatissement global A.

La correspondance entre classes granulaires d/D et grilles à fentes de largeur E est donnée dans le tableau ci-après :

Tableau I.5 : Correspondance entre classes granulaires d/D et largeur E des grilles à fentes utilisées.

Classe granulaires d/D (mm)	31.5/40	25/31.5	20/25	16/20	12.5/16	10/12	8/10	6.3/8	5/6.3	4/5
Ecartement E des grilles à fentes (mm)	20	16	12.5	10	8	6.3	5	4	3.15	2.5

✓ **Matériel nécessaire :**

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulat.

- Une série de tamis normalisés à mailles carrées,
- Une série de tamis à fentes de largeurs normalisées, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement.

La détermination des classes granulaires s'effectue sur les tamis à mailles carrées utilisés pour l'analyse granulométrique définie par la norme **NF P 18-560**. On utilise les tamis de dimensions d'ouverture de maille de :

31,5 - 25 - 20 - 16 - 14 - 12,5- 10 - 8 - 6,3 -5 et 4 mm.

Pour la détermination du coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire, on utilise une série de grilles à fentes correspondantes, constituées par des barres cylindriques parallèles fixées dans un châssis carré. Les écartements intérieurs des barres sont respectivement de :

16 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 - 4 - 3,15 et 2,5 mm.



Figure I.8 : Grille à fente.

✓ **Conduite de l'essai :**

On opère, comme dans l'analyse granulométrique, avec un échantillon représentatif de matériaux de masse $M \geq 0,2D$, tel que :

M : la masse de l'échantillon en kg.

D : le diamètre maximum des granulats en mm.

Tamiser la prise d'essai sur les tamis à mailles carrée par voie sèche sur les tamis en se conformant aux prescriptions de la norme **NF P 18-560**. Puis tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement entre les barres est définie par le (**tableau I.5**).

✓ **Expression du coefficient d'aplatissement « A » :**

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$Ai = \frac{Mei}{Mgi} * 100$$

Avec :

Mei : masse de la classe granulaire d/D.

Mgi : masse du passant à travers le tamis à fentes d'écartement E correspondant.

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par :

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Mei}}{\sum_{i=1}^n \text{Mgi}} * 100$$

I.3.1. Calcul du coefficient d'aplatissement « A » pour les gravillons :

Tableau I.6 : Détermination du coefficient d'aplatissement pour le gravier 15/25.

Masse sèche de la prise d'essai M0 : 5410g.				
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille		
Classe granulaire d/D (mm)	Mgi (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passants Mei (g)	$Ai = \frac{\text{Mei}}{\text{Mgi}} * 100$
25 – 31.5	60	16	22	37
20 – 25	1267	12.5	77	6
16 – 20	2879	10	152	5
12.5 – 16	1037	8	83	8
10 – 12.5	78	6.3	6	8
8 – 10	21	5	0	0
6.3 – 8	9	4	0	0
5 – 6.3	2	3.15	0	0
4 - 5	1	2.5	0	0
$\sum \text{Mgi} = 5354\text{g}$		$\sum \text{Mei} = 340\text{g}$		
$\sum \text{Mgi} = 5354\text{g} > 0.98 \times 5410 = 5301.8\text{g}$				
$A = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Mei}}{\sum_{i=1}^n \text{Mgi}} * 100 = 6\%$				

Tableau I.7 : Détermination du coefficient d’aplatissement pour le gravier 8/15.

Masse sèche de la prise d’essai M0 : 3160g.				
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grille		
Classe granulaire d/D mm)	Mgi (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passants Mei (g)	$Ai = \frac{Mei}{Mgi} * 100$
16 – 20	95	10	9	9
12.5 – 16	966	8	144	15
10 – 12.5	1021	6.3	109	11
8 – 10	712	5	49	7
6.3 – 8	278	4	32	12
5 – 6.3	18	3.15	3	17
4 - 5	10	2.5	1	10
$\sum Mgi = 3100g$		$\sum Mei = 347g$		
$\sum Mgi = 3100g > 0.98 \times 3160 = 3096.8g$				
$A = \frac{\sum_{i=1}^n Mei}{\sum_{i=1}^n Mgi} * 100 = 11\%$				

Les coefficients d’aplatissements des deux granulats (15/25, 8/15) sont inférieurs à 20, donc nos granulats sont massifs.

I.4. Détermination de la propreté superficielle :

I.4.1. Calcul de la teneur en impureté pour les gravillons (NF P 18-591) :

✓ **Définition :**

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondérale des particules inférieures à 0.5 mm, mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2 mm.

✓ Principe de l'essai :

Les particules inférieures à 0.5 mm sont séparées par lavage sur le tamis 0.5 mm de l'échantillon destiné pour l'essai.

✓ Matériel utilisé :

- Tamis de 0.5 mm ;
- Balance ;
- Etuve ;
- Echantillon.

✓ Préparation de l'échantillon :

L'échantillon doit être préparé par quartage.

La masse M de l'échantillon (exprimé en grammes) pour l'essai doit être comprise entre 200D et 600D.

D : le diamètre max des granulats utilisés étant exprimé en (mm).

Gravier 15/25 : **3000 < M < 9000 g**

Gravier 8/15 : **5000 < M < 15000 g**

✓ Conduite de l'essai

- Préparer l'échantillon tel qu'il est (dans son état humide). Peser et noter sa masse **Mh**.
- Laver l'échantillon sur le tamis de 0.5 mm par un jet d'eau.
- Egoutter puis sécher à l'étuve à 105°C.
- Repeser à sec et noter **Ms** la masse sèche de l'échantillon.



Figure I.9 : Propreté superficielle.

✓ **Expression des résultats :**

La teneur en impureté des granulats (P) est obtenue par le rapport suivant :

$$P = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Tableau I.8 : Teneur en impureté des gravillons 15/25, 8/15.

Echantillons	Gravier 15/25	Gravier 8/15
Caractéristiques		
Masse humide M_h (g)	6270	3700
Masse sèche M_s (g)	6180	3655
Masse m' (g)	90	45
Propreté superficielle P (%)	1.46	1.23

On remarque que la teneur en impureté des gravillons P(15/25, 8/15) < 1.5%, donc ils sont propres et ils ne nécessitent pas un lavage.

I.4.2. Détermination de la propreté de sable (équivalent de sable) (NF EN 933-8) :**✓ But de l'essai :**

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition du béton. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, Une procédure qui permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

✓ Principe de l'essai :

Test normalisé pratiqué sur un échantillon de sable afin d'en mesurer la propreté.

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse sédimentée.

✓ Matériel utilisés :

- Tamis de 5 mm,
- Spatule,
- Récipients de pesée,
- Balance,
- Chronomètre,
- Éprouvettes en verre,
- Solution lavante ,
- Entonnoir pour introduire le sable,
- Bonbonne de solution lavante avec son bouchon, le siphon et le tube souple,
- Tube laveur métallique plongeant,
- Machine agitatrice,
- Réglét métallique pour la mesure des hauteurs des sables et floculats.

✓ **Préparation de l'échantillon :**

- Réduire l'échantillon de laboratoire conformément à la norme (NF P 18-553) afin d'obtenir deux sous échantillons.
- A partir du premier échantillon, prendre deux prises d'essai, qui serviront pour la détermination des teneurs en eau W et en fines f .
- Réduire le second sous échantillon afin d'obtenir deux autres échantillons de masse M_t .

1. Détermination de la teneur en eau :

On détermine la teneur en eau W exprimée en pourcentage sur deux échantillons de 100g à 200g :

- On prend la masse des deux échantillons humides, soit M_{h1} et M_{h2} .
- Mettre à l'étuve à 105° c pendant 24h.
- On prend la masse des deux échantillons secs, soient M_{s1} et M_{s2} .
- On déduit la teneur en eau W des deux échantillons selon la formule suivant :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

Tableau I.9: Les valeurs de la teneur en eau W du sable 0/4.

N° échantillon	Echantillon 01	Echantillon 02
Masse humide (g)	225.55	249.62
Masse sèche (g)	221.9	245.4
La teneur en eau W (%)	1.64	1.68
W moyenne (%)	1.66	

2. Détermination de la teneur en fines f :

- Peser et noter la masse $M1$ de l'échantillon préparé.
- Laver sur le tamis 0.063 mm, sécher les retenues et peser et noter $M2$.
- Déterminer la teneur en fines f en pourcentage selon la relation suivante :

$$f = 100 - \frac{M2(100 + W)}{M1}$$

- Si $f \leq 10\%$, il n'y a pas lieu d'utiliser le sable correcteur et l'essai s'effectue directement de manière classique sur les échantillons préparés pour l'essai à leur teneur en fines d'origine.

La masse de chaque échantillon pour essai exprimée en (g), est alors égale à :

$$M_t = \frac{120(100 + W)}{100}$$

- Si $f > 10\%$, prendre une masse $M3$ égale à :

$$M3 = \frac{1200}{f} \left(1 + \frac{w}{100}\right)$$

Ajouter à cette masse une quantité $M4$ de sable correcteur sec (fraction sableuse 0.08/2), afin de ramener la teneur en fines à 10%.

La masse de sable correcteur $M4$, est calculée suivant la formule suivante :

$$M4 = 120 - \frac{1200}{f}$$

Donc, la masse de l'échantillon pour l'essai, exprimée en (g) est égale à :

$$M_t = M3 + M4$$

✓ Conduite de l'essai :

➤ Mise en place de la première prise d'essai :

- Remplir les éprouvettes avec la solution lavante, jusqu'au premier trait.
- Verser soigneusement la quantité de sable voulue dans l'éprouvette et éliminer les bulles d'air.
- S'assurer du mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer dix minutes.



Figure I.10 : Equivalent de sable.

➤ **Agitation de l'éprouvette :**

À la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation.

Faire subir à l'éprouvette 90 cycles \pm 1 cycle en 30 s \pm 1 s.

Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais.



Figure I.11 : Machine agitatrice.

➤ **Lavage :**

Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.

En descendant le tube laveur dans l'éprouvette rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante en faisant descendre et remonter le tube, laver le sable en enfonçant le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.

Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère.

Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.



Figure I.12 : Equivalent de sable après lavage des échantillons.

➤ **Mesure**

Laisser reposer pendant 20 min \pm 10 s.

Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette.

Mesurer également la hauteur h2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.

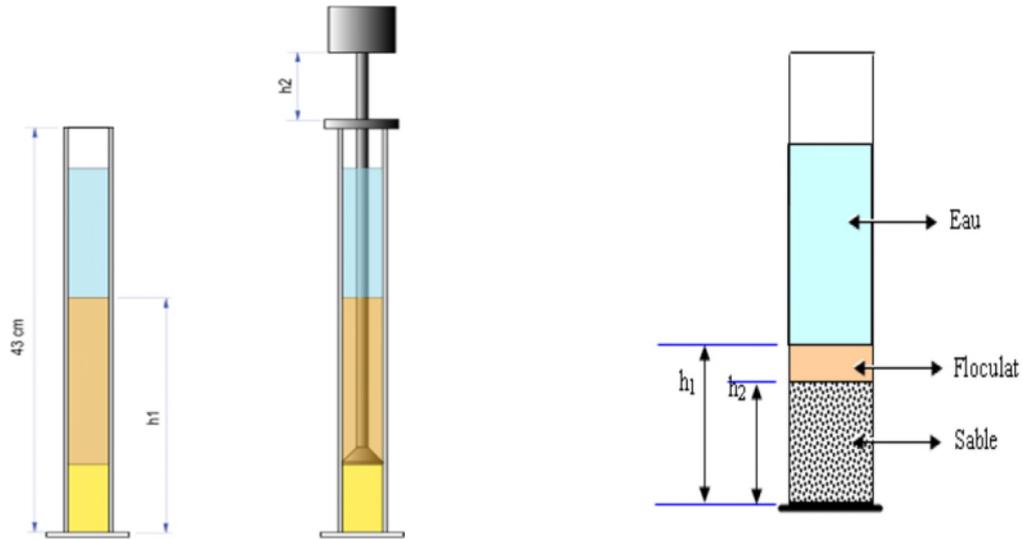


Figure I.13 : Mesure de la hauteur du sable.

✓ Expression des résultats :

On calcul pour chaque éprouvette ESP, sa formule est donné comme suit :

$$Esp = \frac{h2}{h1} \times 100$$

Le tableau suivant récapitule les résultats d'essai :

Tableau I.10: Résultats d'équivalent de sable pour le sable 0/4.

Eprouvettes	Hauteur total du floculat h1 (cm)	Hauteur total du sable par piston h2 (cm)	Expression des résultats	moyenne
			ESP (%)	ESP moy (%)
1	15	7.9	52.66	52.99
2	15	8	53.33	

Donc, la valeur de l'équivalent de sable par piston ESP est :

ESP= 52.99 % < 60%, donc c'est un sable qui contient des fines.

On procède à l'essai au bleu de méthylène pour connaître la nature de ces fines.

I.5. Essai au bleu de méthylène (NF P 18-592):**✓ Définition :**

Après chaque injection de bleu, ce test consiste à prélever, à l'aide de la baguette de verre, une goutte de suspension que l'on dépose sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau, coloré d'un bleu généralement soutenu, entouré d'une zone humide incolore.

La goutte prélevée doit être telle que le diamètre du dépôt soit compris entre 8 et 12 mm.

Le test est dit positif si, dans la zone humide, apparaît autour du dépôt central une auréole bleu clair persistante. Il est dit négatif si l'auréole est incolore.

✓ But de l'essai :

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène.

Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

✓ Principe de l'essai :

On injecte successivement des doses de 5 ml de solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant l'eau et l'échantillon. On contrôle l'absorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tache sur un papier filtre.

✓ Equipement nécessaire :

- Une balance.
- Tamis
- Un chronomètre.
- Un bêcher en plastique.
- Un récipient.
- Un agitateur magnétique.
- Une burette graduée de 50 ml.
- Solution de bleu de méthylène.

- baguette en verre
- Papier filtre
- Un agitateur à ailettes,
- De l'eau distillée.



Figure I.14 : Préparation de la solution de bleu de méthylène.

✓ **Préparation des échantillons :**

➤ **sable :**

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/2 mm du matériau, ce sont principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2 mm) qui contiennent la fraction argileuse. Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène.

➤ **gravier :**

L'essai est effectué sur la fraction de 0/0.125 mm, l'échantillon doit être récupéré au fond des tamis à mailles carrées de l'essai de mesure du coefficient d'aplatissement, après il doit être passé au tamis de 0.125 mm.

✓ **Conduite de l'essai :**

- Placer la masse $m=200$ g pour la fraction 0/2 mm ($m=30$ g pour la fraction 0/0.125 mm) dans un bécher contenant 500 ml d'eau distillée.
- Après 5 minutes d'agitation (eau+échantillon) à 600tr/min, injecter 5 ml de solution de bleu dans le récipient l'aide de la burette et agiter à 400 tr/min. Après 2 min, on

effectue un test à la tache. Si l'auréole n'apparaît pas, ajouter une dose de 5 ml de solution de bleu, cette addition est suivie du test de la tache sur le papier filtre après une minute d'agitation à 400 tr/min toujours.

- On procède ainsi jusqu'à ce que le test devienne positif. A ce moment, sans rien ajouter, on laisse s'opérer l'adsorption du bleu, qui n'est pas instantanée, tout en effectuant des tests de minute en minute (5 taches).
- Si l'auréole bleu clair disparaît à la cinquième tache on procède à de nouvelles additions.

Chaque addition est suivie de tests effectués toujours 5 taches de minute en minute.

- Renouveler ces opérations jusqu'à ce que le test demeure positif pendant cinq minutes consécutives : le dosage est alors considéré comme terminé.
- Enregistrer le volume total de la solution de colorant V ajouté pour obtenir l'auréole.
- On procède au nettoyage de l'appareillage dès que l'on a terminé les essais, les dépôts de bleu se détachent facilement quand ils sont récents.

Le matériel se nettoie très bien à l'eau.



Figure I.15 : Essai au bleu de méthylène.

✓ **Expression des résultats :**

La valeur de bleu est donnée par la formule :

$$VB = \frac{V}{M}$$

Avec :

V : volume de solution de bleu utilisée jusqu'à obtention du test positif en (cm³).

M : masse sèche de la prise d'essai en (g).

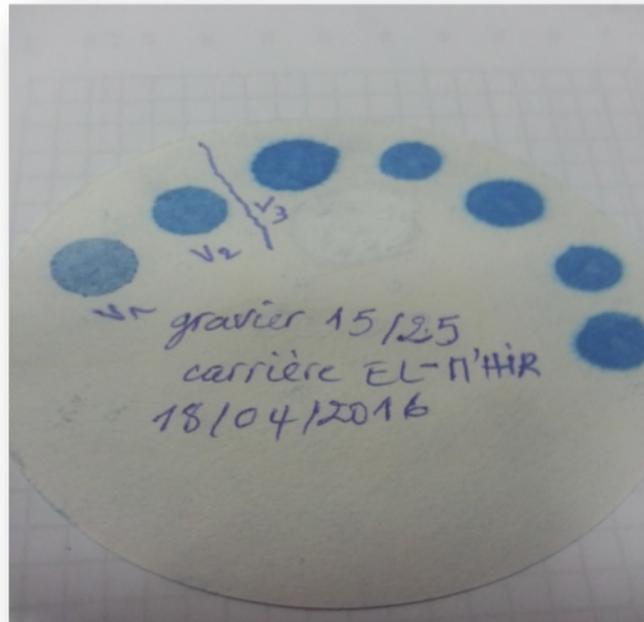


Figure I.16 : Les résultats de l'essai à la tache du gravier 15/25.



Figure I.17 : Les résultats de l'essai à la tache du gravier 8/15.

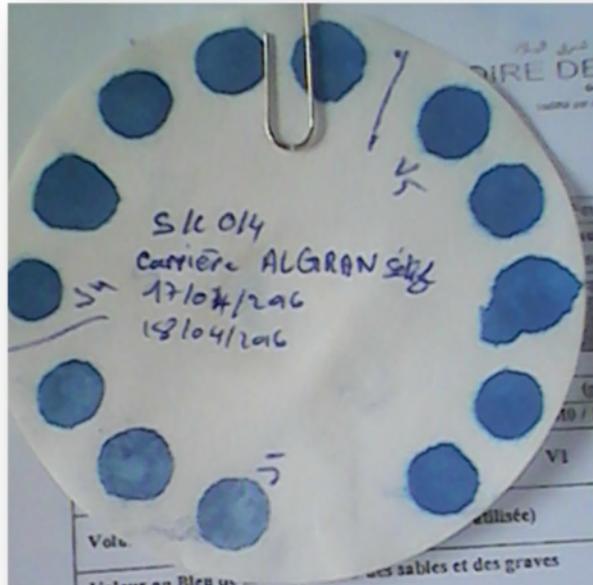


Figure I.18 : Les résultats de l'essai à la tache du sable 0/4.

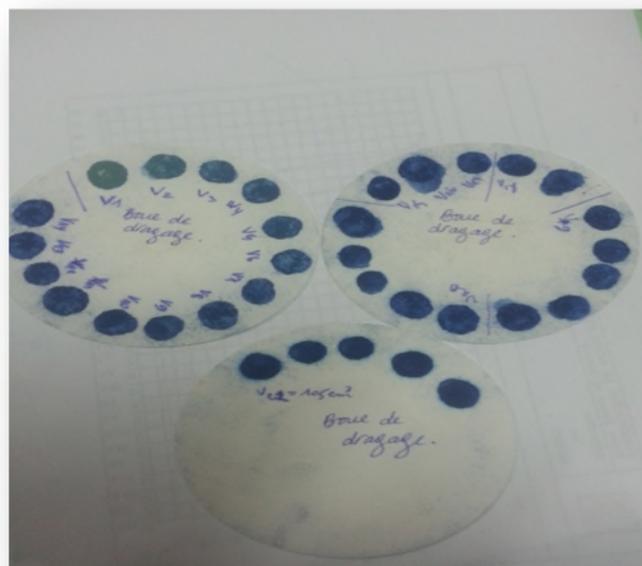


Figure I.19 : Les résultats de l'essai à la tache de la boue de dragage.

Les résultats d'essai sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau I.11 : Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène.

Echantillons	M (g)	V (cm ³)	VB
Gravier 15/25	30	15	0.5
Gravier 8/15	30	10	0.33
Sable 0/4	200	20	0.1
Boue de dragage	30	105	3.5

✓ **Interprétation des résultats :**

- Pour les graviers 15/25 et 8/15, $V_B < 1 \longrightarrow$ graviers non argileux.
- Pour le sable 0/4, $V_B < 1 \longrightarrow$ sable non argileux.
- Pour la boue de dragage $V_B > 1 \longrightarrow$ la boue est argileuse.

I.6. Détermination des masses volumiques (NF P 18-555) :

✓ **Définition :**

La masse volumique, est une propriété caractéristique qui représente la masse d'un matériau par unité de volume. On distingue :

- Masse volumique absolue.
- Masse volumique apparente.

Les masses volumiques s'expriment en t/m³, en kg/dm³, ou en g/cm³.

✓ **But de la détermination :**

La masse volumique est la grandeur qui permet de passer de la masse d'un matériau, au volume occupé par ce même matériau.

I.6.1. Détermination de la masse volumique absolue (ρ_s) :✓ **Définition :**

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

I.6.1.1. La méthode de l'éprouvette graduée :✓ **Principe de l'essai**

Cette méthode est très simple et très rapide, et elle ne nécessite pas un matériel spécifique.

✓ **Matériels :**

- Une éprouvette graduée.
- Une balance.
- Échantillon (boue de dragage).

✓ **Conduit de l'essai :**

- Remplir une éprouvette graduée d'un volume d'eau $V_1 = 600 \text{ cm}^3$.
- Peser un échantillon sec du granulat de masse $M = 300 \text{ g}$.
- Introduire l'échantillon dans l'éprouvette et éliminer toutes les bulles d'air.
- l'eau monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume V_2 .
- La masse volumique absolue est alors :

$$\rho_s = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

Cet essai est effectué trois fois, et on prendra la moyenne.

Les résultats obtenus sont établis dans le tableau qui suit :

Tableau I.12 : Résultats de la masse volumique absolue de la boue par la méthode de l'éprouvette graduée.

Echantillon	N°	Volume V2 (cm ³)	masse volumique absolue ρ_s (g/cm ³)	ρ_s moyenne (g/cm ³)
Boue de dragage	1	720	2.5	2.39
	2	727	2.36	
	3	730	2.31	

I.6.1.2. La méthode de pycnomètre :

✓ Principe de l'essai :

La masse des particules solides est obtenue par pesage. Le volume est mesuré au pycnomètre.

✓ Matériel utilisé :

- Tamis,
- Pycnomètre,
- Thermomètre placé en permanence au laboratoire,
- balance,
- Etuve.

✓ Conduite de l'essai :

- Laver la prise d'essai sur un tamis de 4 mm et de 0.063 afin d'éliminer les grains fins.
- Peser le pycnomètre rempli d'eau, noter sa masse **M3**.
- Introduire l'échantillon dans le pycnomètre vide (l'échantillon occupe trois quart du volume du pycnomètre c'est-à-dire 75%).
- Remplir le pycnomètre contenant l'échantillon d'eau et fermer le bouchon en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air. Peser et noter **M2**, la masse de l'ensemble.
- Placer le pycnomètre dans un bain d'eau.

- Après 24 heures, mesuré la température de l'eau et noter la masse volumique de l'eau ρ_w . Laisser décanter la majeure partie d'eau recouvrant la prise d'essai et vider le pycnomètre sur un plateau.
- Exposer les granulats à un faible courant d'air chaud ou l'essuyer pour évaporer l'humidité en surface.
- Peser l'échantillon saturé et séché en surface. Noter sa masse **M1**.
- Sécher les granulats à l'étuve à une température de 105 °C. laisser refroidir à température ambiante. peser et noter **M4**, la masse sèche de l'échantillon.
- La masse volumique absolue est donnée par la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w \times \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$



Figure I.20 : Mesure de la masse volumique au pycnomètre.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau I.13 : Récapitulatif des résultats de la masse volumique absolue des gravillons.

