

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat en Génie Civil
Option : Structure et Matériaux

Présentée par :

M^{me} SEKLAOUI-OUKID Ouiza

**VALORISATION DES SEDIMENTS DU BARRAGE D'EL
MERDJA SIDI ABED : ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE**

Devant le jury composé de :

Mr AIT AIDER Hacene	Professeur, UMMTO	Président
Mr BOUHERAOUA Ali	Professeur, UMMTO	Rapporteur
Mr HADDADI Smail	Professeur, USTHB	Examineur
Mr HAMZA Ali	M.C., UMMTO	Examineur
Mr KHEMISSA Mohamed	Professeur, U de Msila	Examineur
Mr JAUBERTHIE Raoul	M.C. HDR, INSA Rennes	Co-rapporteur
Mr RANGEARD Damien	M.C., INSA Rennes	Invité

Soutenu le : 15/03/2016

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Génie Civil de l'université de Tizi-Ouzou Mouloud Mammeri LaMoMS en collaboration avec le Laboratoire de Génie Civil et de Génie mécanique de l'INSA de Rennes.

J'exprime toute ma profonde reconnaissance envers Mrs Ali Bouheraoua, Damien Rangedard et Raoul Jauberthie qui ont dirigé cette thèse. Ils ont su guider mes choix, me faire profiter de leurs connaissances et m'accorder leur confiance.

Je remercie vivement Monsieur Ait Aider Hacene Professeur à l'UMMTO d'avoir honoré et accepté de présider le jury.

J'adresse également ma gratitude à Mr Haddadi Smail, Professeur à l'USTHB, Mr Hamza Ali Maître de conférences à l'UMMTO et Mr Khemissa Mohamed, Professeur à l'université de Msila, pour avoir accepté de faire parti du jury et d'évaluer mon travail.

Je souhaite ensuite remercier tous les membres du laboratoire, LaMoMS de l'université MMTO et du Laboratoire de Génie Civil et de Génie mécanique à l'INSA de Rennes, pour leur disponibilité et leur aide qu'ils m'ont apporté, sans oublier les membres du laboratoire de Génie Mécanique de l'université MMTO.

Mes vifs remerciements sont adressés aussi aux personnels de l'Agence Nationale des Barrages chargés de la gestion du barrage de Merdja Sidi Abed à Relizane et à Mr Houglawane Mourad, Chef de Département des ressources à L'ANBT d'Alger, pour leur disponibilité.

Pour terminer, j'ai une pensée pour celles et ceux qui m'ont permis de mener à bien cette thèse, à savoir ma famille et mes amis sans oublier mes collègues enseignants de l'université MMTO.

RESUME

L'envasement des retenues de barrages en Algérie a pris une ampleur importante, limitant ainsi leur capacité (diminution importante du volume d'eau stockée). Le désenvasement est un moyen de lutte contre l'envasement néanmoins les conséquences engendrées sont le dépôt sédimentaire et les problèmes liés à son stockage.

Les projets d'infrastructures dans le domaine des travaux publics nécessitent d'importantes quantités de matériaux. En Algérie, les matériaux naturels se font rares et coûteux, en effet, dans le but de protéger les nappes phréatiques, le gouvernement a pris des mesures très strictes pour l'extraction de sable de rivières. Afin de répondre aux demandes importantes de matériaux pour la mise en place des nouvelles infrastructures routières (notamment l'autoroute Est-Ouest), il devient nécessaire de trouver des sources de matériaux de remplacement.

L'objectif de la thèse est de proposer une solution au dépôt sédimentaire issu du dragage du barrage de Merdja Sidi Abed et de tester la possibilité de réutiliser les sédiments dans le domaine des travaux publics (en couche de forme), notamment en utilisant ces matériaux comme une solution de remplacement aux matériaux de base.

Le barrage d'El Merdja Sidi Abed à l'origine était un lac alimenté à partir d'une rivière par une station de pompage. Les sédiments dragués dont le volume est estimé à 5 million m³, sont constitués d'un dépôt de particules fines.

Les caractéristiques géotechniques de ce matériau sont trop faibles pour envisager leur utilisation directe. Un traitement est nécessaire afin d'obtenir des caractéristiques mécaniques minimales permettant leur utilisation, par exemple en couche de forme dans le domaine routier. Dans un premier temps, une caractérisation géotechnique et minéralogique du matériau est réalisée. L'analyse minéralogique (diffraction X, MEB) permet de définir le type d'éléments présents dans le matériau. On met notamment en évidence la présence d'argile gonflante. Les essais géotechniques classiques (analyse granulométrique au laser, limites d'Atterberg, valeur au bleu et teneur en matières organiques) permettent de classer le matériau dans son état naturel. Ensuite, on étudie la possibilité d'un traitement au ciment afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau. L'amélioration apportée est évaluée à partir des résultats des essais de poinçonnement, de compression et de traction par fendage. Enfin une étude comparative des coûts entre des solutions de couche de forme en matériaux traités et non traités est menée afin de pouvoir choisir une solution économique.

Mots-clés : Sédimentation – Barrage – Dragage – Réseau routier - Valorisation - Caractérisation – Techniques routières – Etude économique.

ABSTRACT

The silting of dams in Algeria has grown considerably, thus limiting their capacity (significant decrease in the volume of water stored). The desilting is a means of struggle against the silting nevertheless the consequences are generated sedimentary deposit and the problems associated with storage.

Infrastructure projects in the field of public works require large amounts of material. In Algeria, natural materials become scarce and expensive, indeed in order to protect groundwater, the government has taken stringent measures for the extraction of sand from rivers. Order to meet the significant demands of materials for the development of new road infrastructure (including the East-West highway), it becomes necessary to find alternative sources of materials.

The objective of the thesis is to propose a solution to the sedimentary deposit from the dredging of Merdja Sidi Abed dam and test the ability to reuse the sediments in the area of public works (layer-shaped), including using these materials as an alternative to basic materials.

The dam of El Merdja Sidi Abed was originally a lake fed from the river by a pumping station. The dredged sediment whose volume is estimated at 5 million m³, are made of a deposit of fine particles.

The geotechnical characteristics of this material are too low to consider their direct use. A treatment is necessary to obtain the minimum mechanical characteristics enabling their use, for example in layer-shaped in the road sector. As a first step, a geotechnical and mineralogical characterization of the material is executed. The mineralogical analysis (XRD, SEM) is used to define the type of elements present in the material. In particular it shows the presence of swelling clay. Conventional geotechnical tests (particle size analysis by laser, Atterberg limits, value blue and organic content) used to classify the material in its natural state. Next, we study the possibility of a cement treatment to improve the mechanical characteristics of the material. The improvement is evaluated from the results punching shear, compressive and tensile splitting testing. Finally, a cost comparison study between layer-shaped solutions with treated and untreated materials is carried in order to choose an economical solution.

Keywords: Sedimentation – Dam, dredging – Road network – Valorization - Characterization - Road Technology - Economic study.

TABLE DES MATIERES

Table Des Matieres	i
Liste Des Figures	v
Liste Des Tableaux	vii
INTRODUCTION	1
Chapitre I PHENOMENES DE SEDIMENTATION	4
I.1 Les sédiments	4
I.1.1 Cause et origine de l'envasement	4
I.1.2 composition des sédiments	5
I.1.3 Granulométrie des sédiments	6
I.2 Envasement des barrages	7
I.2.1 envasement et mécanisme de sédimentation	8
I.2.2 Problème lié à la sédimentation	10
I.2.3 Moyen de lutte contre l'envasement	11
I.2.4 Les techniques de dévasement	14
I.2.5 Particularité des retenues en Algérie	17
I.3 Etat de l'art sur la valorisation des sédiments dans le Génie-Civil	20
I.3.1 Valorisation dans le béton et mortier	20
I.3.2 Valorisation dans la fabrication du ciment	22
I.3.3 Valorisation dans la fabrication de Briques	24
I.3.4 Valorisation dans la construction des routes	25
I.4 Conclusion	27
Chapitre II VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DANS LES MATERIAUX ROUTIERS	29
II.1 L'utilisation des granulats dans le BTP	29
II.1.1 Production du granulat en Algérie	29
II.1.2 Consommation du granulat en Algérie	31
II.2 Conception d'une chaussée souple	33
II.2.1 Description d'une structure routière	33

II.2.2 Rôle des différentes couches	33
II.2.3 Conception et fonctionnement de la couche de forme	34
II.3 Présentation du barrage de Merdja Sidi Abed	35
II.3.1 Situation	35
II.3.2 Description du barrage : Fiche technique	36
II.3.3 Etude de la retenue	37
II.4 Conclusion	39
Chapitre III CARACTERISATION DES SEDIMENTS A L'ETAT NATUREL	41
III.1 Introduction	41
III.2 Préparation de l'échantillon	41
III.3 Caractéristiques physiques et chimiques	42
III.3.1 Observation visuelle	42
III.3.2 Observation au microscope à balayage électronique MEB	42
III.3.3 Analyse granulométrique	43
III.3.4 Analyse par diffraction X	45
III.4 Caractéristiques Géotechniques	47
III.4.1 Détermination de la masse volumique des particules solides	47
III.4.2 Potentiel hydrogène pH	47
III.4.3 Limites d'Atterberg	48
III.4.4 Limites de retrait	51
III.4.5 Valeur au bleu de méthylène	54
III.4.6 Teneur en matière organique (Mo)	56
III.4.7 Récapitulatif des résultats de la caractérisation géotechnique	57
III.5 Caractéristiques de compactage	58
III.5.1 Essai Proctor Normal	59
III.5.2 Détermination de l'indice portant immédiat IPI	60
III.5.3 Détermination de l' l'indice CBRI immergé	63
III.5.4 Détermination de l'indice CBRI immédiat	66
III.6 Etude de l'homogénéité des sédiments	66
III.7 Récapitulation des résultats et classification des sédiments selon GTR	68
III.8 Conclusion	68

Chap. IV VALORISATION EN TECHNIQUE ROUTIERE (EN COUCHE DE FORME)...	70
IV.1 Condition d'utilisation des matériaux en couche de forme	70
IV.1.1 Les critères à satisfaire	70
IV.1.2 Techniques de traitement et de préparation des matériaux de couche de forme	71
IV.2 Traitement des sols en technique routière.....	71
IV.2.1 Les produits de traitement	72
a - Les chaux aériennes	72
b- Les liants hydrauliques	72
IV.2.2 Principes d'action des produits de traitement	73
1. Action de la chaux aérienne	73
2. Action des liants hydrauliques	75
IV.3 Méthodologie de l'étude	76
IV.3.1 Choix des liants et dosage	76
IV.3.2 Différents niveaux d'études de formulation	77
IV.3.3 Caractéristiques de mise en œuvre des mélanges	78
IV.4 Etudes des performances mécaniques	79
IV.4.1 Paramètres de densification (Proctor)	79
IV.4.2 Essai de poinçonnement	80
IV.4.3 Essai de compression simple	81
IV.4.4 Essai de traction brésilienne	81
IV.4.5 Récapitulatif des essais	83
IV.5 Réalisation des essais	84
IV.5.1 Paramètres de densification (Proctor)	84
IV.5.2 Confection des éprouvettes	85
IV.5.3 Détermination de l'IPI et de l'ICBR	85
IV.5.4 Mesure du gonflement vertical	88
IV.5.5 Conclusion	89
IV.6 Essais de compression simple	89
IV.7 Essais de traction brésilienne	94
IV.8 Conclusion	95

Chapitre V PRINCIPES GENERAUX DE DIMENSIONNEMENT ET ETUDE

ECONOMIQUE	96
V.1 Conception de la couche de forme	96
V.1.1 Définition et nature de la couche de forme.....	96
V.1.2 Fonctions et conception de la couche de forme.....	97
V.2 Dimensionnement de la couche de forme	98
V.2.1 Les différents cas de Partie Supérieure des Terrassements (PST).....	98
V.2.2 Epaisseur préconisée pour la couche de forme	98
V.3 Classement des plates-formes pour le dimensionnement des structures de chaussée.....	98
V.3.1 Portance à long terme de la plate-forme	98
V.3.2 Règles de surclassement de portance des plates-formes	100
V.3.2.1 Couches de forme en matériau non traité	100
V.3.2.2 Couches de forme en sols argileux et limoneux traités en place	101
V.4 Etude économique	102
V.4.1 Limites des études économiques	103
V.4.2 Calcul des coûts des matériaux de couche de forme	103
V.4.3 Epaisseur de la couche de forme réalisée avec le sédiment traité de Merdja	103
V.4.4 Calcul des volumes et des coûts des matériaux utilisés pour la couche de forme en sédiment traité	104
V.4.5 Epaisseur de la couche de forme réalisée avec un matériau non traité	105
V.5 Conclusion	106
 CONCLUSION GENERALE	 107
ANNEXES	110

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Propagation d'un courant de densité [Remini W., Remini B.].....	9
Figure I.2	Décantation et tassement des particules solides fines [Remini W., Remini B.] ..	10
Figure I.3	différentes disposition des obstacles étudiés [Remini B., 2011]	12
Figure I.4	Zones de dépôt des sédiments [Remini B., 2011]	13
Figure I.5	Histogramme Capacité / Envasement par Région (ANBT).....	18
Figure I.6	Correction torrentielle dans un cours d'eau	19
Figure I.7	Drague activant dans la retenue du barrage Foum-El-Gherza (Biskra)	20
Figure II.1	Répartition des carrières [Sayah D. M.]	30
Figure II.2	Perspectives de développement du réseau routier et auto routier algérien	32
Figure II.3	Différentes couches d'une chaussée	33
Figure II.4	Carte de localisation du barrage	35
Figure II.5	Etat d'envasement du barrage	36
Figure II.6	Envasement de la retenue	38
Figure III.1	Etat des sédiments tels prélevés dans la zone de stockage	42
Figure III.2	Photographie du sédiment broyé.....	42
Figure III.3	Observations au MEB	43
Figure III.4	Courbe granulométrique	44
Figure III.5	Classification triangulaire des sols fins	45
Figure III.6	Diagrammes de diffraction X du sédiment d'El Merdja	46
Figure III.7	Les états d'un sol	48
Figure III.8	Appareil du cône de pénétration	50
Figure III.9	Abaque de Casagrande	50
Figure III.10	Photographies illustrant le retrait volumique	51
Figure III.11	Photographies illustrant le retrait linéique	53
Figure III.12	Courbe de dessiccation (retrait linéique horizontal, Le triangle sur la courbe représente la valeur du retrait volumique	53
Figure III.13	a) Matériel de l'essai au bleu de méthylène ; b) Test de la tache	55
Figure III.14	Courbes granulométriques du sédiment comparées à celle sans matières organiques	57
Figure III.15	Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature	58

Figure III.16	Appareil CBR : compacteur automatique Proctor-CBR	59
Figure III.17	Courbe Proctor Normal du sédiment de Merdja	60
Figure III.18	Dispositif de l'essai de poinçonnement	61
Figure III.19	Courbe effort – enfoncement pour différentes teneurs en eau	62
Figure III.20	Courbe IPI en fonction de la teneur en eau	62
Figure III.21	Variation de la masse volumique sèche et IPI en fonction de la teneur en eau..	63
Figure III.22	Dispositif du montage pour mesurer le gonflement vertical [norme afnor]	64
Figure III.23	Courbe Effort- Enfoncement de ICBR après immersion	65
Figure III.24	Courbe gonflement – teneur en eau associée à la courbe Proctor	65
Figure III.25	Essai ICBR _i : Courbe effort – enfoncement	66
Figure III.26	Courbes granulométriques des différents échantillons	67
Figure IV.1	logigramme définissant le niveau de l'étude de formulation à engager [GTS 2000]	78
Figure IV.2	Exemple de courbe Proctor d'un sol avant et après traitement [GTS 2000]	80
Figure IV.3	Principe de l'essai de traction brésilienne (fendage)	82
Figure IV.4	Courbe Proctor du sédiment de Merdja avant et après traitement au ciment...	84
Figure IV.5	Moule pour confection des éprouvettes (compression et traction).....	85
Figure IV.6	Immersion de l'éprouvette pour la détermination de ICBR et de Gv	86
Figure IV.7	Courbe IPI en fonction de la teneur en eau	87
Figure IV.8	Courbe ICBR imm (Poinçonnement) à l'optimum Proctor	87
Figure IV.9	Variation du gonflement vertical en fonction de la teneur en eau	88
Figure IV.10	Courbe de dessiccation (retrait linéique horizontal)	89
Figure IV.11	Conservation des éprouvettes	90
Figure IV.12	Essai de compression simple	91
Figure IV.13	Contraintes de compression du Sédiment naturel	92
Figure IV.14	Résistances à la compression du sédiment traité au ciment à différents âge de maturation	92
Figure IV.15	Contraintes de compression à 90 jours pour le sol naturel et traité au ciment (5%) pour des teneurs en eau de 22, 25 et 27%	93
Figure IV.16	Essai d'écrasement en traction brésilienne (par fendage)	94
Figure IV.17	Résistance de traction par fendage à 90 jours pour le sol naturel et traité au ciment (5%) pour des teneurs en eau de 22, 25 et 27%	94
Figure V.1	Définition des différents termes (GTR)	96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Classes granulométriques d'un matériau	7
Tableau I.2	Envasement des grands barrages en exploitation (source ANBT).....	18
Tableau II.3	Evolution de la perte de capacité de la retenue du barrage à la RN	38
Tableau III.1	Paramètres granulométriques des sédiments	45
Tableau III.2	Limites de retrait et retrait linéique total LS	54
Tableau III.3	Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène [GTR, 2000]	55
Tableau III.4	Caractéristiques géotechniques du sédiment de Merdja	57
Tableau III.5	Valeurs au bleu et % en matière organique des différents échantillons	67
Tableau IV.1	Adéquation des ciments courants avec différents types de sols [GTS].....	77
Tableau IV.2	Indice Portant Immédiat (IPI) minimal à obtenir à la mise en œuvre [GTS 2000]	79
Tableau IV.3	Récapitulatif des essais	83
Tableau IV.4	Caractéristiques optimales de compactage et masse d'une éprouvette de sédiment naturel et traité au ciment.....	91
Tableau V.1	Tableau définissant les classes de plate-forme PFi	99
Tableau V.2	tableau des modules de calcul descriptifs du sol support	99
Tableau V.3	Classes de portance des sols Si [Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves].....	100
Tableau V.4	Condition de surclassement de portance des plates formes avec C.F non traitée [GTR200].....	101
Tableau V.5	Sur classement avec couche de forme en matériaux non traités [CTTP]	101
Tableau V.6	conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en sol fin traité en place [GTR].....	102

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE

L'envasement des retenues et des estuaires est lié directement aux phénomènes de l'érosion. Les processus de l'érosion ont des définitions diverses, suivant les auteurs [Semcha A., 2006]. Nous avons retenu la définition qui combine l'arrachement (creusement de la surface du sol, dégradation et altération des roches), le transport et le dépôt de matériaux. Il est à remarquer que la répartition spatiale des processus d'érosion n'est pas nette; plusieurs phénomènes peuvent se produire en même temps.

L'envasement des retenues de barrages en Algérie a pris une ampleur importante, limitant ainsi leur capacité (diminution importante du volume d'eau stockée). Le dévasement est un moyen de lutte contre l'envasement néanmoins les conséquences engendrées sont le dépôt sédimentaire et les problèmes liés à son stockage.

Le développement dans la construction des bâtiments et d'ouvrages de Génie Civil a provoqué durant ces deux dernières décennies, un accroissement considérable dans la consommation de granulats, ceci induit un important déficit en granulats. Face à la surexploitation des sables d'oued et de mer, ayant engendré une menace certaine sur les nappes alluviales et une dégradation inquiétante de l'environnement, des mesures draconiennes sont prises pour la protection des sites d'exploitation situés dans les domaines publics maritimes et hydrauliques. Afin de répondre aux demandes importantes de matériaux pour la mise en place des nouvelles infrastructures routières (notamment l'autoroute Est-Ouest), il devient nécessaire de trouver des sources de matériaux de remplacement.

En effet le réseau routier a connu un grand développement ces dernières années, notamment la construction de l'autoroute Est-ouest et les nouvelles routes ainsi que les ouvrages d'art nécessaires pour relier l'autoroute aux centres urbains et à l'ancien réseau routier.

Malgré le développement soutenu qu'il connaît depuis quelques années, le secteur des carrières en Algérie n'arrive toujours pas à satisfaire la demande en matériaux de construction exprimé par le marché national des BTPH, en hausse exponentielle [SAYAH D. M., 2008].

Confrontées à la nécessité de trouver des granulats en grande quantité et à faible coût, les entreprises routières se sont rapidement intéressées aux matériaux de recyclage.

Cependant, l'ouverture de nouvelles carrières est soumise à une réglementation de plus en plus sévère et des normes environnementales plus exigeantes. D'un autre côté, le volume annuel de sédiments dragués est de plusieurs millions de mètres cubes. Par conséquent, ce volume important peut constituer une source d'approvisionnement en granulats pour le secteur de la construction.

Face à cette problématique, des filières de valorisation en génie civil ont été recherchées : en technique routière [Bourabah M. A. et al, 2009], [Scordia P.Y., 2008], [Nguyen T. B., 2008], [Tran N.T., 2009], [Wang D., 2011], [Achour R., 2013]. Tous les résultats ont donné des avis favorables sur l'utilisation des sédiments dans la construction des routes. Avant qu'ils soient utilisables, les sédiments doivent être traités pour que leurs caractéristiques physico-mécaniques soient satisfaisantes vis-à-vis des critères géotechniques de la construction routière. Les sédiments se caractérisent par une importante teneur en eau (jusqu'à 200%), en sels (pour les sédiments marins), en éléments argileux de type gonflant, en matière organique et parfois en métaux lourds. Ce sont les principaux facteurs qui empêchent l'utilisation des sédiments sans traitement.

L'objectif de ce travail est de proposer une solution au dépôt sédimentaire issu du dragage du barrage de Merdja Sidi Abed, dont le volume est estimé à 5 million de m³, et de tester la possibilité de les réutiliser dans le domaine des travaux publics (en couche de forme), notamment en utilisant ces matériaux comme une solution de remplacement aux matériaux de base.

Le travail présenté se divise en cinq parties :

- La première partie est consacrée au phénomène de sédimentation en s'intéressant particulièrement à la cause et l'origine de l'envasement pour envisager les moyens de lutte. Après une revue sur la sédimentation des retenues de barrage en Algérie, les matériaux concernés par le dragage, les techniques de dévasement et le devenir des sédiments dragués. Les voies de valorisation potentielles des sédiments de dragage tout en s'intéressant à l'état de l'art sur la valorisation dans le Génie-civil, notamment dans le domaine des travaux publics, grand consommateur de granulats sont exposés.

- La deuxième partie présente, le développement du réseau routier en Algérie et sur la provenance et l'exploitation du granulat. Ensuite, une description d'une structure routière, le rôle des différentes couches et la conception et fonctionnement de la couche de forme sont revus. Enfin, une présentation du barrage de **Merdja Sidi Abed**, sa situation géographique, l'étude de la retenue sont présentés.

- La troisième partie porte sur la caractérisation du sédiment dragué du barrage de **Merdja Sidi Abed**. Dans un premier temps, une caractérisation physique, et minéralogique du matériau est réalisée. L'analyse minéralogique (diffraction X, MEB) permet de définir le type d'éléments présents dans le matériau. Ensuite des essais géotechniques classiques (analyse granulométrique au laser, limites d'Atterberg et de retrait, valeur au bleu et teneur en matières organiques) sont effectués et ont permis de classer le matériau dans son état naturel. L'influence du type d'argile est particulièrement mise en évidence sur le comportement au retrait du matériau. Enfin, les caractéristiques de compactage sont déterminées, elles ont permis d'évaluer les performances de ces matériaux en relation avec le domaine de valorisation envisagé,

- La quatrième partie présente la valorisation des sédiments en couche de forme. Après un exposé des conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme, le traitement des sols en technique routière et la méthodologie générale de l'étude à adopter, une étude des performances mécaniques est réalisée sur les sédiments traités au ciment, notamment des essais de poinçonnement, de compression et de traction,

- Dans la dernière partie, nous avons déterminé l'épaisseur de la couche de forme selon les guides GTR et le catalogue Algérien de dimensionnement des chaussées neuves. Afin de pouvoir choisir une solution économique, nous effectuons une étude comparative des coûts entre une couche de forme réalisée avec des granulats naturels et celle réalisée avec des sédiments traités au ciment.

Chapitre I

PHENOMENES DE SEDIMENTATION

Chapitre I

PHENOMENES DE SEDIMENTATION

I.1. LES SEDIMENTS

I.1.1 Cause et origine de l'envasement

Les sédiments proviennent du dépôt des particules en suspension dans l'eau dérivant elles-mêmes de l'érosion des roches et des sols, de matériaux détritiques organiques et de la floculation d'éléments colloïdaux.

Les sédiments peuvent donc être d'origine :

- endogène : les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d'animaux;
- exogène : il s'agit des particules issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents ;
- naturelles ou anthropiques : elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micro-polluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [Aloui-Labiod Z., 2014].

L'envasement des retenues et des estuaires est lié directement aux phénomènes de l'érosion. Les processus de l'érosion ont des définitions diverses, suivant les auteurs. Nous avons retenu la définition qui combine l'arrachement (creusement de la surface du sol, dégradation et altération des roches), le transport et le dépôt de matériaux [Semcha A., 2008].

Il ressort dans les processus de l'érosion que l'eau en est le principal agent moteur. Elle est la cause première de l'altération des roches qui donnent des particules, du détachement et de l'arrachement des agrégats. L'énergie cinétique développée par le ruissellement permet l'enlèvement des agrégats détachés, le creusement du sol et le transport des matériaux qui sont déposés ou accumulés progressivement avec la dissipation de cette énergie.

Suivant les causes et les conséquences de l'érosion dans le temps, il est retenu deux grands types d'érosion:

- L'érosion naturelle (érosion normale ou érosion géologique): ce type d'érosion est à l'échelle des temps géologiques. Elle est causée par la dégradation des roches par l'eau, les variations de température, la mer, la gravité, le vent, les glaciers..., en l'absence de toute intervention humaine. La conséquence de ce type d'érosion est la sculpture du relief actuel de la Terre,

- L'érosion accélérée: les agents sont les mêmes, mais les causes principales restent dans ce type d'érosion les activités humaines. Celles-ci ont modifié la couverture végétale et l'état du sol. Les conséquences à long terme sont les inondations et l'envasement des retenues.

Selon les différentes approches des études sur l'érosion, on distingue quatre groupes d'érosion : l'érosion glaciaire, l'érosion éolienne, l'érosion chimique et l'érosion hydrique (mécanique). C'est cette dernière (érosion hydrique) qui contribue, à terme relativement court, à l'envasement des retenues.

Les précipitations sont la principale cause de l'action érosive hydrique (d'où le terme d'érosion pluviale). La pluie intervient par la destruction des agrégats (par la vitesse de chute des gouttes), dans l'enlèvement et le transport des particules détachées.

Le phénomène d'érosion est très répandu en Afrique du nord. Selon une étude faite par Remini [Remini W., Remini B., 2003], En Tunisie, l'érosion hydrique dégrade les terres cultivables. Au total 1,2 millions d'hectares sont gravement affectés par l'érosion dans le nord, et le centre de la Tunisie, soit 25% de la superficie totale des terres (1991).

En Algérie, le taux d'érosion dépasse 2000 t/km².an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Télien (Rhiou, Sly, Fodda, Mazafran, Isser). Il atteint 4000 t/km².an sur la chaîne côtière de Dahra, et 5000 t/km².an sur le bassin très dégradé de l'Oued Grioum (1982). Sur la Seine, par contre, le taux d'érosion est de 62 t/km².an, il atteint 1500 t/km².an sur celui de la Durance (France), et dépasse 2500 t/km².an sur certains bassins de la Chine, et de l'île de Java (1980).

Tous ce matériel érodé est transporté plus ou moins rapidement jusqu'aux cours d'eau. Il comprend des particules fines en suspension, des sédiments grossiers charriés et de la matière dissoute. Ce sont les crues d'automne qui causent le plus d'érosion.

I.1.2. Composition des sédiments

Les vases sont constituées de quatre (04) éléments principaux [Scordia P.Y., 2008]:

- La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates) ;
- La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite) ;
- La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes) ;

- Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

Les argiles sont des silicates d'aluminium hydratés qui présentent une structure cristalline en feuillets. Cette constitution permet l'hydratation des argiles, avec parfois un phénomène de gonflement très important. Les principales caractéristiques sont :

- Leur grande surface spécifique, leur permettant de fortes capacités d'échange cationique (donc d'adsorption),
- Leur capacité de rétention de l'eau,
- Leurs propriétés colloïdales.

La souplesse des liaisons entre les feuillets permet aux argiles d'avoir un comportement plastique. La dernière propriété des argiles est l'interaction avec les espèces ioniques. En effet, les charges négatives des argiles sont neutralisées par des cations compensateurs. Or, ces cations peuvent s'échanger avec ceux présents dans le milieu et notamment avec les métaux lourds : c'est le phénomène d'adsorption.

En ce qui concerne la matière organique, on retrouve dans les sédiments tous les composés organiques naturels, issus des végétaux, des algues et des animaux, ou biosynthétisés par la microflore. La décomposition de ces matières est très lente (plusieurs centaines d'années). En général, la proportion massique de matière organique est de l'ordre de 2 à 10 % pour les sédiments des cours d'eaux [Shneider G. 2001].

Enfin, la teneur en eau dans la vase est très variable. Généralement, on peut distinguer l'eau libre, l'eau colloïdale et l'eau pelliculaire [Marot F., 1998]. L'eau capillaire est liée à la matrice solide par des forces de capillarité qui créent entre les grains des forces d'attraction. L'eau colloïdale permet l'hydratation des colloïdes. De même que l'eau capillaire, elle peut être éliminée par des procédés mécaniques de séparation solide-liquide. L'eau adsorbée et pelliculaire est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles. Cette dernière n'est séparable de la matrice solide que par des moyens thermiques. L'eau de constitution entre dans les formules chimiques des substances pour former les substances hydratées. Comme l'eau pelliculaire, elle peut être éliminée uniquement par des moyens thermiques.

I.1.3. Granulométrie des sédiments

La distribution granulométrique d'un sédiment et plus globalement, de n'importe quel matériau, constitue son empreinte physique. Elle caractérise en effet la taille des particules constituant la phase solide du matériau. D'autre part, la répartition de fréquence de taille des grains explique la répartition des sédiments dans un milieu

aquatique. En effet, les grosses particules restent en amont tandis que les plus fines se retrouvent en aval.

Les différentes classes granulométriques couramment utilisées sont présentées dans le tableau I.1.

Tableau I.1 Classes granulométriques d'un matériau

Diamètre	Dénomination
> 20mm	Cailloux
2 mm à 20 mm	Graviers
63µm à 2 mm	Sables (grossier et fins)
2µm à 63 µm	Limons (ou silt)
< 2 µm	Argiles

Une vase est généralement constituée des 3 dernières classes : sables, limons et argiles.