Echantillons	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	T (°C)	ρ_w (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)
Gravier 15/25	1276.58	4061.25	3248.82	1260	21.8	0.9978	2.81
Gravier 8/15	1122.98	3959.82	3248.82	1115	20.6	0.9980	2.75
Sable 0/4	600.41	1104.29	756.40	561	20.6	0.9980	2.63

I.6.2. Détermination de la masse apparente (ρ_p) :

✓ Définition :

La masse volumique apparente, est donc la masse du matériau par unité de volume, cette masse intègre les grains de granulat ainsi que les vides compris entre ces grains.

✓ Matériel utilisé :

- Un récipient.
- Une règle à raser.
- Une balance.

✓ Conduit de l'essai :

- On pèse le récipient vide, on note sa masse **M=486.40g**
- On prend l'échantillon et on remplit avec le moule.
- On arase le surplus du matériau à l'aide d'une règle à raser.
- On pèse le récipient rempli, on note **M'** la masse de l'ensemble.

L'opération doit être effectuée trois fois sur chaque échantillon.

D'où :

$$\rho_p = (M' - M) / V_r$$

Avec :

M : masse du récipient vide.

M' : masse du récipient plein.

V_r : volume du récipient qui égale à 1020 cm³.



Figure I.21 : Mesure de la masse volumique apparente.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau qui suit :

Tableau I.14 : Résultats des masses volumiques apparentes.

Echantillon	N°	Masse pleine M' (g)	M'-M (g)	Volume du récipient (cm ³)	$\frac{M' - M}{V}$ (g/cm ³)	ρ_p moy (g/cm ³)
Gravier 15/25	1	1821.79	1335.39	1020	1.31	1.30
	2	1787.87	1301.47	1020	1.28	
	3	1819.85	1333.45	1020	1.31	
Gravier 8/15	1	1858.85	1372.45	1020	1.35	1.35
	2	1858.10	1368.70	1020	1.34	
	3	1865.27	1378.87	1020	1.35	
Sable 0/4	1	1695.30	1208.90	1020	1.19	1.19
	2	1720.61	1234.21	1020	1.21	
	3	1691.80	1205.40	1020	1.18	
Boue de dragage	1	1164.01	677.61	1020	0.66	0.65
	2	1153.40	667.00	1020	0.65	
	3	1136.19	649.79	1020	0.64	

I.7. Mesure de la compacité C :

✓ Définition :

La compacité est le rapport du volume absolu au volume du récipient.

$$C = \frac{V_s}{V}$$

Avec :

C : la compacité

V_s : volume absolu du solide

V : volume du récipient

Comme : $M = V \times \rho_p$

Et : $M = V_s \times \rho_s$

Donc : $C = \frac{\rho_p}{\rho_s} \leq 1$

La compacité se déduit donc directement sur les mesures des masses volumiques (apparente et absolue).

I.8. Mesure de la porosité P :

La porosité est le complément à l'unité de la compacité.

$$P = 1 - C$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.15 : Mesure de la compacité (C) et la porosité (P).

Echantillons	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Masse volumique absolue (g/cm ³)	compacité	porosité
Gravier 15/25	1.30	2.81	0.46	0.54
Gravier 8/15	1.35	2.75	0.49	0.51
Sable 0/4	1.19	2.63	0.45	0.55
Boue de dragage	0.65	2.39	0.27	0.73

I.9. Mesure de la teneur en eau W de la boue :

✓ **Définition :**

La teneur en eau est le rapport du poids d'eau au poids des grains d'un échantillon de matériau donné.

✓ **Conduite de l'essai :**

- Pesé trois échantillons de la boue de dragage fraîche (Mh)
- Sécher les échantillons à l'étuve à 105° C.
- Repesé ces échantillons secs (Ms).
- Calculé la teneur en eau W de la boue, sa formule est donné par :

$$W = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Tableau I.16 : Mesure de la teneur en eau de la boue d dragage.

Echantillon		Masse humide Mh (g)	Masse sèche Ms (g)	La teneur en eau W (%)	W moy
Boue de dragage	1	390	281.79	38.40	37.86
	2	390.78	282.30	38.43	
	3	390.54	285.60	36.44	

I.10. Résistance au choc (Essai Los Angeles) (NF P 18-573):

✓ **But de l'essai :**

L'essai Los Angeles a pour but de déterminer la résistance à la fragmentation par choc et la résistance obtenue par frottement des granulats.

✓ **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumit aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les 6 classes granulaires, et Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de cette granularité (voir le tableau suivant).

Tableau I.17 : Charges des boulets correspondants à chaque classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	fractions	Nombre de boulets	Poids des fractions (g)
4-6,3	/	7	5000
6,3-10	/	9	5000
10-14	/	11	5000
10-25	10-16	11	3000
	16-25		2000
16-31,5	16-25	12	2000
	25-31,5		3000
25-50	2-40	12	3000
	40-50		2000

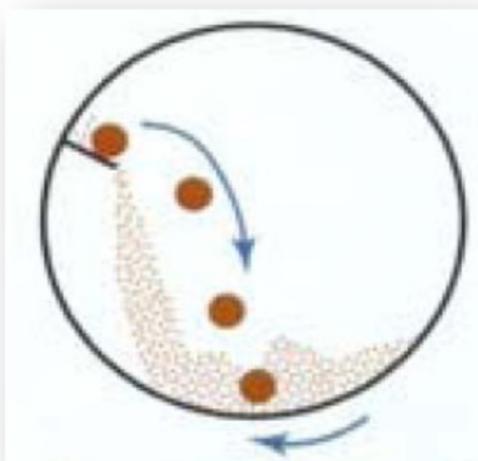


Figure I.22 : Principe de l'essai Los Angeles.

✓ Matériel utilisé :

- Tamis correspondant à la classe voulu.
- machine Los Angeles, composée d'un cylindre et d'un moteur.
- Le moteur doit entraîner ce cylindre à une vitesse comprise entre 31 et 33 tours par minute et être équipé d'un compte tours permettant un arrêt automatique après 500 tours.
- boulets d'acier de diamètre compris entre 45 et 49 mm et de masse comprise entre 400 et 445g.
- Un bac utilisé pour recueillir le matériau à la fin de l'essai.

✓ Préparation de l'échantillon :

- tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en le mettant dans le tamis le plus grand. Le passant du tamis le plus grand et le refus du plus petit sera l'échantillon de l'essai.
- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105 °C.

Prendre une masse $M = 5$ kg pour l'essai.

✓ Conduite de l'essai :

- Introduire dans le cylindre de la machine les boulets correspondants à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon.
- Mettre à tourner la machine pour 500 tours.
- Une fois l'essai terminé, séparer les boulets du matériau et recueillir les granulats dans le bac placé sous l'appareil en prenant le soin d'amener l'ouverture du cylindre juste au dessus du bac afin d'éviter toute perte du matériau.
- Laver le refus au tamis 1,6 pour éliminer tous les passants à ce tamis.
- Egoutter et mettre à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.
- Peser le matériau une fois séché. Noter.



Figure I.23 : Appareil de Los Angeles.

✓ Expression de résultat :

Le coefficient los Angeles se définit par le rapport :

$$LA = \frac{m}{5000} \times 100$$

Avec : $m = 5000 - m'$: masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6 mm.

$$LA = \frac{5000 - m'}{5000} \times 100$$

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Tableau I.18 : Mesure d coefficient de Los Angeles du gravier 8/15.

Nature du matériau	Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse (g)			Coefficient Los Angeles « LA » (%)
			initial	Supérieur au tamis 1.6 mm	Inferieur au tamis 1.6 mm	
Gravier 8/15	10/14	11	5000	3678.58	1321.42	26.43

I.11. Classification des granulats (XP P 18-540) :

Le tableau suivant, résume les résultats des essais de laboratoire effectués sur les granulats, à partir de ces résultats, on peut classer les granulats pour la fabrication des bétons selon la norme (XP P 18-540).

Tableau I.19 : Résultats des différents essais effectués au laboratoire sur les granulats.

Echantillons	Granulométrie			ES	P (%)	MF	A	LA	Masses volumiques	
	%>D	%<d	%<80 µm						ρp	ρs
Gravier 15/25	00	7	/	/	1.46	/	6.35	26.43	1.30	2.81
Gravier 8/15	13	14	/	/	1.23	/	11.19	26.43	1.35	2.75
Sable 0/4	4	/	12	52.99	/	3.23	/	/	1.19	2.63

✓ **Caractéristiques applicable aux gravillons :**

➤ **Los Angeles (NF P 18-573) :**

Tableau I.20 : Los Angeles.

catégorie	Vss
LAA	30
LAB et LAC	40
LAD	50

D'après ce tableau on peut classer les graviers 8/15 en catégorie **LAA**.

➤ Granularité (NF P 18-560) :

Tableau I.21 : Granularité des gravillons.

catégorie	Passants (%)					
	2D	1.58D	D	(d+D)/2 (1)	d	0.63d
Gr _A	Vsi 100	Vsi 99	Li 80	Li 25	Li 1	Vss 5
			Ls 99	Ls 75	Ls 20	
Gr _B			e 15	e 35	e 15	
Gr _C			e 19	Ls 80 e 40	e 19	
Gr _D	Pas de spécification (2)					
(1) : s'applique si $D \geq 2.5d$ (2) : catégorie destinée, par exemple, aux produits préfabriqués en usine et aux bétons architectoniques.						

Donc, on aura les valeurs suivantes des différents granulats :

Tableau I.22 : Résultats de la granularité des graviers.

gravillons	Passants (%)					
	2D	1.58D	D	(d+D)/2	d	0.63d
15/25	100	100	97	54	17	9
8/15	100	100	82	48	13	3

A partir des deux tableaux précédents, on peut classer les gravillons comme suit :

- Gravier 8/15 en catégorie Gr_A.

- Gravier 15/25 en catégorie **Gr_A**.

➤ **Propreté (NF P 18-591) :**

On a la valeur spécifique supérieur $V_{ss} = 1.5\%$.

Donc :

$P(15/25) = 1.46\% < 1.5 \longrightarrow$ gravier 15/25 est **propre**.

$P(8/15) = 1.23\% < 1.5 \longrightarrow$ gravier 8/15 est **propre**.

➤ **Coefficient d'aplatissement (A, P 18-561) :**

Tableau I.23 : Coefficient d'aplatissement.

Catégorie	V _{ss}
A_A	20
A_B et A_C	30
A_D	40

D'après le tableau précédent, on peut classer les gravillons comme suit :

- Gravier 15/25 en catégorie **A_A**.
- Gravier 8/15 en catégorie **A_A**.

✓ **Caractéristique applicable aux sables :**

➤ **Granularité (NF P 18-560) :**

Tableau I.24 : Granularité du sable.

Sable	Passants (%)		
	2D	1.58D	D
Gr_A à Gr_D	V _{si} 100	V _{si} 99	V _{si} 85 V _{ss} 99

Tableau I.25 : Résultats sur la granularité du sable 0/4.

Sable	Passants (%)		
	2D	1.58D	D
0/4	100	100	96

Du point de vue de granularité, ce sable peut être classé en catégorie **Gr_A**

➤ **Module de finesse :**

Tableau I.26: Module de finesse.

catégorie	MF	
MF _A	Li 1.8	e 0.6
MF _B	Ls 3.2	e 0.7
MF _C	e 0.7	
MF _D	e 0.8	

Donc, du point de vue de finesse, ce sable peut être classé en catégorie **MF_B**.

➤ **Teneur en fines (f)**

Tableau I.27 : Teneur en fines.

catégorie	Passants (%) au tamis de 0.08 mm
f _A	Ls 12 e3 ou CV ≤ 20%
f _B	Ls 15 e5 ou CV ≤ 20%
f _C	Ls 18 e6 ou CV ≤ 20%
f _D	Pas de spécification mais FTP renseigne.

D'après l'analyse granulométrique du sable 0/4, on constate que la teneur en fines est classée en catégorie **f_A**.

➤ Propreté (PS ou VB, P 18-597) :

Tableau I.28: Equivalent de sable ou valeur au bleu.

catégorie	PS (%)		
	Sable d'extraction alluvionnaire et marine	Autres sables	VB _{0/D}
PS _A	V _{si} 65	V _{si} 60	V _{ss} 1
PS _B , PS _C et PS _D	V _{si} 60	V _{si} 50	

A partir du tableau précédent on a :

ES= 52.99%, et VB= 0.1, donc on peut classer ce sable comme suit :

Sable 0/4 en catégorie **PS_B**.

✓ **Classification :**

Vu les résultats obtenus précédemment (dans la partie de classification), ces granulats peuvent être désigné comme suit :

- Gravier 15/25 : catégorie **A**
- Gravier 8/15 : catégorie **A**
- Sable 0/4 : catégorie **A** sauf le module de finesse et l'équivalent de sable en catégorie **B**.

I.12. Méthodes d'analyses chimiques :

I.12.1. Résultats des analyses chimiques de la boue de dragage :

Tableau I.29 : Les analyses chimiques de la boue de dragage.

Désignation de l'échantillon	% de chlorures	% de carbonates CaCO ₃	% d'insolubles	% de gypses CaSO ₄ ·2H ₂ O	% de matières organiques	% de SO ₄ ⁻²
Boue de dragage	5.41	38	59.44	00	1.85	00

D'après les analyses chimiques de la boue de dragage du port de Bejaia, on remarque qu'elle a un pourcentage important d'insolubles et de carbonates, et un pourcentage de matières organiques et de chlorure.

I.12.2. Diffraction des rayons X (DRX):

La cristallographie aux rayons X ou diffractométrie de rayons X (DRX, on utilise aussi souvent l'abréviation anglaise XRD pour X-ray diffraction) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de radiocristallographie. Pour les matériaux non-cristallins, on parle de diffusion. La diffraction fait partie des méthodes de diffusion élastique.

Cette méthode utilise un faisceau de rayons X qui rencontre le cristal provoquant la dispersion du faisceau lumineux dans des directions spécifiques. Par la mesure des angles et de l'intensité des rayons réfractés, il est possible d'obtenir une image tridimensionnelle de la densité électronique dans le cristal. À partir de cette densité, la position moyenne des atomes du cristal peut être déterminée, ainsi que leurs liaisons chimiques, leur entropie et d'autres informations.

L'appareil de mesure s'appelle un diffractomètre. Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme.

Les résultats obtenus par la diffraction des rayons X sont illustrés dans les figures suivantes :

✓ DRX de la boue :

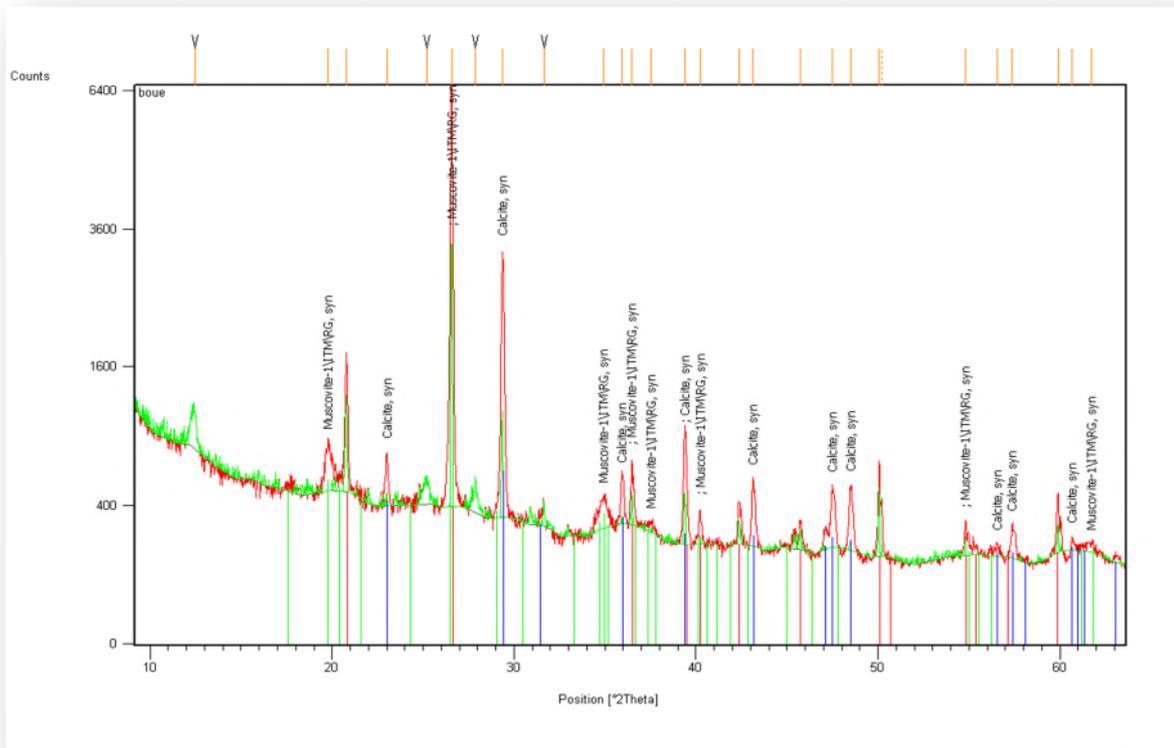


Figure I.25 : Spectre DRX de la boue de dragage.

D'après le spectre DRX obtenu pour la boue de dragage, les principaux constituants sont détectés à des valeurs d'angle de diffraction:

- Muscovite à $2\theta = 19.761^\circ, 26.570^\circ$.
- Calcite à $2\theta = 23.025^\circ, 29.370^\circ$.

✓ DRX du sable normalisé :

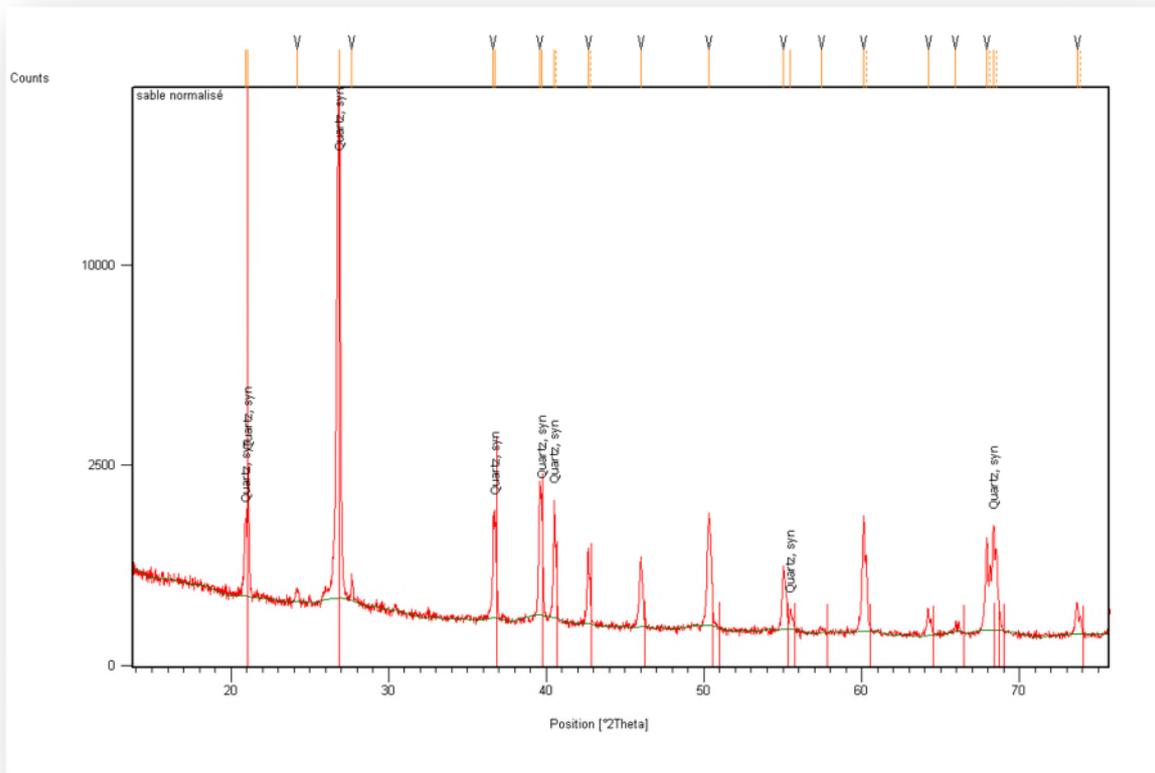


Figure I.26 : Spectre DRX du sable normalisé.

Le spectre DRX obtenu pour le sable normalisé indique la phase minéralogique détecté à des angles de diffraction :

- Quartz (SiO_2) = 21.127° , 26.881° .

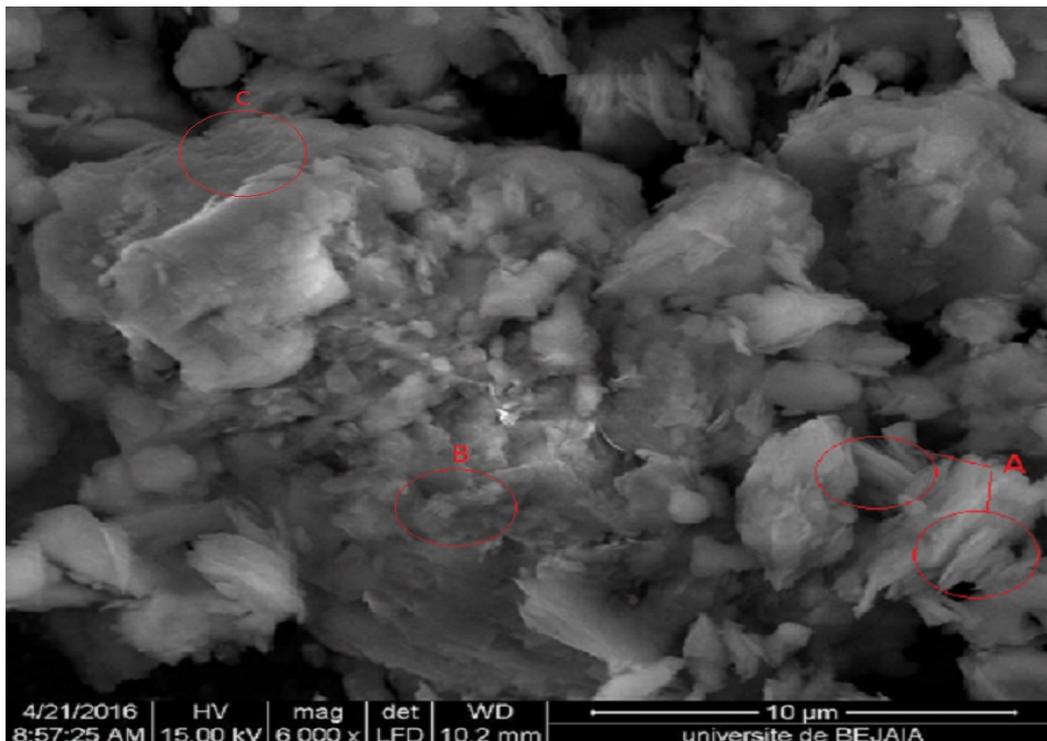
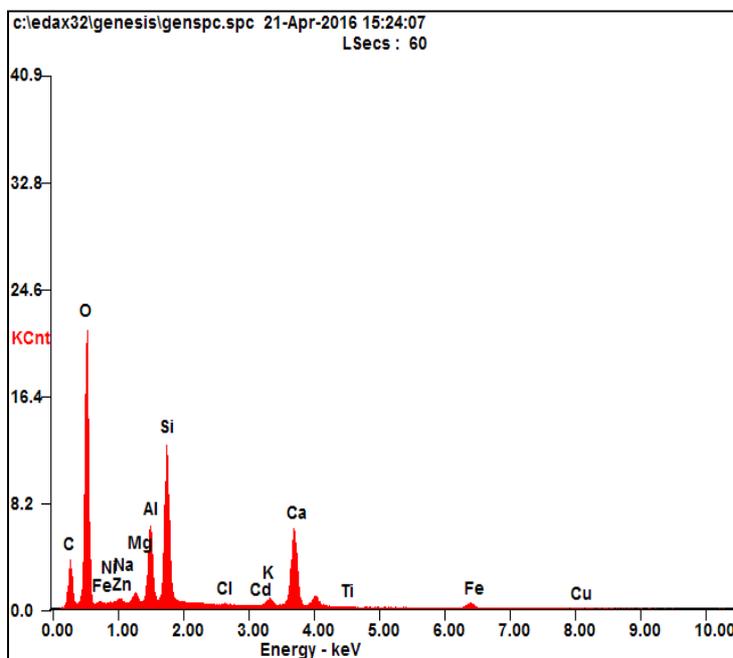


Figure I.28 : Observation microscopique de la boue de dragage.