I.2 ENVASEMENT DES BARRAGES

L'aménagement des cours d'eau modifie l'hydrologie de la partie aval d'un barrage et entrave le transport solide vers les exutoires naturels. Les précipitations provoquent un ruissellement qui entraîne les particules solides par charriage par le biais des cours d'eau, et au niveau du barrage, cette coulée boueuse, appelée communément vase, s'arrêtera et constituera un dépôt qu'on nommera «volume mort». C'est le processus d'envasement ou encore la sédimentation dans les barrages qui pose d'énormes problèmes au niveau du réservoir lui-même mais aussi en amont et en aval du réservoir [Mrabet A. et al., 2008]. L'envasement des retenues est, de ce point de vue, un phénomène inéluctable que tous les réservoirs subissent plus ou moins selon leur implantation et leur possibilité de gestion. Pour un site donné, la nature et le volume des dépôts dépend d'un certain nombre de facteurs tels que la géologie des sols du bassin versant, le régime climatique de la vallée, le régime hydrologique du cours d'eau, la couverture végétale du bassin versant, son degré d'activités humaines...etc. Certains barrages sont complètement envasés ; ils ne contiennent pratiquement que de la vase, cas du barrage Fergoug par exemple, dont le taux

d'envasement est de plus de 80 %. Les barrages se transforment de plus en plus en réceptacles de vase que d'eau [Semcha A., 2006].

Cette sédimentation pose d'énormes problèmes à savoir; la réduction de la capacité, l'obturation des organes de vidange, la sécurité de l'ouvrage, la sédimentation des canaux d'irrigation et elle a même un impact sur la qualité de l'eau [Remini W., Remini B.]

I.2.1 Envasement et mécanisme de sédimentation

L'envasement des barrages et le mécanisme de sédimentation ont été traités en détail par Remini. Selon ce chercheur, la sédimentation des barrages dans les pays de l'Afrique du nord est très élevée et même spectaculaire. Elle est due directement aux forts taux d'érosion des bassins versants, dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eau et provoqueront à l'entrée des retenues des courants de densité.

L'Afrique du nord dispose actuellement de plus de 230 barrages d'une capacité totale de stockage de 23 milliards de m³.

Le suivi de l'envasement des retenues a permis d'évaluer près de 125.106 m³ la capacité perdue par envasement en moyenne chaque année. En plus de la réduction de la capacité, la sédimentation a un impact au niveau du réservoir lui même, en amont et en aval du barrage. Ces pays (Algérie, Tunisie, Maroc), font partie d'une zone montagneuse caractérisée par un climat agressif avec alternance d'années sèches et humides et des pluies d'automne dévastatrices pour les sols, d'autant plus qu'elles surviennent à une période où la couverture végétale est réduite ou inexistante, et les sols ameublissent par les labours.

La conséquence est que d'une part, les crues d'automne violentes et brutales sont la cause d'une forte ablation, et d'autre part, le taux d'érosion dans les bassins versants est important, ce qui favorise l'apparition des courants de densité dans les réservoirs des barrages des pays de l'Afrique du nord.

En Tunisie, l'érosion hydrique dégrade les terres cultivables. Au total, 1,2 millions d'hectares sont gravement affectés par l'érosion dans le nord, et le centre de la Tunisie, soit 25% de la superficie totale des terres (1991).

En Algérie, le taux d'érosion dépasse 2000 t/km².an sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Tellien (Rhiou, Sly, Fodda, Mazafran, Isser). Il atteint 4000 t/km².an sur la chaîne côtière de Dahra, et 5000 t/km².an sur le bassin très dégradé de l'Oued Agrioum (1982).

Tous ce matériel érodé est transporté plus ou moins rapidement jusqu'aux cours d'eau. Il comprend des particules fines en suspension, des sédiments grossiers charriés et de la matière dissoute. Ce sont les crues d'automne qui causent le plus d'érosion.

Une fois ce matériau solide arrivé dans les cours d'eau, il sera transporté par la force du courant. Les concentrations des sédiments sont très élevées suivant les cours d'eau, et l'importance des crues. Une fois la crue arrivée au niveau des eaux calmes du réservoir, les matériaux grossiers se déposent dans la zone de remous en formant un «delta» en queue de la retenue. Les particules fines sont piégées dans la retenue et commencent à se déposer, à se tasser et à se consolider, diminuant ainsi progressivement leur capacité de stockage en eau.

Lorsque la concentration des sédiments est très élevée, les particules fines plongent au fond de la retenue et s'y écoulent sous forme d'un courant de densité (figure I.1). La configuration géométrique des retenues sous forme de canal, pour la plupart des barrages de l'Afrique du nord, favorise les courants de densité à se propager jusqu'au pied du barrage.

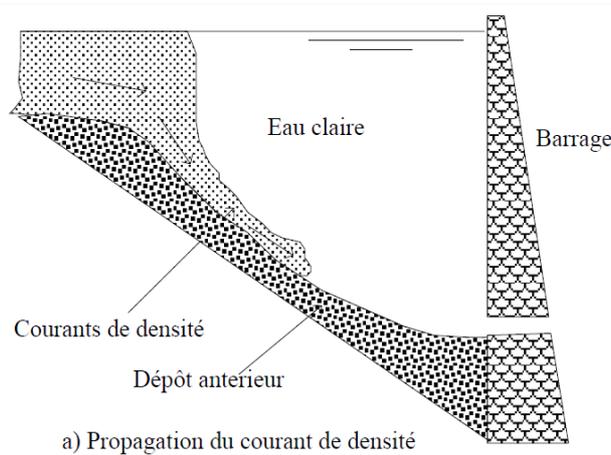


Figure I.1 Propagation d'un courant de densité [Remini W., Remini B.]

En l'absence d'ouverture des vannes, les sédiments drainés par les courants de densité, se déposent et se tassent puis se compactent selon leur nature, et les conditions physicochimiques du milieu (figure I.2). Cette consolidation peut gêner, plus tard, l'évacuation des sédiments accumulés dans la cuvette lorsque les manœuvres des vannes seront opérées très en retard.

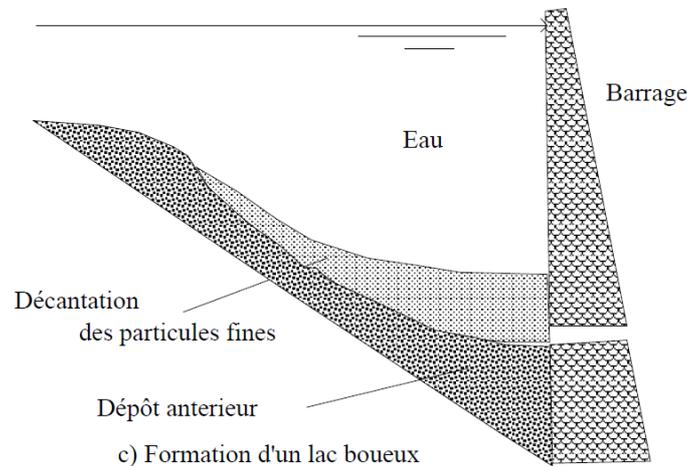


Figure I.2 Décantation et tassement des particules solides fines [Remini W., Remini B.]

I.2.2 Problème lié à la sédimentation

La sédimentation dans les barrages pose d'énormes problèmes au niveau du réservoir lui-même, mais aussi en amont et en aval du réservoir. Elle entraîne la réduction de la capacité utile du barrage, le blocage des organes de vidange. La sédimentation peut mettre la stabilité de l'ouvrage en danger. Elle peut aussi accélérer l'eutrophisation du lac. Les sédiments en suspension dans l'eau distribuée par les canaux, à partir des barrages, se déposent dans ces ouvrages, réduisent leur débitance et rendent difficile leur exploitation :

- La réduction de la capacité: chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue,
- La sécurité de l'ouvrage : l'envasement pose un problème sur la stabilité de l'ouvrage. On sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée progresse au carré de la hauteur [OUMRANI N., 2009],
- L'obturation des organes de vidange : un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond tel que montré sur la figure I.2,
- Envasement des canaux d'irrigation : lorsque l'eau d'irrigation est chargée en sédiments, ces particules fines vont se déposer dans les canaux, réduisant leurs sections mouillées. Ceci pose le problème de comblement du réseau des canaux d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage,
- Dégradation de la qualité de l'eau : les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau [Remini B. et al 1997].

I.2.3 Moyen de lutte contre l'envasement

De nombreux moyens sont mis en œuvre pour lutter contre les désordres causés par les phénomènes de l'envasement. Semcha A., (2006) regroupe les étapes de lutte dans les trois zones suivantes :

- la zone 1, où il y a production des sédiments par dégradation des roches mères, il est nécessaire de protéger les berges des bassins versants : cultures en terrasses, reboisement,...

- la zone 2, définie comme étant la zone de transit des sédiments ; les forces vives des ruissellements doivent être éliminées. La diminution de l'énergie cinétique des particules entraînera leur dépôt avant d'arriver dans la retenue,

- la zone 3, qui représente les sites des dépôts particulièrement privilégiés par les particules les plus fines, est la plus douloureusement touchée par l'envasement ; il est inévitablement nécessaire de recourir à des moyens plus onéreux: les dragages et les vidanges.

Les deux premières zones sont liées aux conditions du climat local, à la géologie et la géomorphologie des terrains ainsi qu'aux conditions de drainage. Les altérations des sols dans la zone 1 et les désordres dus aux actions de l'eau transitant en zone 2, se traduisent par leur ampleur sur la zone 3 qui consiste en un comblement au niveau de la cuvette du barrage, d'où la nécessité de dévaser.

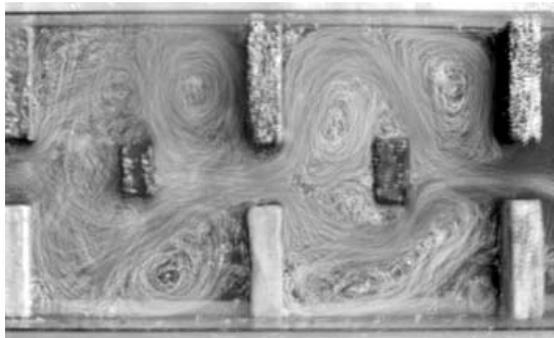
Les moyens de lutte contre l'envasement sont les suivants :

- **Le reboisement** : il s'agit de protéger le bassin versant par la restauration des sols, la formation des banquettes, la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds (par exemple les tamaris qui ont poussé à l'amont des barrages de Bouhanifia, du Fergoug, de Cheurffas constituent de véritables pièges à sédiments).
- **Réalisation de bassins de décantation** : la technique consiste tout simplement en une succession de bassins de décantation creusés plus en amont du barrage à dévaser. Les boues extraites sont déposées dans ces bassins et après décantation, les eaux sont acheminées gravitairement vers leur lieu d'origine (exemple du barrage de Merdja Sidi Abed).
- **Surélévation des barrages** : la surélévation des barrages permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser la valeur envasée. Cette technique a été réalisée sur les barrages suivants : Fergoug, Mefrouch, Bakhada, K'sob, Hamiz et Zardézas.

- **Chasse dite à l'espagnole** : la méthode de chasse dite à l'espagnole est utilisée pendant les premières crues pour les barrages de moindre importance tels que les barrages suivants : Hamiz, Beni Amrane, K'sob, Cette méthode est efficace quand elle est possible. Elle consiste à vider complètement le barrage au début de l'automne et à le laisser vide, toutes vannes ouvertes, jusqu'aux premières pluies. La première crue enlève sans difficulté les vases de l'année non encore consolidées [Aloui-Labioud Z., 2014].

En plus de ces moyens de lutte, il ya des recherches sur d'autres nouvelles méthode, parmi elles :

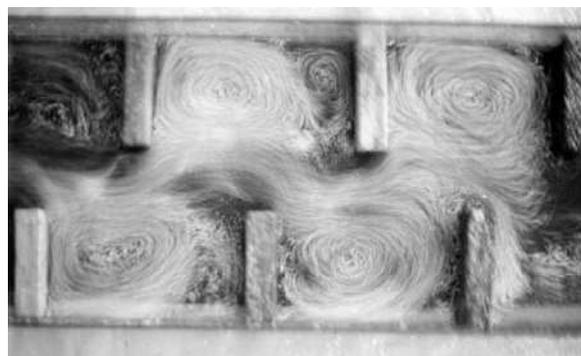
- **La technique des obstacles émergés** : une nouvelle approche de lutte contre l'envasement initié par Remini B. (2011). Elle consiste en l'emplacement des obstacles émergés dans le cours d'eau principal à l'amont d'un barrage pour piéger les sédiments. L'expérimentation a été menée dans un canal rectangulaire dans le fond et est équipé d'obstacles de différentes dimensions. L'auteur a étudié différentes dispositions des obstacles telles que montrées sur les figures I.3.a, I.3.b et I.3.c



a : disposition éparpillée



b : disposition en forme d'épis

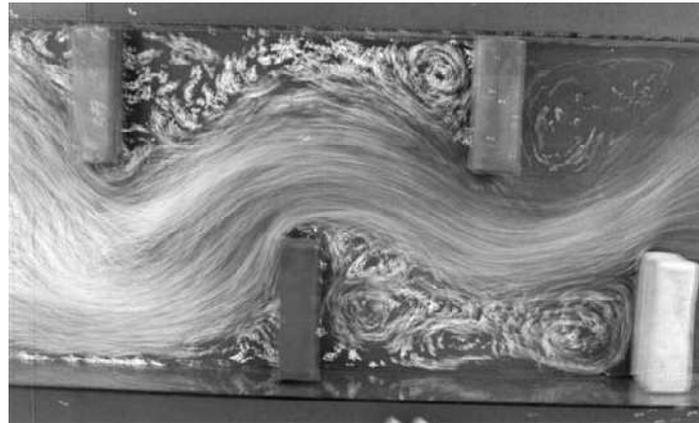


c : disposition en chicane

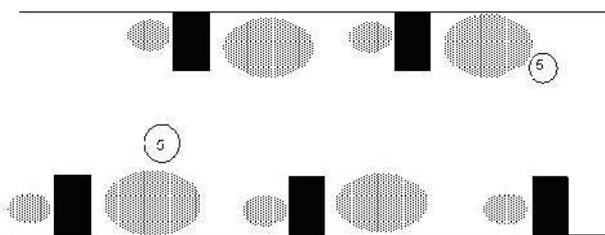
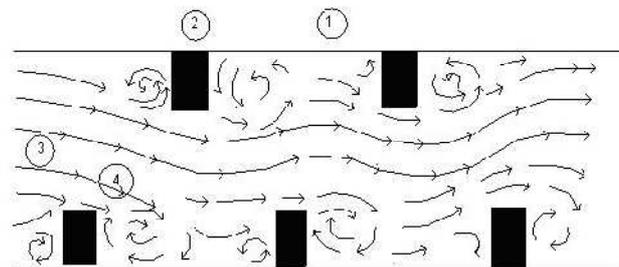
Figure I.3 Différentes dispositions des obstacles étudiés [Remini B., 2011]

Les résultats obtenus ont montré que la configuration de type chicane est plus rentable, donnant un dépôt important des particules fines dont le rendement exprimé par le rapport entre la quantité des sédiments déposés et celle des sédiments drainés (totale), est égal successivement à 50%, 56% et 69% suivant les dimensions des obstacles.

La formation des sédiments est montrée sur la figure I.4.a et I.4.b.



a :



b :

Figure I.4 Zones de dépôt des sédiments [Remini B., 2011]

1. Canal ; 2. Obstacle ; 3 et 4. Sens de l'écoulement ; 5. Zone de dépôt

Le chercheur a conclu aussi que ce modèle pourrait faire l'objet de réalisation dans une échelle à grandeur nature.

- **La revégétation** : une nouvelle technique de création d'espaces verts pour la lutte notamment contre l'envasement des barrages et la protection des zones steppiques.

Cette nouvelle technique, proposée par une société américaine de droit algérien, consiste à mettre en place en premier lieu une structure métallique qui sera enduite d'un produit favorisant l'adhésion des végétaux avant d'être recouverte de gazon. L'avantage de cette méthode, qui va ainsi favoriser l'apparition de végétations, est le prolongement de la durée de vie des barrages en retardant leur envasement, comme elle peut fournir de l'alimentation pour le bétail. La revégétation a donné de bons résultats en Arabie saoudite, permettant une durée de vie de 18 mois des surfaces implantées sans arrosage sous une température même de plus de 45 degrés. Selon l'inspecteur général de la DGF Abdallah Ahmed, l'Algérie, un pays confronté aux problèmes de l'érosion hydrique et éolienne, devrait opter pour cette nouvelle méthode à même de protéger les bassins versants des barrages et de prévenir leur envasement. A titre d'exemple, parmi les sites les plus indiqués pour bénéficier de cette technique, on peut citer les barrages de Béni Haroun (Mila) et de l'Oued Mina (Relizane). Sur l'ensemble des barrages algériens, l'envasement représente 800 millions de mètres cubes d'eau.

I.2.4 Les techniques de dévasement

Avant dévasement, les sédiments se présentent à l'état consolidé sous forme de couches juxtaposées, emprisonnant des formations plus grossières. Dans cet état consolidé la vase aura des caractéristiques différentes selon ses propriétés et le milieu dans lequel s'effectue le tassement.

Les opérations de dévasement peuvent s'effectuer suivant deux techniques en fonction de la nature et du degré de consolidation des sédiments piégés : remobilisation des sédiments par des opérations de chasse durant les périodes des crues. Dans le cas contraire, ce sont les actions mécaniques par dragage qui donnent des résultats plus satisfaisants. Néanmoins c'est l'opération la plus coûteuse.

Les techniques de dévasement des barrages peuvent être résumées globalement par les deux moyens suivants :

- l'utilisation des moyens de vidange dont est équipé le barrage (les soutirages). Dans ce cas l'état avancé de consolidation des sédiments, ou bien celui où les vases sont encore en suspension, ne permettent pas l'utilisation efficace de cette technique (soutirage),

- l'utilisation d'un moyen d'enlèvement des matériaux adapté à leur état de consolidation en place dans la cuvette de la retenue (les dragages).

A. Le soutirage

Selon Remini B. (2002), le moyen le moins coûteux reste l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange du barrage qu'il préfère appeler « technique de soutirage ». Cette technique qui peut contribuer effectivement à augmenter la durée de vie d'un réservoir nécessite la bonne connaissance des écoulements divers dans la retenue, en plus de la dotation d'ouvrages à annexer au barrage dès sa conception initiale. En effet un système de batteries de vannes spécialement conçues pour l'entraînement des sédiments est nécessaire. Son application est conseillée à certains sites qui favorisent l'apparition de courants de densité. Ces courants de densité sont très concentrés en sédiments, qui nécessitent l'ouverture des vannes de fond et de dégager le maximum de sédiments avec une perte d'eau minimum.

La mauvaise utilisation de cette technique de soutirage a entraîné l'obturation des vannes des barrages de Oued El Fodda (1948) et Foum El Gherza (1982), l'abandon du barrage des Cheurfas I (1966) et le comblement de 80% du barrage de Fergoug (1984) dû au mauvais soutirage au niveau du barrage de Bou Hanifia (se trouvant en amont du Fergoug sur la même rivière). C'est la méconnaissance du phénomène des courants de densité et du comportement des vases dans les réservoirs qui fut la principale cause de cet échec.

Le seul barrage qui a enregistré des résultats encourageants est celui d'Ighil Emda : durant les années 1955-1956, plus de 50% des sédiments entrant dans la retenue ont été évacués. Une batterie composée de huit (08) vannettes de dévasement et trois (03) vannes de dégravoiment a été installée dans le corps du barrage en 1953. C'est l'un des rares barrages dans le monde équipé d'un tel système. Au vu des résultats obtenus par ces pertuis de faibles diamètres, six (06) vannettes de désenvasement ont été placées dans le barrage de Oued El Fodda en 1961. Quatre (04) vannettes de désenvasement et deux (02) de dégravoiment ont été installées dans le corps du barrage d'Eurraguene en 1962.

Cette première technique de désenvasement nécessite une bonne gestion du barrage : allant de l'installation des vannes de vidanges appropriées à la bonne connaissance des moments d'arrivée des courants de densité chargés, pour permettre la synchronisation de l'ouverture de ces vannes avec l'arrivée de ces courants avec une perte minimale des eaux claires. Par contre l'ouverture des vannes après remise en suspension des sédiments est inefficace. Remini B. parle de «bons» et de «mauvais» soutirages.

B. Le dragage.

Le premier barrage ayant subi des opérations de dragage en Algérie est celui de Fergoug, situé dans la région de Perrégaux (ouest algérien) : de 1986 à 1989 plus de dix (10) millions de m³ de vase ont été dragués. Quand au barrage de **Merdja Sidi abed** dont fait l'objet de notre étude l'opération de dragage a commencé en 2004.

Ce dragage a été réalisé avec une drague suceuse refouleuse flottante. Après remaniement local, les sédiments sont aspirés par la drague et refoulés à travers une canalisation constituée d'une partie flottante et d'une partie fixe sur plusieurs centaines de mètres de longueur. Cette canalisation sert aussi au transport par refoulement des sédiments jusqu'à la zone de rejet située en aval du barrage.

Préalablement au choix du type de drague à utiliser, une étude des fonds de la retenue a été nécessaire. Une étude géotechnique a été réalisée sur des sondages effectués dans la retenue; ils ont permis le prélèvement d'échantillons intacts. Les échantillons prélevés ont fait l'objet d'identifications et de caractérisations géomécaniques au laboratoire. Ces études ont aidé à la prise de décision sur le choix du type de matériel à utiliser pour le dragage, ainsi que sur les moyens de transport et de mise en dépôt.

Suite aux opérations de dragage, des désordres sur l'environnement sont apparues, et des enseignements sont à tirer pour les prises de décisions futures. En effet, les moyens de dragage sont très variés, allant du simple pelletage aux systèmes automatisés qu'il est possible de concevoir. La réalité a montré la nécessité de prise en charge des opérations de dragage sur toutes ses facettes :

- La caractérisation initiale des matériaux à draguer,
- La mise en état des matériaux avant dragage (séparation de phases),
- Le transport et la mise en dépôt des matériaux dragués,
- Les questions de dépollution des matériaux à déposer dans les sites naturels,
- Les aspects de valorisation des matières pouvant être exploitées,
- Les retombées économiques immédiates et à long terme.

Malgré la diversité des problèmes liés à l'envasement des retenues, la récupération des volumes de stockage des moyens existants est une priorité. Même si la construction de nouvelles retenues est envisageable, elle est confrontée dans de nombreux cas à l'inexistence de sites nouveaux. Ainsi, que ce soit par soutirage ou par dragage, les sédiments cumulés en 2000 sont estimés à plus de 650 millions de m³ et répartis sur l'ensemble des barrages algériens.

I.2.5 Particularité des retenues en Algérie

L'Algérie dispose de plus de 110 barrages en exploitation totalisant une capacité de 4,5 milliards de m³ et permettant de régulariser un volume annuel de 2 milliards de m³ utilisées pour l'A.E.P., l'industrie et l'irrigation.

Selon Remini B. (2002), l'Algérie figure parmi les contrées les plus dangereusement menacées par l'érosion et l'envasement des retenues. Les retenues algériennes étant essentiellement destinées au stockage et à la régulation de la ressource eau, sont d'autant plus vulnérables qu'elles sont défavorisées sous le rapport du régime des rivières lié à une pluviosité sous forme d'averses de fortes intensités et de courtes durées.

Or, du fait de l'érosion assez sensible (pluie de courte durée, de forte intensité, absence du couvert végétal et relief assez jeune ...), l'Algérie perd annuellement une capacité estimée à 20 millions de m³ par le dépôt des sédiments dans les retenues. La majorité des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'années. Il est rare cependant, que l'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, l'abandon d'un aménagement hydraulique particulièrement lorsqu'il s'agit de réservoirs destinés à l'adduction en eau potable ou l'irrigation dont les intérêts socio-économiques justifient une garantie de service illimitée. Il importe donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible, de manière à prendre les dispositions économiques et sociales qui s'imposent mais aussi et surtout de sauvegarder au maximum l'existence de la retenue en luttant contre ce phénomène.

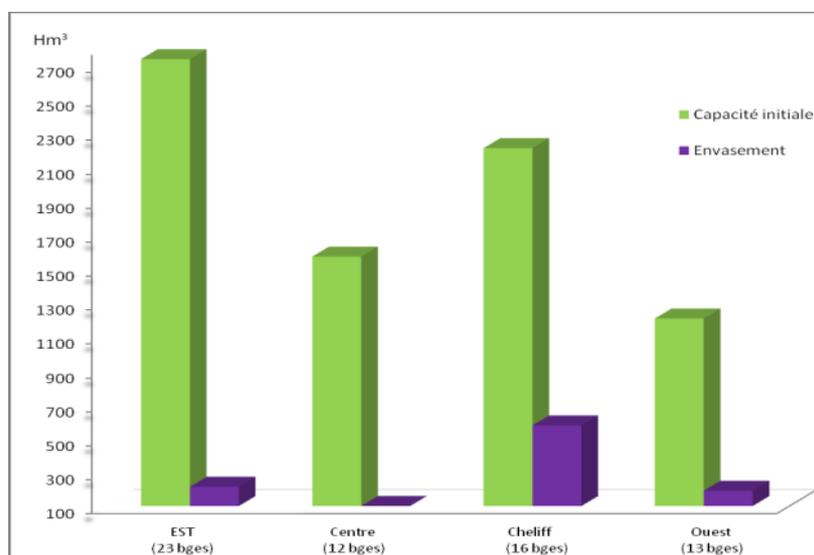
Le taux d'envasement a augmenté au début des années 2000 ; cela est dû surtout à la sécheresse qui a sévi dans notre pays durant les années 1990, suivi des années humides. Cette alternance d'années sèches et humides a provoqué une forte érosion des bassins versants. En effet les années 90 (sèches) ont été caractérisées par une faible couverture végétale et des sols disséqués et ameublés. Il est plus ressenti à l'ouest du pays suivi de la région centre et l'Est.

L'envasement des grands barrages en exploitation est donné dans le tableau I.2.

Tableau I.2 Envasement des grands barrages en exploitation (source ANBT)

Région	Nombre de Barrages	Capacité initiale (Hm ³)	Date Dernier levé Bathymétrique	Capacité dernier levé (Hm ³)	Envasement moyen annuel (Hm ³)	Envasement dernier levé (Hm ³)	Taux d'envasement %
Ouest	13	1204,88	2004	1015,16	9,14	189,72	15,75
Cheliff	16	2209,40	2005	1639,39	23,77	573,01	25,94
Centre	12	1576,50	2005	1549,03	3,57	27,49	1,74
Est	23	2754,00	2004	2 586,40	11,38	167,60	5,31
Total	64	7744,78		6786,98	47,86	957,82	12,37/14,11

La région Chleff représente à elle seule environ le tiers de l'envasement total des barrages algériens (289 hm³, figure I.5).

**Figure I.5 Histogramme Capacité / Envasement par Région (ANBT)**

Parmi les multiples procédés de lutte expérimentés sur les barrages algériens, à savoir : le reboisement des bassins versants, la surélévation des digues, les corrections torrentielles (figure I.6), la construction de barrages de décantation et l'utilisation du barrage à onde de chasse (le programme de 2004 de la Direction Générale des forêts a concerné les bassins versants de 09 barrages), il a été fait recours à des opérations de dragage.

Un important programme est en cours d'études au niveau de l'Agence Nationales des Barrages et Transferts et qui concerne le traitement et la protection des bassins versants d'une trentaine de barrages et portera sur la réalisation d'ouvrages de capture

de sédiments, de retenues collinaires, la réalisation de drains et exécutoires et la protection des abords routiers.

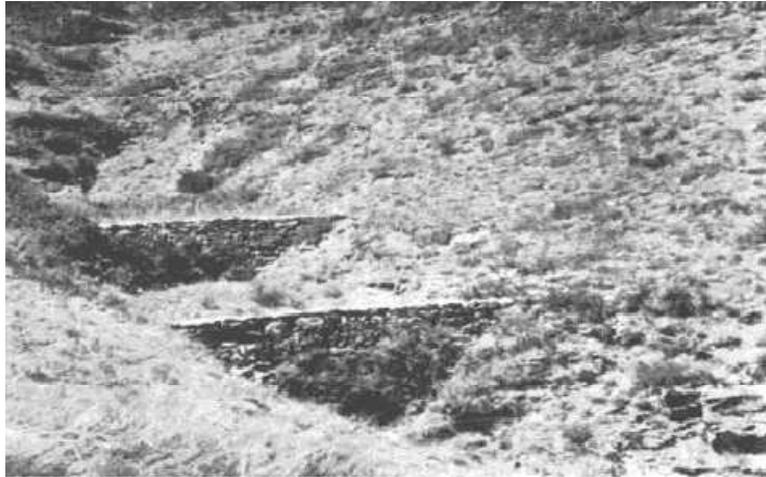


Figure I.6 Correction torrentielle dans un cours d'eau (ANBT)

Cet ambitieux programme traduit la prise de conscience en Algérie des conséquences ravageuse résultant de l'impact négatif de l'érosion des sols et les mesures préventives à prendre pour en atténuer l'impact

Soutirages : l'Algérie a connu ces 25 dernières années une sécheresse persistante ayant un impact négatif sur le niveau de remplissage des barrages. Par conséquent les chasses et les lâchés par vidange de fond au moment des crues n'ont pu être effectués au détriment de l'envasement.

Surélévation : l'Algérie a été parmi les premiers pays du monde à pratiquer la surélévation des barrages. Cette pratique a concerné neuf (09) barrages pour un gain de capacité de l'ordre de 170 hm³. Cette technique implique de lourds travaux de génie civil et ne peut être envisagée pour tous les barrages.

Dévasement par dragage : en Algérie cette alternative est incontournable afin de permettre aux barrages de continuer à sécuriser l'AEP des populations et les besoins pour l'irrigation, et ce, eu égard à la rareté des sites pour la construction de nouveaux barrages.

La première expérience de dragage par drague suceuse, acquise en 1986, est celle du barrage de Fergoug durant la période 1986 à 1989. Cette drague a été utilisée sur plusieurs autres sites avec les mêmes objectifs : la récupération d'une partie des volumes de stockage perdus par envasement.



Figure I.7 Drague activant dans la retenue du barrage Fom-El-Gherza (Biskra)

Ces opérations de dragage de volumes considérables de matières solides à l'état vaseux, n'ayant pas trouvé de réglementation ni de tradition sur le devenir de ces matériaux issus du dragage, ont eu des retombées spectaculaires sur l'environnement.

I.3 ETAT DE L'ART SUR LA VALORISATION DES SEDIMENTS DANS LE GENIE-CIVIL

Le domaine de la construction consomme des quantités importantes en granulats. La plupart de cette quantité provient de carrières naturelles.

Cependant, l'ouverture de nouvelles carrières est soumise à une réglementation de plus en plus sévère et des normes environnementales plus exigeantes. D'un autre côté, le volume annuel de sédiments dragués est de plusieurs millions de mètres cubes. Par conséquent, ce volume important peut constituer une source d'approvisionnement en granulats pour le secteur de la construction. Depuis quelques années, les applications sédimentaires dans le Génie Civil sont de plus en plus étudiées. La composition principale du sédiment est le sable, l'argile et le calcaire. Le pourcentage de ces derniers peut varier selon l'origine du sédiment.

La variation dans la composition permet aux sédiments d'avoir un potentiel de valorisation très variable dans le Génie civil : soit dans la construction des routes, soit comme granulats dans le béton, soit comme matière première dans la fabrication du ciment ou des briques.

I.3.1 Valorisation dans le béton et mortier

La production du béton présente un des gros consommateurs de matériaux et les granulats constituent un des matériaux de base de cette filière. En effet, les granulats sont des matériaux régulièrement utilisés dans la fabrication du béton. Ils proviennent

très majoritairement de carrières terrestres et sont issus de gisements alluvionnaires dont la ressource s'épuise. De plus, l'exploitation des carrières devient difficile. Dans ce contexte, l'utilisation des sédiments de dragage sous forme de granulats est amenée à se développer pour répondre aux besoins croissants de la filière de fabrication de béton à base de sédiment.

Achour R., (2013) a étudié la durabilité de deux blocs en béton à base de sédiment marin. Cette étude est divisée en trois étapes.

La première étape est consacrée à une caractérisation non destructive et destructive des deux bétons contenant 12,5% et 20% de sédiment associé à une caractérisation microstructurale. La seconde concerne la durabilité de ces bétons face aux attaques sulfatiques externes, à la soumission aux cycles gel/dégel et à la réaction alcali-granulats afin d'évaluer l'effet de l'incorporation des sédiments dans les bétons et le comportement de ces derniers. Enfin, la troisième étape traite du volet impact environnemental par des essais de lixiviation sur les deux types de bétons.

Agostini F. (2006) a étudié des sédiments contaminés. Dans son travail, il a utilisé un processus de traitement appelé le processus Novosol. Les produits traités ont été ensuite utilisés dans les mortiers en remplacement des granulats naturels. Quatre types de mortier ont été réalisés : mortier de référence MR, mortiers à 33% ; 66% ; 100 % de remplacement du sable par le sédiment traité. La résistance à la compression, le module d'Young, la perméabilité au gaz, la porosité, la masse volumique ont été mesurés sur divers échantillons à l'âge de 28, 60 et 90 jours. Les résultats ont montré que lorsque la quantité de sédiment dans le mélange augmente, la porosité augmente et la masse volumique diminue. La valeur de la perméabilité intrinsèque du mélange MS33 est très proche de celle du mortier de référence MR ; en revanche les valeurs correspondant à MS66 et MS100 sont plus grandes de trois (03) fois par rapport aux deux premiers. Des mesures de retrait ont aussi été effectuées. Elles ont montré qu'à l'âge de 110 jours, la déformation de MS100 est jusqu'à neuf (09) fois supérieure à celle de MR. Pour les substitutions inférieures, les déformations finales sont trois à six fois supérieures à celle du mortier de référence. De larges fissures ont été observées rapidement sur l'échantillon MS100. Ce phénomène n'a pas été observé ni sur MS33 ni sur MS66. En ce qui concerne la résistance à la compression, les résultats montrent que l'introduction des sédiments traités dans les mortiers conduit à l'amélioration de la résistance à la compression. Une augmentation de 20% est obtenue pour MS33. Selon la courbe de compression en fonction du taux de substitution, la valeur optimale se trouve avoisine les 33%. Hors de cette zone, la résistance diminue, mais elle est encore plus grande que celle du mortier de référence. Les auteurs ont conclu que le processus Novosol permet de traiter efficacement les sédiments dragués et contaminés puisqu'il

fixe les métaux lourds dans la matrice d'apatite et élimine les combinaisons organiques et que le produit obtenu peut être utilisé comme du sable avec un taux de substitution optimal d'environ 33%.

Ben Allal L. et al., (2011)] ont étudié la valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc) dans les mortiers par substitution du sable. Les valeurs des résistances à la compression obtenues ont confirmé qu'une substitution partielle du sable par des sédiments de dragage des ports de Tanger et de Larache dans les mortiers est satisfaisante pour un dosage de 20%.

En Algérie des études de valorisation des vases de dragage de barrages ont été faites, Belas N. et al. (2011) ont valorisé la vase issue du barrage de Fergoug en tant que matériau de construction entrant dans la composition des bétons en l'utilisant, après calcination pour la rendre active, en dosages définis substituables au ciment (10,15 et 20% de vase par rapport au dosage en masse du ciment). Les bétons ainsi confectionnés sont testés vis-à-vis du comportement mécanique en compression et du retrait. Les résultats obtenus montrent de belles perspectives pour les bétons à base de vase qui affichent des performances mécaniques et un comportement au retrait satisfaisants.

I.3.2 Valorisation dans la fabrication du ciment

La composition chimique des sédiments (principalement de la silice, quartz, calcite, ...) rappelle celle de la matière brute utilisée pour la fabrication du clinker. L'idée est que l'on peut les utiliser dans l'industrie cimentaire. Or très peu d'études existent sur ce sujet. C'est en 2004 que l'étude de cette solution a débuté par Dalton et al. (2004) cité dans [Dang T.A., 2011]. Ils ont fabriqué du clinker en présence de sédiments et ceci a deux niveaux : au niveau du laboratoire (bench scale) et au niveau semi-industriel (pilot scale), la référence étant le ciment Portland ordinaire industriel (full scale).

Les essais au laboratoire (bench scale) consistaient en la fabrication de quatre (04) types d'échantillons en augmentant la proportion en matière contaminée : 0% (l'échantillon de référence), 1,49%, 6,63%, 12,3% en masse. Les échantillons ont été calcinés à 1450°C et puis refroidis. Ils ont été ensuite broyés en poudre fine comme le ciment et puis analysés. Trois variables ont été étudiées : teneur en sédiment, technique de mélange et processus de cuisson. Les essais « pilot scale » ont été réalisés avec 6,5% de sédiment (en masse sèche) dans un four rotatif sous une température maximale de 1350°C. Les auteurs concluent sur la possibilité d'utiliser le sédiment comme matière première pour la fabrication du ciment Portland en remplacement des cendres volantes et de la bauxite. Le taux de substitution en

sédiment dépendra alors de sa teneur en SiO₂. Enfin, la haute teneur en chlorure libre dans le sédiment ne fait pas augmenter la concentration en chlorure du produit final (ciment).

Dang T.A. (2011) a étudié la possibilité d'utilisation des sédiments provenant du piège de Lyvet aménagé sur la Rance et de la baie de Mont Saint Michel. Après une caractérisation physico-chimique des sédiments bruts faisant appel à diverses techniques (DRX, ATG -ATD, MEB...), un traitement thermique à 650°C et 850°C a été adopté. Ce traitement permet d'éliminer des matières organiques et d'activer des argiles. Les sédiments traités ont été ensuite ajoutés selon différents dosages (8, 16, 33% par rapport à la masse sèche du liant) à du ciment Portland ordinaire afin de développer de nouveaux liants de type ciments Portland composés. Ces nouveaux liants ont ensuite été caractérisés (temps de prise, pouzzolanité, résistance en compression, module d'Young, perméabilité au gaz...etc.). Les résultats ont montré que même si les nouveaux liants ne présentent pas de caractère de pouzzolanité selon la norme NF EN 196-5, ils développent des propriétés mécaniques et de transfert intéressantes par rapport à un ajout inerte. La classe de résistance de ces liants a été déterminée selon la norme NF EN 196-1. Les résultats ont montré que les sédiments calcinés à 650°C pourraient être utilisés jusqu'à 35% pour obtenir des liants de classe 42,5, alors que les sédiments calcinés à 850°C ne vérifient que la classe 32,5.

Quant à Semcha [Semcha A., 2006], il a étudié la possibilité de réutilisation de la vase prélevée à l'état solide, dans la zone de rejet sur Oued El Hammam (en aval du barrage de Fergoug) ainsi que dans la région de la Macta dans la fabrication du ciment.

Les cimenteries algériennes utilisent, pour la production d'un ciment composé de type CEM II de classe élevée, une pouzzolane naturelle. L'étude a amené à la conception d'une pouzzolane artificielle par traitement thermique (750°C) de la fraction argileuse des vases issues du barrage de Fergoug. Des micro-éprouvettes de pâte durcie ont été fabriquées et soumises à des essais de compression uniaxiale afin d'en estimer leur réactivité pouzzolanique. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus avec la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, dans les mêmes conditions expérimentales. La comparaison des résultats obtenus sur les deux matériaux étudiés permettent de retenir en conclusion les principaux éléments suivants :

- Ces deux matériaux peuvent trouver des applications aussi bien pour la production de ciment composé de type CEM II, que pour la fabrication de liants pouzzolaniques,
- Un meilleur comportement est observé pour la pouzzolane de synthèse à base de vase calcinée ont dépassé celles obtenues avec de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. Les deux procédés traduisent un véritable intérêt économique.

I.3.3 Valorisation dans la fabrication de briques

La fabrication de briques à partir des sédiments de dragage constitue une autre voie de valorisation.

Ben Allal L. et al. (2011) ont étudié la valorisation des sédiments provenant des ports de Larache et de Tanger comme matière première dans la fabrication de briques. Les sédiments ont été utilisés dans la fabrication de briques par substitution partielle de l'argile entrant dans la formulation. La confection des briques a été réalisée au sein même d'une briqueterie. La préparation des échantillons de briques consiste en un mélange de 70% de sédiments et 30% d'argile. Après séchage à l'air libre, les matériaux sont broyés puis tamisés à un (01) mm. Après malaxage, moulage et séchage de la pâte, les briques-éprouvettes sont séchées à une température de cuisson de 920 °C pendant 32 heures. Les premiers constats sont encourageants puisque la fabrication de briques s'est révélée possible.

Semcha A. (2006) s'est intéressé à la fabrication de la brique autoclavée à base de vase. La vase prélevée à l'état solide, dans la zone de rejet sur Oued El Hammam (en aval du barrage) ainsi que dans la région de la Macta, stabilisée au ciment dans des conditions particulières de température, d'humidité et de pression, a donné des résistances à la compression comparables à celles de la brique silico-calcaire. Le procédé de conception est inspiré de celui décrit pour le composite à base de quartz [Benamara L.,1990]. L'activateur chimique utilisé est le ciment Portland ordinaire (CEM I). Les étapes essentielles de la production du composite sont les suivantes :

- Broyage et nettoyage de la vase crue,
- Dosage des mélanges,
- Malaxages à sec et humide,
- Moulage et pressage,
- Autoclavage pendant 6, 15 et 24 heures.

Après le séjour en bain hydrothermal à une température de 135 °C et une pression de 3,3 bars, les éprouvettes (4x4x16) sont testées à la compression et les résidus analysés. Une résistance à la compression de l'ordre de 40 MPa est obtenue pour un mélange de 40% de ciment et 60% de vase. Cette résistance est très suffisante pour un moellon à bâtir.

D'autres travaux de recherche ont été réalisés, notamment [Harmer, K., et al., 2002 ; Lafhaj, Z., et al., 2007, Samara, M., et al., 2009]. Ils ont fabriqué des briques à partir d'un mélange de sédiments et d'argile par traitement thermique.

I.3.4 Valorisation dans la construction des routes

En géotechnique routière, l'intérêt d'envisager des voies de valorisation réside d'abord dans la demande importante en matières premières et le large éventail de techniques et de qualités acceptables pour les matières premières dans le secteur des travaux publics permettent à un sous-produit de trouver plus facilement un réemploi.

Les projets d'infrastructures dans le domaine des travaux publics nécessitent d'importantes quantités de matériaux. Les matériaux naturels se font rares et coûteux. Confrontées à la nécessité de trouver des granulats en grande quantité et à faible coût, les entreprises routières se sont rapidement intéressées aux matériaux de recyclage.

Ce sujet a été étudié par plusieurs auteurs. Tous les résultats ont donné des avis favorables sur l'utilisation des sédiments dans la construction des routes. Avant qu'ils soient utilisables, les sédiments doivent être traités pour que leurs caractéristiques physico-mécaniques soient satisfaisantes vis-à-vis des critères géotechniques de la construction routière. Les sédiments se caractérisent par une importante teneur en eau (jusqu'à 200%), en sels (pour les sédiments marins), en argile, en matière organique et parfois en métaux lourds. Ce sont les principaux facteurs qui empêchent l'utilisation des sédiments sans traitement.

Plusieurs études ont été réalisées dans le domaine de valorisation en techniques routières. La méthodologie générale de valorisation décrite dans l'étude de [M. A. Bourabah M.A. et al, 2009] a pour but l'utilisation des sédiments de dragage du barrage de Cheurfas (Algérie) dans une formulation de matériau routier. La formulation retenue est un mélange constitué de 30% de sédiment naturel et de 70% de sable. Pour améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau traité, des ajouts de ciment ou de chaux ou une combinaison de ces deux liants ont été effectués. Les auteurs ont conclu que l'ajout d'un matériau granulaire a montré une amélioration de la densité sèche (γ_{dOPM}) et une réduction de la teneur en eau optimale (W_{OPM}), et que l'ajout de liants hydrauliques a permis d'améliorer la portance du matériau ($35 < IPI < 50$) et ont conclu que le sédiment traité peut être utilisé en couche de fondation et de base.

L'objet du travail de thèse de Scordia P.Y. (2008) concerne la valorisation de sédiments fluviaux, pollués et traités par le procédé Novosol®, développé par la société Solvay, dans le domaine de la construction routière. Une première étape de caractérisation physico-chimique et géotechnique des sédiments traités Novosol® (STN) a établi la faisabilité de leur valorisation en couche de forme. Il a également été mis en évidence qu'ils présentaient une réactivité hydrique et pouzzolanique. L'influence de la nature du liant sur le traitement des STN a ensuite été abordée. D'après les résultats des essais mis en oeuvre (aptitude au traitement, gonflement,

portance, résistance en compression et en traction Brésilienne), 2 des 5 liants testés se distinguent particulièrement et présentent un niveau de performance de classe 3 selon le Guide du Traitement des Sols. Il s'agit du Roc Sol et de la chaux vive.

Dans le cadre de l'étude de Nguyen T. B. (2008), il s'est intéressé à la valorisation des sédiments fluviaux traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux routiers pour assises de chaussée. Les études expérimentales en laboratoire comportent deux aspects : performance mécanique et comportement à la lixiviation des matériaux. Les sédiments traités NOVOSOL® sont introduits dans des matériaux traités aux liants hydrauliques en substitution d'une partie ou en totalité du sable traditionnel. L'auteur a conclu que la valorisation des sédiments traités NOVOSOL® dans les matériaux routiers traités aux liants hydrauliques pour assises de chaussée est tout à fait envisageable du point de vue technologique, mécanique et environnemental.

La démarche de valorisation des sédiments marins et fluviaux en technique routière de Tran N.T. (2009), s'appuie sur une identification des caractéristiques physiques et mécaniques, la composition minéralogique, l'impact sur l'environnement des sédiments bruts et sur le potentiel d'utilisation de ces matériaux en technique routière. Pour améliorer, en particulier, les performances mécaniques des sédiments étudiés vis-à-vis des contraintes imposées pour une utilisation en assise de chaussée, des correcteurs granulométriques (sable de dragage et sable du Boulonnais) ont été utilisés. La méthode expérimentée pour l'étude de la formulation de matériaux pour une utilisation en assise de chaussée est conforme à la méthode de préparation des échantillons pour l'étude du comportement mécanique de matériaux dans le domaine des travaux routiers. Les mélanges granulaires déduits sont ensuite traités au ciment et/ou à la chaux pour améliorer leurs performances mécaniques. Sur la base de cette démarche, les mélanges développés remplissent les conditions d'utilisation en couches d'assise de chaussées sur le plan mécanique. L'impact sur l'environnement des mélanges développés est également exploré au travers d'essais de lixiviation.

Les travaux dans le cadre de l'étude de Wang D. (2011) portent sur la proposition d'une solution pour l'utilisation des sédiments marins en couche d'assise de chaussée. Après une identification des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et environnementales, le potentiel d'utilisation des sédiments bruts en techniques routières est évalué. Pour améliorer les propriétés mécaniques des sédiments le ciment, la chaux et les cendres volantes sont employées dans cette étude.

La valorisation des sédiments marins non-immérgeables du Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) en technique routière a été étudiée par Achour R. (2013). Dans cette étude, une formulation à base de sédiment marin a été mise en place avec un

traitement de 1% de chaux et 6% du liant hydraulique. L'étude mécanique de cette formulation a montré de bonnes performances au niveau de la résistance à la compression et à la traction ainsi qu'au niveau du module d'élasticité. Selon la classification GTS, la formulation se classe en S3 qui est une bonne classe pour une valorisation en couche de fondation. Du point de vue environnemental, la formulation a dévoilé que les concentrations des éléments métalliques traces sont largement inférieures aux seuils pour une utilisation en technique routière définis par le guide. Conformément à ce guide, la formulation est utilisable en construction routière.

Kamali S. B. et al. (2008) ont examiné plusieurs formulations à base de sédiments marins. Ils se sont intéressés principalement à la vase draguée qui provient des zones non-polluées du port de Dunkerque. Dans leurs recherches, les sédiments ont été d'abord déshydratés, mélangés à de la chaux vive afin de diminuer la teneur en eau et de stabiliser les composés organiques. Ensuite, le sédiment traité a été mélangé à du sable de dragage, du sable naturel, du ciment portland CEM I et CEM II. Différentes formulations à base de sédiment ont été mises au point. Ils ont ainsi montré que les sédiments étudiés peuvent être utilisés dans les couches de fondation et de base des routes. En revanche, étant donné la sensibilité des sédiments à l'eau, il est nécessaire de bien contrôler l'humidité au cours de l'exécution du chantier.

I.4 CONCLUSION

L'envasement des retenues est la conséquence la plus dramatique des phénomènes de l'érosion. La recherche de solutions nécessite la prise en compte du problème dans son ensemble c'est-à-dire l'étude des causes du comblement et du comportement des sédiments à l'extérieur de la retenue ainsi que dans la cuvette.

La construction de barrages crée artificiellement des lacs, qui représentent en fait les réservoirs d'eau recherchés ; ce qui favorise l'instauration d'un équilibre entre les apports liquides dans le bassin versant et la restitution des quantités d'eau nécessaire aux besoins.

En plus de l'équilibre entre la gestion des ressources pluviométriques du bassin versant et les besoins en eau de surface, le barrage est à l'origine de l'équilibre des niveaux phréatiques dans les sous sols filtrants du lac-réservoir, ainsi qu'une régularité d'alimentation des nappes par les infiltrations tout le long des cours d'eau en aval du barrage.

Que ce soit à l'aide de dragage ou de soutirage (par les ouvrages de vidange), la récupération des volumes de stockage et la remise du barrage à ses fonctions initiales nécessitent la connaissance des phénomènes de sédimentation ayant abouti au

comblement de la retenue. En effet, les volumes d'eau exploitables sont comblés dans des délais très courts d'une part, et en évacuant les matières solides en grandes quantités, elles provoquent un impact négatif sur l'environnement, d'autre part.

Malgré les grands efforts financiers mis en œuvre dans les opérations curatives de dragage en Algérie, ces derniers restent insuffisants, et la nécessité de rechercher d'autres moyens de lutte pour la préservation de la ressource eau et de l'environnement est une priorité vitale. De grands efforts financiers restent encore à fournir pour le curage d'un grand nombre de barrages. Que ce soit par dragage ou par soutirage la programmation d'opérations périodiques de vidange est nécessaire. Les volumes considérables de matières solides qui en résultent, avant valorisation nécessitent des traitements appropriés et un stockage en harmonie avec leur environnement.

Le dragage constitue la phase ultime qui traduit clairement les insuffisances des autres moyens de lutte contre l'envasement utilisés en amont. Le dragage en Algérie étant un dragage d'entretien des retenues de barrages, il doit s'inspirer des moyens et méthodes utilisés dans le monde malgré la particularité des sites et du climat. L'adoption des techniques de dragage doit passer par la caractérisation et l'identification de la vase pour le choix des moyens de vidange.

Chapitre II

VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DANS LES MATERIAUX ROUTIERS

Chapitre II

VALORISATION DES SEDIMENTS DE DRAGAGE DANS LES MATERIAUX ROUTIERS

II.1. L'UTILISATION DES GRANULATS DANS LE BTP

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre I, les sédiments de dragage ont déjà fait l'objet de plusieurs études de valorisation : dans les mortiers, les bétons ou encore les briques cuites. Dans cette partie, nous présentons les raisons qui nous ont amenées à explorer les possibilités de valorisation des sédiments dans les matériaux routiers

Si l'on s'intéresse à la répartition des besoins en granulats en fonction des différents secteurs d'activité du BTP, on s'aperçoit que le domaine routier se place en première position en consommant une grande quantité de granulats et de plus la consommation est supérieure à la production.

II.1.1. Production du granulats en Algérie

Les quatre opérations nécessaires à la production des granulats sont :

- l'extraction de la matière première ;
- le concassage ;
- le criblage ;
- le stockage avant expédition

On distingue deux catégories de granulats.

➤ **Les granulats de carrière**

La quasi-totalité des granulats est issue de roches massives principalement calcaires. Ils sont produits à partir de bancs rocheux. L'extraction se fait par abattage à l'explosif après que la découverte (terre végétale et roche altérée surplombant le front de taille) ait été éliminée au buteur ; l'abattage doit se faire selon les règles de l'art, l'usage de l'explosif étant très réglementé pour des raisons de sécurité et de nuisances à l'égard de la collectivité.

Les caractéristiques des granulats produits dépendent de la roche et de la structure des bancs. Par exemple, si un banc calcaire dur est très fissuré, étant rempli d'argile, le sable de concassage contiendra beaucoup de fines argileuses [Saadani S.].

Malgré le développement soutenu qu'il connaît depuis quelques années, le secteur des carrières en Algérie n'arrive toujours pas à satisfaire la demande en matériaux de construction exprimé par le marché national des BTPH, en hausse exponentielle.

Il ya 933 carrières dont 661 privées et 272 publiques (figure II.1) avec une production nationale entre 80 et 100 tonnes par an et 110 sablières (privées pour la plupart) avec un déficit de 60 mille tonnes par an [Sayah D. M., 2008].

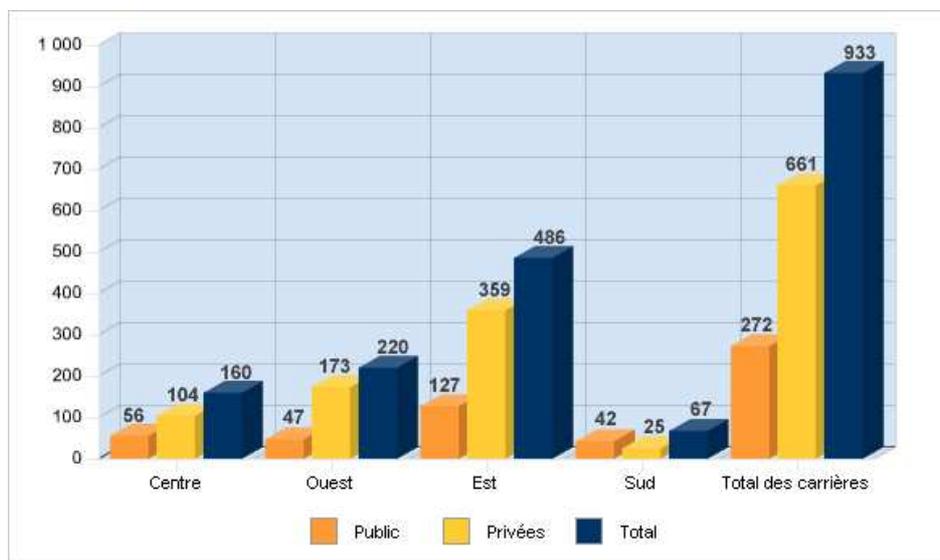


Figure II.1 Répartition des carrières [Sayah D. M., 2008]

Les efforts déployés ont permis de répondre, au moment opportun, aux besoins essentiels de l'économie nationale en produits miniers et notamment en substances minérales destinées aux matériaux de construction nécessaires à la réalisation des importants programmes du gouvernement, à savoir la construction des infrastructures routières, ferroviaires, aéroportuaires, portuaires, hydrauliques, de santé, de logements etc., réparties à travers l'ensemble du territoire national. C'est ainsi que la production des granulats pour l'année 2009 a atteint plus de 68.7 Mln de m³ en hausse de +31.8% par rapport à l'année 2008. La production des agrégats a atteint 55.3 Mln de m³ en 2009.

La politique d'encouragement de la production et de consommation de sable concassé en appoint au sable naturel de construction pour la préservation du sable des plages et des oueds commence à porter ses fruits. C'est ainsi qu'elle est passée de 2.21 Mln de M3 en 2005 à 13.4 Mln de m³ en 2009 en augmentation de +27.6% par rapport à la seule année 2008 (bilan des activités minières, 2009).

➤ Les granulats alluvionnaires

L'extraction se fait classiquement par une pelle mécanique en site terrestre et par dragage en site aquatique (mer). Contrairement au cas de l'exploitation en carrière, le concassage est une opération auxiliaire puisqu'on concasse les classes granulaires non demandées pour augmenter la production des classes déficitaires.

Le criblage est ici, l'opération principale ; il est généralement pratiqué dans un courant d'eau, ce qui combine tamisage et lavage en effet, même en site terrestre, le gisement est fréquemment sous la nappe phréatique.

Face à la surexploitation des sables d'oued et de mer, ayant engendré une menace certaine sur les nappes alluviales et une dégradation inquiétante de l'environnement, des mesures draconiennes sont prises pour la protection des sites d'exploitation situés dans les domaines publics maritimes et hydrauliques. Cette situation a entraîné, évidemment, une diminution drastique de l'offre en sable de construction, ressentie avec acuité au niveau surtout des wilayas du centre du pays.

L'extraction de sable des oueds est autorisée jusqu'au 31 août 2009 avec une autorisation provisoire et sous conditions, indique un décret présidentiel (décret exécutif N° 09-376) publié dans le Journal officiel. Autrement dit, l'exploitation des sablières situées dans les oueds ne peut se faire que dans le cadre d'un cahier des charges précis ou dans le cadre d'une concession, sous réserve d'une étude d'impact établie conformément à la législation et à la réglementation en vigueur. Une commission est installée à cet effet. Elle se chargera d'arrêter la liste des oueds concernés par l'octroi ou le refus de l'autorisation d'extraction. Tout dépend de l'état dans lequel se trouve la zone concernée.

II.1.2 Consommation du granulat en Algérie

Le développement dans la construction des bâtiments et d'ouvrages de Génie Civil a provoqué durant ces deux dernières décennies, un accroissement considérable dans la consommation de granulats. Ceci induit un important déficit en granulats, notamment les sables des rivières, les graviers, les gisements, tous agrégats confondus, sont soit mal exploités soit sous exploités.

De nombreux projets dans la construction en Algérie génèrent une forte consommation de matériaux. En effet, l'état algérien a mis en place différents programmes pour la réalisation de grands projets dont [Daho I. 2012] :

- 01 million de logements,
- La réalisation de l'autoroute est-ouest (1200 km),
- La réhabilitation et le développement du réseau routier (routes nationales départements et chemins de wilayas), 6000 km,
- La réalisation de 145 ouvrages d'art,
- Le renforcement et la modernisation de 20 aérodromes,
- Le renforcement de 11 infrastructures portuaires,
- La construction de 08 nouveaux barrages,
- 13 usines de dessalement d'eau de mer,
- La réalisation et la réhabilitation de stations d'épuration,
- La grande mosquée d'Alger,
- La réalisation d'écoles, d'universités.

Le réseau routier a connu un grand développement ces dernières années. La figure II.2 montre les perspectives de développement du réseau routier et auto routier algérien.



Figure II.2 Perspectives de développement du réseau routier et auto routier algérien
[Sayah D. M., 2008]

Les besoins en matière de sable ont été estimés à 45 millions de tonnes pour la réalisation des grands projets de travaux publics sur la période 2005-2009 :

- 26 millions seront utilisés pour le développement routier,

- 10 millions pour les projets d'autoroute est-ouest, rocadés et voies express,
- 04 millions pour l'entretien des routes,
- 05 millions de tonnes pour les ouvrages d'art...

II.2 CONCEPTION D'UNE CHAUSSEE SOUPLE

II.2.1 Description d'une structure routière

La coupe transversale d'une route fait apparaître, en plus du terrassement, 4 couches principales (figure II.3).

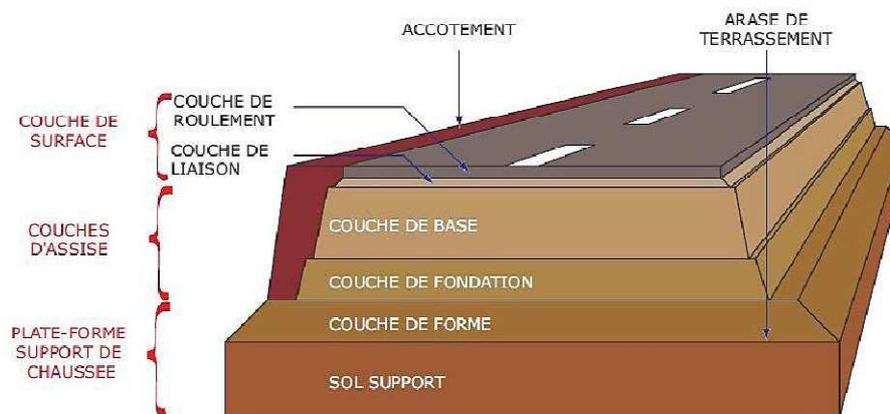


Figure II.3 Différentes couches d'une chaussée

En partant de la Partie Supérieure des Terrassements (PST), on distingue la couche de forme, les couches de fondation et de base qui forment l'assise de la chaussée et la couche de roulement. De façon générale, plus on s'éloigne de la PST et plus les performances mécaniques requises sont importantes. Par conséquent, les matériaux, les liants utilisés, les techniques et les modalités du compactage sont propres à chaque couche.

II.2.2 Rôle des différentes couches

La couche de forme est une structure qui sert à adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai aux caractéristiques mécaniques, géométriques et thermiques requises pour optimiser les couches de chaussée. Elle facilite la traficabilité du chantier, protège l'arase du terrassement en évitant qu'elle subisse des modifications physiques, qu'il s'agisse de sa géométrie ou de sa portance. Ses performances mécaniques facilitent la mise en œuvre des couches d'assise et leur compactage tout en

permettant un dimensionnement plus précis. A long terme, la couche de forme permet d'élever et d'homogénéiser la portance de la PST. Lorsque c'est possible, elle est constituée des matériaux en place après un traitement à la chaux ou au liant hydraulique. Cependant, il peut arriver que les propriétés du sol ne soient pas adaptés et on a alors recours à des matériaux d'apport.