D’après la (figure I.28), on remarque l’existence de plaquettes d’argile (A), calcite CaCO_3 (B), et de fibres (C)



Element	Wt %	At %
C K	19.15	28.85
O K	46.21	52.27
NiL	00.20	00.06
ZnL	00.45	00.12
NaK	00.15	00.12
MgK	00.78	00.58
AlK	05.61	03.76
SiK	11.65	07.51
ClK	00.15	00.08
CdL	00.11	00.02
K K	01.02	00.47
CaK	11.40	05.15
TiK	00.11	00.04
FeK	02.69	00.87
CuK	00.32	00.09

Figure I.29 : Spectre EDX de la boue de dragage.

I.12.4. Infrarouge IR :

Le nom signifie « en dessous du rouge » (du latin infra : « plus bas »), car l'infrarouge est une onde électromagnétique de fréquence inférieure à celle de la lumière visible: le rouge. La longueur d'onde des infrarouges est comprise entre le domaine visible ($\approx 0,7 \mu\text{m}$) et le domaine des micro-ondes ($\approx 1 \text{ mm}$).

L'infrarouge est associé à la chaleur car, à température ambiante ordinaire, les objets émettent spontanément des radiations dans le domaine infrarouge ; la relation est modélisée par la loi du rayonnement du corps noir dite aussi loi de Planck. La longueur d'onde du maximum d'émission d'un corps noir porté à une température absolue T (en kelvin) est donnée par la relation $0,002898/T$ connue sous le nom de loi du déplacement de Wien. Cela signifie qu'à température ambiante ordinaire (T aux environs de 300 K), le maximum d'émission se situe aux alentours de $10 \mu\text{m}$, la plage concernée étant $8\text{-}13 \mu\text{m}$. Placé à la surface terrestre, un télescope observant dans cette gamme de longueur d'onde serait donc aveuglé par le fond thermique émis par les objets environnants, c'est pourquoi on envoie les télescopes infrarouges dans l'espace.

Cette association entre l'infrarouge et la chaleur n'est cependant due qu'à la gamme de température observée à la surface de la Terre. Selon sa température, un objet émettra spontanément des radiations dans différentes bandes du spectre électromagnétique, en dessous des infrarouges ou même au-dessus, par exemple dans le visible. C'est ainsi qu'une lampe à incandescence produit de la lumière. Inversement, il est possible de générer un rayonnement infrarouge qui ne soit pas thermique, c'est-à-dire dont le spectre ne soit pas celui du corps noir ; c'est le cas, par exemple, des diodes électroluminescentes utilisées dans les télécommandes.

L'analyse scientifique et technique de ces rayonnements est dénommée spectroscopie infrarouge.

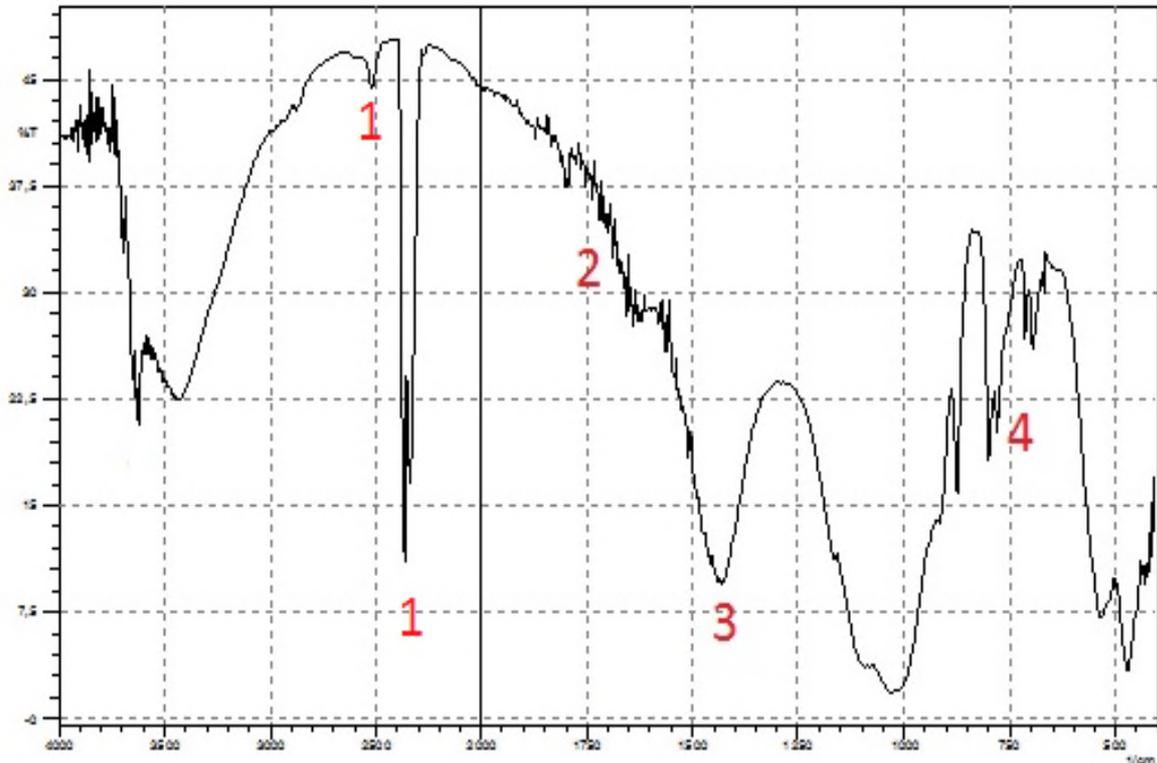


Figure I.30 : Spectre infrarouge de la boue de dragage.

- Les pics (1) à 2500 et 2400 cm^{-1} nous révèlent la présence de matière organique.
- La bande (2) décelée entre 2000 et 1600 cm^{-1} montre la présence d'un environnement carbone et azote due à l'existence de matières organiques.
- Le pic (3) visible entre 1600 et 1400 cm^{-1} indique la présence de CO_3 .
- La bande (4) entre 1000 et 1700 cm^{-1} représente les liaisons appartenant à la structure d'argile.

Conclusion :

Après avoir caractérisé et identifié les différents constituants entrant dans la composition des mortiers et bétons, on passe dans le chapitre suivant à la présentation de la méthode de confection et de formulation.

Introduction :

Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué ces dernières années. Car, de nouveaux constituants tels que les adjuvants, les additifs ou les fibres sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments.

II.1. Mortiers :**II.1.1. Les matériaux utilisés :****✓ Ciment :**

Le ciment utilisé pour la confection du mortier est le ciment portland artificiel NA 442 ; CPA-CEM 1/ 42.5 R.

✓ Eau :

L'eau de gâchage utilisée est l'eau potable du robinet de la ville de Bejaia.

✓ Sable [24] :

Le sable utilisé est un sable normalisé CEN, EN 196-1, il est commercialisé en sac plastique de 1350 ± 5 g.

➤ Caractéristiques :

C'est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

La composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences de la norme EN 196-1 et de la norme ISO 679.

Tableau II.1 : Résultat d’analyse granulométrique de sable normalisé.

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d’humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 et ISO 679.

Sa courbe granulométrique doit se situer à l’intérieur du fuseau indiqué sur la figure

Les analyses chimiques de ce sable sont données par le tableau suivant :

Tableau II.2 : Analyses chimiques du sable normalisé.

Désignation de l'échantillon	% de SiO₂	% de Al₂O₃	% de Fe₂O₃	% de CaO	% de MgO	% de K₂O	% de Na₂O	% de SO₃
Sable normalisé	97.22	nd	nd	1.34	nd	nd	nd	nd

On remarque que c’est un sable quartzeux.

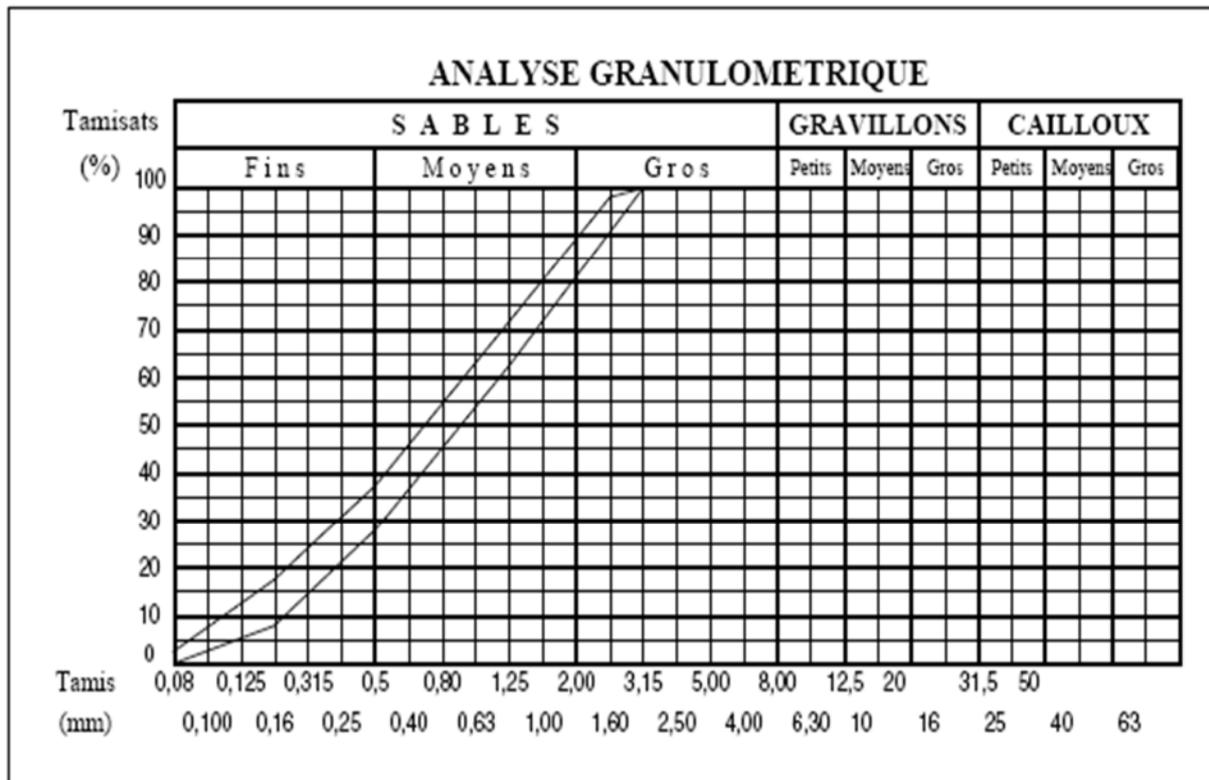


Figure II.2 : Composition granulométrique du sable de référence CEN.

✓ **La boue :**

La boue utilisée est une boue de dragage récupérée au port de Bejaia.

II.1.2. Dosage ou pesés des constituants :

Pour la préparation des éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm³, on a utilisé les quantités suivantes :

- Ciment + boue 450g
- Sables 1350 ± 5 g
- Eau 225g

Le rapport E/C est donc 0.5

Dans le but de connaître les effets des boues de dragage sur les caractéristiques mécaniques des mortiers, nous réaliseront :

5 séries d'éprouvettes, confectionnées avec le sable normalisé CEN EN 196-1, et les boues de dragage et d'une série d'éprouvette à l'autre nous allons faire varier la teneur en boue (0%, 5%, 10%, 15% et 20%) par rapport au poids du ciment.

✓ Détermination des poids des boues :

Les boues sont rajoutées en pourcentages (0%, 5%, 10%, 15% et 20%). Celui de 0% est un mortier témoin, les masses des boues sont déterminées en substitution de la masse de ciment.

➤ Mortier à 0% de boue de dragage :

Poids de la boue : 0g.

Poids de ciment : 450g.

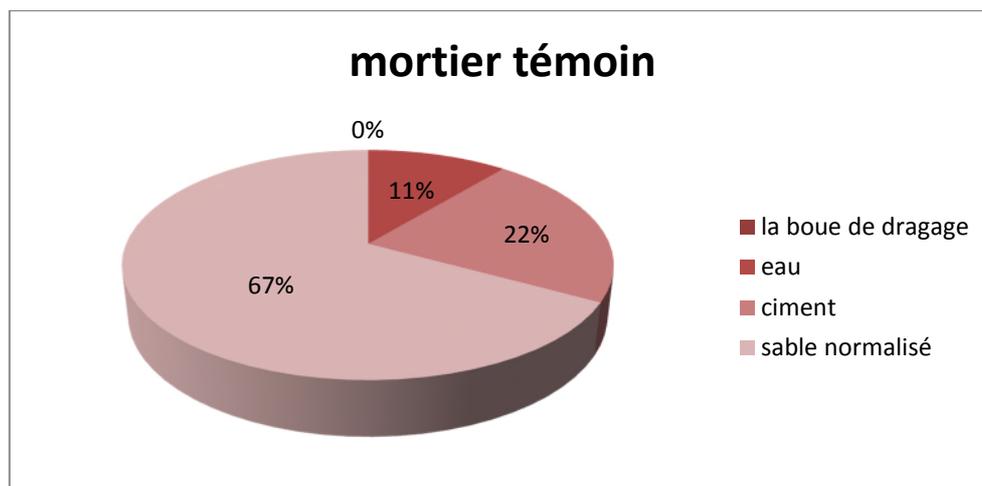


Figure II.4 : Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 0% de boue de dragage.

➤ **Mortier à 5% de boues de dragage :**

$P_{total} = (p_b + p_c) = 450g.$

Comme : $p_t = 450g \longrightarrow 100\%$

$P_b \longrightarrow 5\%$

On aura : $p_b = 22.5\%$;

Donc $p_c = 427.5g.$

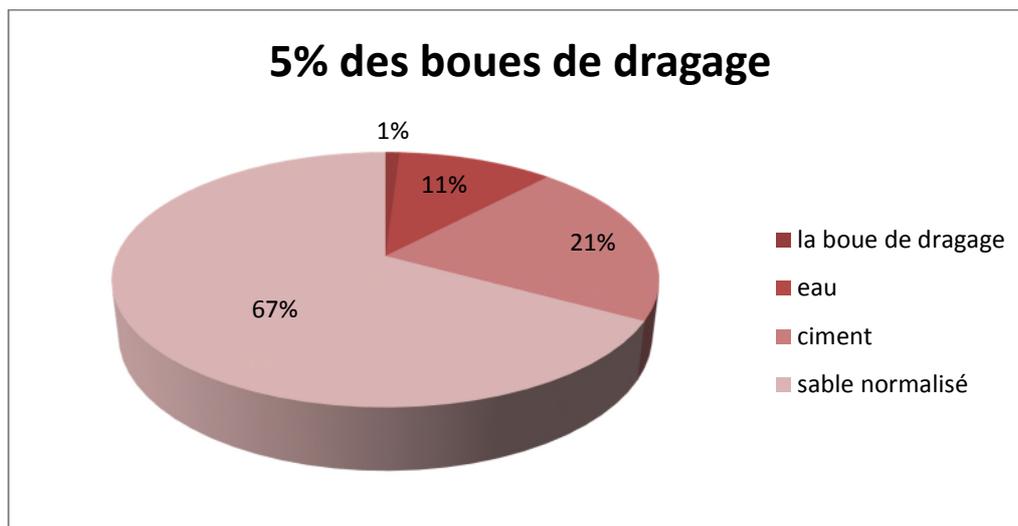


Figure II.5: Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 5% de boue de dragage.

➤ **Mortier à 10% de boues de dragage :**

$p_b = 45\%$;

$p_c = 405g.$

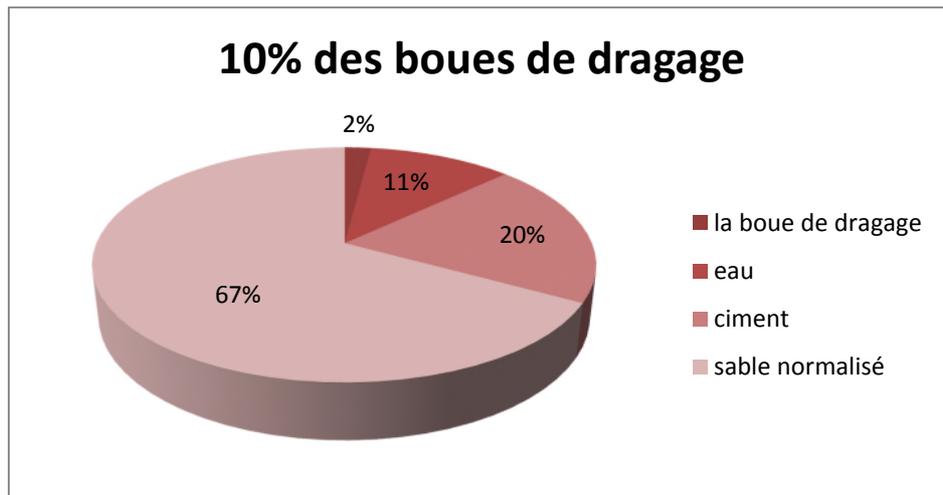


Figure II.6 : Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 10% de boue de dragage.

➤ **Mortier à 15% de boues de dragage :**

pb = 67.5% ;

pc = 382.5g.

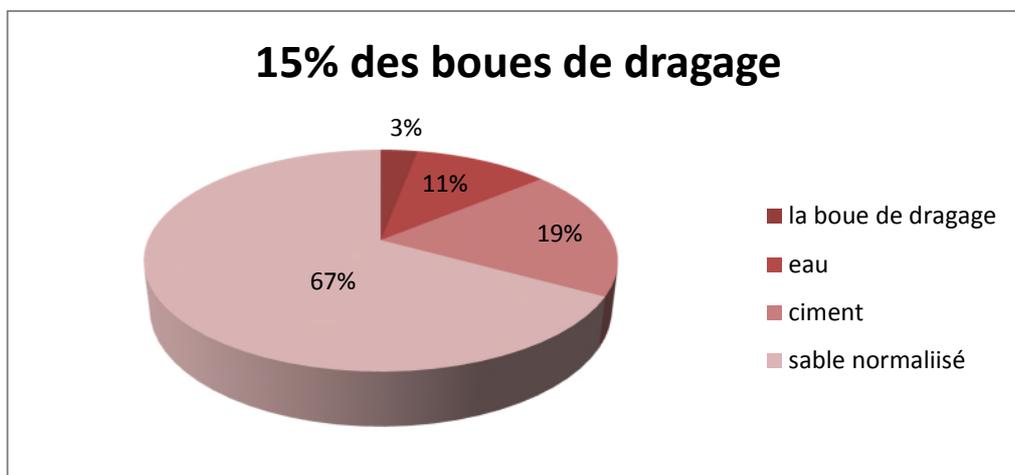


Figure II.7 : Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 15% de boue de dragage.

➤ **Mortier à 20% de boues de dragage :**

pb = 90% ;

pc = 360g.

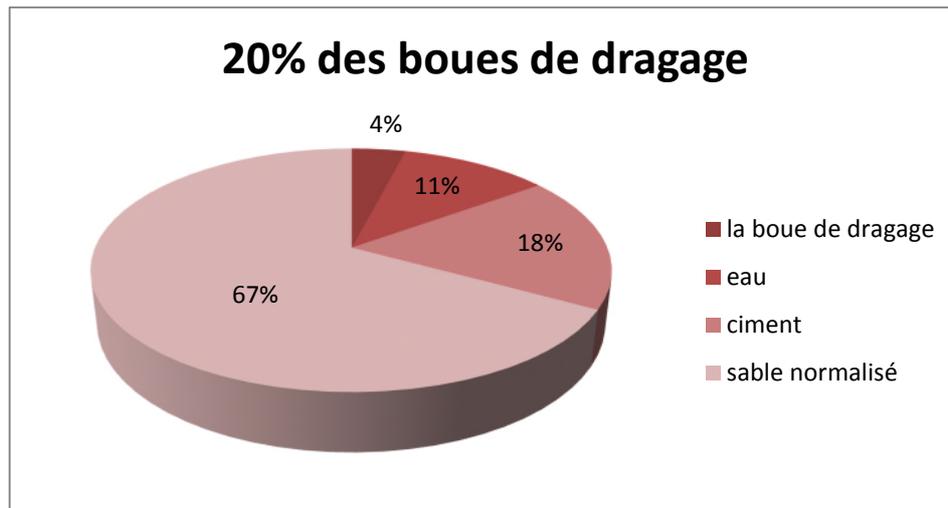


Figure II.8 : Les pourcentages des différentes composantes entrant dans la composition du mortier à 20% de boue de dragage.

Tableau II.3 : Proportions des matériaux utilisées pour les mortiers.

N° de la série	% des boues de dragage	Poids des boues (g)	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)
MR (0%)	0	0	450	1350	225
MB (5%)	5	22.5	427.5	1350	225
MB (10%)	10	45	405	1350	225
MB (15%)	15	67.5	382.5	1350	225
MB (20%)	20	90	360	1350	225

II.1.3. Formulation des mortiers :

✓ **Moules pour éprouvettes prismatiques et accessoires :**

On définit les caractéristiques des moules utilisés pour la préparation des éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm³ pour mortier, ainsi que leurs accessoires, plots, raclettes et appareil à démouler destinés aux essais de liants hydrauliques.

Le moule comporte trois compartiments permettant l'exécution simultanée de trois éprouvettes 4×4×16 cm³, les cotés correspondants aux bases des éprouvettes sont pleins ou percés de trous pour la fixation de plots destinés à rester enrobés dans le mortier au centre des

bases des éprouvettes, ces trous sont susceptibles d'être obturés pour permettre la préparation dans le même moule d'éprouvette pour essais mécaniques, les moules sont métalliques. [25]



Figure II.9 : Plots de mesure.

✓ **Préparation des moules :**

- Nettoyage des moules.
- Montage et mise en place des plots de mesure.
- Badigeonner les moules avec de l'huile.
- Pesé les moules à vide.



Figure II.10 : Les moules prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

✓ **Malaxage de mortier :**

Le mélange doit être effectué au moyen d'un malaxeur. Avant d'être utilisé pour les différents essais de maniabilité, de prise, de résistance ou de retrait, ces mortiers sont malaxés pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme :

- Introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur, y verser ensuite le ciment, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30 s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.4: Opération pour déterminer le mortier normal.

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30 s	30s	30s	15s	1 min 15s	60s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide



Figure II.11 : Malaxeur.

✓ **Confection des éprouvettes :**

Avec le mortier préparé pour chaque série d'éprouvette, on remplit le moule $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

Les éprouvettes sont moulées au moyen de l'appareil à chocs conformément au mode opératoire suivant :

Le mélange étant terminé, on fixe le moule sur la table à chocs on introduit dans chacun des 03 compartiments du moule une fraction du mortier. On met la machine en marche pour 60 chocs.



Figure II.12 : Confection des éprouvettes.

On rajoute le reste du mortier et on remet encore une fois la machine en marche pour autres 60 chocs.

La moule étant retiré de la machine, on arase le mortier avec l'arête d'une règle métallique plate et on nettoie le moule, enfin on les repese plein.



Figure II.13 : Table à chocs.

✓ **Conservation des éprouvettes :**

➤ **Avant démoulage :**

Le moule rempli de mortier, marqué et placé jusqu'au moment du démoulage dans une salle humide.

Chaque moule est extrait de la salle de conservation à l'heure prévue pour son démoulage.

➤ **Démoulage des éprouvettes :**

Le démoulage est exécuté entre 20 et 24 heures après la mise en moule.

Le démoulage doit être effectué avec précaution.



Figure II.14 : Les mortiers après démoulage.

➤ **Après démoulage :**

❖ **Conservation pour le gonflement :**

Une fois démoulées est marquées et éventuellement pesées, les éprouvettes sont conservées entièrement immergées dans l'eau distillée, jusqu'au moment de l'essai de rupture et la mesure du gonflement.



Figure II.15 : Conservation des éprouvettes dans l'eau distillée.