Les couches de l'assise (fondation et base) ont un rôle structural beaucoup plus important. Elles doivent reprendre les efforts verticaux statiques en permettant la distribution de ces charges sur le sol. Les performances mécaniques requises sont donc plus importantes que pour une couche de forme, ce qui se traduit notamment par une différence dans l'énergie de compactage nécessaire pour leur mise en œuvre. Elles sont généralement constituées par une grave traitée ou non.

Enfin, la couche de roulement a pour fonction principale de supporter les efforts superficiels dynamiques dus au trafic et surtout aux efforts horizontaux. Les matériaux utilisés doivent présenter de bonnes performances mécaniques, notamment en ce qui concerne leur usure et leur fragmentabilité. Le liant utilisé peut être bitumineux ou non, en fonction du type de chaussée (souple ou rigide).

II.2.3 Conception et fonctionnement de la couche de forme

La première application de la valorisation des sols fins intéresse les sous couches routières, en particulier la couche de forme. Si l'on traite les sols fins, on observe une différence notable dans les caractéristiques mécaniques qui deviennent acceptables pour la réalisation de chaussées. Ainsi, la couche de forme est introduite concrètement ci-après. Elle se trouve entre la couche d'assise et le sol support. Selon les cas d'études et de chantier en fonction de la nature du sol support, du climat local, de l'environnement hydrogéologique, des activités humaines, du trafic local, etc., la couche de forme doit répondre à différentes conditions.

Elle peut être inexistante car les matériaux constituant le remblai sont inutiles ou bien les sols en place ont eux-mêmes les qualités requises. On se limite à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques nécessaires. Selon le concept traditionnel, elle est constituée d'une superposition de couches de matériaux différents répondant à des fonctions distinctes (GTR, 1992). La couche de forme fonctionne avec les deux objectifs: le court terme, vis-à-vis de la phase de réalisation de la chaussée et le long terme lorsque l'ouvrage est en service.

II.3 PRESENTATION DU BARRAGE DE MERDJA SIDI ABED

II.3.1 Situation

Le barrage de Merdja Sidi Abed est situé dans la plaine de l'oued Chélif entre les villes d'Oued Rhiou et Sidi Abed dans la wilaya de Relizane, région du nord-ouest de l'Algérie.

L'oued Chélif est l'oued principal du centre-ouest algérien. Il prend sa source dans les monts situés à l'est du massif de l'Ouarsenis à proximité de Ksar El Boukhari puis s'écoule sensiblement d'est en ouest jusqu'à proximité de Mostaganem où il se jette dans la Mer Méditerranée.

Le barrage de Merdja Sidi Abed à proprement parler est constitué pour sa plus grande partie par une digue artificielle entourant une large plaine au nord, à l'ouest et au sud. La retenue est ainsi normalement alimentée par pompage depuis l'oued Chélif qui passe un peu plus au nord.

La figure II.4 montre la Carte de localisation du barrage.

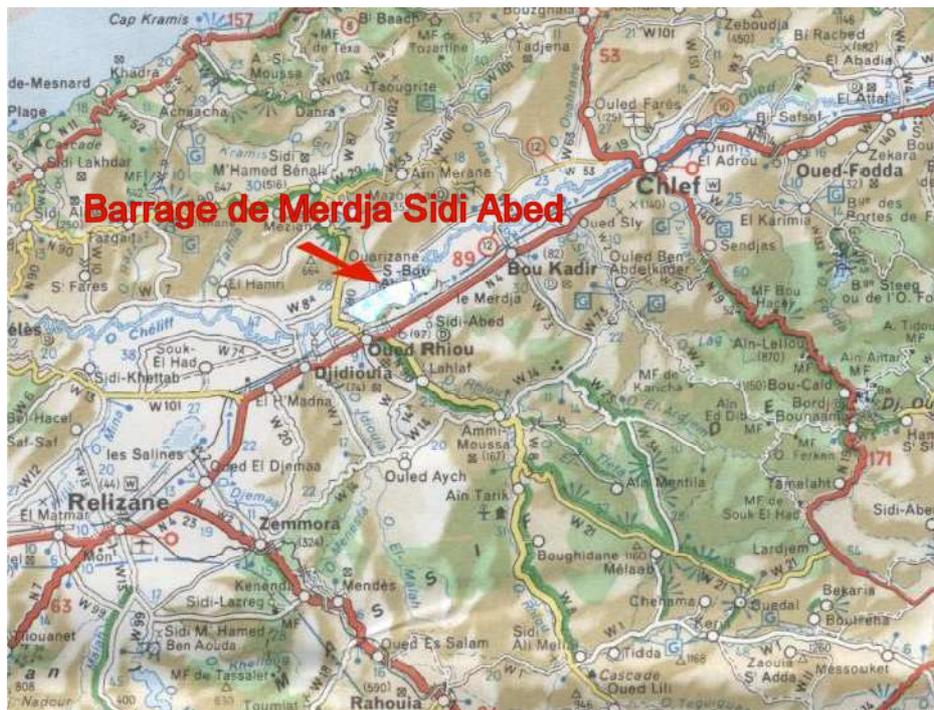


Figure II.4 Carte de localisation du barrage

Le barrage de Merdja Sidi Abed est parmi les ouvrages programmés dans le cadre de désenvasement dont le volume de sédiment à draguer est de 5 millions de m³. Des

opérations de dragage ont été lancées en 2004. L'état d'envasement du barrage est montré sur la figure II.5.

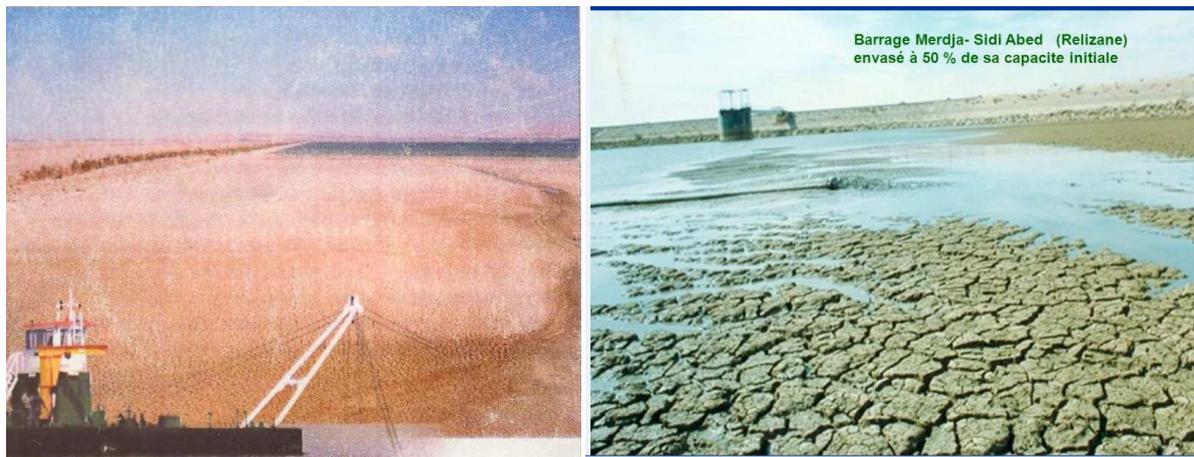


Figure II.5 Etat d'envasement du barrage

II.3.2 Description du barrage : Fiche technique

Le barrage de Merdja Sidi Abed a été mis en service en 1984 pour une capacité initiale de 54.9 Hm³.

L'exploitation du barrage a été interrompue en 1999. Des opérations de dragage ont été lancées en 2004 afin de pouvoir reprendre l'exploitation.

La cote de la retenue normale a été fixée à 67.75 m et celle de la retenue maximale à 68.00 m (niveau des Plus Hautes Eaux Exceptionnelles).

Pendant la campagne de mesures, la cote du plan d'eau était de 63.13 m dans le système hydrographique du barrage.

Le barrage de Merdja Sidi Abed est situé dans la plaine de l'oued Chélif dans la wilaya de Relizane (Algérie) en bordure de la route nationale N° 04. C'est un réservoir alimenté d'une part par un canal gravitaire jusqu'à la côte 64,20 et d'autre part par une station de pompage équipée de 04 pompes.

Il est destiné essentiellement à l'irrigation de la plaine du Bas-Cheliff et à l'alimentation en AEP de la ville d'Oran dans le cadre du sseau de l'urgence.

Envasement moyen annuel est de 6%.

II.3.3 Etude de la retenue

En juin 2003, l'Agence Nationale des Barrages du Ministère des Ressources en Eaux (A.N.B.) a confié au consortium de bureaux d'étude LEM-GEOID la réalisation des levés bathymétriques et topographiques des 31 barrages en exploitation des échelons Ouest Lot 1 (14 barrages) et Est Lot 4 (17 barrages).

Cette étude permettra plus particulièrement d'actualiser la capacité de stockage de la retenue d'eau et la surveillance de l'envasement de l'un des barrages de l'ouest : le barrage de MERDJA SIDI ABED (Wilaya de RELIZANE).

Elle aidera l'A.N.B. à définir de façon rationnelle et précise la réserve en eau du barrage.

Ces opérations ont également inclus la délimitation des retenues à la côte des Plus Hautes Eaux Exceptionnelles (PHE) ainsi que le calcul des capacités de stockage de ces retenues aux différentes côtes intermédiaires.

L'interprétation des mesures réalisées en février 2004 donne les résultats suivants :

- La superficie du barrage à la cote de retenue normale (67.75 m) est de 1 019.56 ha.
- La superficie du barrage à la cote de la PHE (68.00 m) est de 1 026.41 ha.
- La capacité du barrage à la cote de retenue normale (67.75 m) est de 47.97 Hm³.
- La capacité du barrage à la cote de la PHE (68.00 m) est de 50.53 Hm³.

L'analyse des résultats de 2004 par rapport à ceux obtenus en 1996 par l'étude réalisée par le LEM montre que l'envasement du barrage se poursuit. En 1996 l'envasement du barrage était de 12.42 % par rapport à sa capacité initiale. En 2004 le taux a légèrement augmenté puisqu'il est de l'ordre de 12.62 % toujours par rapport à sa capacité initiale qui était de 54.90 Hm³.

L'évolution de la perte de capacité de la retenue du barrage à la RN (67.75 m) est donc résumée dans le tableau suivant :

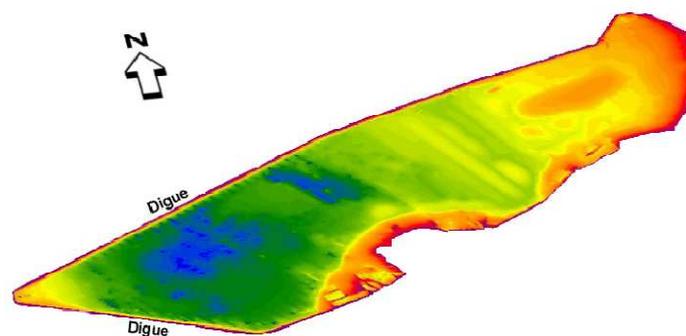
Selon l'étude réalisée par les bureaux d'étude LEM-GEOID.

Tableau II.1 Evolution de la perte de capacité de la retenue du barrage à la RN

	1984 (Mise en service)	1996 (LEM)	2004 (LEM/GEOID)
Capacité à la RN (hm ³)	54.90	48.08	47.97
Perte par rapport à la capacité initiale(hm ³)	–	6.82	6.93
% de perte par rapport à la capacité initiale (%)	–	12.42	12.62

La perte moyenne annuelle entre l'année de mise en service du barrage et l'année 2004 est donc de l'ordre de 346 500 m³/an. La perte totale en capacité de stockage à la RN entre 2004 et 1984 est de 6.93 Hm³.

Une analyse concernant la disposition et l'allure des isobathes de 1996 et de 2004 indique qu'un envasement s'est opéré dans la zone Nord Est du barrage (figure II.6).

**Figure II.6 Envasement de la retenue**

Ce barrage est très plat (environ 66 à 67 m à l'est puis 61m au centre ouest et enfin 64 m vers la digue de l'ouest). L'envasement se fait de façon progressive, d'abord la zone Nord Est puis vers l'Ouest.

II.4 CONCLUSION

Le réseau routier a connu un grand développement ces dernières années, notamment la construction de l'autoroute Est-ouest et les nouvelles routes ainsi que les ouvrages d'art nécessaires pour relier l'autoroute aux villes et à l'enceinte réseau.

Un important déficit en granulats, notamment les sables des rivières et les graviers, est déploré. Les gisements, tous agrégats confondus, sont soit mal exploités soit sous exploités.

Malgré le développement soutenu qu'il connaît depuis quelques années, le secteur des carrières en Algérie n'arrive toujours pas à satisfaire la demande en matériaux de construction exprimé par le marché national des BTPH, en hausse exponentielle.

Les dépôts de sable naturel, de gravier et de pierres, surtout ceux qui sont situés près des grands centres urbains, risquent de s'épuiser ou d'entraîner des frais d'exploitation très élevés en raison du coût du transport et des restrictions relatives à la protection de l'environnement.

Confrontées à la nécessité de trouver des granulats en grande quantité et à faible coût, les entreprises routières se sont rapidement intéressées aux matériaux de recyclage. De nombreux sous-produits industriels ou déchets ont trouvé des applications dans les matériaux routiers, après une éventuelle opération de traitement (dépollution, concassage, criblage, etc.). Ainsi, il est possible de bénéficier de ces expériences et des méthodologies développées en laboratoire pour l'étude de la valorisation des sédiments dans les matériaux routiers.

Chapitre III

**CARACTERISATION DES SEDIMENTS A
L'ETAT NATUREL**

*Chapitre III***CARACTERISATION DES SEDIMENTS A L'ETAT NATUREL****III.1 INTRODUCTION**

Après avoir présenté le barrage de Merdja Sidi Abed, nous allons procéder à l'identification du sédiment prélevé dans la zone de stockage de la retenue de ce barrage. L'objectif de cette étude expérimentale consiste à déterminer les caractéristiques physico-chimiques, géotechniques et de compactage. Ces paramètres permettent d'identifier ultérieurement des solutions de valorisation. Le chapitre est scindé en parties. Nous avons commencé par la préparation de l'échantillon avant d'entamer les parties concernant la détermination des caractéristiques physico-chimiques du matériau, les caractéristiques géotechniques et les caractéristiques de compactage. Après avoir déterminé globalement toutes ces caractéristiques, le sédiment étudié est classé selon le GTR. Enfin une conclusion relative à ce chapitre est dressée.

Les essais de caractérisation physico-chimique et géotechniques sont réalisés au laboratoire Génie Civil Génie Mécanique de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes (INSA, Rennes).

III.2 PREPARATION DE L'ECHANTILLON

Les matériaux sont préparés de manière à ne pas modifier leurs caractéristiques. Les sédiments tels que prélevés, se présentent sous forme de blocs humides (figure III.1). Afin de faire les essais de caractérisation, ils sont séchés dans une étuve à faible température pour ne pas les brûler, ensuite ils sont broyés, tamisés et conservés dans des sacs en plastique fermés.



Figure III.1 Etat des sédiments tels prélevés dans la retenue

III.3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

III.3.1 Observation visuelle

Visuellement, après séchage et broyage, le sédiment se présente sous forme de poudre de couleur grise tel que montré sur la figure III.2. En présence d'eau il devient collant et difficile à manipuler.

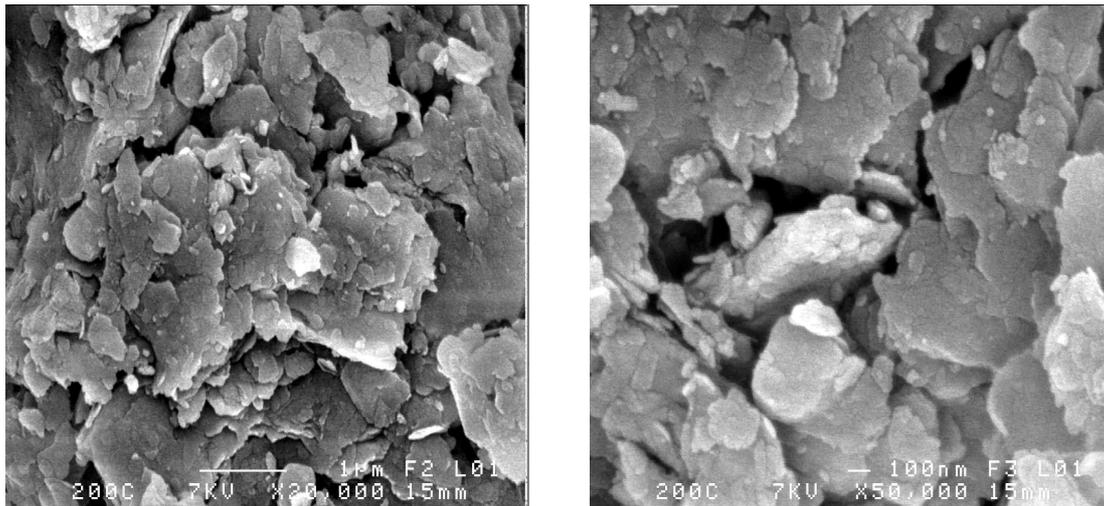


Figure III.2 Photographie du sédiment broyé

III.3.2 Observation au microscope à balayage électronique MEB

Des observations au microscope électronique ont été réalisées sur un appareil JEOL 6400 conventionnel muni d'une diode pour micro analyse EDS Oxford Inca. Il est ainsi possible de quantifier les compositions globales et ponctuelles des échantillons. La tension d'accélération des électrons est de 9 kV, la distance de travail de 15 mm. A

l'aide d'un microscope électronique à effet de champ JEOL JSM 6301 FEG, on obtient des observations avec une meilleure définition et un plus fort grossissement. Un dosage global par rapport aux argiles a mis en évidence la présence de silicium et d'aluminium, mais aussi de magnésium et de fer. Ces compositions minéralogiques confirment l'analyse X (figure III.3), notamment la présence de smectite et/ou de chlorites (Mg et Fe).



a) grossissement x 20000

b) grossissement x50000

Figure III.3 Observations au MEB.

III.3.3 Analyse granulométrique

La distribution granulométrique constitue le premier paramètre de classification des sols dans le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de formes [GTR 2000].

Dans cette étude, la granulométrie est déterminée, à l'aide d'un granulomètre Cilas 1180 par diffraction laser, intégrant l'approximation de Fraunhofer et la théorie de Mie. Elle est réalisée sur le matériau naturel, préalablement séché à 50°C. L'échantillon est ensuite placé sous agitation magnétique dans une solution contenant un défloculant (l'hexametaphosphate) afin de désolidariser les particules.

Les résultats, en termes de courbe granulométrique, sont présentés sur la figure III.3. Les sédiments présentent une granulométrie fine, avec un diamètre maximal de 20 μm

et un diamètre moyen de 3 μm . Ils sont composés essentiellement d'argile (39,1 %) et de limons (59 %).

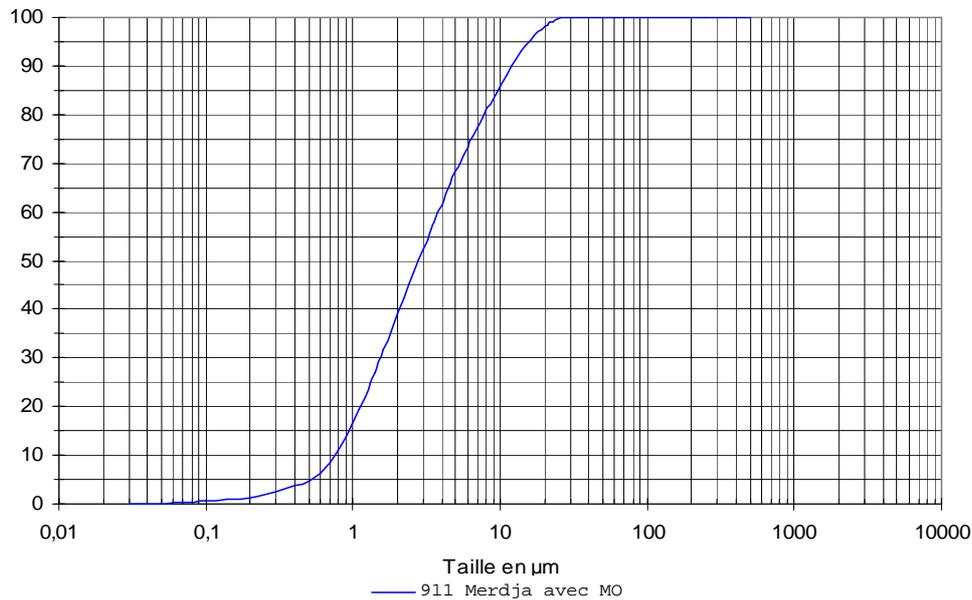


Figure III.4 Courbe granulométrique.

Les paramètres de granularité (D_{max} et tamisat à 80 μm) sont déterminés à partir de la répartition granulométrique. D_{max} est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le matériau, c'est le diamètre correspondant à 95% du tamisât. C'est un paramètre déterminant en terrassement, le seuil retenu dans le GTR est 50 mm pour la classification des sols fins. Le tamisat à 80 μm permet de distinguer la richesse du matériau en fines et dans le sens le plus large, d'évaluer leur sensibilité à l'eau (GTR 2000).

De la courbe granulométrique sont déterminés les diamètres des particules intervenant dans le calcul du coefficient d'uniformité C_u et de courbure C_c donnés respectivement par les formules III.1 et III.2.

$$C_u = D_{60} / D_{10} \quad (\text{III.1})$$

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60}) \quad (\text{III.2})$$

avec :

D_{60} : diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant

D_{30} : diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant

D_{10} : diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant.

Si $Cu < 2$, la granulométrie est uniforme (ou serrée)

$Cu > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée)

$1 < Cc < 3$, la granulométrie est bien graduée.

Tableau III.1 Paramètres granulométriques des sédiments

Argiles 0-2 μ m	Limons 2-20 μ m	Sable fin 20- 200 μ m	D60 μ m	D30 μ m	D10 μ m	Cu	Cc	T80 %
39,1	59	1,9	4	1,6	0,8	5	0,8	100

De l'analyse granulométrique, le sédiment peut être classé en fonction de la classification triangulaire des sols fins (figure III.5). Dans cette étude le sédiment est classé à la limite entre argile silteuse et limon argileux.

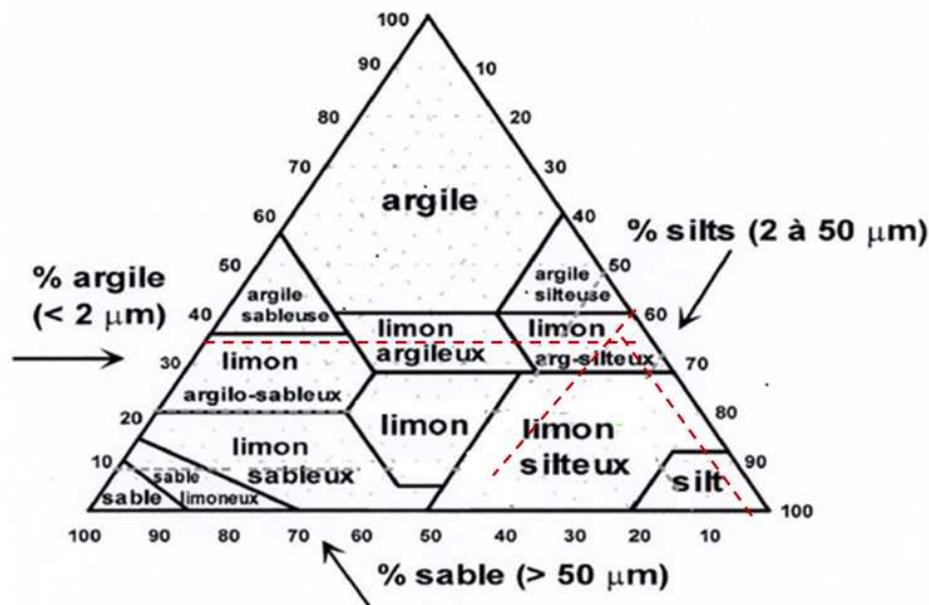


Figure III.5 Classification triangulaire des sols fins

III.3.4 Analyse par diffraction X

Les diagrammes de diffraction X sont réalisés sur un diffractomètre Philips XPERT en géométrie Bragg-Brentano avec une anode Cu ; le rayonnement est filtré au Ni, la radiation utilisée est $K\alpha$. La tension utilisée est de 45 kV et le courant est de 40 mA.

L'analyse par diffraction X est réalisée sur l'échantillon naturel. Celui-ci est composé du quartz, de la calcite et de différents types d'argiles (figure III.6a). Les minéraux argileux ne peuvent être déterminés qu'après traitement à 550°C pendant 1 heure (figure III.6d) et par glycérolage (figure III.6c). En effet les raies caractéristiques du kaolin disparaissent par chauffage, alors que l'illite, stable en température et par traitement au glycérol, est présente en petite quantité. Les minéraux à 1,4 nm sont composés de chlorite stable pendant les différents traitements et de smectite (gonflante au glycérol dont la distance inter foliaire diminue par chauffage).

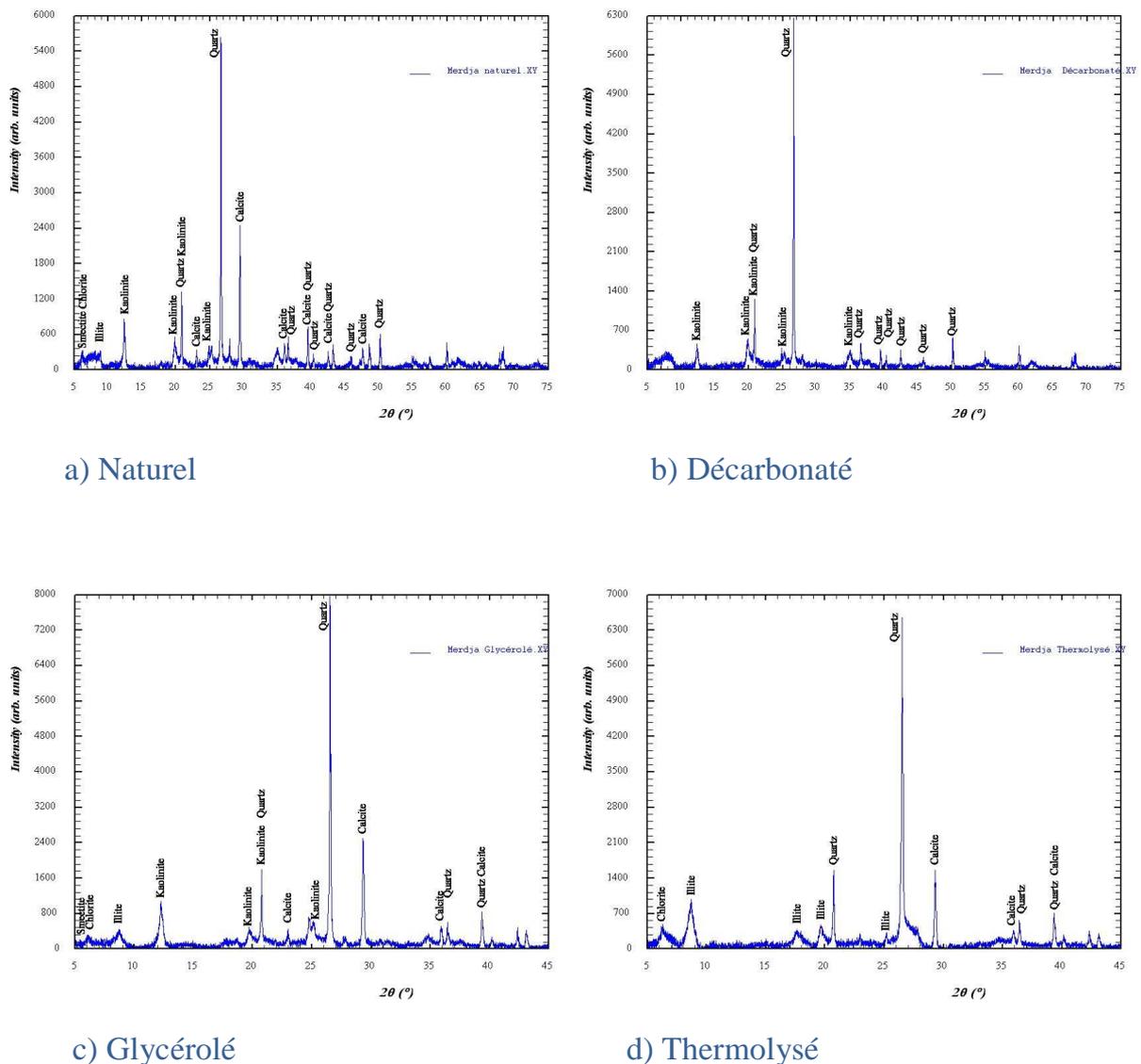


Figure III.6 Diagrammes de diffraction X du sédiment d'El Merdja

III.4 CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

III.4.1 Détermination de la masse volumique des particules solides

La masse volumique des grains solides est déterminée par la norme NF P 94-054.

L'essai consiste à peser un échantillon de sol sec, le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.

La procédure est la suivante :

- le pycnomètre et son bouchon sont pesés (m_1),
- l'échantillon de sol séché est introduit dans le pycnomètre de nouveau pesé avec son bouchon (m_2),
- le pycnomètre est ensuite rempli d'eau distillée ou déminéralisée, l'ensemble est de nouveau pesé avec le bouchon (m_3) en prenant soin qu'aucune bulle d'air ne reste accrochée aux particules,
- le pycnomètre est vidé, nettoyé, rempli d'eau distillée ou déminéralisée et pesé (m_4).

La masse volumique des particules solide est déterminée à partir de la formule III.3 :

$$\rho_s = \rho_w (m_2 - m_1) / (m_4 + m_2 - m_1 - m_3) \quad (\text{III.3})$$

La masse volumique ρ_s obtenue pour le sédiment de Merdja est de $2,7 \text{ gr/cm}^3$; elle correspond à celle proposée pour les matériaux standards.

III.4.2 Potentiel hydrogène pH

La valeur du pH dans les sédiments de dragage est importante car elle joue un rôle sur la fixation des métaux en limitant leur mobilisation.

L'essai au laboratoire est réalisé de la manière suivante : trois échantillons sont prélevés sur le sédiment et placés sous agitation magnétique pendant 15 mn dans 5 fois le volume d'eau déminéralisée d'un échantillon. Les suspensions sont ensuite disposées dans une pièce climatisée à 20°C pendant 2 heures, délai au bout duquel l'équilibre est observé à l'aide d'un pH-mètre [NF ISO 10 390].

Le pH mesuré pour le sédiment de Merdja est de 8,4

III.4.3 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg correspondent aux teneurs en eau qui entraînent un changement de l'état d'un sol. Elles sont déterminées sur la fraction de sol passant au tamis 400 μm . On distingue :

- la limite de liquidité W_l : c'est la teneur en eau d'un sol au point de transition entre l'état liquide et plastique,
- la limite de plasticité W_p : c'est la teneur en eau d'un sol au point de transition entre l'état plastique et l'état solide,
- l'indice de plasticité I_p : c'est le domaine situé entre les états de liquidité et de plasticité.

L'indice de plasticité est le paramètre le plus utilisé, il caractérise l'argilosité d'un matériau. La valeur de l' I_p est d'autant plus forte que l'argilosité d'un sol est importante, il est donné par la relation suivante :

$$I_p(\%) = W_l(\%) - W_p(\%) \quad (\text{III.4})$$

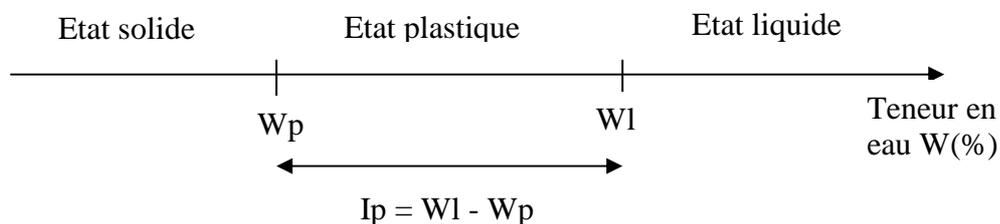


Figure III.7 Les états d'un sol.

Les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse, mais également avec la nature des minéraux argileux [Scordia P.Y., 2008].

Les limites de liquidité et de plasticité du sédiment ont été déterminées respectivement à la coupelle de Casagrande et au cône tombant [Zentar R., et al. 2009].

- **Méthode de Casagrande**

La limite de liquidité est déterminée à l'aide de la méthode de Casagrande [norme NF

P 94 051]. L'essai consiste à déterminer la relation entre la teneur en eau et le nombre de chocs imposés à une coupelle contenant le matériau, induisant la fermeture, sur un (1) cm, d'une rainure préalablement formée dans le matériau. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture sur un centimètre pour 25 chocs.

La limite de plasticité est déterminée par la méthode du rouleau [norme NF P 94 051].

Par définition, la limite de plasticité est définie comme la teneur en eau du cylindre de diamètre 3 mm qui se brise.

- Méthode au cône tombant (Fall cone)

Il existe une méthode autre que la méthode de Casagrande et du rouleau, pour déterminer les limites d'Atterberg. C'est la méthode du cône de pénétration 'fall cône' (figure III.8).

Le principe de la méthode au cône consiste à mesurer l'enfoncement d'un cône normalisé (angle au sommet de 30°, masse de 80 g) pendant 5 secondes dans un échantillon de sédiment. On effectue plusieurs opérations avec des teneurs en eau variées. Les résultats obtenus permettent de tracer la courbe reliant la teneur en eau (%) en fonction de la pénétration du cône (en mm).

La limite de liquidité est définie comme la teneur en eau du matériau à 17 mm d'enfoncement du cône ($d = 17$ mm), d'après la norme française [norme NF P 94 052] et de 20 mm ($d = 20$ mm) selon la norme anglaise [BS. 1990].

La limite de plasticité par l'essai au fall cône, est définie comme étant la teneur en eau correspondant à 2mm de pénétration du cône [Feng T.W., 2000]. En outre, les études effectuées par Zentar *et al* (2008) sur les sédiments de dragage ont suggéré que la teneur en eau définie à partir de l'essai de pénétration au cône de 1,7 mm à 2 mm sont comparables à la limite de plasticité déterminée par la méthode du rouleau.



Figure III.8 Appareil du cône de pénétration

Les sédiments de Merdja ont une limite de liquidité de 65%, une limite de plasticité de 26%, d'où un indice de plasticité I_p de 39 %. Ceci traduit une plus grande sensibilité à l'eau.

Sur la base du diagramme de plasticité de Casagrande (figure III.9), le sédiment se trouve dans la classe des argiles minérales très plastique.

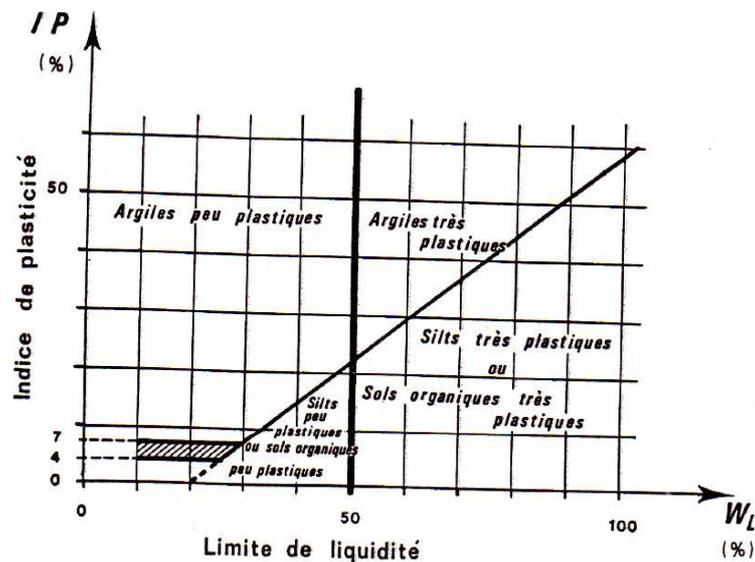


Figure III.9 Abaque de Casagrande

III.4.4 Limites de retrait

Des essais de mesure du retrait ont été effectués sur les sédiments. La limite de retrait W_R d'un matériau est définie comme la teneur en eau pondérale en dessous de laquelle le volume de l'échantillon reste constant et pour laquelle le matériau reste quasi saturé [Holtz R.D., 1981].

La limite de retrait d'un sol est classiquement déterminée sur le passant à 400 μ m du matériau suivant la norme française [XP P94-060-01].

Cette méthode, largement utilisée, nécessite l'utilisation de mercure. L'essai consiste, après humidification du matériau à une teneur en eau supérieure à sa limite de liquidité, à déterminer la perte de volume après dessiccation complète à 105°C, d'une éprouvette contenue dans une coupelle cylindrique de volume connu (figure III.10). La mesure du volume de l'éprouvette après dessiccation se fait par immersion dans un bain de mercure de masse volumique connue. La limite de retrait conventionnelle W_R est déterminée à partir de l'expression (III.5). Cette limite de retrait correspond à une limite de retrait volumique.

$$W_R = \frac{m_h - \rho_w(V_0 - V_d)}{m_d} - 1 \quad (\text{III.5})$$

Avec m_h : la masse humide initiale de la prise d'essai,
 m_d : la masse sèche de la prise d'essai,
 V_0 : le volume initial de la prise d'essai
 V_d : le volume de la prise d'essai après dessiccation complète.

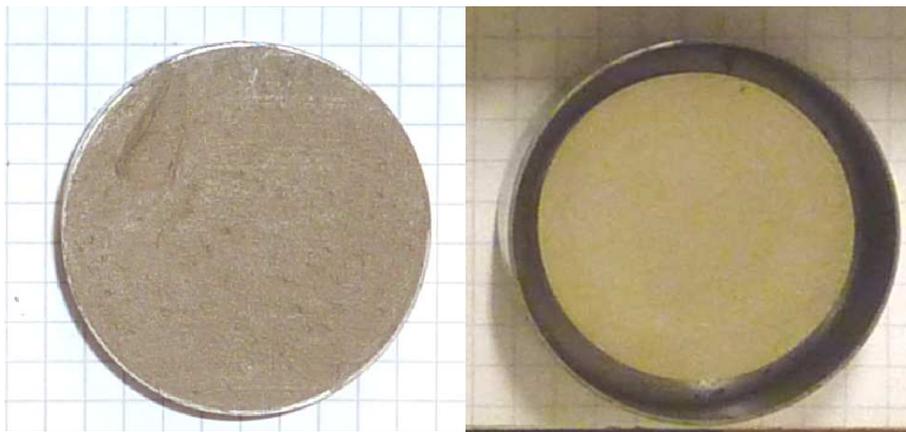


Figure III.10 Photographies illustrant le retrait volumique

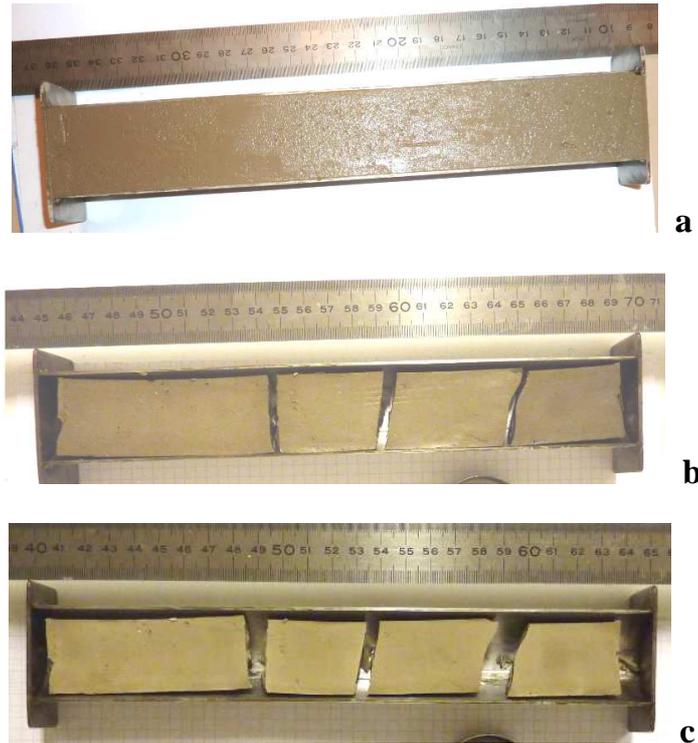
La détermination de la limite de retrait par immersion dans un bain de mercure est peu précise vu que le mercure est extrêmement dense. Une goutte de mercure de plus ou de moins modifie la valeur de la limite de retrait et de plus, elle représente uniquement l'état initial et l'état final. Elle ne donne pas la courbe complète de dessiccation. Des études récentes ont montré que l'utilisation des courbes de dessiccation est le meilleur moyen d'obtenir une valeur plus exacte de la limite de retrait.

Parmi les méthodes qui permettent d'obtenir la courbe de dessiccation complète, nous avons choisi une méthode basée et décrite dans les normes anglo-saxonnes ([BS 1277 :2,1990], [AS 1289.C4.1 1977]). Cette Méthode permet de déterminer également une limite de retrait à partir d'essais de retrait linéique horizontal. L'essai consiste à mesurer, après dessiccation complète, la longueur d'une éprouvette de matériau mise en place dans un moule formé d'un demi-cylindre. Le moule utilisé dans cette étude a un diamètre de 25 mm et une longueur de 250 mm (figure III.11). Le matériau est mis en place dans le moule en trois couches, en évitant d'emprisonner des bulles d'air. Le matériau est ensuite laissé à l'air libre au moins 12 heures, puis placé à l'étuve à 60°C. L'exploitation classique de l'essai consiste à mesurer, après dessiccation complète, la longueur l_d de l'échantillon. Le retrait linéaire LS est alors défini conventionnellement par :

$$LS = \left(1 - \frac{l_d}{l_0}\right) \cdot 100 \quad (\text{III.6})$$

Cette valeur correspond à la déformation longitudinale de l'éprouvette après dessiccation.

De manière à obtenir la courbe de retrait complète, des prises de photographies et des pesées de l'éprouvette sont réalisées en cours de dessiccation (figure III.11). La variation de longueur de l'éprouvette $\Delta l = l - l_0$, et sa teneur en eau w sont ainsi évaluées de manière à construire la courbe de dessiccation. La limite de retrait est alors déterminée, comme l'abscisse de l'intersection des deux droites linéarisant le comportement de l'échantillon dans le domaine quasi saturé et dans le domaine non saturé. Plus de précisions sur cette méthode de mesure peuvent être trouvées dans [Fall M. et al 2009].



**Figure III.11 Photographies illustrant le retrait linéique
(a : retrait à l'instant zéro, b : retrait à l'instant intermédiaire et c : retrait final)**

Chacun des deux essais (retrait volumique et retrait horizontal) a été réalisé sur le sédiment. Dans chacun des cas, le matériau a été initialement humidifié à une teneur en eau proche la limite de liquidité (65%). La courbe de dessiccation obtenue pour la limite de retrait horizontal est présentée en figure III.12. Les valeurs des limites de retrait identifiées à partir des deux méthodes expérimentales et le retrait linéaire total sont synthétisés dans le tableau III.2.

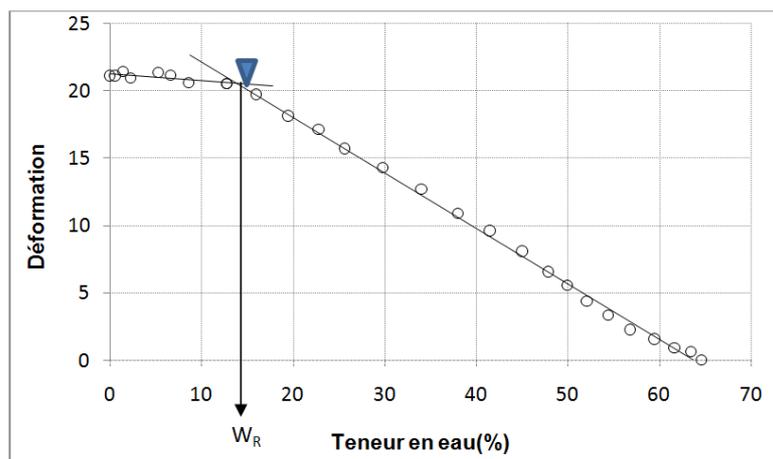


Figure III.12 Courbe de dessiccation (retrait linéique horizontal, Le triangle sur la courbe représente la valeur du retrait volumique)

Tableau III.2 Limites de retrait et retrait linéique total LS

Limite de retrait W_R (%)			
	Volumique	Horizontal	LS (%)
Sédiment de Merdja	14,8	14	20,5

On remarque l'influence marquée de la nature des argiles sur le retrait des matériaux. Le sédiment de Merdja, contenant de la smectite et un indice de plasticité I_p élevé, présente une limite de retrait relativement faible et un retrait total LS important. La présence d'argile gonflante est la cause de l'étendue de la plage de sensibilité à l'eau.

III.4.5 Valeur au bleu de méthylène

L'argilosité du matériau est aussi déterminée par la valeur au bleu de méthylène qui permet d'apprécier globalement l'activité et la quantité d'argile dans le matériau. Le principe repose sur la capacité particulière qu'a la molécule de bleu de méthylène de s'adsorber à la surface des particules. Etant donné que la surface spécifique des argiles est prépondérante par rapport à celle d'autres fines, il y a une corrélation directe entre la quantité de bleu adsorbée par les particules d'un sol et son argilosité. L'essai au bleu de méthylène, encore appelé essai à la tache, consiste à déterminer la quantité maximale de bleu de méthylène qui peut être adsorbée par un échantillon de sol. Il est décrit dans la norme NF P94-068. L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de matériau maintenue en agitation. On prélève périodiquement, à l'aide d'une burette de verre, une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleue apparaît autour de la tâche, on considère que l'absorption de bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée (figure III.13). La valeur du bleu de méthylène VBS est déterminée à partir du volume du bleu de méthylène adsorbé et la quantité de matériau utilisé. Elle est exprimée en gramme par 100 gr de matériau et est donnée par l'expression (III.7).

$$VBS = (B/m_0) \times 100 \quad (III.7)$$

Avec

m_0 : masse sèche de la prise d'essai (gr)

B : masse de bleu de méthylène introduit (solution à 10gr/l) en gr, $B = V \times 0,01$

V : volume total de bleu introduit (solution à 10gr/l)

La valeur au bleu du sédiment de Merdja est de 7,5gr/100gr.

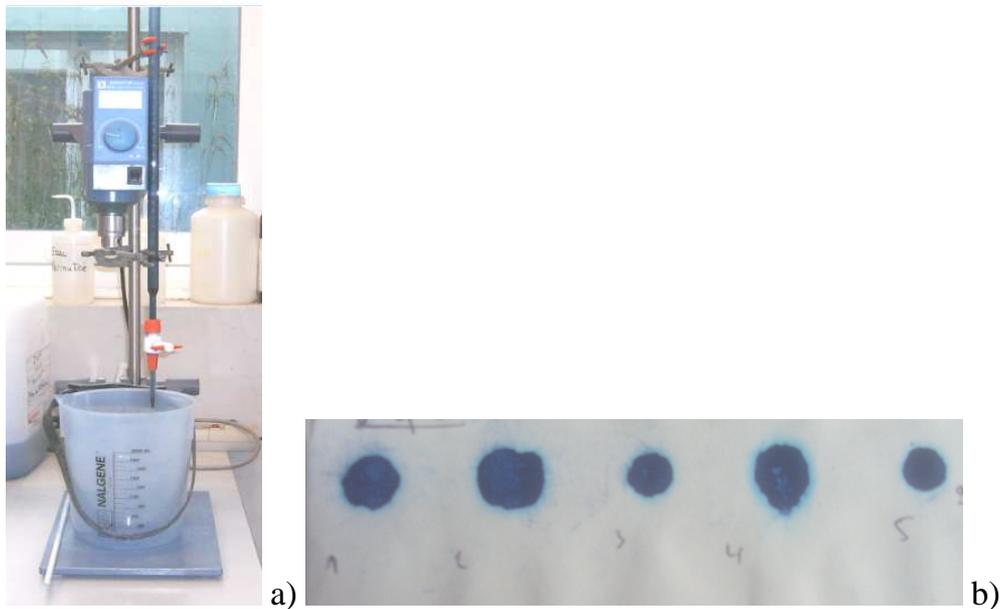


Figure III.13 a) Matériel de l'essai au bleu de méthylène ; b) Test de la tache.

Selon le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme GTS 2000 (tableau III.3) le sédiment est classé comme sol argileux (VBS compris entre 6 et 8).

Tableau III.3 Classification des sols en fonction de la valeur au bleu de méthylène [GTR, 2000]

VBS (g/100g)	Appréciation du sol / type de sol
0,1	Le sol est insensible à l'eau
0,2	Seuil à partir duquel apparaît la sensibilité à l'eau
1,5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux
2,5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
6	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

III.4.6 Teneur en matière organique (Mo)

Les études précédentes [Wang D. 2011; Bennett R.H. et al. 1985 ; Husein Malkawi et al. 1999], montrent que la matière organique est très difficile à fixer à l'aide de ciment et /ou de la chaux. Les principaux facteurs qui influencent l'immobilisation des contaminants organiques sont le taux de carbone organique, la température, et le temps de durcissement et l'acidité.

La chaux et le ciment peuvent réagir avec les fractions argileuses pour former l'agglomération des particules grâce à la réaction pouzzolanique et à l'échange d'ions. Dans le cas général, les matières organiques entravent le développement de cette réaction. Les matières organiques peuvent retarder le processus de durcissement du ciment du fait de la formation d'un film protecteur autour des particules de ciment [Sora I.N. et al, 2002 ; Paria S. et Pak K.Y., 2006]. Le développement des réactions de cimentation peut être retardé à cause de la présence de matières organiques qui peuvent consommer une quantité de produit de traitement pour neutraliser l'acidité du milieu (GTS 2000). D'après l'étude de Fan Z.P. et al (2005), il existe une teneur limite ($O_c=4,3\%$) en matière organique qui influence la résistance en compression des sédiments de dragage.

La matière organique possède d'importantes propriétés indésirables. En effet elle retient l'eau et empêche la réaction pouzzolanique, ainsi la teneur en matière organique doit être mesurée afin de prendre en compte ces phénomènes.

Dans cette étude, la détermination de la matière organique est effectuée par la méthode par perte au feu.

Cette méthode consiste à calciner les échantillons de sol afin d'éliminer la matière organique et de l'estimer par perte de masse.

Trois échantillons préalablement séchés à 105°C sont placés dans des creusets et mis dans le four à 375°C pendant 16 heures. Après refroidissement dans un dessiccateur, les creusets contenant le sol calciné sont pesés.

La teneur en matière organique MO est calculée par l'expression (III.8) :

$$\text{Mo}(\%) = (\text{poids sol sec (gr)} - \text{poids sol calciné (gr)}) / (\text{poids sol sec (gr)}) \times 100 \quad (\text{III.7})$$

La valeur de la teneur en matière organique obtenue pour le sédiment de Merdja est de l'ordre de 3%, c'est une valeur relativement faible par rapport à celle des sédiments de dragage, qui varie de 3% à 10%.

Afin de montrer l'influence de la matière organique sur la granulométrie des sols, une analyse granulométrique des sédiments éliminés de la matière organiques par attaque à l'eau oxygénée est réalisée. Les résultats sont représentés sur la figure III.14.

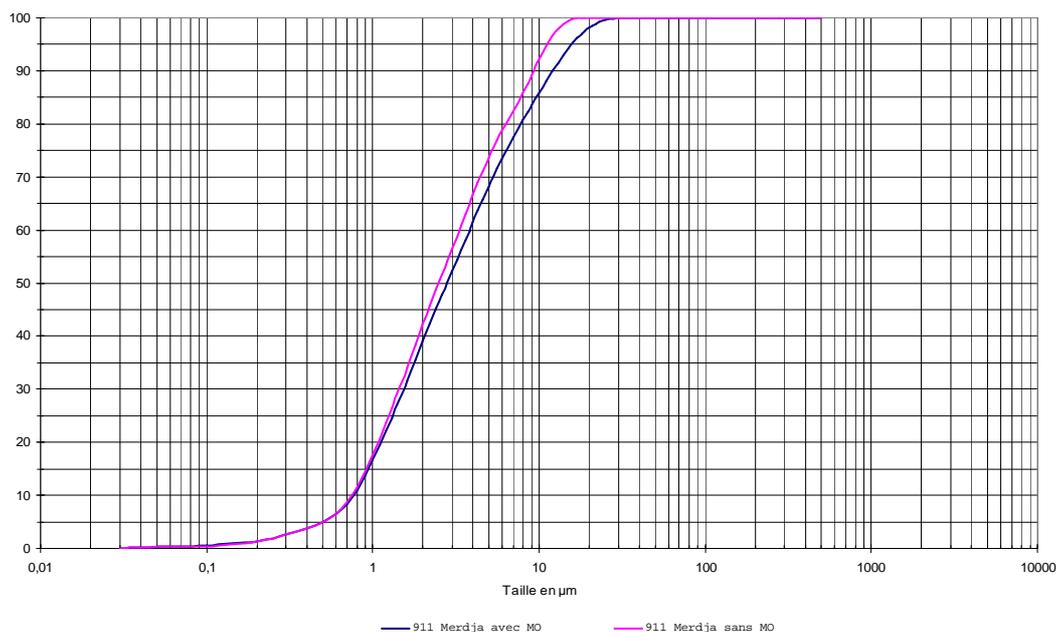


Figure III.14 Courbes granulométriques du sédiment comparées à celle sans matières organiques.

Le sédiment sans matières organique a une granulométrie plus fine que le sédiment avec matières organique.

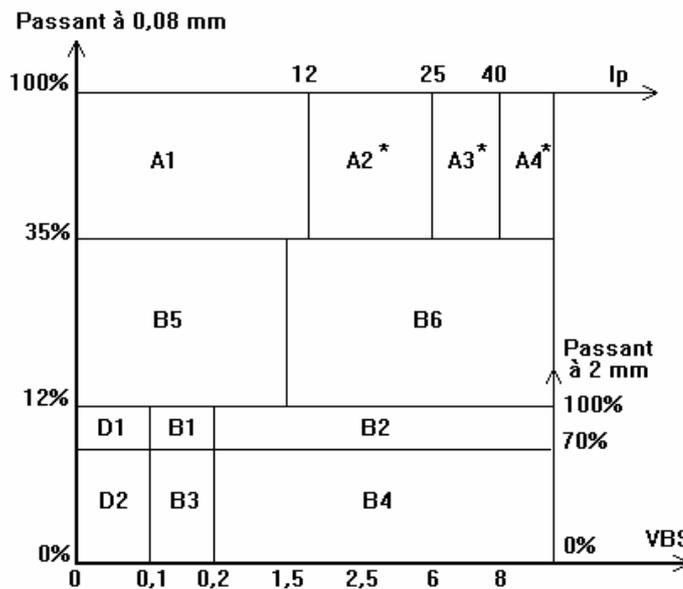
III.4.7 Récapitulatif des résultats de la caractérisation géotechnique

Les résultats obtenus pour le sédiment de Merdja sont représentés dans le tableau III.4. Ces paramètres permettent de le classer dans le guide technique de réalisation des remblais et des couches de formes GTR 2000.

Tableau III.4 Caractéristiques géotechniques du sédiment de Merdja.

Tamisé 80µm (%)	W_l (%)	W_p (%)	I_p (%)	W_r (%)	VBS (gr/100g de sol)	M_o (%)
100	65	26	39	14	7,5	3

Toutes les particules ont un diamètre inférieur à 80µm, l'indice de plasticité I_p est de 39%, la valeur au bleu VBS est de 7,5 et la teneur en matière organique M_o est de 3%, les sédiments du barrage de Merdja sont classés dans la catégorie des sols fins classe A3 (Fascicule II, Annexe 1, et figure III.15).



* Matériaux pour lesquels la mesure de l' I_p est à retenir comme base de classement. Pour les autres matériaux on utilisera la **VBS**.

Figure III.15 Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature

III.5 CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE

Le compactage sert à densifier un sol et ainsi à améliorer le comportement mécanique du matériau et ses propriétés hydrauliques. Le compactage permet de resserrer la texture du sol, de réduire ses déformations, d'améliorer sa portance et sa résistance. Les caractéristiques de compactage d'un matériau sont liées à la granulométrie (dimension et formes des particules) et à l'énergie de compactage. Pour un sol donné et pour une énergie de compactage donnée, il existe une seule teneur en eau correspondant à la densité maximale. S'il n'y a pas assez d'eau, la lubrification entre les grains n'est pas assurée. S'il y a trop d'eau, Les grains solides glissent les uns sur les autres et ne peuvent plus se placer afin d'occuper un volume minimum ; de plus l'eau prend la place des vides et absorbe une partie de l'énergie de compactage.

La teneur en eau optimale et la densité maximale correspondante sont déterminées au laboratoire par l'essai Proctor (NF P 94-093). Ces deux caractéristiques des matériaux, dont la dimension maximale des grains est inférieure ou égale à 50mm, mis en remblai et en couche de forme, sont déterminées par l'essai Proctor normal [GTR 2000].

Un autre paramètre de compactage qui a son importance dans la caractérisation des matériaux de couche de forme est l'indice portant immédiat IPI. La mesure de l'IPI permet d'évaluer l'aptitude d'un sol à supporter la circulation des engins de chantier. La portance d'un matériau sous circulation d'engins de chantier est directement liée à

sa nature (granularité, plasticité) et à ses paramètres d'état (teneur en eau, masse volumique sèche et degré de saturation).

III.5.1 Essai Proctor Normal

- Principe de l'essai (NF P 94-093)

L'essai consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau dite courbe Proctor. Cette courbe présente une valeur maximale de la masse volumique sèche du sol qui correspond à une valeur particulière de la teneur en eau ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques de compactage Proctor.

- Protocole

Le matériau est humidifié à des teneurs en eau croissantes, vue que le sédiment est très sensible à l'eau et très plastique, la phase de la préparation est délicate. Elle est réalisée selon le protocole suivant : le mélange sol - eau est malaxé d'abord dans un malaxeur ensuite manuellement à l'aide d'une spatule et d'une truelle pour éviter la formation de mottes et d'homogénéiser le mélange. Enfin, ce dernier est tamisé et est placé dans des sacs en plastiques fermés hermétiquement pendant 12 heures pour permettre à l'eau de bien se diffuser. Après cette opération le matériau humidifié est placé dans un moule Proctor. Le compactage est fait par un compacteur automatique avec une énergie Proctor normal (figure III.16).



Figure III.16 Appareil CBR : compacteur automatique Proctor-CBR

Pour chacune des valeurs de teneur en eau W considérées, on détermine la masse volumique sèche ρ_d du matériau compacté, et on trace la courbe des variations de la masse volumique en fonction de la teneur en eau.

La courbe obtenue présente un maximum correspondant à une masse volumique maximale pour une teneur en eau correspondante. Ce sont les caractéristiques optimales de compactage Proctor Normal (W_{opt} et ρ_{dmax}).

La courbe Proctor Normal obtenue pour le sédiment de Merdja est représentée sur la figure III.17.

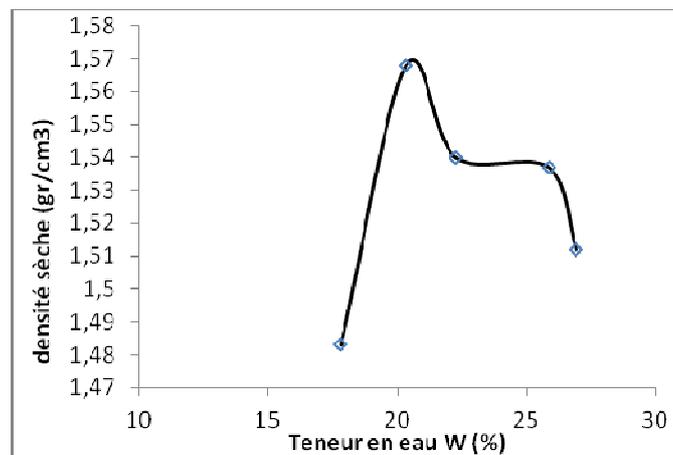


Figure III.17 Courbe Proctor Normal du sédiment de Merdja

Les caractéristiques optimales de compactage obtenues sont : une teneur en eau optimale de 20% et une densité sèche maximale de 1,57 gr/cm³.

III.5.2 Détermination de l'indice portant immédiat IPI (NF P 94-078)

a) Principe

Selon la norme NF P 94-078, le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de 19,35 m² de section pour le faire pénétrer à vitesse constante (1,27mm/mn) dans une éprouvette de matériau compacté. Les valeurs particulières des deux forces, ayant provoqué les enfoncements de 2,5 et 5mm, sont alors rapportées aux valeurs de 13,35 et 20 KN, qui sont respectivement les forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements. Par convention, l'indice Portant Immédiat IPI, exprimé en pourcentage, est la plus grande des deux valeurs suivantes :

- Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en KN) x 100 / 13,35
- Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en KN) x 100 / 20

La capacité portante d'un sol est d'autant meilleure que l'IPI est élevé.

b) Protocole

L'essai de poinçonnement est effectué juste après l'essai Proctor. Le matériau est humidifié à des teneurs en eau croissantes avec les mêmes précautions que l'essai Proctor, ensuite il est placé dans un moule CBR, compacté avec un compacteur automatique à énergie CBR normal.