❖ Conservation pour le retrait :

La conservation des éprouvettes pour le retrait se fait à l'air libre sans aucune condition.



Figure II.16 : Conservation des éprouvettes à l'air libre.

II.2. Bétons :**II.2.1. Composition et dosage du béton:**

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal de différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage en cause.

La méthode pratique permettant de déterminer la composition des bétons est la méthode de DREUX-GORISSE.

II.2.2. Quelques méthodes de composition de béton :

Il existe plusieurs méthodes, pour déterminer la composition des bétons à mettre en œuvre :

- Méthode de FAURY.
- Méthode de VALLETTE.
- Méthode de BOLOMEY.
- Méthode de JOISEL.
- Méthode de DREUX-GORISSE.
- Méthode des VOLUMES ABSOLUS.
- Méthode de BARON-LESAGE.

II.2.3. Méthode de DREUX-GORISSE :

Dans cette méthode, les proportions des constituants granulaires du mélange sont déduites d'une courbe de référence OAB représentée par deux segments de droite dans le diagramme granulométrique. Cette courbe représente la distribution optimale, sans le ciment, qui conduit à la plus forte compacité granulaire

Notre but est de définir les quantités des différents composants à malaxer, pour se procurer un béton répondant non seulement aux exigences de résistance mais également à la durabilité.

✓ Tracé de la courbe granulaire de référence :

Sur un graphique d'analyse granulométrique, on trace les courbes granulométriques des granulats (15/25, 8/15, 0/4) et une courbe de référence OAB, cette courbe nous permet de déterminer les différents pourcentages (%) des entrants dans la composition du béton.

➤ **Coordonnées des points O, A, et B :**

❖ **Le point d'origine O est fixé à 0% de tamisât :**

- Abscisse : $X_o = 0\text{mm}$
- Ordonnée : $Y_o = 0\%$

❖ **Le point d'extrémité B se situe sur le tamis, D du plus gros granulat, avec 100% de tamisât :**

- Abscisse : $X_B = D = 25\text{ mm}$
- Ordonnée : $Y_B = 100\%$

❖ **Le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies :**

- Abscisse :

Si $D \leq 20\text{mm}$, l'abscisse $X_A = D/2$

Si $D > 20\text{mm}$, l'abscisse X_A est située au milieu du segment délimité par D et par le tamis 5mm

Dans notre cas : $D > 20\text{mm}$ ($D = 25\text{mm}$)

Donc X_A est située entre les tamis de mailles 10mm et 12.5mm.

- Ordonnée :

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

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

Sachant que le dosage en ciment est de 350 kg/m^3 , et que notre sable est concassé et choisissant une vibration normale, donc d'après le tableau de l'Annexe D : **K = +2**

$$K_s = 6 M_f - 15$$

$$K_s = 6 \times 3.29 - 15 = 4.74$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{25} + 2 + 4.74 = 51.74\%$$

✓ **Tracé des lignes de partage :**

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulat au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire du plus gros granulat. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les

proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier. Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection. Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier.

- Pourcentage du gravier 15/25 : $G_1 = 42\%$
- Pourcentage du gravier 8/15 : $G_2 = 15\%$
- Pourcentage du sable 0/4 : $S = 43\%$

$$G_1 + G_2 + S = 100\%$$

Les pourcentages sont représentés sur la figure suivante :

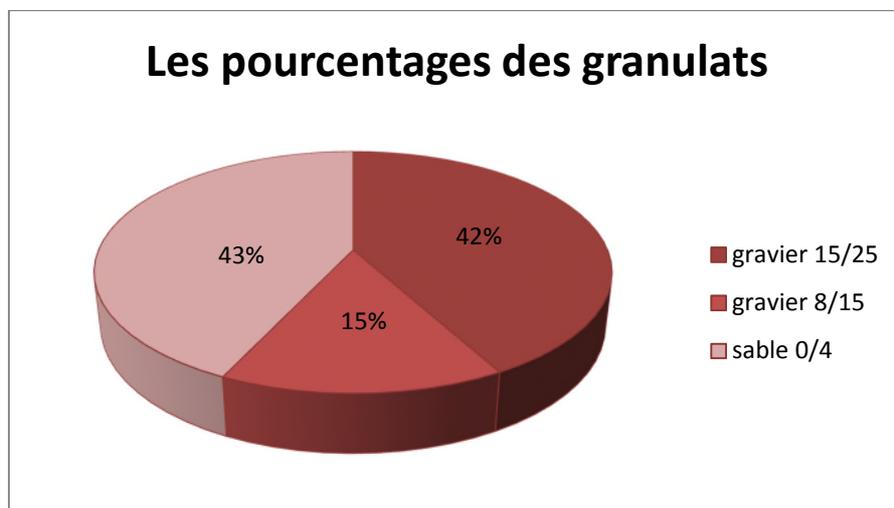


Figure II.17 : Les pourcentages des différentes fractions granulaires.

II.2.3.1. Dosage en ciment :

Le dosage en ciment le plus courant pour un béton de qualité est général de 350 kg/m^3 . Nous allons donc, adopter cette valeur que nos résultats couvrent les cas les plus courants de la pratique.

II.2.3.2. Dosage en eau :

Le rapport d'eau sur ciment couramment utilisé est égale à 0.5 ($E/C = 0.5$), sachant que le dosage en ciment est de 350 kg/m^3 , donc on peut déterminer la quantité d'eau nécessaire pour 1 m^3 de béton.

On a : $C = 350 \text{ kg/m}^3$ et $E/C = 0.5$

Donc : $E = 175 \text{ kg/m}^3$

II.2.3.3. Dosage des granulats :**✓ Calcul de coefficient de compacité (γ) :**

Ce coefficient γ est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre.

Les valeurs de coefficient (γ) sont données dans le tableau de l'Annexe E :

$$\gamma = V_m/1000$$

$$V_m = V_g + V_s + V_c$$

Avec :

- V_m : Volume absolu des matières solides
- V_g : Volume absolu des gravillons
- V_s : volume absolu du sable
- V_c : volume absolu du ciment

D'après le tableau, pour une consistance plastique et un serrage de vibration normale, on détermine γ comme suit :

- Pour $D= 20\text{mm}$, on a : $\gamma= 0.825$
- Pour $D= 31.5\text{mm}$, on a : $\gamma= 0.830$

Donc : pour $D= 25 \text{ mm}$, on aura $\gamma= 0.827$

Pour le sable et les gravillons concassés, il faut apporter la correction de -0.03

$$\gamma = 0.827 - 0.03 = 0.797$$

✓ Volumes absolues des constituants solides :

- $V_m = 1000 \times \gamma = 797$ litres
- $V_c = 350/\rho_s = 113$ litres (la valeur moyenne spécifique des grains de ciment $\rho_s = 3.1$)
- $V_g = V_m - V_c = 684$ litres

Alors les volumes absolus des constituants sont les suivants :

- Volume absolu du gravier 15/25.....684×0.42= 287.28 litres
- Volume absolu du gravier 8/15.....684×0.15= 102.6 litres
- Volume absolu du sable 0/4.....684×0.43= 294.12 litres
- Volume absolu du ciment.....113 litres
- Volume total (vérification).....797 litres

✓ **Dosage des constituants en kg/m³ :**

On obtient ces dosages, en multipliant le volume absolu de chaque granulat par sa masse volumique absolue(ρs)

$$\rho_s = m/v \rightarrow m = \rho_s \times v$$

- Gravier 15/25.....287.28×2.81= 807.26 kg/m³
- Gravier 8/15.....102.6×2.75= 282.1 kg/m³
- Sable 0/4.....294.12×2.63= 773.54 kg/m³
- Ciment350 kg/m³

✓ **Influence du rapport G/S :**

Pour avoir une bonne résistance du béton, Dreux recommande un rapport G/S (gravier/sable) proche de 2

$$\frac{G}{S} = \frac{807.26 + 282.15}{773.54} = 1.41 \ll 2$$

Le rapport G/S est loin de la valeur 2, on va modifier les pourcentages des granulats pour avoir une valeur proche de 2.

- Gravier 15/25.....42%
- Gravier 8/15.....23%
- Sable 0/4.....35%

II.2.4. Densité théorique du béton rais ($\Delta 0$)

La densité théorique du béton frais est égale a la somme des densités de tous les constituants du béton (gravier 15/25, gravier 8/15, sable, ciment, eau)

- Gravier 15/25..... $0.42 \times 684 \times 2.81 = 807.26 \text{ kg/m}^3$
- Gravier 8/15..... $0.23 \times 684 \times 2.75 = 432.63 \text{ kg/m}^3$
- Sable 0/4..... $0.35 \times 684 \times 2.63 = 629.62 \text{ kg/m}^3$
- Ciment..... 350 kg/m^3
- Eau..... 175 kg/m^3
- La somme..... 2244.03 kg/m^3

✓ **Calcul du rapport G/S**

$$\frac{G}{S} = \frac{807.26 + 432.63}{629.62} = 1.97 \approx 2$$

Le rapport G/S est proche de la valeur 2, donc les résultats sont vérifiés.

II.2.5. Dosage des granulats en (litre/m³) :

Les dosages des granulats en (litre/m³), sont obtenus en divisant le dosage de chaque granulat par sa ma masse volumique apparente (**pp**).

- Gravier 15/25..... $807.26/1.30= 620.97 \text{ litres/m}^3$
- Gravier 8/15..... $432.63/1.35= 320.47 \text{ litres/m}^3$
- Sable 0/4..... $629.62/1.19= 529.09 \text{ litres/m}^3$

II.2.6. Récapitulation de la composition du béton :

Tableau II.5 : Récapitulatif de la composition du béton.

composition	Pourcentage des granulats	ρ_s (g/cm ³)	Volume absolu des composants (litres)	ρ_p (g/cm ³)	Dosage des composants (kg/m ³)	Volume des composants (litres/m ³)
Gravier 15/25	42	2.81	287.28	1.30	807.26	620.97
Gravier 8/15	23	2.75	102.60	1.35	432.63	320.47
Sable 0/4	35	2.63	294.12	1.19	629.62	529.62
Ciment	-	3.10	113.00	-	350.00	-
Eau	-	1.00	175.00	1.00	175.00	175.00
TOTAL	100	12.29	972.00	4.84	2244.03	1646.06

✓ Tracé de la courbe de mélange des granulats :

Les valeurs des tamisats de la courbe de mélange sont calculées à partir des analyses granulométriques des granulats (gravier 15/25, gravier 8/15, sable 0/4) et des pourcentages obtenues précédemment.

Ces valeurs des tamisats sont données par le tableau suivant :

Tableau II.6 : les valeurs des tamisâts (%) de la courbe de mélange.

Tamis (mm)	Tamisâts (%) G1 (15/25)	Tamisâts (%) G2 (8/15)	Tamisâts (%) S (0/4)	Mélange 0.42 G1+ 0.23 G2+ 0.35 S
31.5	100	100	100	100
25	97	100	100	99
20	54	100	100	81
16	22	91	100	65
14	14	76	100	58
12.5	11	60	100	53
10	9	31	100	46
8	8	13	100	41
6.3	4	4	100	38
5	2	3	100	37
4	1	0	96	34
2	0	0	68	24
1	0	0	47	16
0.5	0	0	29	10
0.315	0	0	24	8
0.25	0	0	21	7
0.125	0	0	15	5
0.063	0	0	12	4

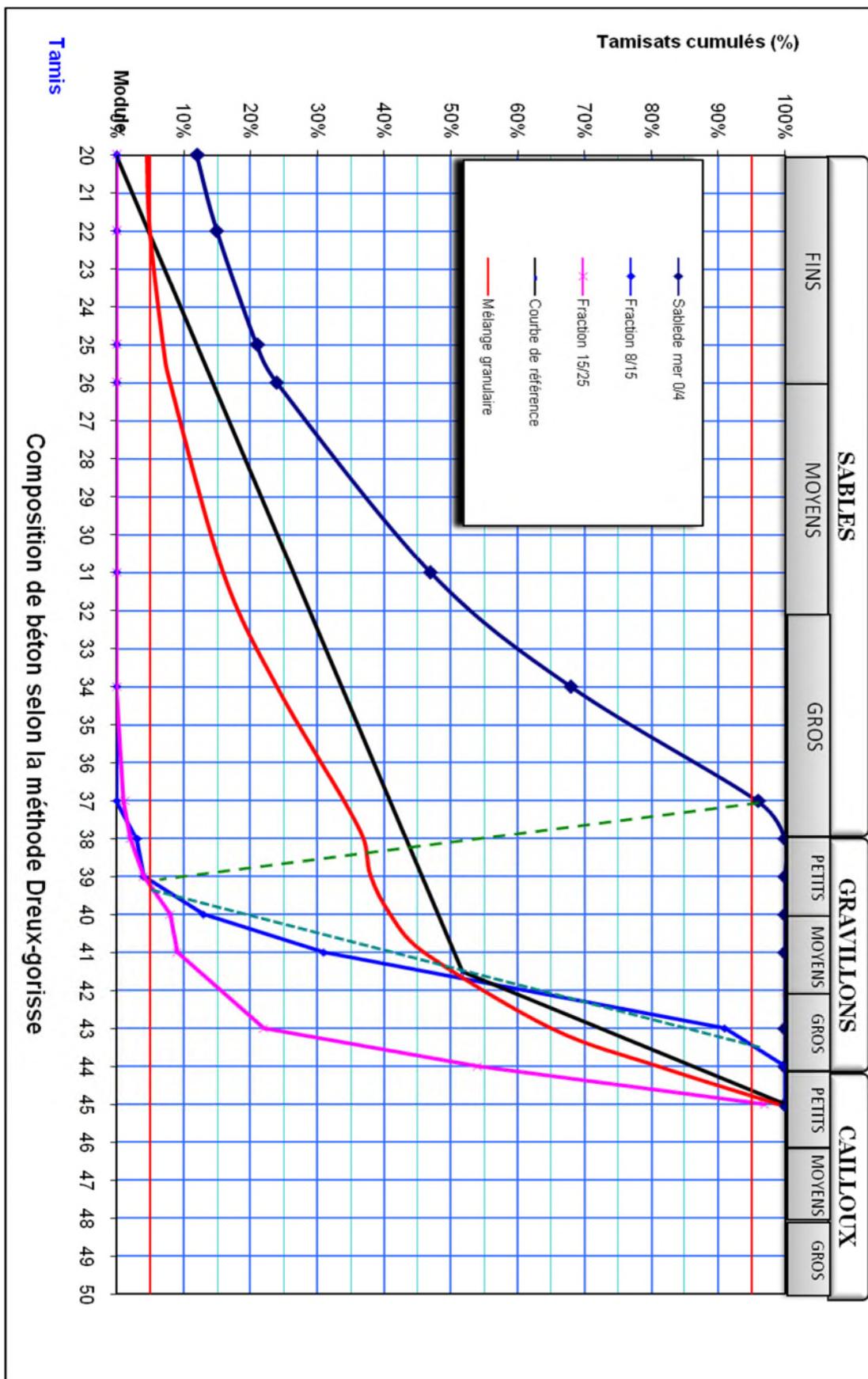


Figure II.18 : Courbe de mélange selon DREUX-

II.2.7. Confection des éprouvettes :

✓ Dimensions des éprouvettes (NF P18-400) :

Les moules les plus fréquemment utilisés sont les moules cylindriques, leurs dimensions doivent être choisis en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton.

Pour notre étude on utilisera des moules de $16 \times 32 \text{ cm}^2$.

✓ Gâchée d'essai

Après avoir pesé les matériaux nécessaires pour la réalisation d'une gâchée, le mélange est réalisé en introduisant tout d'abord les granulats (graviers, sable) et le ciment+ la boue dans le malaxeur, suivi d'un malaxage à sec d'une minute. L'eau est ensuite introduite progressivement, le malaxage est alors poursuivi pendant deux minutes.

La gâchée exécutée au laboratoire, doit permettre d'obtenir un volume du béton frais excédant celui des éprouvettes

- **Remarque** : il faut bien mélanger la boue de dragage et le ciment avant le malaxage pour qu'il soit homogène.

L'affaissement au cône d'Abrams et la mesure du volume d'air entraîné dans le béton ont été mesurés sitôt le béton malaxé (la conduite de l'essai est représenté dans le chapitre suivant).

Dans notre étude, on compte réaliser des bétons plastiques avec un affaissement proche de 8 cm.

Sachant qu'on a besoin pour la gâchée d'essai de :

- Remplir 3 cylindres de $16 \times 32 \text{ cm}^2$.
- Remplir le cône d'Abrams (ce cône prend presque le même volume qu'un cylindre de $16 \times 32 \text{ cm}^2$).

Donc on a besoin d'un volume total de 4 cylindres.

$$Vt = \pi r^2 \times 4 = 3.14 \times 8^2 \times 32 \times 4 = 25735.93 \text{ cm}^3 \approx 0.026 \text{ m}^3$$

Pour remplir un cylindre ($16 \times 32 \text{ cm}^2$) de béton on aura besoin d'un poids P (kg), qu'on calculera comme suit :

$P = V \times \Delta 0$, tel que :

V : volume du cylindre

$\Delta 0$: densité théorique du béton frais

$$P = \pi r^2 \times \Delta 0 = \frac{3.14 \times 8^2 \times 32 \times 2.24}{1000} = 14.44 \text{ kg}$$

➤ **Masse total de la gâchée :**

Pour une série de trois (03) éprouvettes :

$$P' = 3 \times P = 44.31 \text{ kg}$$

Lors de malaxage du béton, on mesurera son affaissement au cône d'Abrams, ce cône prend presque le même poids qu'une éprouvette 16×32 cm². Alors le poids total de la gâchée est :

$$P_t = 14.73 \times 4 = 57.75 \text{ kg}$$

Ce poids total, est celui du béton frais qu'on doit obtenir à la fin de la gâchée. Il nous reste à déterminer le poids de chaque constituant de ce béton (graviers, sable, ciment et eau). Il est obtenu, en divisant chaque dosage de ces composants par un coefficient (ξ), tel que :

$$\xi = \frac{\text{poids total des composants par 1 m}^3 \text{ de béton}}{\text{poids total du béton frais}} = \frac{\Delta 0}{P_t}$$

$$\xi = 2244.03 / 57.75 = 38.86$$

Donc, pour une gâchée, la masse nécessaire de chaque composant est de :

- Gravier 15/25.....(807.26/38.86)= 20.774 kg
- Gravier 8/15.....(432.63/38.86)= 11.133 kg
- Sable 0/4.....(629.62/38.86)= 16.202 kg
- Ciment.....(350/38.86)= 9.007 kg
- Eau.....(175/38.86)= 4.503 kg

✓ **Détermination des poids de boue de dragage :**

On utilise la boue de dragage comme ajout pour les bétons, ou nous allons faire varier le pourcentage de boue (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%) par rapport au poids du ciment, celui de 0%

est un béton témoin, alors on peut déterminer les poids de boue de dragage aux différents pourcentages.

➤ **Béton à 0% de boues de dragage :**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pt} \longrightarrow 100\% \\ \text{Pb} \longrightarrow 0\% \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Poids du ciment : } P_c = 9.007 \text{ kg.} \\ \text{Poids de boue : } P_b = 0 \text{ kg.} \end{array} \right.$$

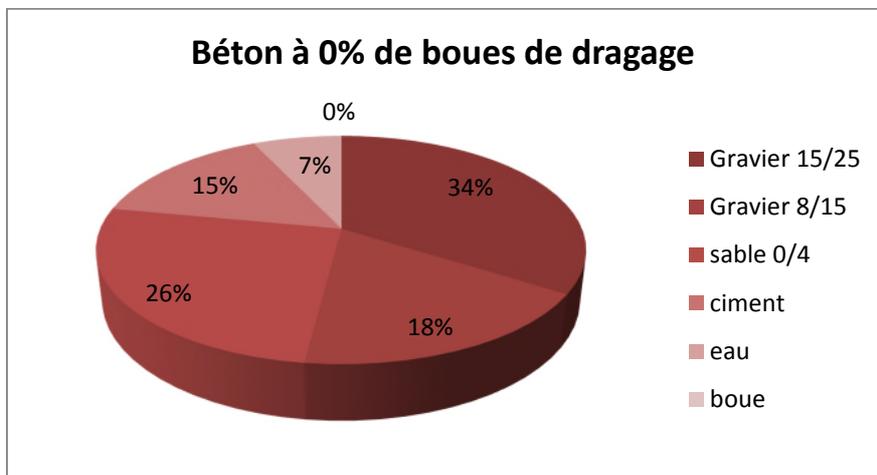


Figure II.19 : Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 0% de boue de dragage.

➤ **Béton à 2.5% de boues de dragage :**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pt} \longrightarrow 100\% \\ \text{Pb} \longrightarrow 2.5\% \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Poids du ciment : } P_c = 9.007 \text{ kg.} \\ \text{Poids de boue : } P_b = (2.5 \times 9.007) / 100 = 0.225 \text{ kg.} \end{array} \right.$$

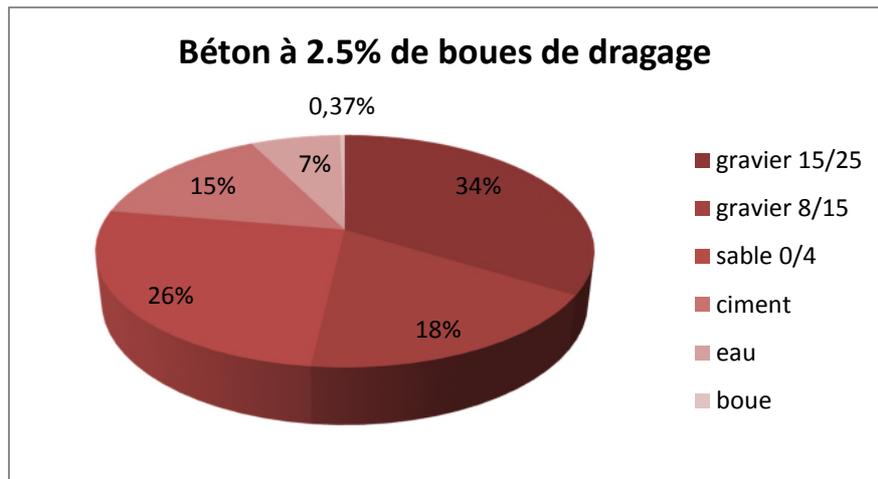


Figure II.20 : Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 2.5% de boue de dragage.

➤ **Béton à 5% de boues de dragage :**

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pt} \longrightarrow 100\% \\ \text{Pb} \longrightarrow 5\% \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Poids du ciment : } P_c = 9.007 \text{ kg.} \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Poids de boue : } P_b = (5 \times 9.007) / 100 = 0.450 \text{ kg.} \end{array} \right.$

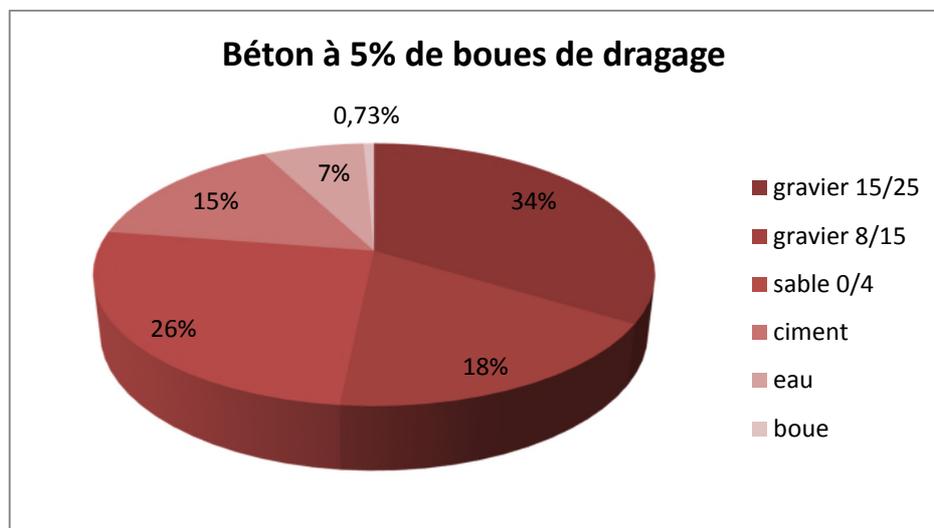


Figure II.21 : Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 5% de boue de dragage.