Le sol compacté est gardé dans le moule, placé sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement (figure III.18). Le poinçonnement est effectué de la manière suivante :

- la face supérieure de l'éprouvette est rapprochée du piston jusqu'à ce que ce dernier vienne affleurer le matériau,
- le dispositif dynamométrique et le comparateur mesurant l'enfoncement sont mis à zéro,
- la presse est mise en marche en maintenant la vitesse constante à 1,27 mm/mn,
- les efforts de poinçonnement correspondants aux enfoncements sont relevés,
- l'éprouvette est démoulée, pesée et séchée dans étuve réglée à 105°C pour déterminer sa teneur en eau.



Figure III.18 Dispositif de l'essai de poinçonnement

Pour chaque teneur en eau considérée, une courbe de l'effort en fonction de l'enfoncement est tracée. La valeur de l'IPI est déterminée en fonction des efforts relevés à 2,5 et 5 mm d'enfoncement comme indiqué précédemment.

c) Résultats

Des essais sur le sédiment de Merdja sont réalisés selon le protocole si dessus. Les résultats sont rapportés sur les figures III.19 et III.20.

La figure III.19 représente l'ensemble des courbes, de l'effort en fonction de l'enfoncement, obtenues en faisant varier les teneurs en eau

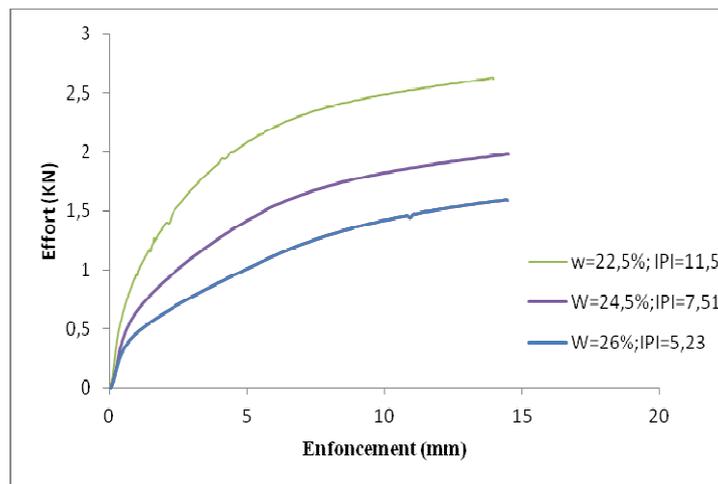


Figure III.19 Courbe effort – enfoncement pour différentes teneurs en eau.

A partir des résultats présentés sur la figure précédente, on déduit une courbe IPI en fonction de la teneur en eau (figure III.20).

Nous constatons que l'indice de portance IPI diminue pour des teneurs en eau croissantes.

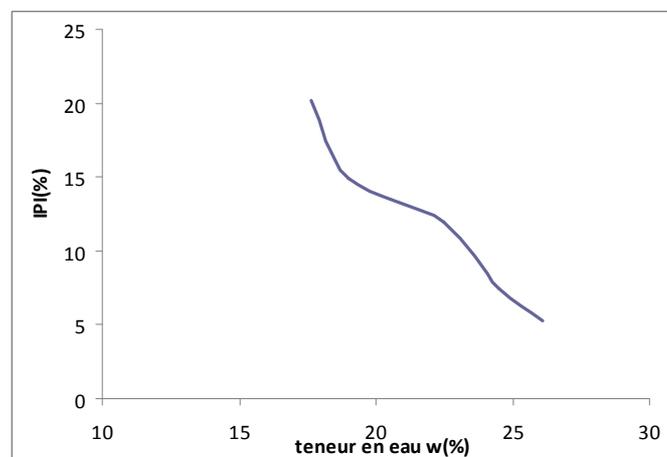


Figure III.20 Courbe IPI en fonction de la teneur en eau

En traçant la courbe IPI en fonction de la teneur en eau sur le même graphe que la courbe Proctor (figure III.21), nous déduisons l'indice portant IPI correspondant à l'optimum Proctor, celui-ci étant de l'ordre de 13 %, ce qui nous permet de classer le sédiment selon sa portance (classification des sols fins GTR 2000) dans la sous classe A3m qui correspond à l'état hydrique moyen.

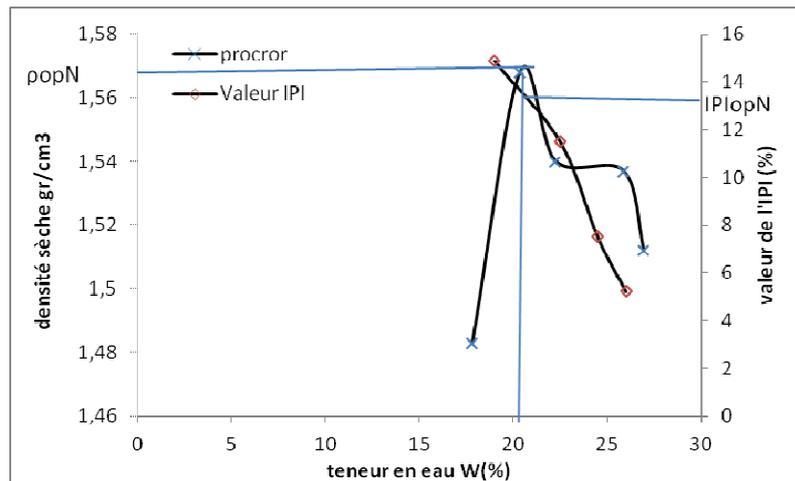


Figure III.21 Variation de la masse volumique sèche et IPI en fonction de la teneur en eau

III.5.3 Détermination de l'indice CBRI immergé

Protocole

Le protocole de mesure de l'indice CBR après immersion est le même que pour l'IPI, mais au lieu d'être effectué juste après le compactage du matériau, l'échantillon, toujours dans son moule, est totalement immergé dans l'eau à 20°C pendant 4 jours. Le dispositif du montage est montré sur la figure III.22.

Les étapes à suivre pour mesurer le gonflement vertical sont :

- sur la partie supérieure de l'éprouvette, est disposé un disque de gonflement et une surcharge annulaire de 2* 2,23 Kg, afin de simuler les contraintes apportées par les couches supérieures de la chaussée,
- le trépied support du comparateur est fixé sur le bord supérieur du moule, le comparateur est remis à zéro,
- le dispositif ainsi obtenu est mis dans le bac d'immersion de telle sorte que l'eau recouvre l'éprouvette,

- après 4 jours d'immersion, on relève la valeur indiquée sur le comparateur qui représente la hauteur de gonflement ΔH .

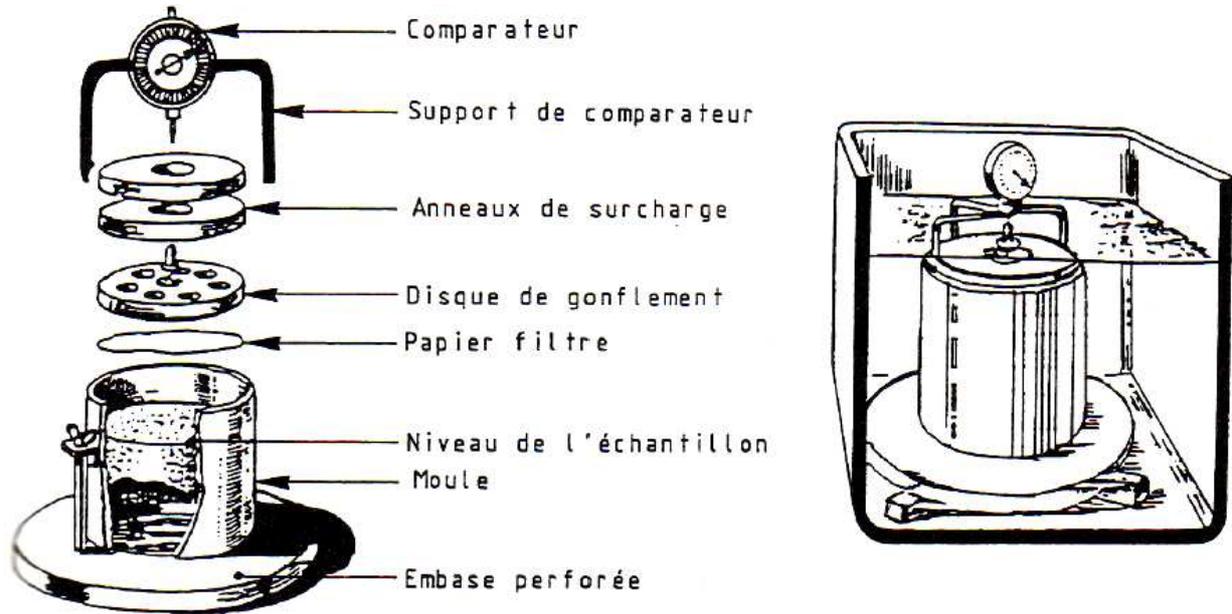


Figure III.22 Dispositif du montage pour mesurer le gonflement vertical [norme afnor]

La valeur du gonflement linéaire G est déterminée par la relation III.10,

$$G = (\Delta H / H) \times 100 \quad (\text{III.10})$$

Avec :

ΔH : le gonflement mesuré (la valeur lue sur le comparateur)

H : la hauteur initiale de l'éprouvette

Le gonflement G est exprimé en pourcentage.

Le poinçonnement est effectué avec le même procédé que pour déterminer IPI, après avoir retiré le dispositif de l'eau et ôté le trépied ainsi que le comparateur du moule, les surcharges annulaires étant maintenues.

Des courbes effort – enfoncement sont tracées pour chaque teneur eau considérée et dans chaque cas un indice CBR après immersion $ICBR_{imm}$ est calculé.

Sachant que le sédiment de Merdja est un sol fin, plastique et sensible à l'eau (classe A_3), le gonflement attendu sera important. Nous avons, ainsi procédé avec précaution pour avoir des résultats fiables.

Les courbes des efforts en fonction des enfoncements obtenues sont représentées sur la figure III.23.

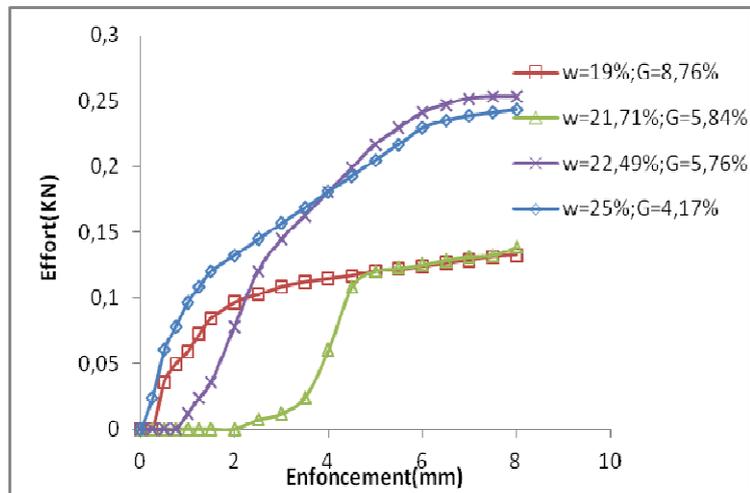


Figure III.23 Courbe Effort- Enfoncement de ICBR après immersion

La valeur de l'ICBR immergé déterminée à l'optimum Proctor est très faible, elle est de l'ordre de 0,94%.

De même que pour l'IPI, on trace une courbe du gonflement linéaire en fonction des teneurs en eau (figure III.24). Le gonflement G à l'optimum Proctor est déduit de la courbe ; il est de l'ordre de 7%.

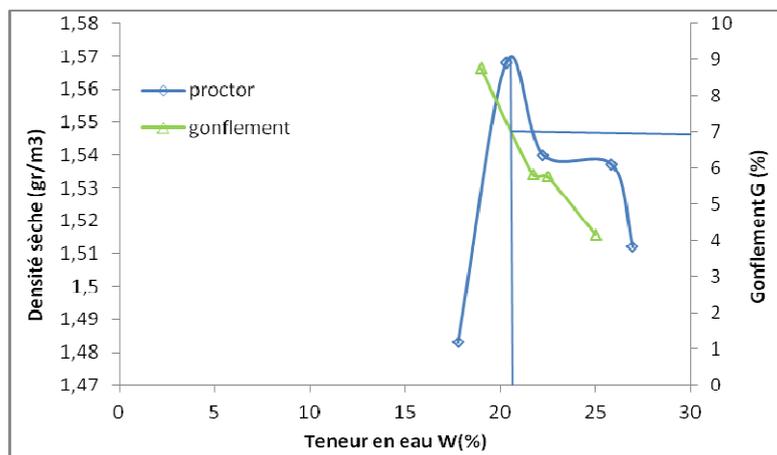


Figure III.24 Courbe gonflement – teneur en eau associée à la courbe Proctor

III.5.4 Détermination de l'indice CBRI immédiat

Nous avons déterminé l'indice ICBR immédiat (ICBRi). Le protocole de l'essai est le même que l'IPI. Seulement, avant d'effectuer le poinçonnement, on dispose d'une

charge annulaire (deux disques de 2,3 Kg chacun) afin de simuler les contraintes apportées par les couches supérieures de la chaussée.

Cet essai est réalisé pour montrer l'effet des surcharges sur la portance.

Les résultats sont représentés sur les figures III.25.

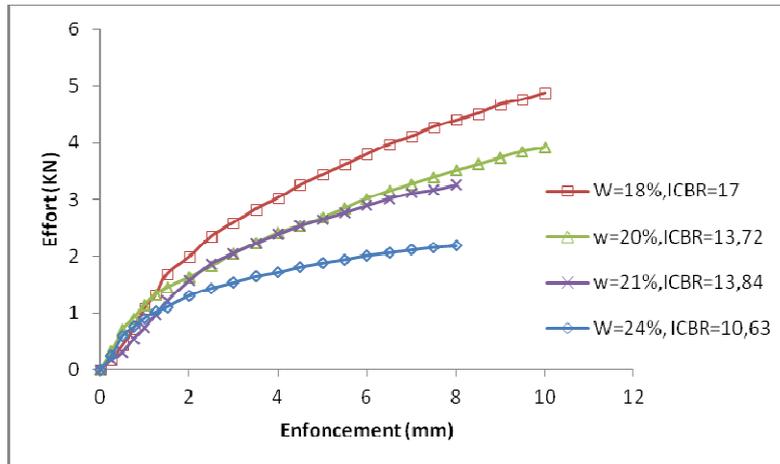


Figure III.25 Essai ICBRi : Courbe effort – enfoncement

III.6 ETUDE DE L'HOMOGENEITE DES SEDIMENTS

Avant de procéder au traitement, il convient d'évaluer l'homogénéité du matériau [GTR 2000]. Pour ce faire nous avons réalisé les essais d'analyse granulométrique, de la matière organique et des essais au bleu de méthylène sur des échantillons prélevés dans huit (08) endroits différents.

Sept (07) échantillons sont prélevés dans la zone de stockage, les sédiments sont stockés depuis 2004 et un échantillon prélevé dans la retenue en 2009.

Les courbes granulométriques des différents échantillons sont représentées sur la figure III.26 et les résultats de la matière organique et VBS sont synthétisés dans le tableau III.5

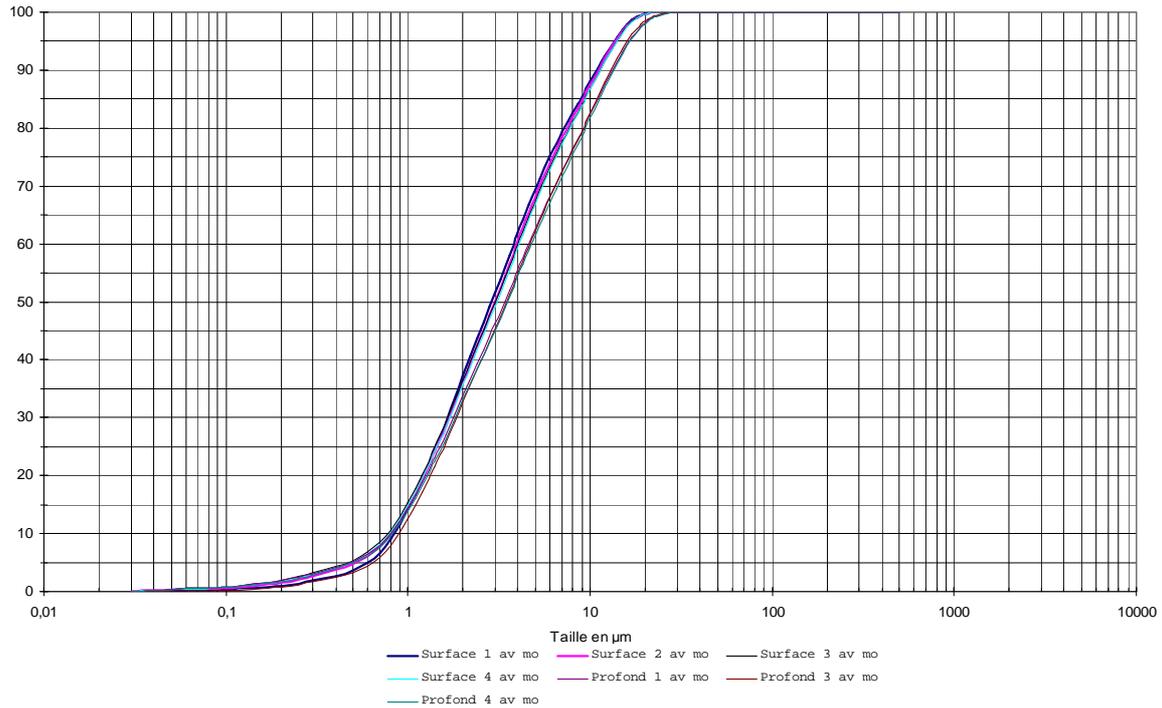


Figure III.26 Courbes granulométriques des différents échantillons

Tableau III.5 Valeurs au bleu et % en matière organique des différents échantillons

	VBS (gr/100gr de sol)	Mo (%)
Echantillon 1 (2009)	7,5	2,77
Echantillon 1 (2004)	6,65	2,40
2	7,03	2,49
3	6,72	2,41
4	6,92	2,47
5	7,09	2,43
6	6,99	2,46
7	6,84	2,52

De ces résultats nous constatons que l'homogénéité du sédiment est bien satisfaite.

III.7 RECAPITULATION DES RESULTATS ET CLASSIFICATION DES SEDIMENTS SELON GTR

Les caractéristiques mesurées uniquement dans le secteur de la technique routière sont récapitulées ci-dessus.

ρ_s (gr/cm ³)	2,7
Mo (%)	3
VBS (gr/100gr de sol)	7,5
W _L (%)	65
W _P (%)	26
I _p (%)	39
Grains < 2 μ m	39,1
2 μ m < grains < 20 μ m	59
20 μ m < grains < 200 μ m	1,9
Tamisât à 80 μ m (%)	100
IPI	13
ICBR immergé (%)	0,94
Gonflement vertical (%)	7

Minéraux principaux Quartz, Calcite, Illite, Kaolinite, Chlorite, Smectites

Selon le guide pour une classification des matériaux routiers [GTS 1992], la proportion en matière organique est de l'ordre de 3%, le diamètre max est de 20 μ m (<50mm) et le tamisât à 80 μ m est de 100% (> 35%), le sédiment étudié est classé dans la catégorie des sols fins A (fascicule II, Annexe 1). Du point de vue argilosité, avec un indice de plasticité I_p de 39% (25 < I_p < 40), la valeur au bleu VBS est de 7,5 (6 < VBS < 8), ce sédiment est dans la sous classe A₃.

III.8 CONCLUSION

Dans le déroulement d'un projet de construction routière, la phase de caractérisation des matériaux est une étape essentielle qui conditionne de nombreux aspects économiques et techniques. Il est en effet primordial de savoir si les sols que l'on

rencontre sur le tracé prévisionnel peuvent être utilisés pour constituer les différentes couches routières, en particulier la couche de forme.

Les laboratoires spécialisés dans l'étude des projets routiers utilisent la méthodologie d'étude décrite dans le guide des traitements des sols [GTS 2000], qui permet entre autre d'aboutir à la classification du sol en fonction de sa granulométrie et de son argilosité. Notre objectif est de valoriser les sédiments du barrage de Merdja Sidi Abed en couche de forme et, de ce fait, nous avons appliqué la même méthodologie.

Nous avons dans un premier temps effectué différents essais de caractérisation physico-chimique qui ont permis de souligner certaines des propriétés de ces sédiments. Le sédiment, visuellement, a l'aspect d'une argile : à l'état brut, il se présente cohérent et sous forme de poudre lorsqu'il est séché et broyé. En effet l'analyse granulométrique montre qu'il contient une forte proportion en particules fines (argiles) dont le diamètre est inférieur à $2\mu\text{m}$, de l'ordre de 39%, ce qui a été confirmé par l'analyse X et par microscope électronique à balayage MEB ; il est composé essentiellement de Quartz, de calcite et d'argile. Les argiles identifiées correspondent à de la kaolinite et également à de la smectite, celle-ci étant de nature gonflante et rend le sol sensible à l'eau.

L'étude géotechnique a également permis de déterminer les paramètres nécessaires à leur mise en œuvre (argilosité, masse volumique sèche et teneur en eau Proctor, portance ...) et a abouti à leur classification en tant que matériau de classe A_3 , la valeur de l'indice portant IPI de 13% nous permet de le classer dans l'état hydrique moyen (sous classe A_{3m}). Les caractéristiques géotechniques du sédiment étudié ne satisfont pas les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme telles que indiquées dans les GTS sans traitements. Le traitement préconisé dans ce Guide est le traitement à la chaux et / ou aux liants hydrauliques qui fera l'objet du chapitre IV.

Chapitre IV

**VALORISATION EN TECHNIQUE ROUTIERE
(EN COUCHE DE FORME)**

*Chapitre IV***VALORISATION EN TECHNIQUE ROUTIERE
(EN COUCHE DE FORME)****IV.1 CONDITION D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME****IV.1.1 Les critères à satisfaire**

Pour qu'un matériau puisse être employé en couche de forme, il faut qu'il satisfasse aux critères définis ci-après [GTR, Fascicule I] :

- Insensibilité à l'eau ;
- Dimension des gros éléments ;
- Résistance au trafic de chantier ;
- Sensibilité au gel.

A. Insensibilité à l'eau

Le matériau de couche de forme doit avoir des caractéristiques mécaniques indépendantes de son état hydrique, soit à l'état naturel soit par une modification appropriée tel qu'un traitement avec la chaux et /ou liant hydraulique de manière à garantir :

- à court terme lors d'exécution des travaux, la circulation des engins approvisionnant les matériaux de chaussées,
- à long terme, le maintien des caractéristiques mécaniques de cette couche quelle que soit l'état hydrique sous la chaussée en service.

Les sols traités restent souvent sensible à l'eau au jeune âge. Le choix du liant et son dosage doivent en tenir compte. Cette sensibilité à l'eau est appréciée à partir de la chute de résistance en traction au jeune âge après immersion.

B. Dimension des plus gros éléments

La dimension des plus gros éléments doit permettre d'assurer un nivellement de la plate forme dans les tolérances requise en général ± 3 cm.

C. Résistance au trafic de chantier.

Un matériau de couche de forme, utilisé sans traitement en liant hydraulique, doit être suffisamment résistant à la fragmentation et à l'attrition sous l'effet du compactage et du trafic.

D. Sensibilité au gel

La sensibilité au gel se manifeste sous les deux aspects :

- La dégradation des roches et des matériaux traités.
- Le gonflement au gel des sols.

IV.1.2 Techniques de traitement et de préparation des matériaux de couche de forme

Le traitement des sols constitue une technique attrayante pour constituer des couches de formes performantes à condition de réaliser le traitement selon les modalités rigoureuses.

Les techniques de préparation sont les actions consistants à mélanger les différents produits tels que la chaux, les liants hydrauliques ou des correcteurs granulométriques pour conférer au matériau des performances mécaniques supérieures à celles qu'il possède à l'état naturel et durables tout au long de la vie de l'ouvrage.

Dans le cas du traitement avec de la chaux ou avec des liants hydrauliques il convient de déterminer par une étude au laboratoire le choix du ou des produits de traitements, les dosages nécessaires pour atteindre les performances mécaniques recherchées, et la plage de teneur en eau du mélange sol-liant dans laquelle il est réalisé d'escompter obtenir ces résistances.

IV.2 TRAITEMENT DES SOLS EN TECHNIQUE ROUTIERE

Dans la réalité, on constate que seul une faible proportion des matériaux provenant des déblais ou des empreints comme les sédiments de dragages remplissent naturellement les conditions d'utilisation des matériaux en couches de forme. Il est nécessaire d'améliorer leur comportement par une technique appropriée et, en particulier, par un traitement avec la chaux et / ou des liants hydrauliques.

Cette technique permet de conférer à des matériaux qui, pour certains ne seraient même pas utilisables en remblai, des performances largement supérieures à celles des matériaux granulaires naturels.

Pour envisager l'utilisation d'un sol traité en couche de forme, il faut en premier lieu connaître avec une précision suffisante ses principales caractéristiques géotechniques.

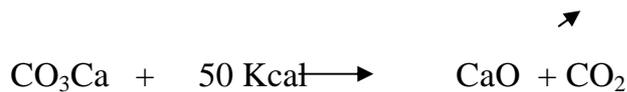
IV.2.1 Les produits de traitement

Ce sont les chaux aériennes principalement calciques et les liants hydrauliques

a - Les chaux aériennes [GTS 2000], [AFNOR 2003]

Les chaux aériennes sont constituées principalement d'oxyde ou d'hydroxyde de calcium qui durcissent lentement à l'air sous l'effet du dioxyde de carbone présent dans l'air. En général, elles ne durcissent pas sous l'eau, car elles n'ont pas de propriétés hydrauliques. Elles peuvent être soit des chaux vives, soit des chaux hydratées.

Elles sont obtenues par décarbonatation du calcaire (CO_3Ca) à une température d'environ 900°C suivant la réaction



La réaction étant réversible, La chaux vive produite peut, après hydratation par l'humidité ambiante, se recarbonater lentement sous l'action du CO_2 atmosphérique avec formation d'une prise à l'air d'où la qualification de chaux aérienne (par opposition à chaux hydraulique)

La chaux aériennes peut exister sous trois formes : chaux vives ; chaux éteinte ; lait de chaux

b- Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des produits, qui en présence d'eau, s'hydratent en donnant naissance à des espèces cristallines insolubles et résistantes qui agglomèrent les éléments granulaires du sol. Ce phénomène dit « prise hydraulique », confère au sol une cohésion permanente dont l'importance dépend de :

- la nature du matériau,
- type de liant,
- le dosage en liant,
- la compacité atteinte à la mise en œuvre,
- la température du milieu et de l'âge du mélange.

- **Les ciments**

Les ciments sont constitués généralement d'une proportion plus ou moins importante de clinker Portland (clinker) et de différents autres constituants.

Le clinker est obtenu par cuisson, aux environs de 1450°C, d'un mélange (le cru) composé d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile, ensuite il est finement broyé.

Les constituants ajoutés au clinker sont des laitiers de hauts fourneaux, des pouzzolanes, des cendres volantes, une faible quantité de gypse (de l'ordre de 3%),...

- **Les liants hydrauliques routiers LHR**

Des LHR ont été étudiés et mis au point depuis plusieurs années pour le traitement des sols en place ou en centrale et pour la fabrication de matériaux d'assise de chaussées.

Les principes d'action des LHR ne sont pas différents de ceux des ciments, car on y trouve, mais en proportion différentes, les mêmes constituants et donc des phénomènes de prise hydraulique de même nature, mais le plus souvent avec des ciments spécifiques. Les LHR présentent certains avantages notamment :

Leurs coûts de fabrication plus faibles, car certains de ces constituants ne nécessitent pas de cuisson spécifique.

Leur possibilité de mieux s'adapter à un cas de chantier particulier.

IV.2.2 Principes d'action des produits de traitement

1. Action de la chaux aérienne

L'incorporation de la chaux dans un sol provoque :

Des actions dites « immédiates » qui se produisent dès l'instant où le mélange sol-chaux est constitué.

Des actions dites « à long terme » qui se produisent durant plusieurs mois, voire plusieurs années après la mise en œuvre du sol traité.

a) Actions immédiates

Elles portent sur l'état hydrique et sur l'argilosité du sol.

a1 / Modification de l'état hydrique

Ces modifications dépendent de la forme sous laquelle la chaux se trouve et de la quantité introduite.

La chaux vive provoque un abaissement de la teneur en eau du sol par l'action combiné des trois phénomènes suivants :

- Hydratation de la chaux vive selon la réaction [GTS] :



- Vaporisation d'une certaine quantité d'eau produite par la chaleur dégagée par la réaction d'hydratation.
- Apport de matière sèche.

La chaux éteinte agit également sur la teneur en eau, mais cette fois uniquement par le phénomène d'apport de matière sèche.

Le lait de chaux produit à l'inverse une élévation de la teneur en eau.

Sur le chantier l'abaissement de la teneur en eau peut atteindre 4 à 6%.

a2/ Modification des caractéristiques de la fraction argileuse du sol

Dès son incorporation dans un sol argileux humide, la chaux agit sur les charges électriques des particules fines et modifie les champs électriques inter-particulaires, ce qui entraîne leur floculation. Cette floculation se traduit géotechniquement par :

- Une élévation importante de la limite de plasticité sans modification significative de sa limite de liquidité, il ya donc réduction de l'indice de plasticité.
- Une augmentation de la résistance au cisaillement du sol.
- Une modification des caractéristiques de compactage du sol

b) Actions à long terme (action pouzzolanique)

Cette action se produit entre la chaux et les minéraux argileux présents dans le sol.

On rappelle que le principe de l'action pouzzolanique repose sur la possibilité, en milieu de pH élevé (supérieur à 12), de mise en solution de la silice, de l'alumine, des oxydes de fer présents dans les minéraux argileux sous des formes cristallisées plus ou moins altérées. Ces éléments en solution réagissent ensuite avec la chaux pour former des ferro-silico-aluminates de chaux insolubles qui précipitent et cristallisent en

présence d'eau créant ainsi des liaisons de même nature que celles produites avec les liants hydrauliques.

Cette action se traduit par l'augmentation de l'indice ICBR après 4 jours d'immersion.

Les facteurs intervenant dans la cinétique de la prise hydraulique des mélanges sol-chaux sont notamment :

- La température du milieu ;
- La quantité et la nature de la fraction argileuse présente dans le sol. Plus cette quantité est élevée et plus les édifices cristallins des minéraux argileux concernés sont altérés (smectites, montmorillonites), plus la mise en solution de la silice et de l'alumine est rapide et les cristallisations importantes.
- L'état hydrique du sol. La présence dans le sol d'une quantité d'eau libre suffisante est indispensable pour assurer tout d'abord l'ionisation à pH élevé du milieu nécessaire à la solubilisation, puis l'hydratation de ces composés conduisant à la cimentation des particules granulaires.

2. Action des liants hydrauliques

Dans le cas des liants hydrauliques, ce sont principalement les modifications à moyen et à long terme qui sont recherchées.

A/ actions immédiates

Modification de l'état hydrique

Les actions immédiates portent principalement sur l'état hydrique du sol qui subit un assèchement du fait de l'ajout d'une certaine quantité de matière sèche et, dans une moindre mesure, de la perte d'eau consommée dans l'hydratation du liant.

B/ Actions à moyen et long terme

Elle résulte de la prise hydraulique qui confère aux matériaux traités une résistance en traction qui devient alors prédominante dans leur comportement.

On peut considérer que la prise hydraulique se développe en trois étapes. La durée de chacune d'elles dépend de la nature du liant et de la température du mélange :

- La première étape est celle du démarrage de la prise (phase dormante). Elle correspond au temps nécessaire à la mise en solution et la précipitation sous forme de gel des silico-ferro-aluminates de calcium dans l'eau libre du sol. Ce temps qui correspond au délai de maniabilité peut varier entre 2 et 24 heures, voire 48 h après fabrication du mélange. Ce délai est très important dans les

opérations de traitement des sols, car il fixe la durée possible des opérations de mise en œuvre.

- La deuxième étape correspond au ‘ développement de la cristallisation du gel ’ et donc de la rigidification du mélange provoquant la prise proprement dite.
- La troisième étape correspond à la phase de durcissement durant laquelle on observe une poursuite de la croissance des résistances mécaniques.

En traitement de sol, les durées de prise et du durcissement interviennent pour évaluer, d’une part, le temps au bout duquel il est possible de solliciter mécaniquement le matériau traité (notamment la possibilité d’être circulé par les engins de chantiers) et, d’autre part, les délais d’étude nécessaires pour caractériser les résistances pouvant être escomptées à long terme avec la formule du mélange retenue.

IV.3. METHODOLOGIE DE L’ETUDE

IV.3.1. Choix des liants et dosage

Il est fait d’après l’expérience du comportement du sol avec les produits de traitement utilisés localement.

La particularité essentielle des liants hydrauliques étant de pouvoir, en jouant sur le liant et le dosage, fabriquer des matériaux dont le niveau de performance (défini généralement par une résistance en traction et un module) correspond au dimensionnement retenu pour l’ouvrage envisagé, il faut tout d’abord rechercher le type de liant adapté à la nature du sol à traiter et aux sujétions de mise en œuvre du chantier et, ensuite, déterminer la valeur du dosage de ce liant à mélanger avec le sol.

Les traitements aux ciments sont couramment pratiqués. Etant donné que les exigences mécaniques requises dans les matériaux de couche de forme sont relativement faibles et tenir compte de l’aspect économique, nous avons choisi d’utiliser un ciment CEM II 42,5 avec un dosage de 5%.

Le tableau IV.1 traduit l’expérience actuelle de l’adéquation des ciments courants avec différents sols désignés conformément à la classification [GTR 2000].

Tableau IV.1 Adéquation des ciments courants avec différents types de sols [GTS].

Type de sols	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B
Sols pas ou peu argileux (classe A1, B1 à B5, D1)	*(1)	*
Sols argileux prétraités à la chaux (Classe A2, A3, B6)	*(1)	*
Sols calcaires et marno-calcaires (Classe R2)	*(1)	*
Craies (Classe R1)	*(1)	Δ
* : Adapté a priori, *(1) : adapté a priori mais, en l'absence de retardateur de prise, leur usage est à privilégier pour les travaux en arrière-saison (en raison du faible délai de maniabilité de ces liants). Δ : Adaptation à confirmer par une étude spécifique.		

IV.3.2 Différents niveaux d'études de formulation

Le niveau de l'étude de formulation adapté à un chantier donné se définit principalement à partir des facteurs suivants :

- Le mode de prise en compte de la couche de forme dans le dimensionnement de la chaussée ;
- Le niveau d'expérience acquis sur des chantiers similaires ;
- L'intérêt économique d'une optimisation du dosage.

La figure IV.1 donne les différents niveaux d'étude de formulation selon les critères si dessous.

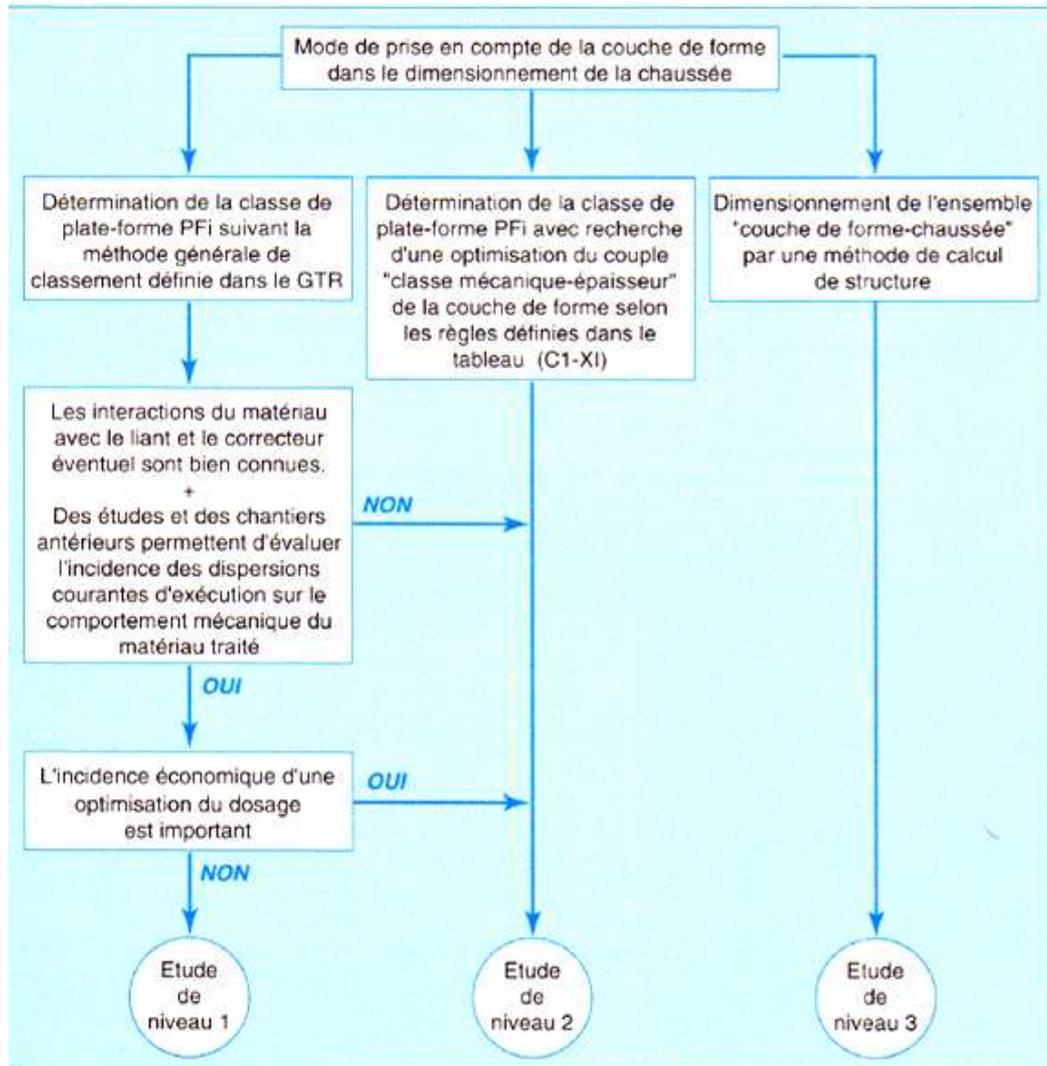


Figure IV.1 Logigramme définissant le niveau de l'étude de formulation à engager [GTS].

Etant donné qu'une étude économique sera faite dans la suite de cette étude, par conséquent le niveau d'étude à envisager dans notre cas est le niveau 2

IV.3.3 Caractéristiques de mise en œuvre des mélanges

Il s'agit d'estimer le comportement du matériau lors de sa mise en œuvre et de déterminer les références de compactage (W_{opn} , ρ_{opn}) du sol traité.

Pour ce faire, on établit les courbes Proctor Normal du sol avant et après traitement ainsi que la courbe IPI du sol traité.

Le tableau IV.2 donne les valeurs minimales de l'IPI à considérer.

Tableau IV.2 Indice Portant Immédiat (IPI) minimal à obtenir à la mise en œuvre [GTS 2000]

Classe de Matériaux	IPI minimal
A ₃ – C ₁ A ₃	10
A ₂ – C ₁ A ₂ – B ₆ – C ₁ B ₆	15
A ₁ – B ₅ – C ₁ A ₁ – C ₁ B ₅	20
Autres classes	à fixer d'après l'expérience ou à déterminer à l'appui d'une étude spécifique

IV.4 ETUDES DES PERFORMANCES MECANIQUES

L'utilisation d'un sol traité en couche de forme nécessite de satisfaire plusieurs critères à plus ou moins long terme [GTS 2000]. Ils diffèrent en fonction du type de traitement (chaux seule ou liant hydraulique).

3 types d'essai ont été mis en œuvre :

- des essais de poinçonnement permettant d'apprécier la portance immédiate (IPI) et après 4 jours d'immersion (ICBR) ;
- des essais de compression simple afin de déterminer l'âge autorisant la mise en circulation de la couche traitée, ainsi que la résistance en compression à long terme,
- des essais de traction brésilienne pour évaluer la résistance et le module élastique en traction (Rt et E).

Avant de détailler chacun de ces essais, nous avons déterminé les paramètres de densification du sol traité.

IV.4.1 Paramètres de densification (Proctor)

Les paramètres de densification optimale d'un sol (ρ_d et W_{op}) sont déterminés à l'aide de l'essai Proctor Normal, présenté au chapitre III.

L'ajout d'un liant hydraulique (chaux, ciment) modifie les caractéristiques de compactage du matériau : la teneur en eau optimale du matériau traité est supérieure à celle du matériau non traité et la densité sèche à l'optimum Proctor est inférieure à celle du matériau non traité. Autrement dit, la courbe Proctor du sol traité est en dessous et à droite de celle du sol naturel (figure IV.2). Dans ces conditions, un compactage à la teneur en eau optimale du matériau non traité (donc inférieure à la

teneur en eau du matériau traité) conduit à une densité sèche inférieure à la densité optimale que l'on peut attendre pour le matériau traité [Rogers C.D.F, 2006], [Consoli N.C., 2009].

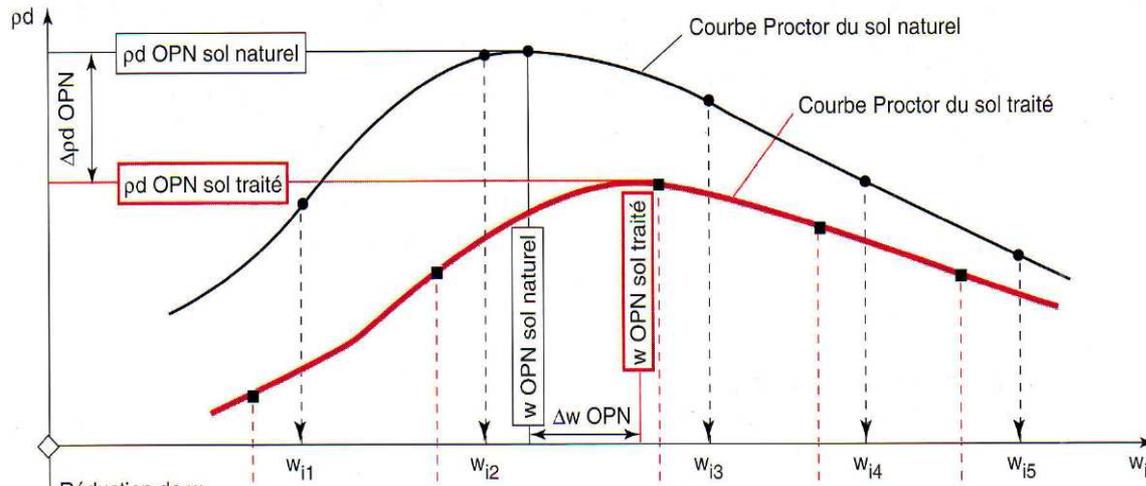


Figure IV.2 Exemple de courbe Proctor d'un sol avant et après traitement [GTS 2000]

IV.4.2 Essai de poinçonnement

L'essai de poinçonnement permet d'évaluer la portance d'un sol. Deux paramètres sont mesurés par cet essai : l'Indice Portant Immédiat (IPI), effectué immédiatement après le compactage dans un moule CBR et l'indice CBR (California Bearing Ratio) après immersion (ICBR). Le protocole de mesure est le même que pour l'IPI mais au lieu d'être effectué juste après le compactage du matériau, l'échantillon, toujours dans son moule, est totalement immergé dans de l'eau à 20°C pendant 4 jours. Sur sa partie supérieure, on dispose une charge annulaire de 4,6 kg afin de simuler les contraintes apportées par les couches supérieures de la chaussée. Durant l'imbibition, on mesure le gonflement du sol grâce à un comparateur opérant entre la surcharge et la paroi du moule, par l'intermédiaire d'un disque. Le protocole de cet essai est présenté en chapitre III.

Pour le sol traité au ciment CEMII dosé à 5%, nous avons effectué un essai de portance immédiate ainsi qu'un CBR après immersion. Les mélanges ont été confectionnés à la teneur en eau Proctor du sol traité. Enfin, nous avons déterminé le rapport ICBR/IPI, qui permet d'évaluer la durabilité du traitement. La durabilité et la portance en cas d'immersion sont jugées satisfaisantes si le rapport ICBR/IPI est supérieur à 1[GTS].

- Essai de retrait

L'effet inverse du gonflement est le retrait, bien que des mesures du retrait ne soient pas nécessaires en technique routière, des essais de retrait ont été réalisés sur le sédiment traité pour monter l'efficacité du traitement.

L'essai de retrait permet de mesurer une limite de retrait, Par définition la limite de retrait W_R d'un matériau est la teneur en eau pondérale en dessous de laquelle le volume de l'échantillon reste constant et pour laquelle le matériau reste quasi saturé. Nous l'avons déterminée par deux méthodes : la première donne la limite de retrait volumique, elle est mesurée par immersion de coupelles dans un bain de mercure, la seconde donne la limite de retrait horizontal, elle est mesurée par analyse de photographies du matériau placé dans des moules semi cylindriques. Le protocole de cet essai est décrit en détail au chapitre III

IV.4.3 Essai de compression simple

Les essais de compression sont pratiqués sur des éprouvettes d'éclatement 1,5, confectionnées à l'optimum Proctor. Les moules que nous avons utilisés permettent la fabrication d'éprouvettes ayant les dimensions suivantes : $\phi = 4$ cm ; $h = 6$ cm. Le protocole de confection par compression statique.

L'objectif des essais de compression est multiple notamment, il permet de déterminer l'âge autorisant la mise en circulation des engins de chantier sur la couche traitée, c'est le critère de traficabilité. Pour évaluer ce paramètre, nous avons mesuré les résistances en compression d'éprouvettes après 2, 3, 7, 14, 28 et 90 jours de maturation normale.

Le critère de traficabilité est jugé satisfaisant dès lors que la résistance en compression simple (R_c) est supérieure à 1 MPa. Il s'agit donc d'estimer à l'aide des courbes d'évolution le temps nécessaire pour que cette condition soit vérifiée.

IV.4.4 Essai de traction brésilienne

L'objectif de cet essai est de déterminer les performances mécaniques en traction de la couche traitée. Nous avons mesuré les résistances en traction d'éprouvettes après 7, 14, 28 et 90 jours de maturation normale.

La résistance en traction peut être évaluée de 2 manières différentes [Scordia P.Y., 2008]. La première consiste à effectuer un essai de traction directe sur des éprouvettes « diabolos » équipées d'anneaux d'extensométrie. Cependant, cet essai est coûteux et délicat à mettre en œuvre. Aussi, on pratique plus couramment l'essai dit de traction brésilienne (ou par fendage), décrit dans la norme NF P98-232-3, sur des éprouvettes

cylindriques, confectionnées à l'optimum Proctor. Les moules utilisés et le protocole de confection est le même que celui de l'essai de compression simple.

Le principe de l'essai consiste à effectuer une compression diamétrale en appliquant une charge linéique sur 2 génératrices diamétralement opposées de l'éprouvette (Figure IV.3). La résistance en traction brésilienne (R_{tb} en MPa) est déterminée à partir de la force appliquée par la presse au moment de la rupture de l'échantillon (F_r en N), en utilisant la formule suivante :

$$R_{tb} = 2.10^{-2} * \frac{F_r}{\pi \phi h}$$

Avec : h , la hauteur de l'éprouvette en cm et
 Φ , le diamètre de l'éprouvette en cm.

La valeur que l'on obtient correspond théoriquement à la résistance en traction de l'éprouvette. Cependant, elle est légèrement surestimée, car en pratique, il est impossible d'appliquer une charge strictement linéique (il se crée nécessairement une zone d'aplatissement). L'expérience a montré qu'en multipliant R_{tb} par 0,8, on obtenait une valeur plus cohérente de la résistance en traction réelle (R_t) du matériau compacté [GTS, 2000].

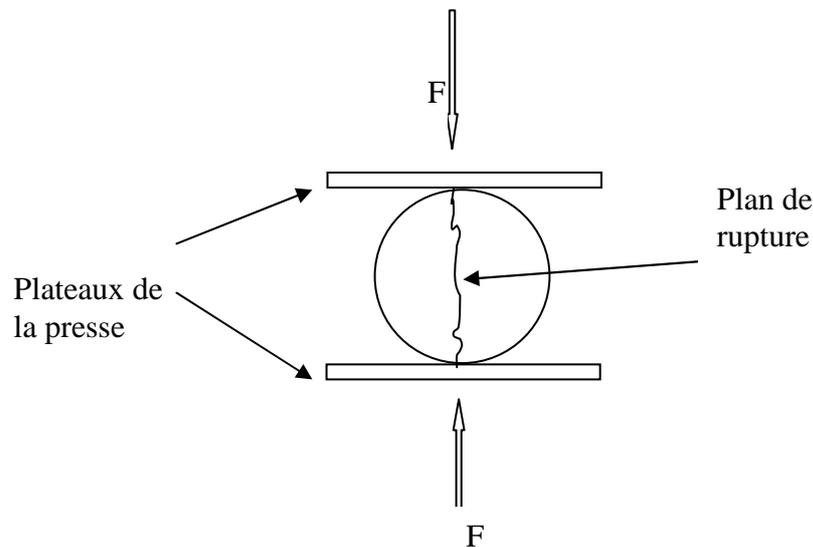


Figure IV.3 : Principe de l'essai de traction brésilienne (fendage)

Le module de déformation peut être défini comme la pente de la droite reliant l'origine au point d'ordonnée $0,3\sigma_c$ (avec σ_c la contrainte de rupture mesurée) de la courbe contrainte-déformation [norme NF P 98 232 1], [Tran N.T., 2009].

Il existe une autre manière de mesurer ce module, il est estimé à 30 % de la contrainte maximale [Scordia P.Y, 2008], c'est à-dire lorsque que la charge appliquée $F_{0,3}$ est égale à $0,3 \times Fr$. Si on note $\Delta\phi_{0,3}$, l'allongement du diamètre perpendiculaire au plan de rupture de l'éprouvette pour $F = F_{0,3}$, alors le module élastique E (MPa) peut être calculé avec la formule suivante ($\Delta\phi_{0,3}$ en cm) :

$$E = 10^{-2} \frac{K}{h} * \frac{F_{0,3}}{\Delta\phi_{0,3}}$$

K est un paramètre qui dépend du coefficient de Poisson ν du matériau. Par défaut, on prend généralement $K = 0,291$ qui correspond à $\nu = 0,25$.

IV.4.5 Récapitulatif des essais

Le tableau IV.3 ci-après récapitule les différents essais que nous venons de présenter ainsi que les exigences requises et/ou les critères de jugement pour l'utilisation d'un matériau traité en couche de forme.

Le tableau IV.3 Récapitulatif des essais

Essais réalisés	Grandeur mesurée	Exigence ou critère de jugement
Paramètres de densification (Proctor)	Densité sèche maximale et Teneur en eau correspondante	
Poinçonnement	Indice de portance Immédiat IPI et ICBR après 4 jours d'immersion dans l'eau à 20°C	$IPI \geq 10$
Gonflement vertical	Mesure du gonflement vertical lors de l'immersion pendant 4 jours de l'essai CBR	Pas de critères exigés
Retrait	Limite de retrait volumique et Horizontal W_r	Pas de critères exigés
Essai de compression Simple	Résistance en compression R_c au jeune âge et évolution de la résistance jusqu'à 90 jours	La couche de forme peut être circulée dès que $R_c \geq 1$ MPa
Essai de traction	Résistance en traction R_t (estimée à partir de la résistance en traction brésilienne)	

IV.5. REALISATION DES ESSAIS

Dans ce paragraphe, nous allons développer le travail expérimental lié à l'exécution des essais décrits précédemment. Pour chacun d'entre eux, nous décrirons le matériel et le protocole utilisé puis nous exposerons et interpréterons nos résultats.

IV.5.1 Paramètres de densification (Proctor)

Les paramètres Proctor sont déterminés pour le sédiment traité avec 5% de ciment.

Après le malaxage du sol avec le ciment à sec, le mélange obtenu est humidifié à des teneurs en eau croissante, ensuite, à l'inverse du sol naturel, il est immédiatement placé dans un moule Proctor, le compactage est fait par un compacteur automatique avec une énergie Proctor normal.

Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du sol traité et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau, dite courbe Proctor.

Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus pour le sol naturel et sont représentés sur la figure IV.4.

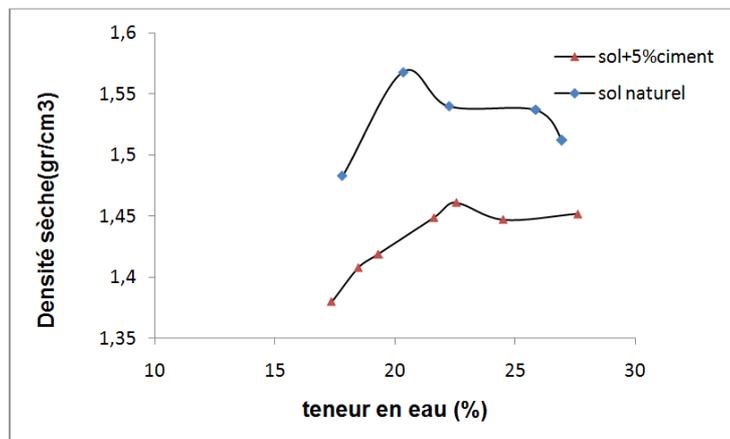


Figure IV.4 : Courbe Proctor du sédiment de Merdja avant et après traitement au ciment.

On remarque bien que la courbe Proctor du sol naturel est au dessus de celle du sol traité au ciment comme indiqué dans les guides techniques en figure IV.2. Les caractéristiques optimales de compactage obtenues pour le sédiment sont : une teneur en eau optimale de 22,5% et une densité sèche maximale de 1,45 gr/cm³.

IV.5.2 Confection des éprouvettes

Deux sortes d'éprouvettes sont nécessaires à confectionner pour réaliser la totalité des essais :

- Des éprouvettes « CBR » pour la détermination de l'IPI et de l'ICBR. Elles sont élaborées par compactage à la dame directement dans les moules CBR selon le protocole décrit au chapitre III (essai Proctor Normal) ;
- Des éprouvettes cylindriques « 4 x 6 » ($\phi = 4 \text{ cm}$; $h = 6 \text{ cm}$) pour les essais de compression et de traction brésiliennes, elles sont confectionnées avec les paramètres de densification Proctor normal. Le moule servant à confectionner les éprouvettes sont montrées sur la figure IV.5.



Figure IV.5 : Moule pour confection des éprouvettes (compression et traction)

IV.5.3 Détermination de l'IPI et de l'ICBR

L'objectif de cet essai, présenté au chapitre III, est d'évaluer la portance d'éprouvettes confectionnées selon le protocole de compactage Proctor Normal, immédiatement après leur fabrication (IPI) et après 4 jours d'immersion dans l'eau à 20°C (ICBR). Il nous a permis de mesurer, pendant la phase d'immersion, le gonflement vertical du matériau compacté (G).

Pour chaque cas, les éprouvettes sont préparées dans des moules CBR en suivant le protocole de compactage de l'essai Proctor Normal selon la norme NF P094-93. Lors de la confection des mélanges.

Pour l'échantillon destiné à la détermination de l'ICBR, on dispose des surcharges annulaires sur la face supérieure de l'éprouvette puis l'ensemble est immergé dans un bac rempli d'eau, lui-même disposé dans une pièce maintenue à $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Enfin, le dispositif de mesure du gonflement vertical est placé en appui sur les rebords du moule (Figure IV.6). Après 4 jours d'immersion, en plus du gonflement nous avons mesuré la portance du sol traité.



Figure IV.6 Immersion de l'éprouvette pour la détermination de ICBR et de G.

- Détermination de l'IPI

Mode opératoire

Le matériau (sédiment + 5% ciment) est humidifié à des teneurs en eau croissantes avec les mêmes précautions que l'essai Proctor, ensuite il est placé dans un moule CBR.

Le sol compacté est gardé dans le moule, placé immédiatement après compactage sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement. Le poinçonnement est effectué de la manière décrite dans le chapitre III.

Résultats et Interprétation

Les résultats concernant IPI sont rapportés sur le même graphe que ceux du sédiment à l'état naturel (figures IV.7).

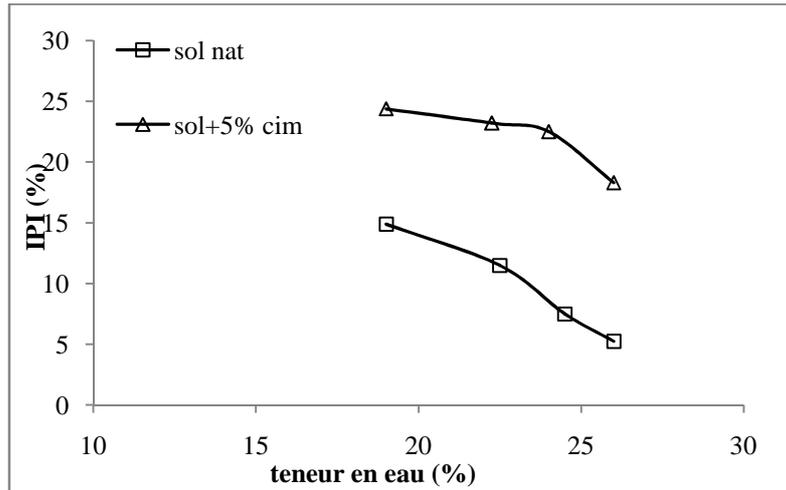


Figure IV.7 Courbe IPI en fonction de la teneur en eau.

On note que la courbe IPI du sédiment traité avec 5% de ciment est au dessus de celle du sol naturel, en d'autres termes les performances de compactage sont améliorées. La valeur de l'IPI à l'optimum Proctor est de 22,5, c'est une valeur nettement supérieure à celle préconisée dans les GTR 2000 (10).

- Détermination de ICBRimm

Nous avons effectués des essais de poinçonnement après 4 jours d'immersion dans l'eau. Le poinçonnement est fait juste après avoir retiré les éprouvettes du bac et enlever le dispositif qui sert à lire le gonflement.

Les résultats obtenus pour les essais d'ICBR immersion sont portés sur le même graphe que celui du sol naturel, ils sont représentés sur la figure IV.8.

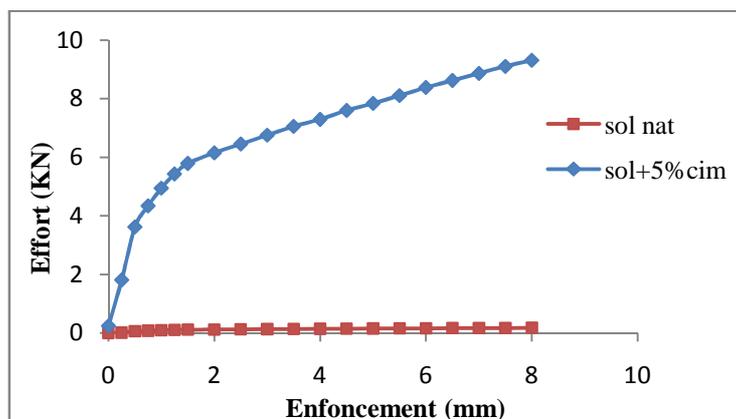


Figure IV.8 Courbe ICBR imm (Poinçonnement) à l'optimum Proctor

Sur cette courbe l'influence du traitement au ciment est bien marquée. On remarque bien la grande sensibilité à l'eau du matériau naturel, ce là se traduit par la portance qui est quasi nulle. Après traitement avec 5% seulement de ciment, la portance est nettement améliorée, la valeur de l'ICBR après immersion passe de 0,94 pour le sédiment naturel à 47,77% pour le sédiment traité. Le rapport ICBRimm/IPI est de l'ordre de 2,12.

IV.5.4 Mesure du gonflement vertical

Le comparateur est réglé à 0 au début de l'essai, puis la valeur du déplacement vertical ΔH (mm) est relevé régulièrement jusqu'au terme des 4 jours d'immersion. G correspond au rapport du déplacement vertical avec la hauteur initiale de l'échantillon, exprimé en %, soit :

$$G = 100 * \Delta H / H$$

L'évolution du gonflement vertical du sol traité et sol naturel en fonction des teneurs en eau est donné en figure IV.9.

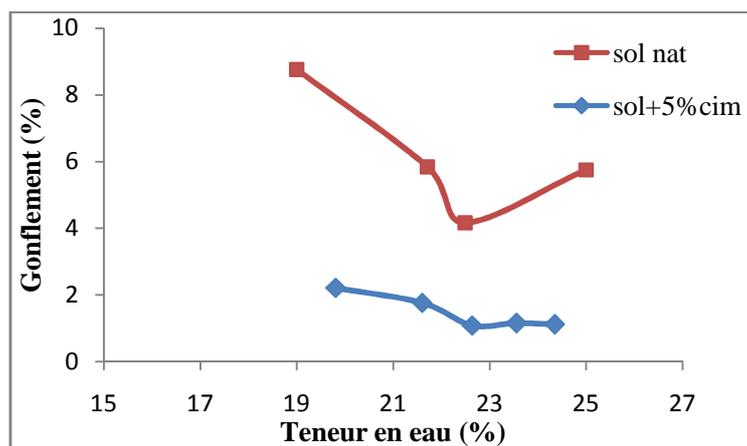


Figure IV.9 Variation du gonflement vertical en fonction de la teneur en eau.

On constate que l'allure des courbes du sédiment naturel et traité est la même et que les valeurs du gonflement diminuent en fonction des teneurs en eau croissantes jusqu'à une valeur proche de l'optimum Proctor ensuite il augmente légèrement.

Le gonflement vertical est réduit, il passe de 7% à 1,12% à l'optimum Proctor.

- Essai de retrait

Les résultats obtenus à partir des essais de retrait sur le sol traité sont représentés sur le même graphique que ceux obtenus pour le sédiment naturel (figure IV.10).