➤ **Béton à 7.5% de boues de dragage :**

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pt} \longrightarrow 100\% \\ \text{Pb} \longrightarrow 7.5\% \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Poids du ciment : } P_c = 9.007 \text{ kg.} \\ \text{Poids de boue : } P_b = (7.5 \times 9.007) / 100 = 0.675 \text{ kg.} \end{array} \right.$

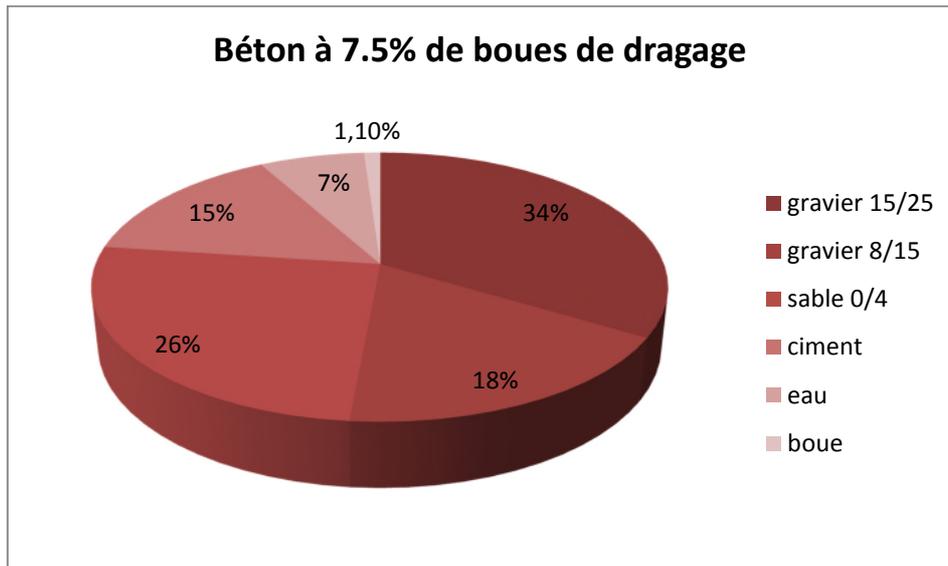


Figure II.22 : Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 7.5% de boue de dragage.

➤ **Béton à 10% de boues de dragage :**

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pt} \longrightarrow 100\% \\ \text{Pb} \longrightarrow 10\% \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Poids du ciment : } P_c = 9.007 \text{ kg.} \\ \text{Poids de boue : } P_b = (10 \times 9.007) / 100 = 0.900 \text{ kg.} \end{array} \right.$

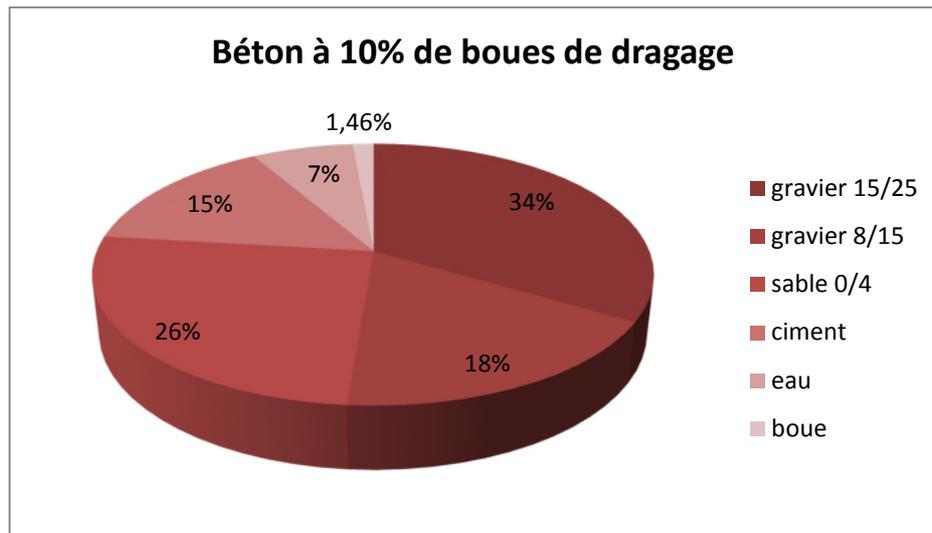


Figure II.23 : Pourcentage de différentes fractions granulaires entrantes dans la composition de béton à 10% de boue de dragage.

II.2.8. Récapitulation de la composition des différentes gâchées :

Tableau II.7 : Récapitulatif de la composition des gâchées.

N ° série	Gravier 15/25 (kg)	Gravier 8/15 (kg)	Sable 0/4 (kg)	Ciment (kg)	Eau (kg)	Boues de dragage (kg)
BT (0%)	20.774	11.133	16.202	9.007	4.503	0
BBD (2.5%)	20.774	11.133	16.202	9.007	4.503	0.225
BBD (5%)	20.774	11.133	16.202	9.007	4.503	0.450
BBD (7.5%)	20.774	11.133	16.202	9.007	4.503	0.675
BBD (10%)	20.774	11.133	16.202	9.007	4.503	0.900



Figure II.24 : Confection des éprouvettes 16×32 cm².

Conclusion

Après avoir présenté dans ce chapitre, la méthode d'exécution et de formulation des mortiers et bétons, nous allons consacrer le prochain chapitre aux différents essais effectués sur les bétons (frais et durci) et les mortiers, ainsi que la durabilité.

Introduction :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, le dosage en ciment et l'eau, afin de réaliser un béton répandant aux qualités recherchées. Une fois le béton préparé, il doit subir des essais à l'état frais et durci, afin de confectionner des ouvrages résistants, durables et économiques.

Dans ce chapitre nous allons présenter les tests et essais expérimentaux portants sur le comportement et les paramètres physico-mécaniques des mortiers et bétons.

III.1. Essais sur les mortiers :**III.1.2. Mesure du retrait et du gonflement (NF P 15-433) :****✓ Objectif de l'essai :**

L'essai de retrait consiste à mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur que provoque le ciment utilisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ de mortier conserver à l'air pour le retrait, et dans l'eau pour le gonflement à différents pourcentages de boue de dragage du port de Bejaia.

✓ Principe de l'essai :

On compare, à différents temps t , la variation de longueur d'une éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour l'origine.



Figure III.1 : Etalonnage de l'appareil de mesure du retrait et gonflement.

✓ **Matériels nécessaires :**

- 5 séries d'éprouvettes de mortier pour chaque essai (retrait et gonflement), la procédure de préparation est décrite dans le chapitre précédent.
- Appareil de mesure de retrait (déformètre) équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures, et une tige de 16 cm de longueur doit permettre à régler le zéro du déformètre.

✓ **Epoques de mesure :**

Les mesures, effectuées sur trois (03) éprouvettes pour chaque série, ont lieux au temps suivants :

- Au démoulage, mesure origine des variations.
- Au 3^{ème}, 7^{ème}, 14^{ème}, 21^{ème}, 28^{ème}.

✓ **Conduite de l'essai :**

Avant chaque série de mesure, l'appareil est étalonné avec la tige de métal de longueur de 16 cm, et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette.

Au moment de la mesure, le comparateur est mis à zéro.

Soit :

$d\ell(t)$: la valeur lue sur le comparateur au temps t .

L : la longueur de base de la tige est égale à 16 cm.

L' : l'éprouvette à une longueur au temps considéré :

$$\ell = L \pm d\ell(t)$$

Soit :

$\Delta\ell(t) = d\ell(t) - d\ell(t_0)$: la variation de longueur au temps t .

$\Delta\ell(t) < 0$ (négatif) \longrightarrow retrait de l'éprouvette.

$\Delta\ell(t) > 0$ (positif) \longrightarrow gonflement de l'éprouvette.



Figure III.2 : Appareil de mesure du retrait et gonflement.

✓ **Expression des résultats :**

Les résultats de la variation du retrait et gonflement obtenus jusqu'à 28 jours, en fonction de pourcentage de fines, sont représentés dans les tableaux de l'annexe B.

III.1.2. Mesure de la variation de masses :

On mesure la variation de masse pour chaque série d'éprouvettes conservées dans l'eau et à l'air libre.

Eventuellement, la masse de l'éprouvette est déterminée à chacun des temps où est effectuée une mesure du retrait ou du gonflement.

La différence entre la valeur mesurée à un temps t , et la masse au démoulage, représente :

- L'augmentation de masse pour gonflement.
- La diminution de masse pour le retrait.

✓ **Expression des résultats**

Pour chaque prisme des séries d'éprouvettes est calculé le rapport :

$$\frac{\Delta M}{M} \times 100$$

Avec :

ΔM : variation de masse par rapport à la masse au moment de démoulage.

M : la masse de l'éprouvette au moment de démoulage.

Les résultats obtenus sont dans l'annexe B.

III.1.3. Essais de résistances mécaniques :

Pour la détermination de la résistance à la flexion pour les éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, on utilise la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé. Les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion doivent être essayés en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$.

✓ **Matériels nécessaires :**

- Une presse hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 200 KN.
- Les 05 séries d'éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, conservées dans l'eau pendant 28 jours.

Les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.

III.1.3.1. Résistance à la traction par flexion :

Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci.

Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter jusqu'à rupture. Conserver les demi-prismes humides jusqu'au moment des essais en compression. La résistance en flexion R_f (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = \frac{1,5Pl}{b^3}$$

Avec :

R_f : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

b : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

l : est la distance entre les appuis, en millimètres.



Figure III.3: Essai de résistance à la flexion.

III.1.3.2. Résistance à la compression :

Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm. Augmenter la charge avec une vitesse providence durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture. La résistance en compression R_c (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

R_c: Résistance à la compression en (MPa).

F_c: Charge de rupture en (N).

b²: Côte de l'éprouvette est égale à 40mm

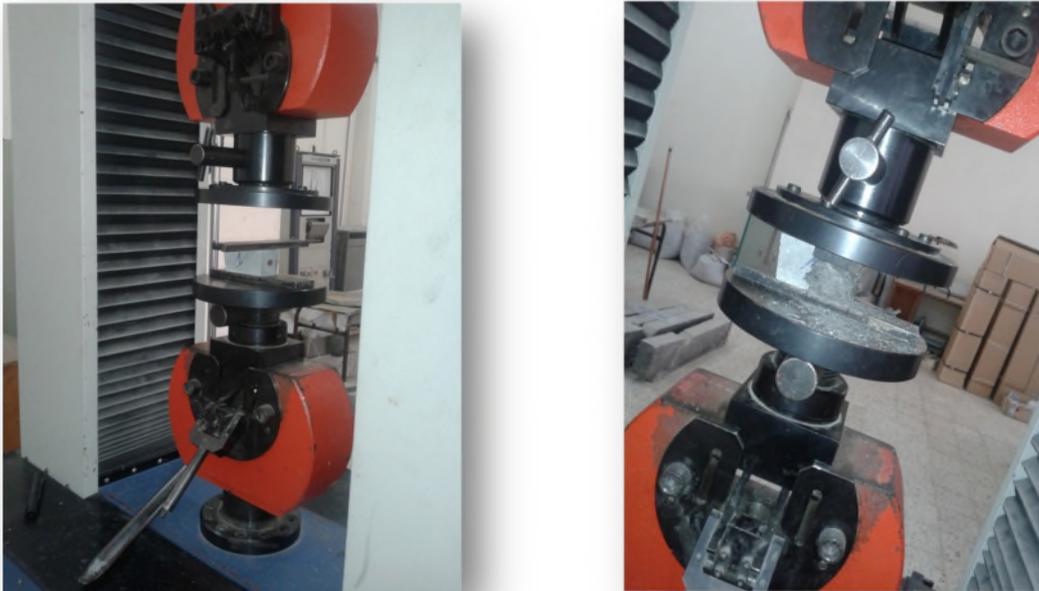


Figure III.4 : Essai de résistance à la compression.

✓ **Expression des résultats**

Les valeurs de **R_f** et **R_c** obtenus sont données dans les tableaux de l'annexe B.



Figure III.5 : Rupture des éprouvettes prismatiques soumise à la flexion.

III.1.4. Diffraction par rayons X (DRX) du mortier à 5% de boue:

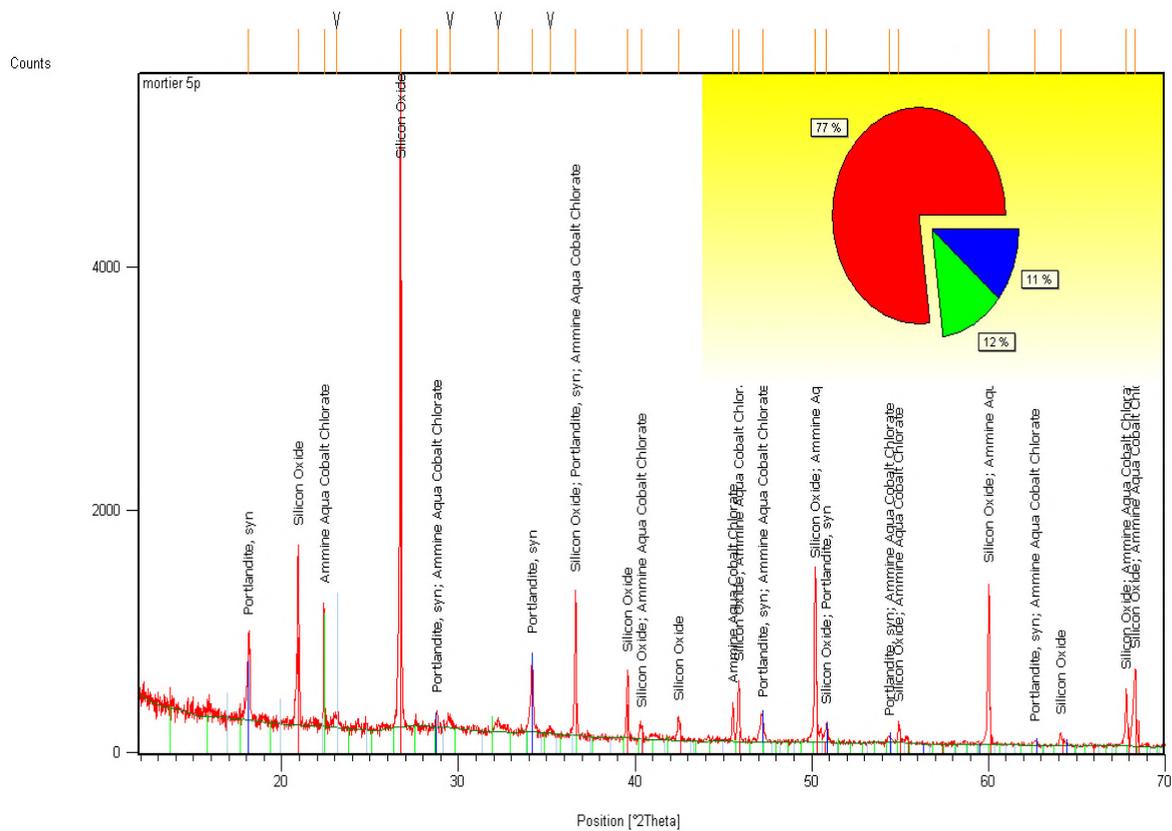


Figure III.6 : Spectre DRX du mortier à 5% de boue.

D'après le spectre DRX obtenu pour le mortier à 5% de boues de dragages, les phases minéralogique détecté à des différents angles de diffractions :

- Portlandite.
- Silicon oxide.
- Ammine aqua cobalt chlorate.

III.1.5. Microscopie électronique à balayage MEB :

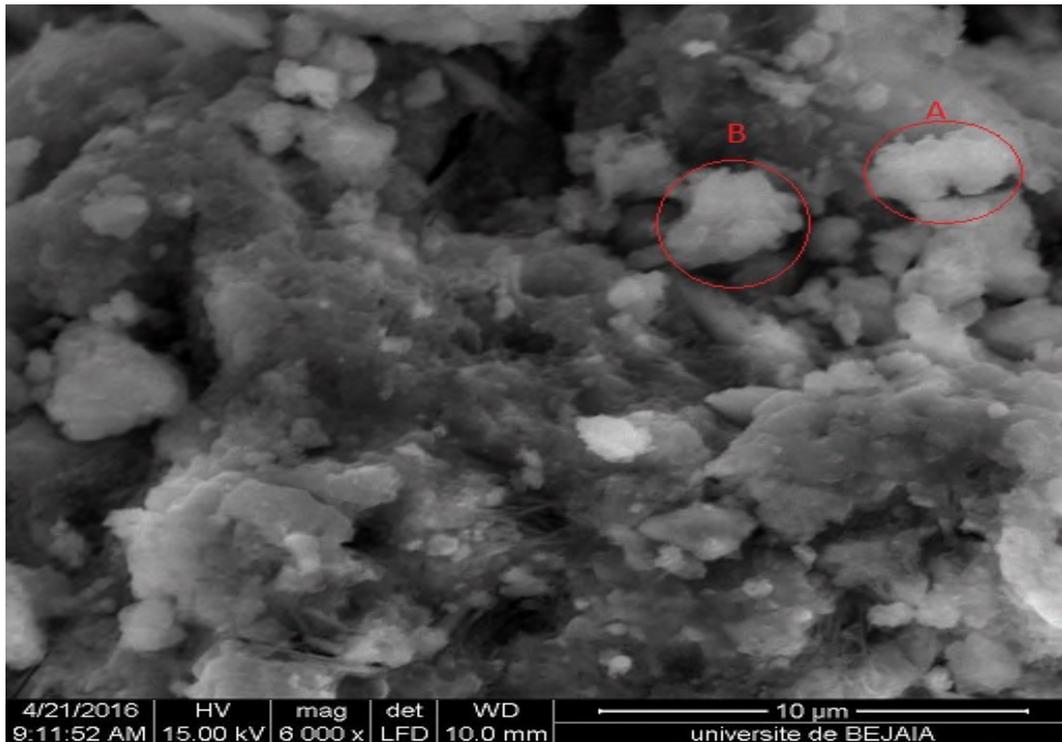
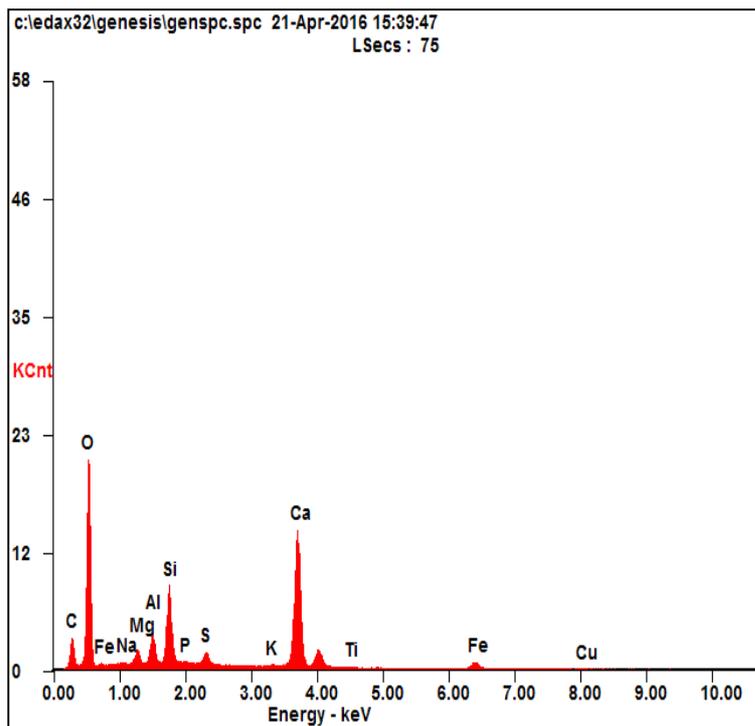


Figure III.7 : Observation microscopique du mortier à 5% de boue.

D'après la figure III.7 on peut constater qu'il y a présence de calcite (A) et quartz (B).



<i>Element</i>	<i>Wt %</i>	<i>At %</i>
<i>C K</i>	12.71	20.72
<i>O K</i>	47.22	57.77
<i>NaK</i>	00.17	00.14
<i>MgK</i>	01.23	00.99
<i>AlK</i>	02.49	01.81
<i>SiK</i>	06.71	04.68
<i>P K</i>	00.11	00.07
<i>S K</i>	01.24	00.76
<i>K K</i>	00.26	00.13
<i>CaK</i>	23.04	11.25
<i>TiK</i>	00.19	00.08
<i>FeK</i>	04.23	01.48
<i>CuK</i>	00.40	00.12

Figure III.8 : Spectre EDX du mortier à 5% de boue.

III.2. Essais sur les bétons :

III.2.1. Essais sur les bétons frais :

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant la prise et durcissement. Parmi ces propriétés : la consistance, le pourcentage d'air occlus dans le béton et la masse volumique.

III.2.1.1. Essai de consistance (affaissement au cône d'Abrams) NF P18-451 :

Cet essai est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier.

Tableau III.1 : Les classes de consistance.

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Très plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide F1	≥ 16	

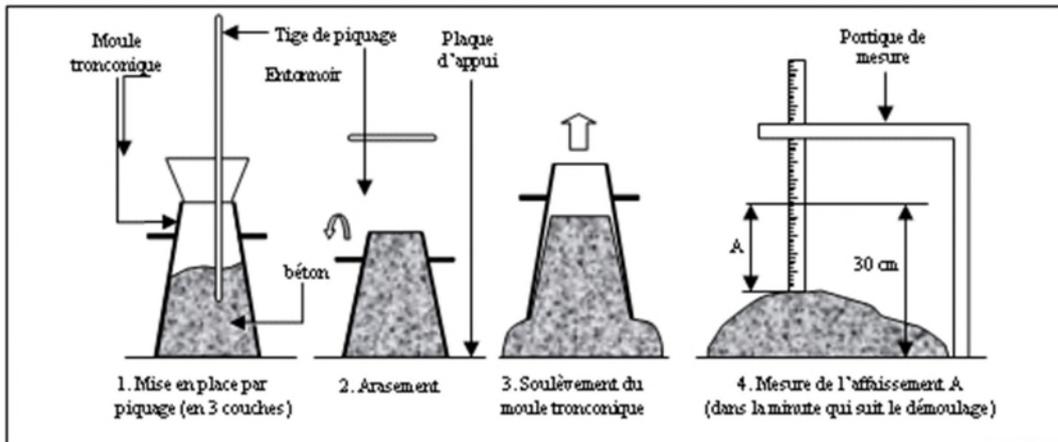


Figure III.10: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

✓ **Conduite de l'essai :**

- Humidifier légèrement la plaque d'appuis et le moule puis le fixer.
- Introduire le béton dans le moule en 03 couches de hauteurs égales qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche (la tige doit pénétrer la couche immédiatement inférieure).
- Après avoir arasé en roulant la tige de piquage sur le bord supérieure du moule, le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, mesuré grâce au portique et arrondi au centimètre le plus proche. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton et dans la minute qui suit le démoulage.

✓ **Expression des résultats :**

Les résultats obtenus sont dans le tableau de l'annexe A



Figure III.11: Affaissement au cône d'Abrams.

III.2.1.2. Essai du contrôle du volume d'air entrainé (Aéromètre) :

✓ **But de l'essai :**

Il s'agit d'évaluer la quantité d'air occlus de manière à vérifier que le minimum prévu par l'adaptation nationale à l'EN 206-1 en cas de gel est bien atteint.

✓ **Principe :**

L'essai consiste à introduire de l'eau sur une hauteur prédéfinie au-dessus d'un échantillon de béton compacté de volume défini dans une enceinte étanche et à appliquer sur l'eau une pression d'air prédéterminée. On mesure la diminution du volume d'air contenu dans le béton en notant la valeur de la baisse de niveau d'eau.

✓ **Équipement nécessaire :**

- Un aéromètre à béton.
- Des moyens de mise en place de béton : tige de piquage, règle à raser.

✓ **Conduite de l'essai :**

- Le béton est mis en place dans le bol de mesure de l'aéromètre en trois couches par piquage 25 coups chacune et donner des coups de maillet sur le récipient jusqu'à la disparition des grosse bulles d'air.
- Araser convenablement la surface supérieure, la partie supérieure de l'aéromètre est alors bridée sur le bol de mesure.
- On remplit d'eau la partie supérieure de l'appareil jusqu'au niveau zéro.
- On applique alors une pression déterminée $P=1$ bar.
- On note la graduation h atteinte par la colonne d'eau.



Figure III.12: Aéromètre à béton.

III.2.1.3. Mesure des masses volumiques fraîches ρ :

Il s'agit de prendre le poids des éprouvettes de béton à l'état frais, et en le divisant par le volume de cette dernière, et cela pour chaque série de béton.

$$\rho = \frac{M_t - M}{V}$$

Avec :

M_t : masse de récipient plein

M : masse de récipient (cylindre 16×32 cm²)

Les valeurs obtenues sont dans le tableau de l'annexe A.

III.2.2. Essais sur les bétons durcis :

✓ Conservation des éprouvettes :

Après démoulage, on mesure la masse de chaque éprouvette, après elles doivent être conservé dans l'eau pendant 28 jours (le vingt-huitième jour est le jour d'écrasement de ces éprouvettes).



Figure III.13: Conservation des éprouvettes dans l'eau.

III.2.2.1. Mesure des masses volumiques :

On mesure la masse de chaque éprouvette à 1, 3, 7, 14, 21, et 28 jours.

Essuyer les éprouvettes avant chaque pesée pendant 15 minutes, pour en éliminer l'excès d'eau.

Les masses volumiques des éprouvettes à l'état humide sont calculées par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$



Figure III.14: Pesé des éprouvettes.

III.2.2.2. Essai de compression :

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques majeures pour un béton. De ce fait, il est indispensable pour n'importe quelles études de prendre en considération la résistance à la rupture en compression.

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm².

✓ **But de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer la résistance des éprouvettes lorsque celles-ci sont soumises à une compression centrée.

✓ **Principe d l'essai :**

Cet essai fournit une force croissante de compression qui génère la rupture de l'éprouvette. La résistance à la compression est déduite en divisant cette charge de rupture par la surface de la section sollicitée.

✓ **Equipement nécessaire :**

- Une presse de force pour effectuer l'essai, et de dimensions appropriées à l'éprouvette.
- Le ciment prompt pour le surfaçage des éprouvettes.



Figure III.15 : Presse pour béton.

✓ **Surfaçage des éprouvettes :**

Afin de garantir la justesse des résultats, les surfaces sur lesquelles s'applique la charge doivent être planes et parallèles. Pour avoir une bonne zone de contact du plateau (exerçant la force de compression) sur l'échantillon, il est nécessaire d'utiliser un ciment prompt pour assurer la planéité et le parallélisme des éprouvettes. Néanmoins, un dispositif rotulé, présent sur la presse, palie aux manques de parallélisme et garantit un bon contact entre le plateau et l'échantillon.



Figure III.16: Surfaçage des éprouvettes.

✓ **Conduite de l'essai :**

- Faire sortir les éprouvettes de l'eau, les essuyer et les laisser 15 min pour éliminer l'excès d'eau.
- Peser les éprouvettes pour la détermination des masses volumiques.
- Rectifier les surfaces des éprouvettes avec le ciment prompt.
- Centrer l'éprouvette sur la presse d'essai et appliquer le chargement jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression se déduit par la formule suivante :

$$f_{cj} = P/S$$

Avec :

P : charge de rupture exprimée en KN.

S : surface de l'éprouvette exprimée en m²



Figure III.17 : Fissuration des éprouvettes.

III.1.4. Essai de durabilité :

La durabilité définit la durée de la persistance de certaines caractéristiques et allure de leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs de l'environnement. [26]

✓ Objectif de l'essai :

Le béton est un matériau durable qui offre une résistance remarquable aux différentes agressions lorsqu'il est correctement mis en œuvre.

L'essai de durabilité a pour objectif de déterminer la résistance à 28 jours des mortiers conservés dans des milieux agressifs.

✓ Conduite de l'essai :

Après les essais mécaniques effectués sur les différents mortiers, on a pu constater que la série de mortier à 5% de boue de dragage a une meilleure résistance, de ce fait on a procédé à la confection de cubes $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ de la même série destinée au test de durabilité.

Les cubes $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ sont confectionnés suivant le même principe que celui des prismes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (voir chapitre II).

III.1.4.1. milieu neutre :

- Conserver 03 cubes dans un bac contenant l'eau distillée et mettre le couvercle afin d'éviter l'évaporation de l'eau.

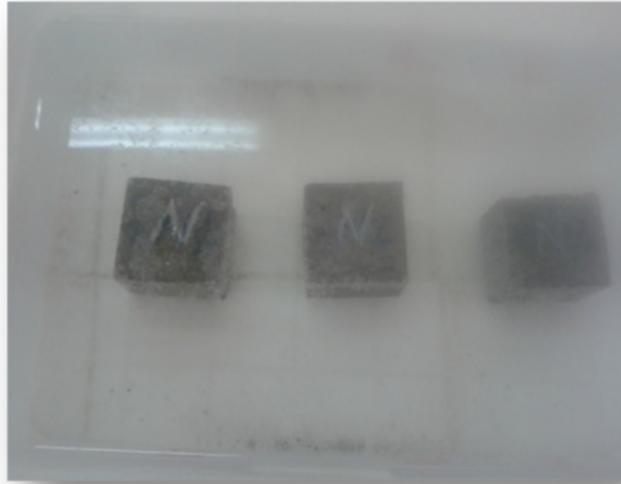


Figure III.18 : Conservation dans le milieu neutre.

Après 6h, 18h, 24h, 3j, 7j, 14j, 21j, 28j, mesurer la masse et les dimensions de ces cubes à l'aide d'un pied à coulisse



Figure III.19 : Mesure de la masse et les dimensions des cubes.

- A chaque mesure prélever un échantillon de la solution pour la mesure du PH et la conductivité électrique.



Figure III.20 : Prélèvement des solutions.

III.1.4.2. Attaque des sulfates:

Des quantités importantes de sulfates dans le sol ou dans l'eau peuvent attaquer et détruire le béton qui n'est pas conçu pour ce genre d'exposition. Les sulfates comme par exemple le sulfate de calcium, le sulfate de sodium et le sulfate de magnésium peuvent attaquer le béton en réagissant avec les produits d'hydratation de la pâte de ciment durcie. Ces réactions peuvent produire suffisamment de pression pour altérer la pâte de ciment, ce qui provoque la désintégration du béton (perte de cohésion de la pâte et perte de résistance).

✓ Préparation de la solution :

Pour la préparation de la solution, on a besoin :

- 2L de l'eau distillée.
- 100 g de sulfate de sodium Na_2SO_4 (5% du volume d'eau).



Figure III.21: Sulfate de sodium Na_2SO_4 .

Agiter le mélange jusqu'à ce que les sulfates de sodium soit complètement dissolu.



Figure III.22: Agitation de la solution de sulfate de sodium.

✓ **Conduite de l'essai :**

C'est la même procédure que celle de l'eau distillée, mais au lieu de conserver dans ce milieu, on conserve dans la solution préparée, et mesurer la masse et les dimensions à chaque fois.

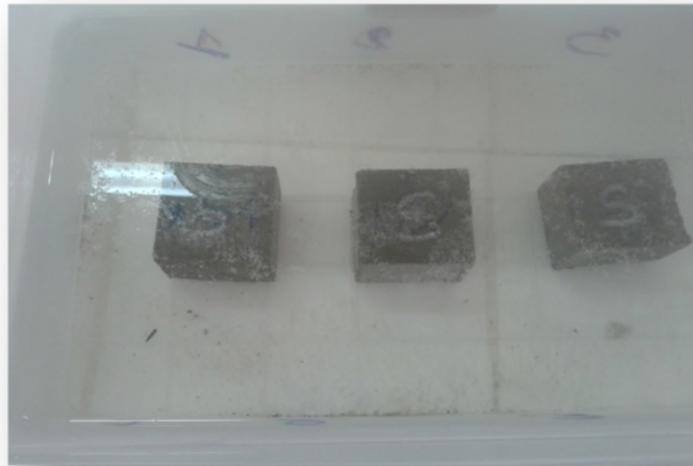


Figure III.23: Conservation dans un milieu sulfaté.

III.1.4.3. Attaque des chlorures:

Indépendamment de leurs effets nocifs sur les aciers, les chlorures peuvent être d'origine du liant lorsqu'ils sont en proportion élevés

Les chlorures s'introduisent dans le béton, soit au gâchage à partir des constituants de base lors de la confection, soit plus tardivement si l'ouvrage est exposé à des embruns marins ou à des sels fondants.

✓ Préparation de la solution :

Pour la préparation de la solution, on a besoin :

- 2L de l'eau distillée.
- 100 ml de l'acide hydrochlorique HCl (5% du volume d'eau).

Il faut mettre d'abord l'eau distillée, puis ajouter l'acide.



Figure III.24: Acide hydrochlorique HCl.

✓ **Conduite de l'essai :**

La même procédure que les autres milieux.



Figure III.25 : Conservation dans un milieu acide.

✓ **Expression des résultats :**

Les résultats en fonction de l'âge sont récapitulé aux tableaux de l'annexe C.



Figure III.26: Résultats des cubes conservés dans différents milieu à 28 jours.

III.4.4.4. Mesure de pH :

Est un paramètre servant de définir l'acidité d'une solution. L'échelle de pH est de 0 à 14 :

- pH est égal à 7, la solution est neutre.
- pH est inférieur à 7, la solution est acide.
- pH est supérieur à 7, la solution est basique.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau de l'annexe C, et schématisé dans le chapitre IV.

III.4.4.5. Mesure de la conductivité électrique :

La conductivité est la propriété que possède une eau pour favoriser le passage d'un courant électrique, elle fournit une indication précise de la teneur en sels dissous (salinité de l'eau). La conductivité s'exprime en micro siemens par centimètre, la mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau. [5]

Les mesures sont récapitulés dans le tableau de l'annexe C.



Figure III.27 : Appareil de mesure de PH et la conductivité.

III.4.4.6. Résistance à la compression :

Après avoir conservé les cubes $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ dans différents milieux à 28 jours, on procède à l'essai de résistance à la compression à l'aide d'une presse hydraulique.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau de l'annexe C.

Conclusion :

Une fois les essais et les expérimentations terminées, on exposera les résultats et les discussions de ces résultats dans le chapitre suivant.

Introduction :

Le présent chapitre sera consacré à la présentation et à l'interprétation de l'ensemble des résultats et conclusions obtenues à partir des essais effectués sur les mortiers et bétons.

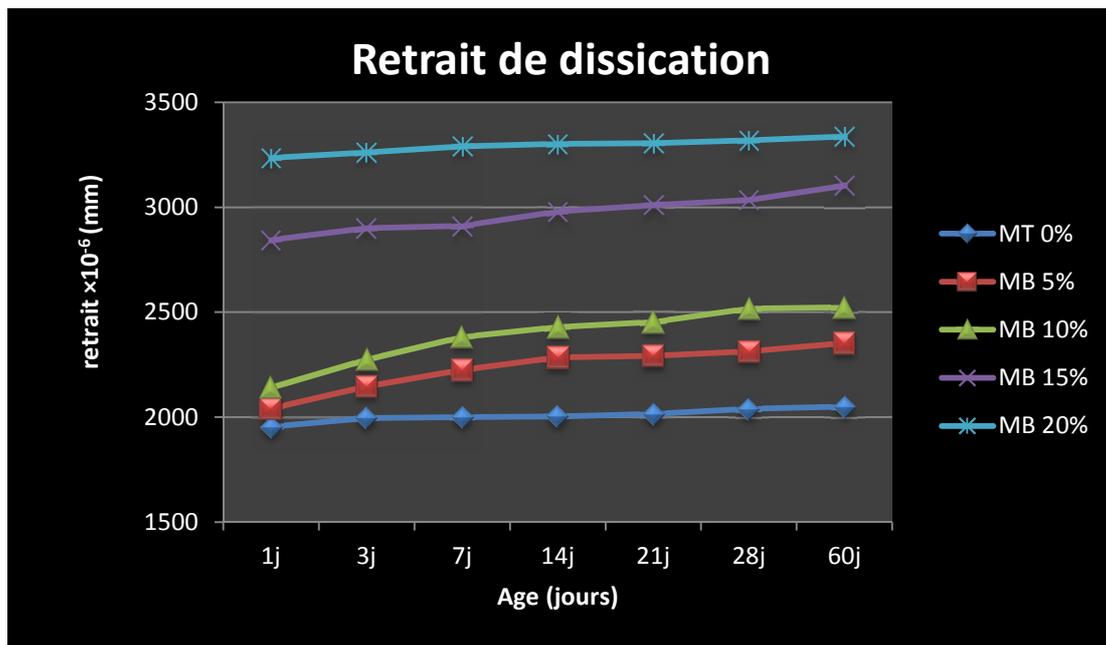
IV.1. Résultats et interprétation des essais sur les mortiers :**IV.1.1. Mesure de retrait et gonflement :****IV.1.1.1. Retrait de dessiccation :**

Figure IV.1 : Variation de retrait.

On sait que la réaction d'hydratation s'accompagne d'une réduction de volume, appelée contraction. L'eau qui s'évapore d'un mortier conservé à l'air libre provoque du retrait, qui est la conséquence de la perte d'eau libre, lorsque cette eau se retire du matériau, une contraction se produit automatiquement.

D'après le graphe, on peut remarquer que toutes les courbes ont presque la même allure.

Les résultats présentés sur la figure IV.1 montrent un comportement de contraction des éprouvettes à différents âges et à différents pourcentages de boue et une évolution de retrait en fonction du temps (1j, 3j, 7j, 14j, 21j, 28j) et ça par évaporation de l'eau emprisonnée dans les mortiers.

Tout foie on constate que le retrait croît proportionnellement avec l'ajout de boue (argile) qui est responsable de la contraction des mortiers.

✓ Variation de la masse des éprouvettes :

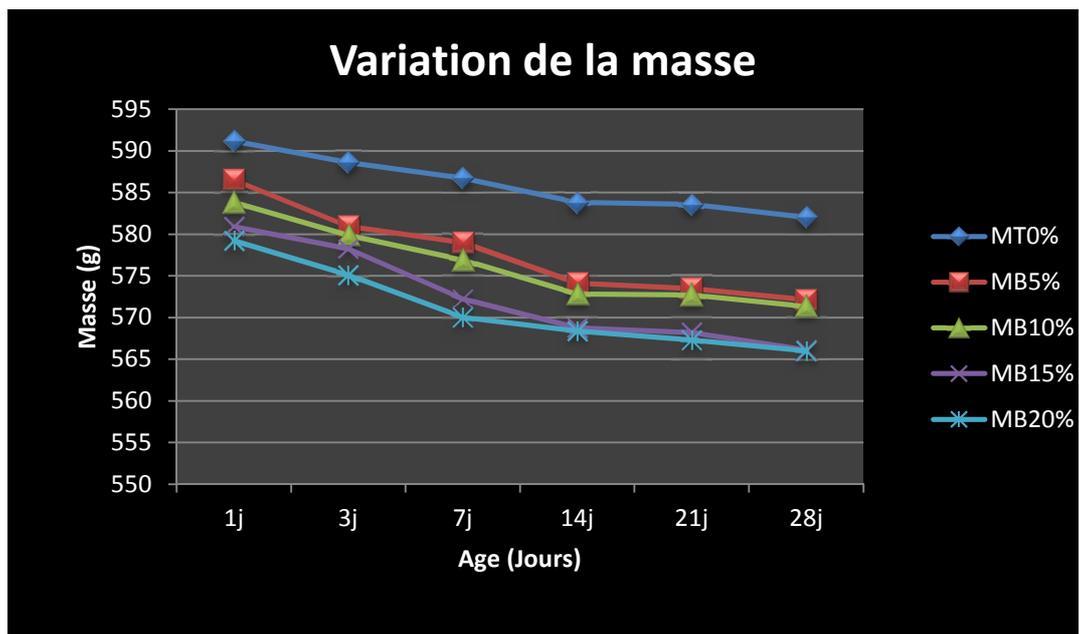


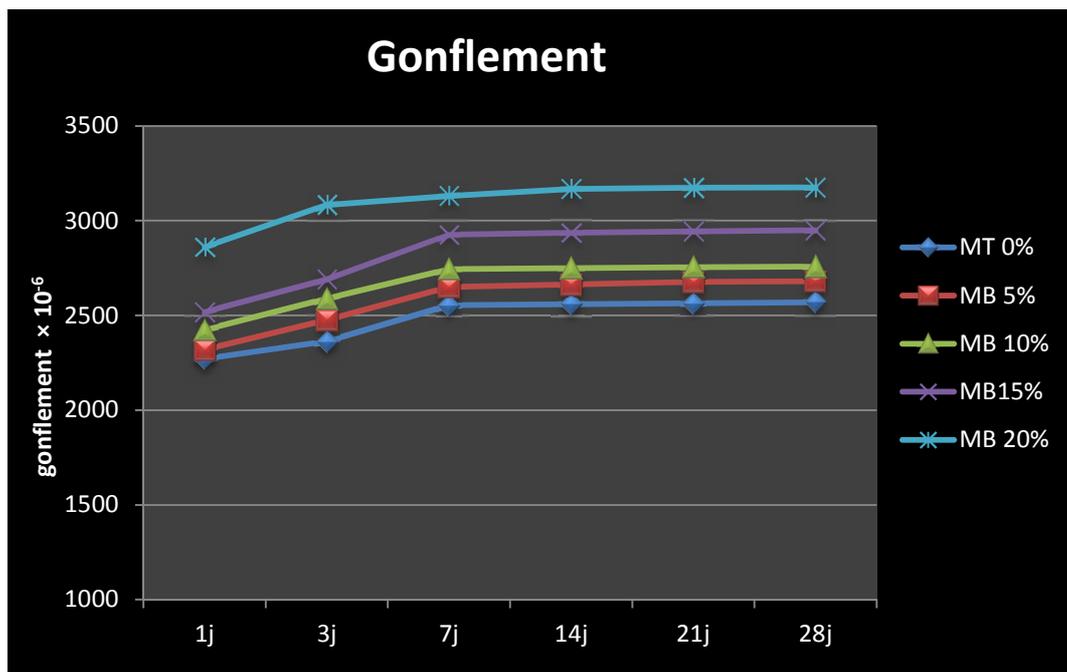
Figure IV.2 : Variation de la masse à l'air libre.

La figure IV.2 présente la variation de la masse des mortiers conservés à l'air libre, on constate que le retrait s'accompagne par une diminution de la masse, un phénomène qui peut être expliqué par l'évaporation de l'eau.

On remarque que :

- La masse diminue en fonction de la substitution du ciment et
- Le mortier témoin a une masse importante par rapport aux mortiers à multiple teneur en boue (5%, 10%, 15%, 20%) ce qui s'explique par la différence entre la masse volumique du ciment et celle de la boue.

IV.1.1.2. Gonflement :

**Figure IV.3 :** Variation du gonflement.

Avec l'emploi de boue de dragage, on observe une augmentation du gonflement en fonction du temps et de la teneur en boue ce qui est dû à cette boue qui contient des particules argileuses responsables de l'absorption de l'eau.

✓ Variation de la masse des éprouvettes :

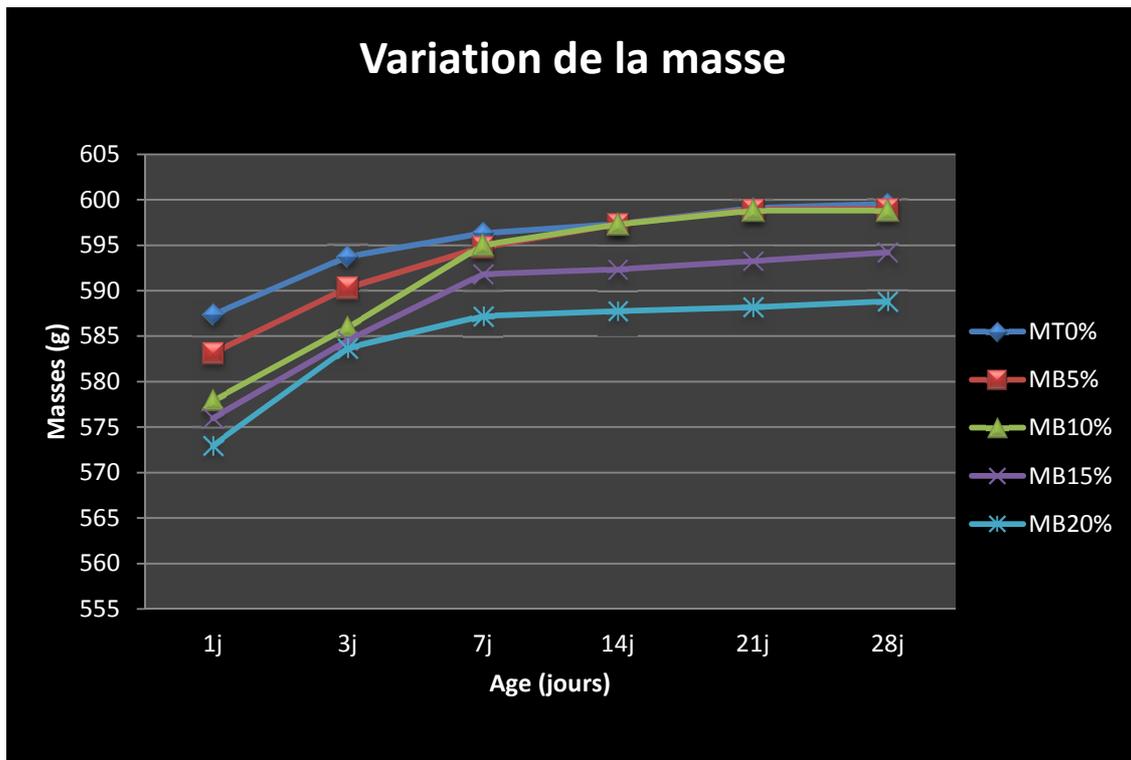


Figure IV.4 : Variation de la masse dans l'eau.

La figure montre que la masse des mortiers conservés dans l'eau augmente en fonction du temps jusqu'à l'âge de 21 jour où nous remarquons une stabilisation de la masse qui est dû à l'hydratation complète du ciment et à l'absorption de l'eau par les sédiments (boue).

On remarque que les mortiers à 0% de boue ont un gain de masse important, ce gain diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de boue qui a une faible masse volumique par rapport à celle du ciment.

IV.1.2. Comportement mécanique (résistance à la compression et à la flexion) :

Les résultats obtenus sont récapitulés dans les tableaux de l'annexe B, et représentés sur la figure suivante :

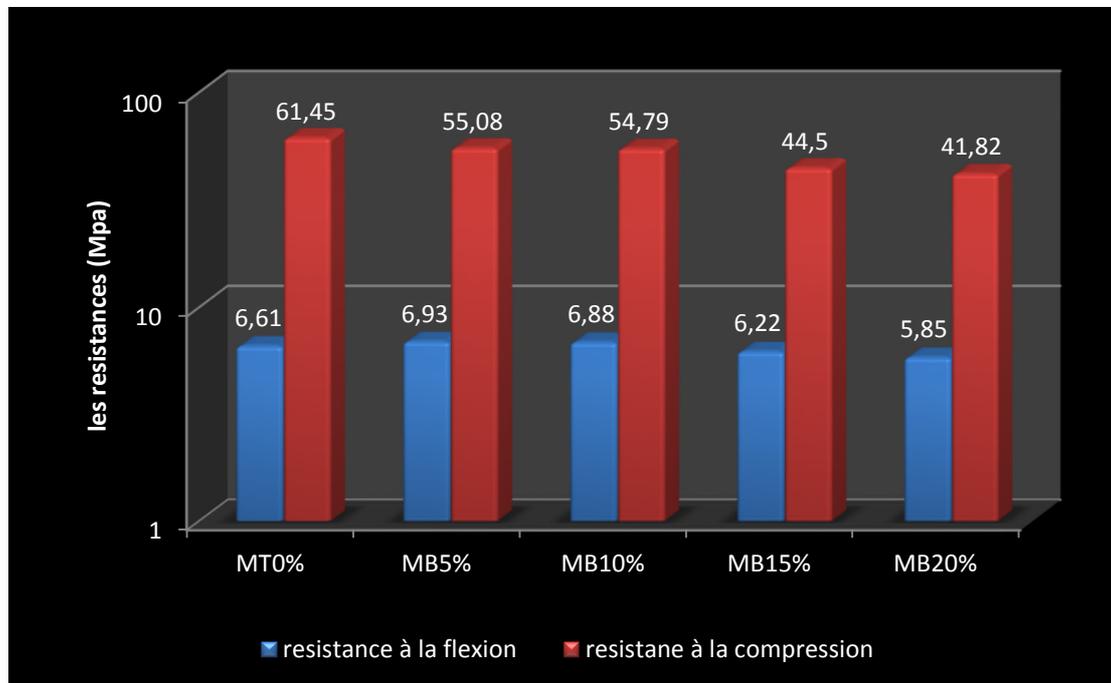


Figure IV.5 : Les résistances mécaniques des mortiers à 28 jours.

A partir des résultats des graphiques présentant l'évolution de la résistance à la compression et à la flexion des mortiers confectionnés avec différents pourcentages de boue en substitution du ciment, on remarque que :

Les résistances à la compression diminuent en fonction de l'augmentation du pourcentage de la boue et à la diminution du pourcentage de ciment car la résistance des mortiers est dû essentiellement au ciment.

IV.2. Résultats et interprétation des essais sur les bétons :

IV.2.1. Affaissement au cône d'Abrams :

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau de l'annexe A, et schématisés sur la figure suivante :

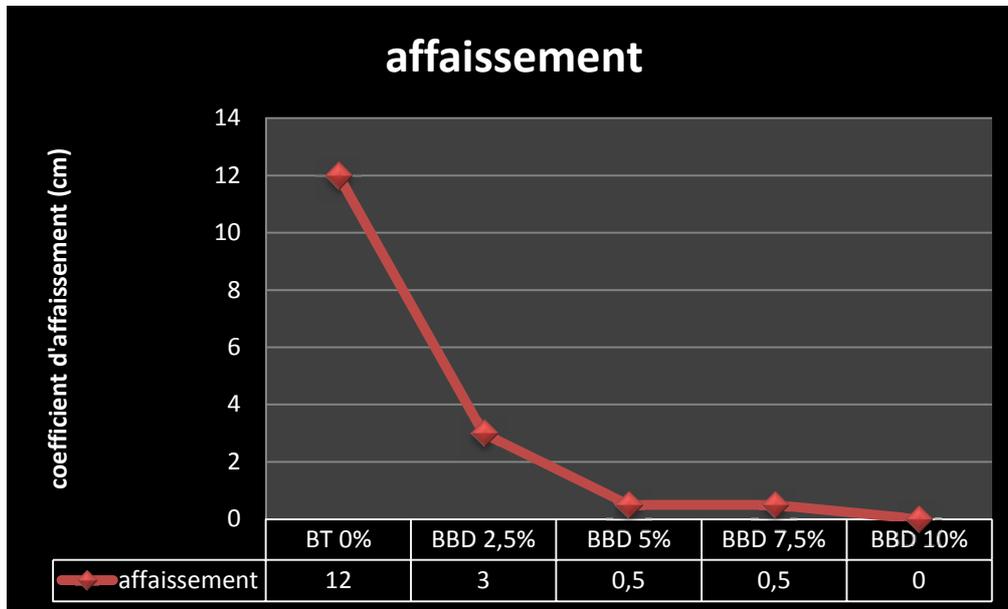


Figure IV.6: Variation de l'affaissement des différentes séries du béton.

Avec l'incorporation de boue à différents pourcentages, on constate que l'affaissement diminue de manière remarquable, phénomène expliqué par l'absorption de l'eau par la boue, donc on peut déduire que le béton devient ferme en fonction de l'ajout de la boue ; tel que :

- Le béton témoin (0% d'ajout) est plastique.
- Le béton avec 2,5% ; 5% ; 7,5% et 10% d'ajouts est un béton ferme.

IV.2.2. Mesure de l'air occlus dans le béton (aéromètre) :

Les résultats obtenus sont dans le tableau de l'annexe A, et représentés sur la figure suivante :

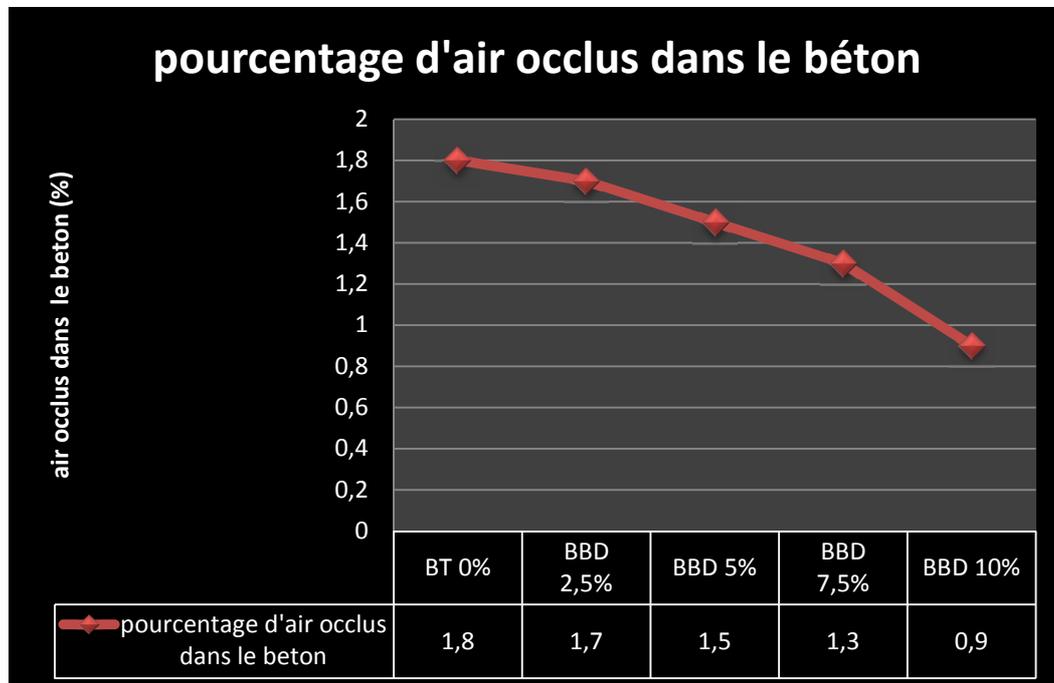


Figure IV.7 : Pourcentage d'air occlus dans le béton.

L'ajout de boue de dragage finement broyée dans le béton fait obturer les vides existants entre les grains de béton, donc la teneur en air est diminuée en augmentant le pourcentage de la boue.

IV.2.3. Les masses volumiques :

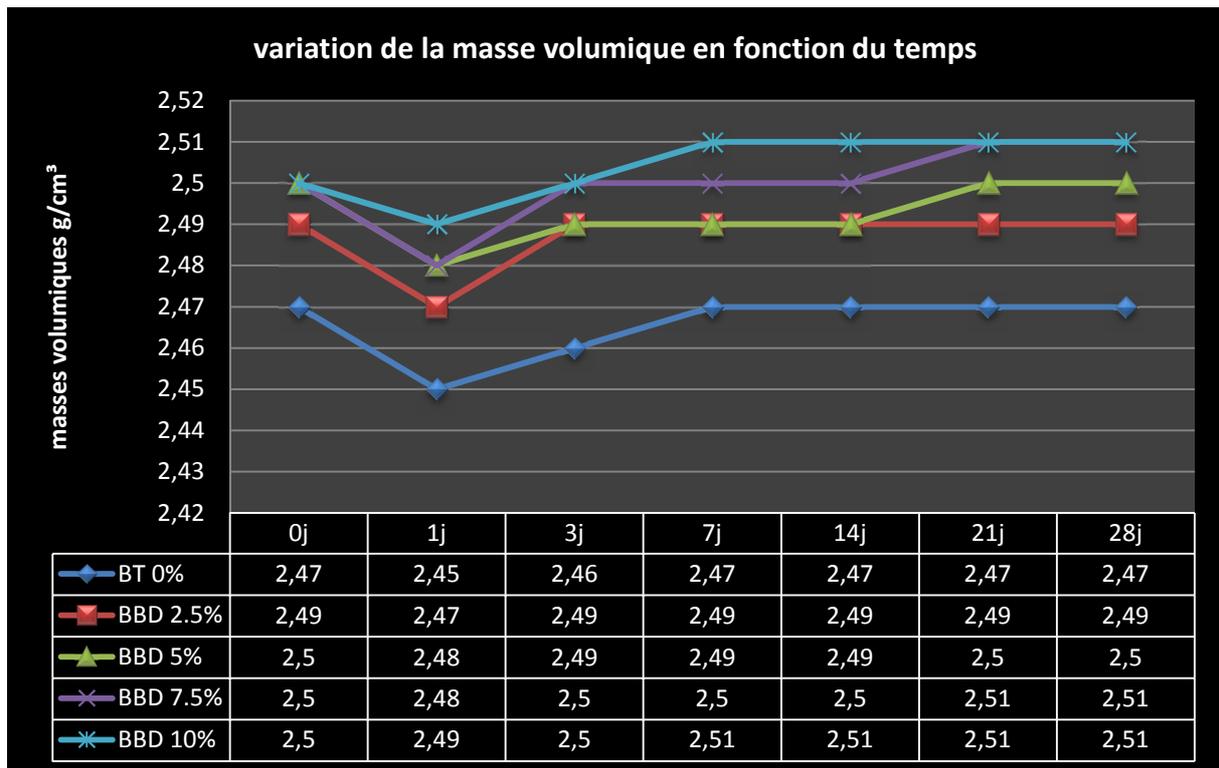


Figure IV.8 : Variation des masses volumiques.

On note une diminution de masse volumique du jour de la confection au jour du démoulage (jour 1) cela est dû à l'évaporation de l'eau des éprouvettes exposées à l'air libre.

Après conservation des éprouvettes dans l'eau, on constate une forte augmentation des masses volumiques des bétons du jour 1 au jour 3 qui est dû à l'hydratation du ciment.

A partir du 21^{ème} jour les masses volumiques des éprouvettes à 0% ; 2,5 % ; 5% ; 7,5%, 10% sont saturées ce qui traduit la stabilisation de ces masses.

Les masses les plus importantes sont celle de 10% d'ajout, un résultat logique puisque on a ajouté une masse importante de boue.

IV.2.4. La résistance à la compression :

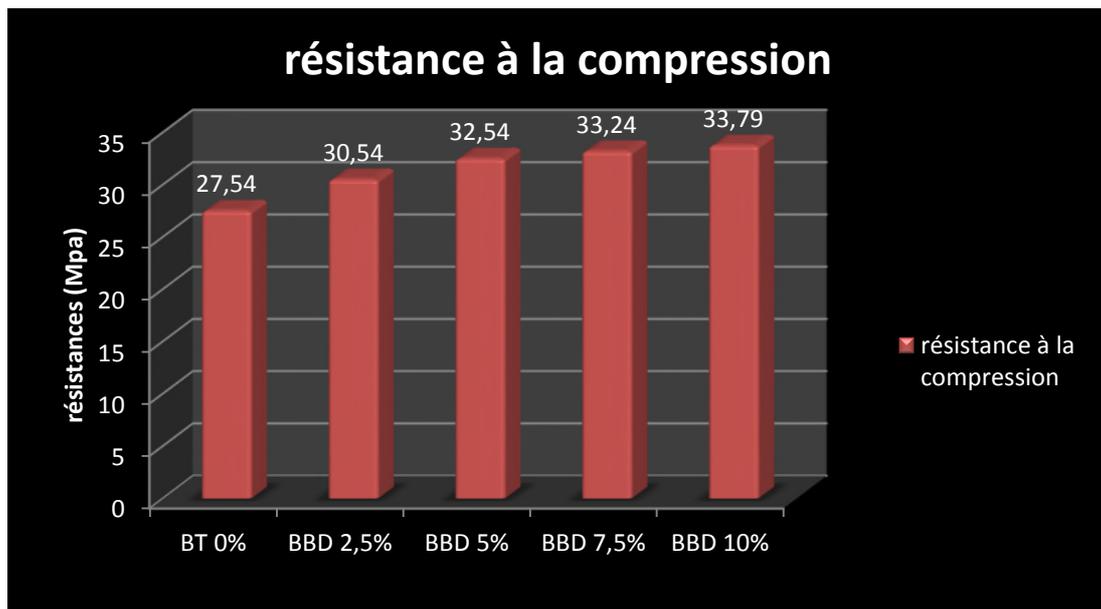


Figure IV.9 : La résistance à la compression à 28 jours.

On remarque une augmentation de la résistance par rapport au béton témoin qui a une résistance > 25 Mpa, et cela revient à l'ajout de boue qui peut s'expliquer par le fait que l'accroissement du dosage de la boue rend le béton plus compact et la résistance à la compression plus importante.

IV.3. Résultats et interprétation des essais sur la durabilité :

IV.3.1. Variation de la masse :

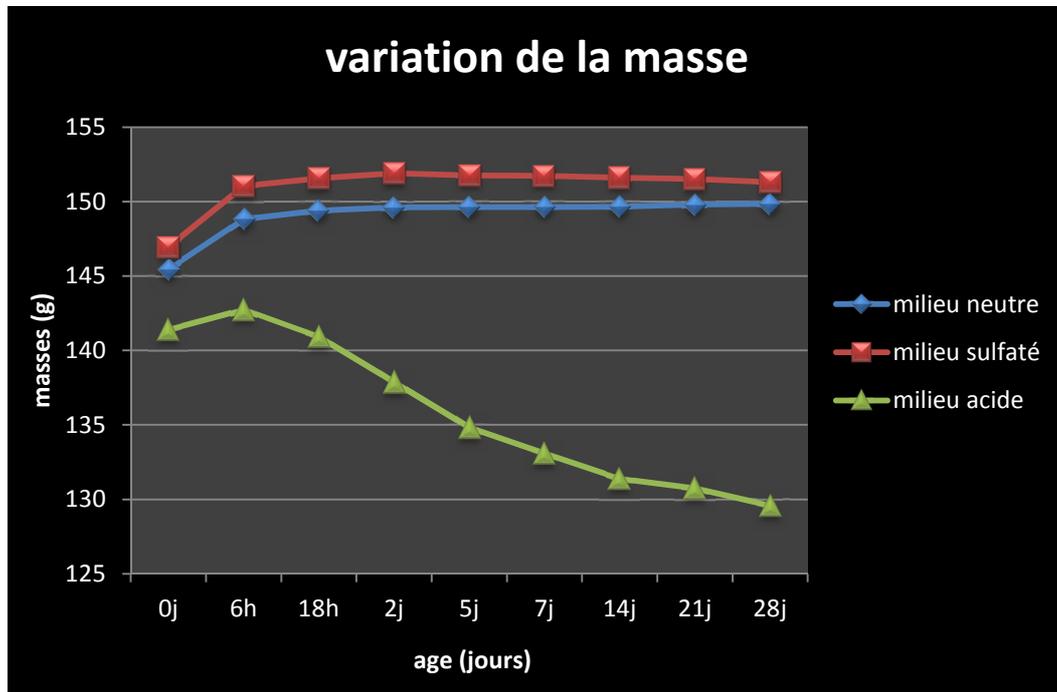


Figure IV.10 : Variation de la masse en fonction du temps.

✓ Milieu neutre :

On constate que la masse des cubes conservés dans l'eau distillée augmente ce qui s'explique par l'absorption de l'eau (hydratation du ciment) et s'est stabilisée à partir du 21 jour.

✓ Milieu sulfaté :

On remarque une augmentation de la masse des cubes conservés dans le milieu sulfaté due à l'absorption de la solution du jour 0 au jour 2 au-delà on note une faible diminution en fonction de l'âge due à l'attaque des sulfates au mortier et à la dissipation de la matière.

✓ Milieu acide :

On note une légère augmentation de la masse après 6 heures de conservation des cubes dans le milieu acide due à l'absorption de la solution, au-delà on remarque une forte diminution de la masse due à l'attaque des chlorures aux carbonates et à la matière organique existante dans la boue ce qui induit à une forte perte de masse.

IV.3.2. Mesure du Ph :

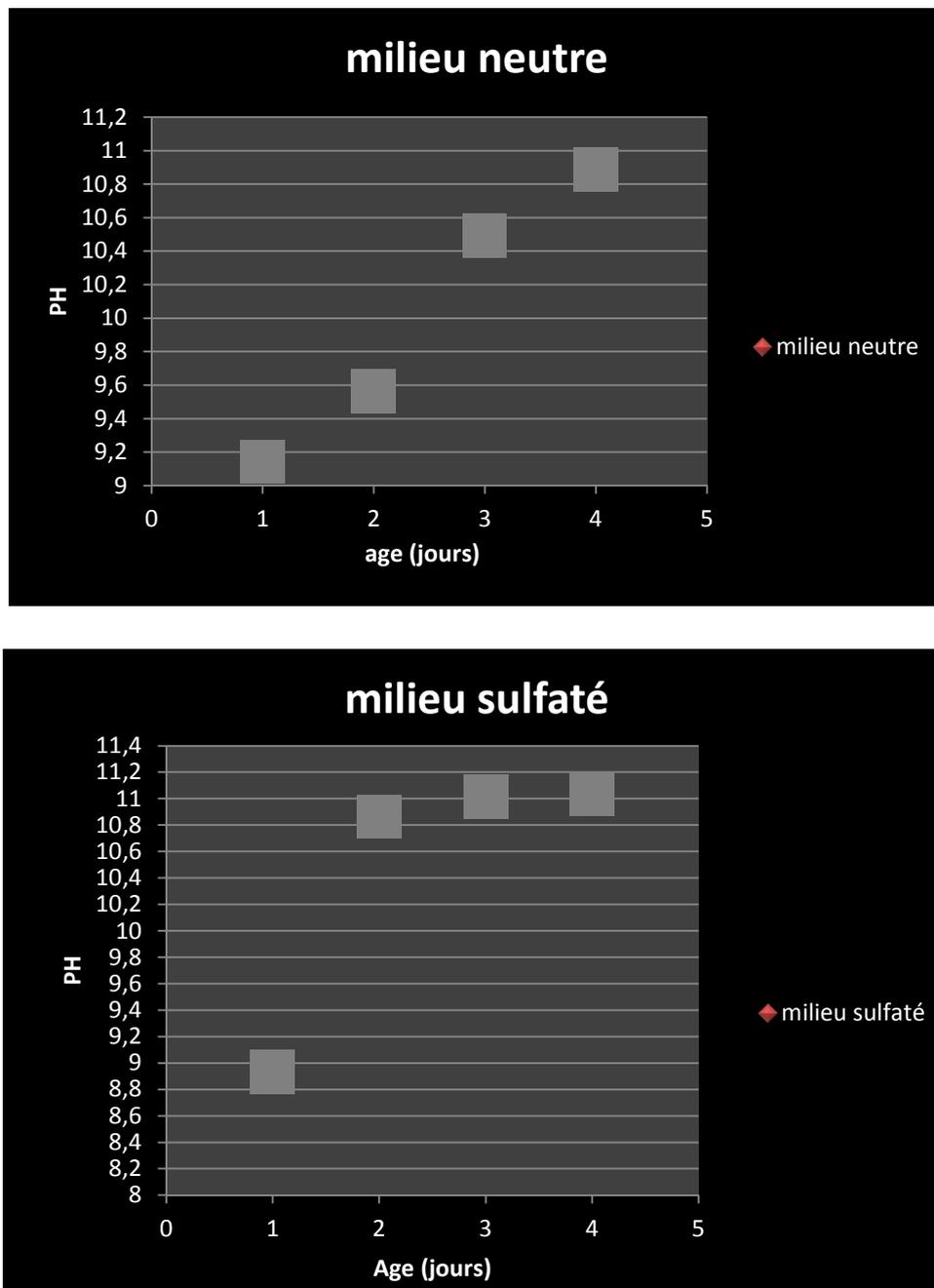


Figure IV.11 : Evolution du Ph dans les milieux neutre et sulfaté.

D'après les deux figures on remarque que PH est basique > 7 , il augmente en fonction du temps ce qui s'explique par le relargage et la présence de OH^- dans la solution de conservation.

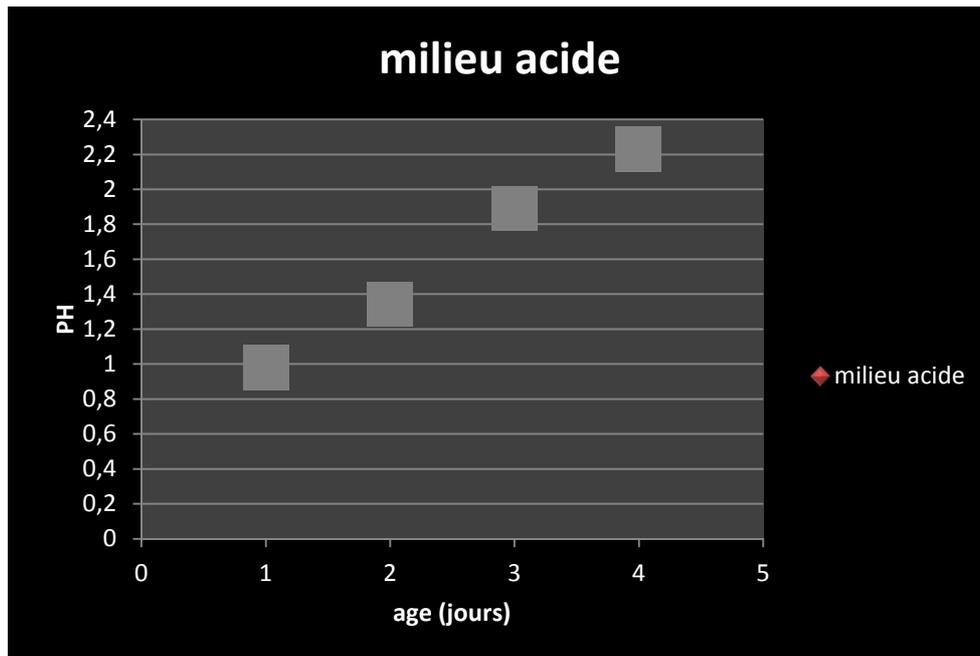


Figure IV.12 : Evolution du Ph (milieu acide).

La figure ci-dessus montre que le PH est acide < 7 , il augmente en fonction du temps par le relargage de l' OH^- mais il reste acide.

IV.3.3. Mesure de conductivité électrique:

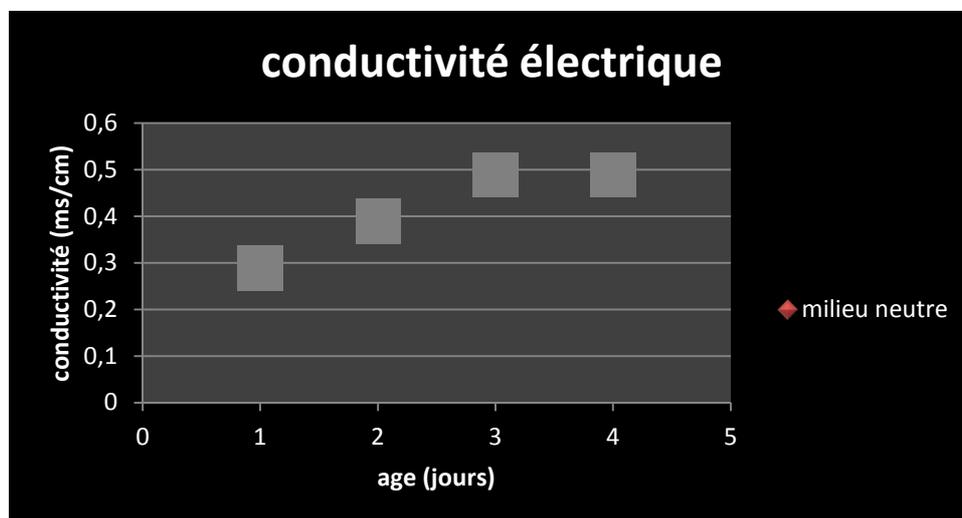


Figure IV.13 : Mesure de la conductivité électrique (milieu neutre).

D'après la figure on remarque un accroissement de la conductivité électrique, cette augmentation est due à la présence d'ions conducteurs.

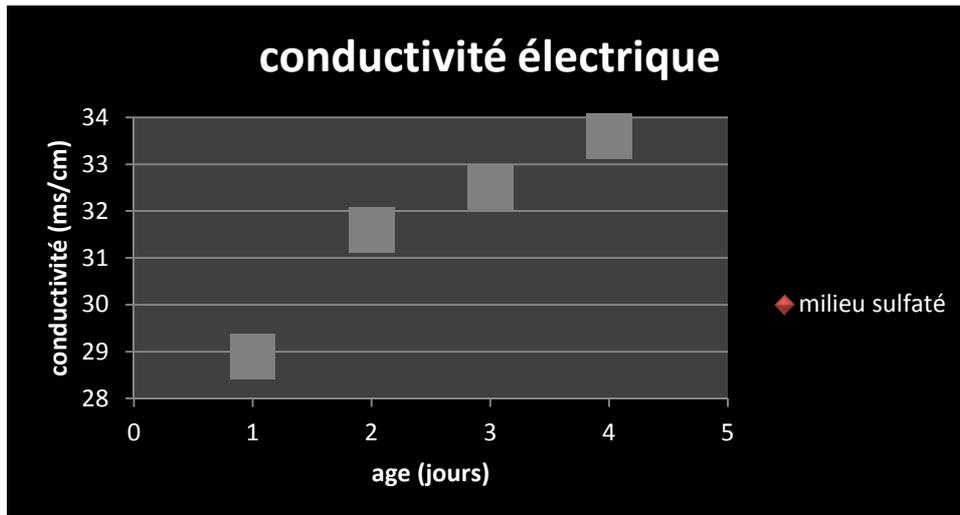


Figure IV.14 : Mesure de la conductivité électrique (milieu sulfaté).

D'après la figure on constate une augmentation de la conductivité électrique due à la présence d'ions conducteurs.

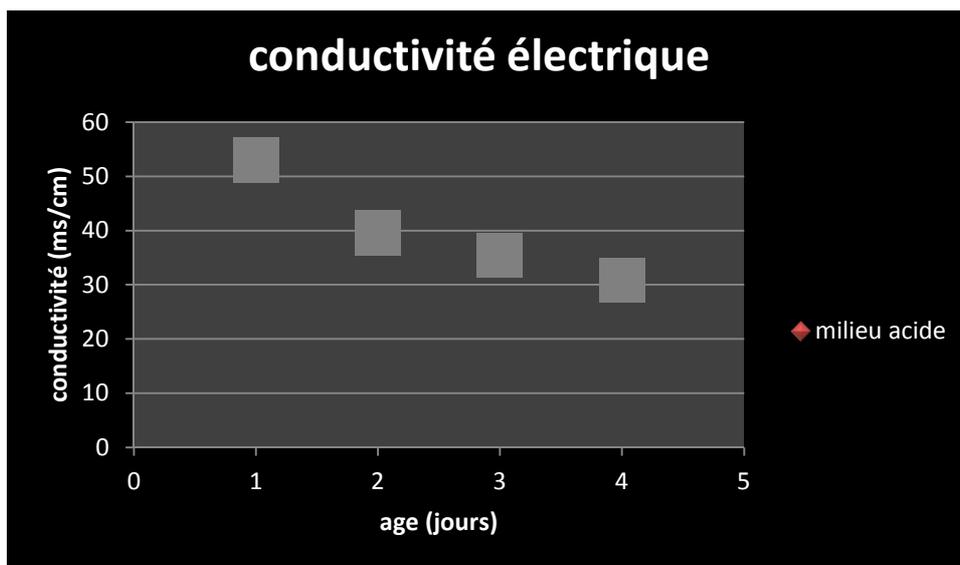


Figure IV.15 : Mesure de la conductivité électrique (milieu acide).

D'après la figure on peut conclure que la conductivité électrique tend à diminuer, le relargage diminue d'où les ions on trouvé une stabilité.

On remarque la présence d'une quantité considérable d'ions conducteurs dans le milieu acide qui varie de l'ordre de : 53,9 à 31,8 ms/cm.

On note la présence de moins d'ions conducteurs dans le milieu sulfaté avec une variation de l'ordre : 29 à 33,7 ms/cm.

Par contre cette quantité est faible dans le milieu neutre, elle varie ainsi de l'ordre de : 0,3 à 0,5 ms/cm.

IV.3.4. La résistance à la compression :

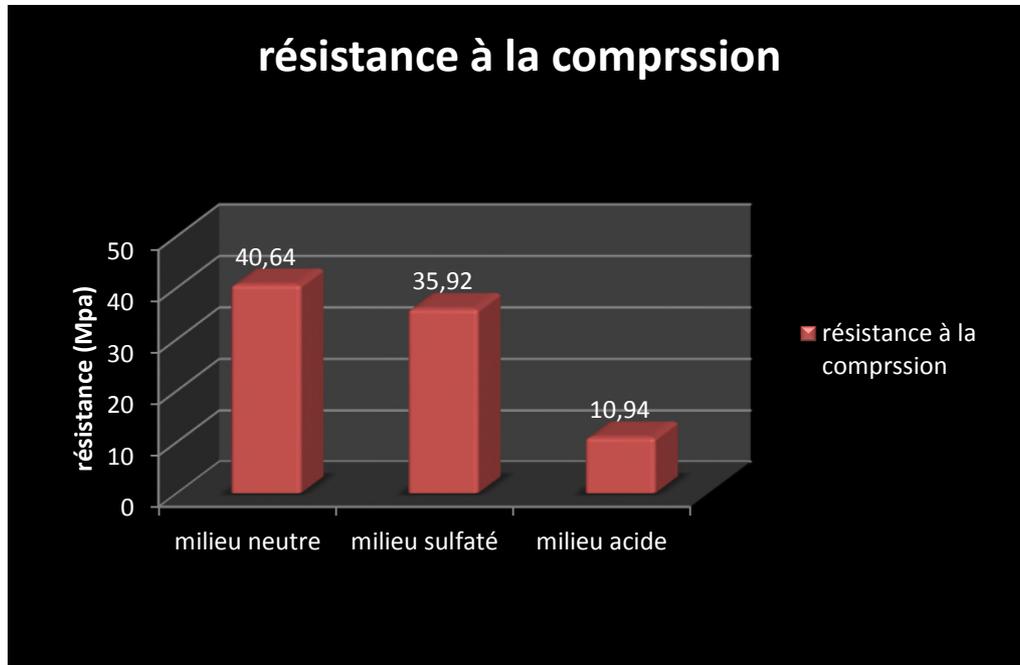


Figure IV.16 : La résistance à la compression des cubes.

✓ Interprétation des résultats :

On remarque que les mortiers conservés dans le milieu neutre ont donné une meilleure résistance à la compression.

On note une faible diminution de résistance de ceux conservés dans le milieu sulfaté car les mortiers n'ont pas été agressés par les sulfates.

On constate une forte diminution de la résistance pour les mortiers conservés dans le milieu acide due principalement à l'attaque des chlorures.

CONCLUSION GENERALE

Le dragage de boue revêt une importance primordiale pour le maintien de la navigation dans les ports, les chenaux d'accès et les canaux. Le transport de marchandises par voie navigable est le moyen de transport le plus respectueux de l'environnement comparé au transport routier, aérien ou ferroviaire. C'est pourquoi, suite aux recommandations liées au développement durable, la valorisation de ce secteur devient de plus en plus indispensable. D'où Les volumes de sédiments dragués annuellement dans le monde ne fait qu'augmenter. En raison de ces quantités considérables, la valorisation des boues de dragage demeure un véritable enjeu.

Plusieurs études et travaux de recherches ont été et sont toujours menées afin de faire de ce déchet un matériau de valeur. Pour l'instant, la valorisation agricole reste la voie privilégiée de recyclage des boues, en effet, celles-ci agissent comme un catalyseur de la biologie du sol et non pas seulement comme un engrais au sens strict du terme. Concernant le domaine du génie civil ; les travaux de construction ne cessent de se développer d'où l'utilisation de ces boues est devenu possible, et ça dans différentes opérations : remblaiement routier, support de construction et dans la fabrication de matériau construction tel que : la brique, le sable, les gravats et le ciment...

Ce travail de recherche rentre dans le cadre de la valorisation des boues de dragage dans les mortiers et bétons. Dans ce contexte, il est aisé d'entrevoir l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter l'utilisation des cette boue.

L'étude menée montre la faisabilité d'utilisation de boue de dragage dans les mortiers et bétons. Autrement dit la substitution de ciment dans les mortiers par ce matériau, et comme ajout dans les bétons classiques est envisageable pour certaines applications du domaine de la construction.

A partir de cette étude et sur la base des résultats des essais effectués sur les mortiers et bétons contenant la boue de dragage, on peut conclure ce qui suit:

- Le retrait et gonflement croient proportionnellement avec l'ajout de boue en fonction de l'âge, mais ils restent acceptables.
- Après le test de résistance effectué sur les mortiers à différentes teneur en boue, on a pu constater que la formulation à 5% de boue présente une bonne résistance à la compression (très proche de celle du témoin) et une meilleure résistance à la flexion.

CONCLUSION GENERALE

- Les résistances à la compression des bétons augmentent avec l'ajout de la boue (ceux avec 10% présentent une meilleure résistance).
- Les mortiers résistent mieux dans le milieu sulfaté.
- Il y a eu une dégradation visible (importante) des mortiers dans le milieu contenant les chlorures.

Nous jugeons utile d'entreprendre des travaux de recherche qui permettront d'exploiter sérieusement la vase et sédiments de dragages. Cette exploitation ne sera rentable que si elle l'est à vaste échelle, ce qui permettrait d'obtenir des bétons économiques.

Enfin nous proposons comme perspectives de recherche d'approfondir ce travail, en étudiant le comportement des bétons à base de boue de dragage à long terme vis à vis de la durabilité. En parallèle un test de lixiviation sur monolithe (TLM) doit être entrepris afin de conforter cette étude et faire l'analyse de la S.A.A à des solutions prélevées lors de la conservation des mortiers dans les milieux agressifs pour déterminer la nature des espèces relarguées. Enfin, étudier la résistance à la compression des bétons avec ajout de boue pour des pourcentages supérieurs à 10%.

Référence bibliographique

- [1] R.Dupain, J.C.Saint-Arroman, *Granulats, sols, ciments et bétons*, 4eme édition, Paris, 2009.
- [2] M.N.Gueye, *Contribution à l'élaboration d'une méthode de formulation des bétons de coquillage*, Projet de fin d'études, Université cheikh anta diop, Dakar, 2005.
- [3] M.Katia, F.Razika, *Etude caractéristiques et la durabilité des bétons et mortiers a base de fibres métalliques*, Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia, 2014.
- [4] Le monde de génie civil, *Granulats-généralité*, Septembre 2013.
- [5] I.Djamel, K.Samir, *Valorisation des déchets industriels (Boues d'usinage) dans les bétons et mortiers*, Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia, 2015.
- [6] L.C.A , *Le ciment et ses applications*, Cours bétons, 2006.
- [7] O.Mehena, *Indicateur de durabilité du béton dans le contexte Algérien*, Mémoire de magistère, Université m'hamed bougara, Boumerdes, 2009.
- [8] Laurence de C, *Etude de phytotoxicite des boues de dragage*, Travail de fin d'études, Université libre de Bruxelles, 2003.
- [9] *Boues de curage et de dragage, matière de vidange*, Guide régional de la gestion des déchets, Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- [10] Anne.B, *Impact sur les milieux aquatiques des sédiments de dragage gérés à terre*, Rapport d'étude, n° DRC-08-95306-16457A, 30 Juin 2009.
- [11] M.Mohamed, *Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil*, Thèse, Université de Lille 1, 2010.
- [12] M.Ahmed, *Valorisation des boues de dragage–application : Port autonome de Dunkerque*, Mémoire, Université d'Artois, 2002.
- [13] CCI Paris, *Les installations de stockage de déchets non dangereux-ISDND*, Fiche pratique, 2015, Ile de France.

- [14] G.Charlotte, P.Florine, A.Isabelle, *Plans de pluriannuel des opérations de dragage*, A65151/D, Décembre.
- [15] P.Jacques, Conditionnement et valorisation des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines, Bull. liaison Labo P. et ch., Réf.2798, 1993.
- [16] G.Didier, *Guide pour la gestion des opérations de dragage*, Décembre 2005, FFPP.
- [17] C.Laurent, N.Sylvie, Valorisation agronomique des sédiments de dragage de canaux : première expérimentation agricole en Saône et Loire, Dupray.
- [18] Environnement et changement climatique Canada, Erosion et sédimentation, Relevés hydrométrique Canada, 07 Janvier 2016.
- [19] Direction opérationnelles de la Boad, Ports et installations portuaires, Boad.
- [20] R.Pierson, J.Bronckart, *Boues de dragage et boues d'épuration : Comparaison multicritère et étude de la faisabilité technique d'une filière de valorisation*, Revue scientifique des ingénieurs industriels, n° 27, 2013, Bruxelles.
- [21] Z.Abdeljalil, A.NorEdine, B.Mahfoud, *Etude de formulations d'un béton de sable à base de sable de dragage*, Tunisie, 2009.
- [22] R.Dominique, *L'échantillonnage et prélèvement à l'analyse*, Éditions de l'ORSTOM, Paris, 1997.
- [23] B.Aida, N.Nadjat, *Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux*, Mémoire de fin d'études, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2004.
- [24] S.N.L. *Sable normalisé CEN, certifié conforme EN 196-1 - Sable normalisé ISO, conforme ISO 679*. France. 2009.
- [25] B.Abdelhak, KH.Abdeladim, *Etude de l'influence de la silice sur mortiers*, Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia, 2004.
- [26] A.Hocine, *Etude des bétons à base des sables de dune*, Mémoire de magister, Université Mohamed Kheider de Biskra, 2009.

Annexe A

(Les Bétons)

✓ Les valeurs des masses volumiques

Les valeurs de masse volumique de 0j					
Série des bétons	V (cm ³)	M moule (g)	Mt (g)	Mt – M moule (g)	(Mt – M moule)/V (g/ cm ³)
BT (0%)	6433.98	9710	25610	15900	2.47
BBD (2.5%)	6433.98	9690	25713	16023	2.49
BBD (5%)	6433.98	9440	25510	16070	2.50
BBD (7.5%)	6433.98	9550	25620	16070	2.50
BBD (10%)	6433.98	9920	26025	16105	2.50

Les valeurs de masse volumique de 1j			
Série des bétons	V (cm ³)	M (g)	M/V (g/ cm ³)
BT (0%)	6433.98	15745	2.45
BBD (2.5%)	6433.98	15912	2.47
BBD (5%)	6433.98	15970	2.48
BBD (7.5%)	6433.98	15975	2.48
BBD (10%)	6433.98	16000	2.49

Les valeurs de masse volumique de 3j			
Série des bétons	V (cm ³)	M (g)	M/V (g/ cm ³)
BT (0%)	6433.98	15800	2.46
BBD (2.5%)	6433.98	16025	2.49
BBD (5%)	6433.98	16050	2.49
BBD (7.5%)	6433.98	16055	2.50
BBD (10%)	6433.98	16110	2.50

Les valeurs de masse volumique de 7j			
Série des bétons	V (cm³)	M (g)	M/V (g/ cm³)
BT (0%)	6433.98	15870	2.47
BBD (2.5%)	6433.98	16028	2.49
BBD (5%)	6433.98	16050	2.49
BBD (7.5%)	6433.98	16085	2.50
BBD (10%)	6433.98	16155	2.51

Les valeurs de masse volumique de 14j			
Série des bétons	V (cm³)	M (g)	M/V (g/ cm³)
BT (0%)	6433.98	15875	2.47
BBD (2.5%)	6433.98	16030	2.49
BBD (5%)	6433.98	16050	2.49
BBD (7.5%)	6433.98	16120	2.50
BBD (10%)	6433.98	16160	2.51

Les valeurs de masse volumique de 21j			
Série des bétons	V (cm³)	M (g)	M/V (g/ cm³)
BT (0%)	6433.98	15880	2.47
BBD (2.5%)	6433.98	16037	2.49
BBD (5%)	6433.98	16065	2.50
BBD (7.5%)	6433.98	16125	2.51
BBD (10%)	6433.98	16165	2.51

Les valeurs de masse volumique de 28j			
Série des bétons	V (cm³)	M (g)	M/V (g/ cm³)
BT (0%)	6433.98	15903	2.47
BBD (2.5%)	6433.98	16052	2.49
BBD (5%)	6433.98	16077	2.50
BBD (7.5%)	6433.98	16125	2.51
BBD (10%)	6433.98	16165	2.51

Les valeurs moyennes des masses de béton (g)							
Séries de béton	0 jour	1 jour	3 jours	7 jours	14 jours	21 jours	28 jours
BT (0%)	15895	15743	15877	15882	15890	15897	15903
BBD (2.5%)	16023	15912	16025	16028	16030	16037	16052
BBD (5%)	16070	15970	16050	16050	16050	16065	16077
BBD (7.5%)	16070	15975	16055	16085	16120	16125	16125
BBD (10%)	16105	16000	16110	16155	16160	16165	16165

✓ **Affaissement**

N° série	Coefficient d'affaissement (cm)	consistance
BT (0%)	12	Très plastique
BBD (2.5%)	3	Ferme
BBD (5%)	0.5	Ferme
BBD (7.5%)	0.5	Ferme
BBD (10%)	0	Ferme

✓ **Pourcentage d'air occlus dans le béton**

N° série	Pourcentage d'air occlus dans le béton (%)
BT (0%)	1.8
BBD (2.5%)	2
BBD (5%)	2.2
BBD (7.5%)	2.2
BBD (10%)	1

✓ **La résistance à la compression**

La résistance à la compression à 28 j		
Séries de béton	Rc à 28 jours (Mpa)	Rc moyenne (Mpa)
BT (0%)	27.00	27.54
	24.42	
	31.21	
BBD (2.5%)	27.77	30.54
	27.14	
	36.72	
BBD (5%)	32.45	32.79
	36.95	
	28.98	
BBD (7.5%)	26.96	33.24
	32.05	
	40.71	
BBD (10%)	27.82	33.79
	41.46	
	32.09	

Annexe B

(Mortiers)

✓ Gonflement

séries	Les valeurs de gonflement (10^{-6}) (mm)					
	1j	3j	7j	14j	21j	28j
MT (0%)	2271	2363	2554	2560	2564	2570
MB (5%)	2320	2477	2650	2664	2678	2681
MB (10%)	2424	2590	2745	2749	2755	2758
MB (15%)	2518	2690	2927	2936	2944	2950
MB (20%)	2861	3083	3131	3168	3175	3176

séries	Les valeurs de M (gr)						
	0J	1j	3j	7j	14j	21j	28j
MT (0%)	600	587,37	593,75	596,33	597,34	599,09	599,55
MB (5%)	595	583,16	590,32	594,81	597,31	598,9	599
MB (10%)	603	577,92	585,95	595,02	597,29	598,81	598,81
MB (15%)	590	575,99	584,52	591,82	592,34	593,25	594,2
MB (20%)	598	573,02	583,72	587,24	587,77	588,19	588,83

✓ Retrait

séries	Les valeurs de retrait (10^{-6}) (mm)					
	1j	3j	7j	14j	21j	28j
MT (0%)	1955	1995	2000	2004	2016	2040
MB (5%)	2041	2146	2225	2285	2293	2313
MB (10%)	2140	2274	2382	2430	2453	2518
MB (15%)	2845	2901	2912	2980	3011	3034
MB (20%)	3236	3261	3291	3302	3306	3319

Les valeurs de M (gr)							
séries	0J	1j	3j	7j	14j	21j	28j
MT (0%)	622	591,18	588,61	586,72	583,82	583,58	582,04
MB (5%)	600	574,51	570,97	568,98	565,6	565,47	564,12
MB (10%)	605	583,84	579,88	576,93	572,81	572,70	571,32
MB (15%)	600	579,97	575,41	572,69	568,33	568,18	566,12
MB (20%)	608	586,22	580,12	576,04	572,39	572,30	570,40

✓ **Résistances mécaniques**

Résistances mécaniques à 28 jours		
séries	Résistance à la compression (Mpa)	Résistance à la flexion (Mpa)
MT (0%)	61.45	6.41
MB (5%)	52.01	7.02
MB (10%)	54.79	6.96
MB (15%)	44.50	6.22
MB (20%)	41.82	5.85

Annexe C

(La durabilité)

✓ La variation des masses :

La masse des cubes en fonctions du temps (g)									
milieux	0 jour	6 heures	18 heures	2 jours	5 jours	7jours	14 jours	21 jours	28 jours
Neutre (eau distillé)	145.45	148.83	149.39	149.62	149.63	149.64	149.65	149.80	149.84
Sulfaté (NaSo₄)	146.95	151.06	151.56	151.91	151.75	151.73	151.60	151.52	151.30
Acide (HCl)	141.40	142.76	140.93	137.88	134.82	133.07	131.38	130.75	129.59

✓ Variation des dimensions :

Jour 0	
Milieux	Dimensions (cm ³)
Neutre (eau distillé)	4×4,1×4
Sulfaté (NaSo₄)	4,1×4×4,1
Acide (HCl)	4×4,2×4,1

6 heures	
Milieux	Dimensions (cm ³)
Neutre (eau distillé)	4×4,1×4
Sulfaté (NaSo₄)	4,1×4×4,1
Acide (HCl)	4×4,1×4

18 heures	
Milieu	Dimensions (cm³)
Neutre (eau distillé)	4×4,1×4
Sulfaté (NaSo₄)	4,1×4×4,1
Acide (HCl)	4×4,1×4

Jour 5	
Milieu	Dimensions (cm³)
Neutre (eau distillé)	4×4,1×4
Sulfaté (NaSo₄)	4,1×4×4,1
Acide (HCl)	4×4 ×4

Jour 7	
Milieu	Dimensions (cm³)
Neutre (eau distillé)	4×4,1×4
Sulfaté (NaSo₄)	4,1×4×4,1
Acide (HCl)	4×4×4

Jour 14	
Milieu	Dimensions (cm³)
Neutre (eau distillé)	4×4,1×4
Sulfaté (NaSo₄)	4,1×4×4,1
Acide (HCl)	4×4×4

Jour 21	
Milieu	Dimensions (cm³)
Neutre (eau distillé)	4×4,1×4
Sulfaté (NaSo₄)	4,1×4×4,1
Acide (HCl)	4×4×4

Jour 28	
Milieux	Dimensions (cm³)
Neutre (eau distillé)	4×4,1×4
Sulfaté (NaSo₄)	4,1×4×4,1
Acide (HCl)	4×4×4

✓ **Résistance à la compression :**

Milieux	Résistances (Mpa)	Moyenne
Neutre (eau distillé)	46.65	40,64
	34.63	
	48.45	
Sulfaté (NaSo₄)	32.20	35,92
	39.63	
	46.87	
Acide (HCl)	13.24	10,94
	8.63	
	16.94	

Annexe D

(Valeur de K)

vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		roulé	concassé	roulé	concassé	roulé	concassé
Dosage en ciment	400 + superplastifiant	-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

Nota 1 : *correction supplémentaire K_s* : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apporter de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $ks = 6 Mf - 15$ (Mf étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2.5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

Nota 2 : *correction supplémentaire K_p* : si la qualité du béton est précisée « pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». on pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur K_p= +5 à 10 environ. selon le degré de plasticité désiré.

Annexe E

(Les valeurs de coefficient de compacité γ)

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulats						
		D=5	D=10	D=12.5	D=20	D=31.5	D=50	D=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	0.835	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

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- Sable roulé et graviers concassé : -0.01
- Sable et gravier concassé : -0.03

Références bibliographiques

Annexes

Introduction générale

Conclusion générale

Chapitre I

Généralités sur les bétons et mortiers

Chapitre II

Généralités sur les boues

Chapitre I

Identification et caractérisation des matériaux

Chapitre II

Confections et formulation des bétons et mortiers

Chapitre IV

Résultats et discussions

Partie I

Etude bibliographique

Partie II

Etude expérimentale

Chapitre III

Essais sur les bétons et mortiers