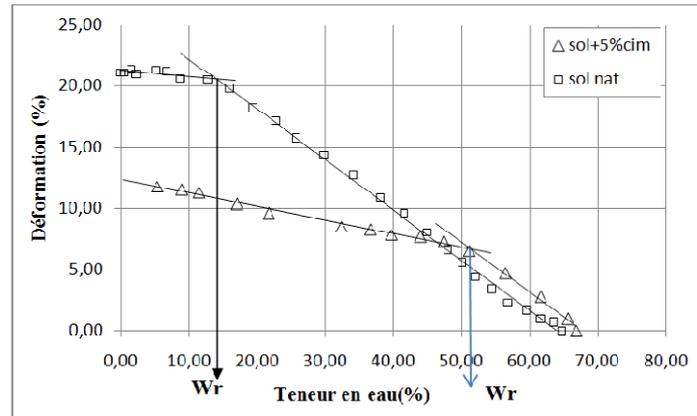


Figure IV.10 Courbe de dessiccation (retrait linéique horizontal).

La valeur de la limite de retrait horizontal est de l'ordre de 52%, elle est proche de la limite de liquidité. Le retrait linéaire LS correspondant à la déformation longitudinale de l'éprouvette après dessiccation complète est de l'ordre de 11,78%, il est nettement inférieur à celui obtenu pour le sédiment avant traitement (20,95%).

IV.5.5 Conclusion

Dans les conditions d'essai de l'ICBR, proches de celles rencontrées par une couche de forme mise en œuvre (simulation des couches supérieures à l'aide des surcharges et frettage horizontal des éprouvettes), le gonflement des sédiments traités est faible et n'engendre pas de déformations préjudiciables.

Enfin, nous avons mis en évidence que la portance était nettement améliorée après 4 jours d'immersion. Ainsi, le risque de perte de cohésion en cas de saturation hydrique de la couche est écarté et d'autre part, le rapport ICBR/IPI est supérieur à 1, ce qui est un critère de pérennité des traitements envisagés [GTS 2000].

IV.6 ESSAIS DE COMPRESSION SIMPLE

Les essais de compression permettent de caractériser plusieurs paramètres en particulier la cinétique de prise et l'âge autorisant la circulation sur la couche traitée.

Afin de comparer les valeurs des résistances en compression du sédiment traité, des essais de compression sont réalisés sur le sédiment naturel.

Préparation des mélanges et confection des éprouvettes

Des éprouvettes de diamètre 40mm et de hauteur 60mm (soit un élanement de 1,5) sont mises en place par compactage statique. Le malaxage du sol et le ciment est fait

dans un malaxeur ensuite l'eau est ajoutée au mélange suivi d'un malaxage pour une bonne homogénéisation. Après confection, les éprouvettes sont conservées à l'air libre (figure IV.11).



Figure IV.11 Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes sont confectionnées à une teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor du matériau.

- Calcul de la masse du sol naturel nécessaire pour la réalisation d'une éprouvette

La masse d'une éprouvette de sédiment est obtenue en multipliant le volume de l'éprouvette par le poids volumique humide.

$$m_h = \gamma_h \times V$$

avec :

m_h : la masse humide nécessaire pour une éprouvette de sédiment humidifié avec une teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor W_{op} .

γ_h : la densité humide, elle est calculée en fonction de la densité sèche maximale γ_d ($\gamma_h = \gamma_d * (1 + W_{op}/100)$).

V : le volume de l'éprouvette.

Après calcul, les masses des éprouvettes du sol naturel et du sol traité sont données dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Caractéristiques optimales de compactage et masse d'une éprouvette de sédiment naturel et traité au ciment.

	Densité sèche γ_d (gr/cm ³)	Teneur en Eau Wop (%)	Densité humide γ_h (gr/cm ³)	Volume V(cm ³)	Masse humide (gr)
Sol naturel	1,57	20	1,88	75,36	141,98
Sol traité	1,45	22,5	1,78	75,36	133,86

Dans un premier temps, afin d'évaluer la résistance à la compression du sol naturel, des essais de compression simple ont été réalisés à différentes échéances : 7, 14, 28 et 90 jours. Les résultats sont présentés en figure IV.13.

L'écrasement est réalisé sur la presse telle montrée sur la figure IV.12.



Figure IV.12 Essai de compression simple

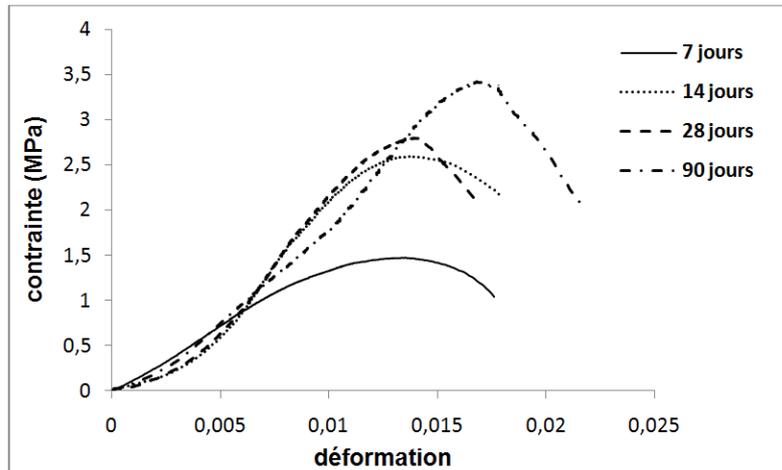


Figure IV.13 Contraintes de compression du Sédiment naturel.

On constate que les résistances obtenues sont croissantes en fonction de la durée de maturation et continuent de croître au-delà de 28 jours. La résistance obtenue à 90 jours est relativement importante, elle est de l'ordre de 3,4MPa. On remarque également que les courbes présentent une pente proche, et donc un module d'élasticité de même ordre de grandeur.

La figure IV.14 montre les résultats d'essais de compression réalisés sur le sédiment d'El Merdja traité avec 5% de ciment. Afin d'évaluer l'âge de la mise en circulation de la couche de forme, les éprouvettes confectionnées à l'optimum Proctor sont écrasées à des échéances de 2, 3, 7, 14, 28, 90 jours, les essais sont désignés respectivement par : sedc2j, sedc3j, sedc7j, sedc14j, sedc28j, sedc90j.

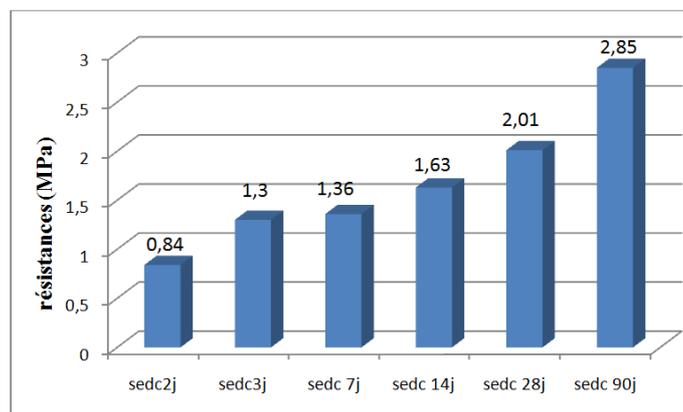


Figure IV.14 Résistances à la compression du sédiment traité au ciment à différents âge de maturation.

On observe sur la figure IV.14, de la même manière que le sédiment à l'état naturel, que la résistance augmente en fonction de l'âge de maturation de 2 jusqu'à 90 jours. Il ressort de ces résultats que la couche de forme peut être circulée à partir du 3^{ème} jours, vu que la résistance à cet âge est de 1,3 MPa.

Il est à noter que la résistance en compression est plus faible que le sédiment à l'état naturel, cela est peut être dû, d'une part, le sédiment est constitué d'une argile raide donc sa résistance est relativement élevée, et d'autre part, le ciment consomme une certaine quantité d'eau nécessaire à la réaction de prise donc la teneur en eau nécessaire pour le compactage est inférieure à l'optimum Proctor, ce qui conduit à un compactage inférieur au compactage optimum (sur la courbe Proctor, on remarque que la densité sèche décroît rapidement lorsque la teneur en eau décroît, et elle décroît lentement lorsque la teneur en eau augmente).

Pour justifier ce raisonnement, nous avons réalisés des essais de compressions en faisant varier la teneur en eau. La figure IV.15 montre les résultats d'essais de compression réalisés sur le sédiment d'El Merdja naturel à l'optimum Proctor et traité avec 5% de ciment pour différentes valeurs de teneur en eau. Les teneurs en eau utilisées sont de : 22, 25 et 27%. Les éprouvettes confectionnées avec ces dosages sont désignés par : sol cim 22, sol cim 25 et sol cim 27.

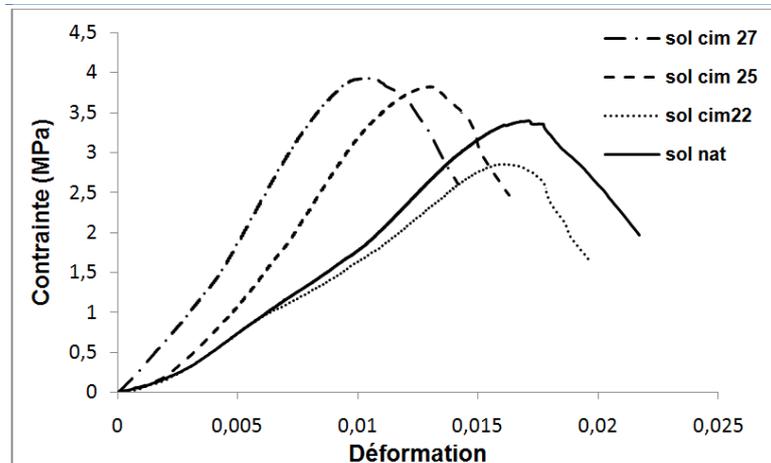


Figure IV.15 : Contraintes de compression à 90 jours pour le sol naturel et traité au ciment (5%) pour des teneurs en eau de 22, 25 et 27%.

On constate que, pour une teneur en eau correspondant à celle de l'optimum Proctor (22%), la résistance en compression est plus faible que celle du sol naturel, En revanche, pour des teneurs en eau supérieures (sol cim 25 et sol cim 27), les valeurs de la résistance en compression augmentent et se stabilisent à partir de 25% d'eau. Cette augmentation de résistance s'explique aisément par la quantité d'eau nécessaire

à l'hydratation du ciment. On remarque également que leur module d'élasticité est plus important que celui du sol naturel et est croissant en fonction de la teneur en eau.

IV.7 Essais de traction brésilienne

Des éprouvettes sont confectionnées avec le même protocole que les essais de compression simple. D'abord elles sont confectionnées à l'optimum Proctor ensuite en faisant varier la teneur en eau.

La figure IV.16 montre l'essai d'écrasement des éprouvettes.



Figure IV.16 Essai d'écrasement en traction brésilienne (par fendage)

Les résultats obtenus sont montés sur la figure IV.17.

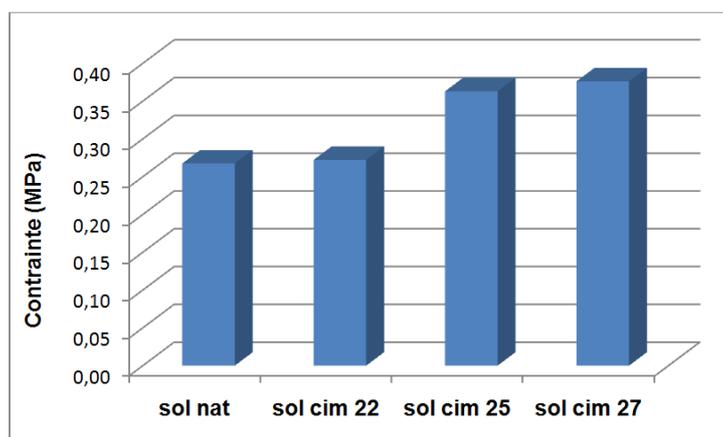


Figure IV.17 Résistance de traction par fendage à 90 jours pour le sol naturel et traité au ciment (5%) pour des teneurs en eau de 22, 25 et 27%.

On constate aussi que, pour une teneur en eau proche de l'optimum Proctor, la résistance en traction est du même ordre de grandeur que celle du sol naturel. En revanche, pour des teneurs en eau supérieures (sol cim 25 et sol cim 27), les valeurs de la résistance en traction sont plus élevées que celles du sol naturel et sont de même ordre de grandeur entre elles.

De ces constatations nous avons retenus deux dosages en eau, la teneur en eau correspondant à l'optimum Proctor qui est celle préconisée par les GTR et une teneur en eau de 25%, celle qui a donné le meilleur résultat en termes de résistance et en plus la valeur du gonflement est de même ordre de grandeur que celle correspondant à une teneur en eau de 20%.

IV.7 CONCLUSION

Les sédiments issus du dragage du barrage de Merdja sont traités au ciment avec un dosage de 5% afin de les réutilisés en couche de forme

En effet, au dosage testé, ils ont tous été jugés aptes au traitement, la portance est améliorée après immersion, ce qui garantit la pérennité du matériau traité, et ne présente pas de gonflement préjudiciable ni de perte de cohésion en cas de saturation à l'eau, le délai de mise en circulation est rapide (3 jours). Les performances mécaniques sont améliorées

Ce sédiment traité avec 5% de ciment CEM II présente des résistances en compression largement supérieures à celles recommandées en couche de forme et ceci malgré la présence d'argiles gonflantes. Le traitement et le dosage suggéré est donc particulièrement préconisé et afin d'optimiser le traitement, la quantité d'eau recommandée peut être supérieure à l'optimum Proctor.

Chapitre V

PRINCIPES GENERAUX DE DIMENSIONNEMENT ET ETUDE ECONOMIQUE

- Inexistante car inutile lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises,
- Limitée à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques nécessaires,
- Constituée d'une superposition de couches de matériaux différents répondant à des fonctions distinctes.

V.1.2 Fonctions et conception de la couche de forme

La couche de forme répond à la fois à des objectifs de court terme (vis à vis de la phase de réalisation de la chaussée) et de long terme (lorsque l'ouvrage est en service).

▪ A court terme :

- Assurer la traficabilité quasi tout temps des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation,
- Permettre le compactage efficace de la couche de fondation,
- Satisfaire les exigences de nivellement de la plate forme support de chaussée,
- Assurer la protection de l'arase terrassement vis-à-vis des agents climatiques dans l'attente de la réalisation de la chaussée.

▪ A long terme :

- L'homogénéisation de la portance du support pour concevoir des chaussées d'épaisseur constante,
- Le maintien dans le temps, en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols supports sensible à l'eau, d'une portance minimale pouvant être estimée avec une précision suffisante au stade du dimensionnement de la chaussée,
- Une amélioration de la portance de la plate-forme pour optimiser le coût de l'ensemble couche de forme – structure de chaussée,
- La protection thermique des sols support gélifs,
- Une contribution au drainage de la chaussée.

Il s'avère ainsi que la conception de la couche de forme requiert une réflexion renouvelée à chaque chantier pour tenir compte des objectifs visés et des conditions de réalisation des travaux. Cette réflexion doit notamment considérer :

- L'aptitude des matériaux disponibles à être employés en couches de forme,
- L'épaisseur de la couche de forme à réaliser selon les matériaux retenus, les conditions de chantier et la saison durant laquelle les travaux de terrassements et de chaussée seront exécutés,
- Les gains éventuels sur le coût global de la chaussée, tirés d'un accroissement d'épaisseur de la couche de forme.

V.2 DIMENSIONNEMENT DE LA COUCHE DE FORME

V.2.1 Les différents cas de Partie Supérieure des Terrassements (PST)

La classification géotechnique des sols et les conditions hydriques intéressant le mètre supérieur supportant la couche de forme, zone appelée Partie Supérieure des Terrassements (PST), à chaque PST est associée une ou deux classes de portance à long terme de l'arase de terrassement, notée(s) ARi.

Le tableau de l'annexe 2 distingue, selon la nature des matériaux et l'environnement hydrique, 7 catégories de Partie Supérieure des Terrassements notées de PST n° 0 à PST n° 6.

Le cas de la PST n° 0 correspond à une situation impropre à la réalisation d'une plateforme.

Les classes de portance de l'arase de terrassement introduites pour chaque cas de PST sont associées aux caractéristiques du sol support dites à long terme.

V.2.2 Epaisseur préconisée pour la couche de forme

L'épaisseur préconisée pour la couche de forme est fixée de sorte qu'elle :

- satisfasse aux divers critères de résistance permettant une mise en œuvre correcte des couches de chaussée,
- assure la pérennité d'une valeur minimale de portance à long terme de la plateforme.

Cette épaisseur dépend :

- du cas de PST et de la portance à long terme au niveau de l'arase des terrassements,
- des caractéristiques du matériau constituant la couche de forme.

Les valeurs sont données dans les dernières colonnes des tableaux de l'annexe 3 sur les conditions d'utilisation des sols et des matériaux rocheux en couche de forme. Les valeurs proposées viennent de l'expérience de chantier et correspondent à des trafics courants de chantier (limités à l'approvisionnement des matériaux de la couche de fondation).

V.3 CLASSEMENT DES PLATES-FORMES POUR LE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSEE

V.3.1 Portance à long terme de la plate-forme

Pour le dimensionnement des structures de chaussée, la portance à long terme de la plate-forme support de chaussée est déterminée à partir du couple PST - couche de forme.

Selon le GTR, on distingue 4 classes de portance des plates-formes définies par des plages de valeur de module de déformation réversible, selon le découpage donné par le tableau V.1.

Tableau V.1 Tableau définissant les classes de plate-forme PFi

Module (MPa)	20 – 50	50 - 120	120 - 200	≥ 200
Classe de Plate-forme	PF1	PF2	PF3	PF4

Le classement de la plate-forme s'effectue ainsi :

- lorsque la couche de forme a au moins l'épaisseur préconisée par les tableaux de l'annexe 3, la classe de la plate-forme est indiquée dans ces mêmes tableaux selon la P.S.T. et la nature de la couche de forme,
- si l'épaisseur de la couche de forme est inférieure à la valeur préconisée, la classe de la plate-forme à retenir est celle de la classe de l'arase de terrassement.

Dans le cas de matériaux sensibles à l'eau, il sera souvent difficile d'être en mesure de déterminer par avance quelles seront ces caractéristiques à long terme. L'état hydrique est variable avec les saisons et sera influencé par les dispositions constructives du projet.

A défaut de pouvoir établir un diagnostic précis, on retiendra pour les calculs de chaussée, comme module d'Young du sol support les valeurs suivantes (tableau V.2).

Tableau V.2 tableau des modules de calcul descriptifs du sol support

Module (MPa)	20	50	120	200
Classe de l'arase terrassement	AR1	AR2	AR3	AR4

D'après les tableaux de l'annexe 3, on relève que la mise en œuvre d'une couche de forme ayant au moins l'épaisseur préconisée conduit à une plate-forme PF2 minimum.

Pour les couches de forme en matériaux traités aux liants hydrauliques, une étude technico-économique est recommandée pour examiner si un reclassement de la plateforme en PF3 ou PF4 ne peut pas être obtenu moyennant une augmentation de l'épaisseur indiquée dans les tableaux.

Pour les classes de plate-forme définies précédemment, on retiendra comme module d'Young dans le calcul pour représenter l'effet mécanique de la plate-forme support de chaussée, les valeurs correspondant à la limite basse de la classe (tableau V.1).

Le tableau V.3 du règlement Algérien (Catalogue de dimensionnement de chaussées neuves, CTTTP) donne les classes des portances du sol support (sol terrassé surmonté éventuellement par une couche de forme) en fonction de CBR.

Tableau V.3 Classes de portance des sols Si [CTTP]

Portance (Si)	CBR
S4	< 5
S3	5 - 10
S2	10 - 25
S1	25 - 40
S0	> 40

V.3.2 Règles de surclassement de portance des plates-formes

Par mesure de simplification, pour couvrir les situations courantes, des règles de surclassement identiques sont proposées ci-après pour les différentes structures de chaussées souples et semi-rigides. Afin de comparer la solution traitement et les matériaux non traités, on considère successivement le cas des couches de forme en :

- matériaux granulaires non traités,
- matériaux traités aux liants hydrauliques.

Les épaisseurs indiquées dans les tableaux V.4 découlent de calculs de mécanique des chaussées pour l'analyse du comportement de la chaussée en service et de constatations de chantier pour la tenue sous le trafic de chantier des couches de forme.

V.3.2.1 Couches de forme en matériau non traité

L'épaisseur de la couche de forme est présentée dans le tableau V.4 donné dans les GTR 2000 du LCPC.

Tableau V.4 Condition de surclassement de portance des plates formes avec C.F non traitée [GTR200].

Classe de l'arase	Classe de la plate-forme	Matériau de la couche de forme	Epaisseur de Matériau de couche de forme
AR1	PF3	B ₃₁ , C ₁ B ₃₁ , C ₂ B ₃₁ , D ₂₁ , D ₃₁ , R ₂₁ , R ₄₁ , R ₆₁ C ₁ B ₁₁ *, C ₂ B ₁₁ *, R ₁₁ *, R ₄₂ *, R ₆₂ *	0,80m**
AR2	PF3	Idem ci-dessus	0,5 m

* sous réserve d'une vérification sur la plate-forme support de chaussée.

** une réduction d'épaisseur de l'ordre de 0,10 à 0,15 m peut être admise si l'on intercale un géotextile adapté entre la couche de forme et la PST.

Le tableau V.5 du catalogue du dimensionnement des chaussées neuves du règlement algérien donne des indications sur le choix et l'épaisseur de la couche de forme à réaliser. Elle peut être en une ou plusieurs couches suivant le cas de portance du sol terrassé et de la classe du sol-support visée.

Tableau V.5 Sur classement avec couche de forme en matériaux non traités [CTTP]

Classe de portance De sol terrassé	Matériaux de couche De forme	Epaisseur de Matériau de C.F.	Classe de portance De sol-support Visée
< S4	Matériaux non traités	50 cm (en 2 couches)	S3
S4	//	35 cm	S3
S4	//	60 cm (en 2 couches)	S2
S3	//	40 cm (en 2 couches)	S2
S3	//	70 cm (en 2 couches)	S1

La classe de portance de la plate forme PFi et l'arase des terrassements ARi correspondent respectivement à la classe de portance sol-support Si et à la classe de portance sol terrassé Sj.

V.3.2.2 Couches de forme en sols argileux et limoneux traités en place

Le tableau V.6 donne l'épaisseur de la couche de forme réalisée avec des matériaux :

- pour un emploi avec traitement à la chaux seule : les sols A3, -
- pour un emploi avec traitement mixte (chaux + ciment) ou ciment seul : les sols A1,

A2 et éventuellement A3, ainsi que les matériaux C dont la fraction 0/50 mm est constituée par les sols précédents et lorsque la faisabilité du traitement est acquise.

Tableau V.6 Conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en sol fin traité en place [GTR]

Classe de l'arase	Classe de la plate-forme	Matériau de la couche de forme	Epaisseur de Matériau de couche de forme
AR1 *	PF3	A3 traité à la chaux seule.	0,70m (en 2 couches)
		A ₁ , A ₂ , A ₃ traités à la chaux + ciment ou éventuellement ciment seul	0,50m (en 2 couches)
AR2	PF3	A ₃ traité à la chaux seule.	0,50m (en 2 couches)
		A ₁ , A ₂ , A ₃ traités à la chaux + ciment ou éventuellement ciment seul	0,35 m

* Cas des PST n°2 et 3. Dans le cas d'une PST n°1 (mauvaise portance à la mise en oeuvre) ces solutions de surclassement ne sont pas applicables.

V.4 ETUDE ECONOMIQUE

La décision de recourir au traitement de sol doit être justifiée par une étude économique prenant en compte un maximum d'aspects et notamment ceux induits par les contraintes de protection de l'environnement.

L'intérêt de recourir à un traitement est, non seulement, de pouvoir utiliser en couche de forme des matériaux qui, dans leur état naturel, n'ont pas les caractéristiques requises, mais également d'élever très sensiblement les caractéristiques des matériaux aptes à l'emploi en couche de forme sans traitement, afin de réduire les épaisseurs et donc les quantités.

Pour la construction d'une couche de forme, le traitement constitue une éventualité qu'il convient d'envisager quasi systématiquement [GTS].

A partir d'une connaissance statistique représentative localement des coûts élémentaires [GTS], il est possible de calculer les coûts au mètre carré de plate forme support de chaussée pour chacune des deux solutions, ce qui permet de prendre en compte les gains éventuels sur les dimensionnements de la structure.

V.4.1 Limites des études économiques

L'évaluation du cout global du traitement n'est pas précise pour différentes raisons. Il y a, tout d'abord, le nombre et la qualité des données statistiques utilisable pour évaluer les couts élémentaires des différentes composantes des solutions « traitement ».

Dans le cas de l'application du traitement à la réalisation des couches de forme, outre la méconnaissance des couts relatifs à l'homogénéisation, humidification, etc., le nombre de passe de malaxage nécessaires pour obtenir la mouture recherchée, les endommagements des machines de malaxages, l'usure plus ou moins rapide des outils, les quantités d'eau éventuellement nécessaires à l'humidification, etc. sont également des éléments aléatoires pouvant affecter considérablement la précision de l'estimation du cout du traitement.

V.4.2 Calcul des couts des matériaux de couche de forme

Concernant la route sur laquelle la couche de forme sera réalisée, on choisira une route relativement de faible importance, vu qu'il s'agit d'une valorisation alors, on optera pour une route du réseau routier du type principale niveau 2 (RP2), ce type de réseau est composé de routes nationales et de chemins willaya. Afin de minimiser les frais de transport, la route sera réalisée à proximité du barrage de Merdja donc dans la willaya de Relizane

Pour pouvoir comparer les couts en solutions emprunt et traitement, nous optons pour la même PST et même arase ARi. Comme nous n'avons pas fait d'essais sur les matériaux du sol support, on choisira le cas PST2 et arase AR1 dans le tableau de l'annexe V.2. Ce cas de PST concerne une plage importante de matériaux qu'on peut rencontrer et nécessite de prévoir la réalisation d'une couche de forme.

V.4.3 Epaisseur de la couche de forme réalisée avec le sédiment traité de Merdja.

L'épaisseur de la couche de forme sera choisie dans le tableau V.6. Pour cela il faut d'abord connaître la classe de portance de la plate forme PFi, celle-ci est donnée en fonction du module de déformation Ev2.

Nous suivons la procédure donnée dans le règlement algérien de dimensionnement des chaussées neuves et les GTR.

Le module de déformation est déterminé par des essais à la plaque, ou dans le cas des sols fins, le module peut être estimé à partir d'essais de poinçonnement de type CBR [CTTP]. Comme nous n'avons pas de matériels, nous n'avons pas fait des essais pour

déterminer ce module, alors il sera calculé avec la formule V.I donnée par les règlements cités ci-dessus.

$$E=5*CBR \quad (V.1)$$

Pour les sols sensibles à l'eau, c'est le cas du sédiment de Merdja, le CBR à prendre en considération est en fonction des zones climatiques [CTTP].

La couche de forme est réalisée sur un tronçon de route situé dans la wilaya de Relizane, celle-ci se trouve dans la zone climatique II (annexe 4).

La valeur du CBR à prendre dans ce cas est le CBR après 4 jours d'immersion à 100% de l'optimum Proctor.

La valeur du CBR à 4 jours d'immersion du sédiment de Merdja traité au ciment est déterminée dans le chapitre IV. Elle est de l'ordre de 47,77%.

Le module de déformation E, calculé avec la formule V.1, est égal à 238,85MPa, ce qui conduit à une classe de portance de plate forme PF4 selon les guides GTR et selon le catalogue de dimensionnement des chaussées neuves de classe S0.

Dans le tableau V.6 nous n'avons pas le cas de PF4, alors on retiendra le cas de PF3, ce qui conduit à une épaisseur de couche de forme de 50 cm réalisée en 2 couches pour une arase AR1.

V.4.4 Calcul des volumes et des coûts des matériaux utilisés pour la couche de forme en sédiment traité

Le volume V_s de sédiment nécessaire pour un mètre carré de couche de forme sur une épaisseur de 50 cm est de $0,5 \text{ m}^3$.

La masse M_s de sol correspondant à ce volume est donnée par :

$$M_s = \gamma_d * V_s \quad (V.2)$$

Avec $\gamma_d = 1,45 \text{ gr/cm}^3$, la densité sèche du sédiment traité à 5% de ciment,

V_s : le volume de sédiment pour un m^2 de couche de forme.

$$M_s = 1,45 * 10^3 * 0,5 = 725 \text{ kg.}$$

La quantité M_c de ciment nécessaire pour un dosage de 5% est de :

$$M_c = 0,05 * 725 = 36,25 \text{ kg}$$

Le prix actuel du ciment CPJ 42,5 est de 1000 DA le quintal (y compris le transport), les 36,25 kg font 362,5 DA (TTC).

Concernant le cout de la mise en place de la couche de forme à savoir le répandage et le malaxage du ciment, l'arrosage et le compactage, nous n'avons pas de prix exact pour chaque prestation séparément, celui ci est donné globalement. En effet, il n'y a pas de réglementation, chaque entreprise fixe les prix de ses prestations pour avoir une idée sur les prix, nous nous sommes rapprochés de la DTP de Tizi - Ouzou et d'une entreprise de travaux publics ; ces organismes nous ont communiqué un prix global pour le transport, arrosage et compactage, il est de l'ordre de 585 DA (TTC) le m³.

Finalement le prix de revient de 1m² de couche de forme réalisée avec le sédiment de Merdja traité au ciment est de 947,5 DA

Comme nous l'avons mentionné précédemment ce prix est approximatif.

V.4.5 Epaisseur de la couche de forme réalisée avec un matériau non traité

L'épaisseur de la couche de forme à réaliser avec des matériaux non traités est donnée dans les tableaux V.4 ou V.5 selon le règlement utilisé, le GTR du LCPC ou le catalogue Algérien du dimensionnement des chaussées neuves. Pour pouvoir utiliser les deux, nous faisons analogies des nomenclatures utilisées : la classe de portance de la plate forme PFi et l'arase des terrassements ARi correspondent respectivement à la classe de portance sol-support Si et à la classe de portance sol terrassé Sj.

Pour déterminer la classe de portance, aucun essai de laboratoire n'a été réalisé sur le matériau à mettre en place pour la réalisation de la couche de forme, notamment l'essai à la plaque ou de poinçonnement qui permet de déterminer la classe de portance de la plate forme PFi. Alors nous choisissons des matériaux utilisés couramment dans la construction de route moyenne telle que le réseau principal 2 (PR2). Selon les ingénieurs de la direction des travaux publics de la wilaya de Tizi Ouzou, le matériau utilisé est le TVC (tout venant de carrière), sachant que le TVO (tout venant de Oued) est interdit de l'extraire de la quasi-totalité des oueds (la liste des oueds et des tronçons d'oueds frappés par l'interdiction d'extraction de matériaux alluvionnaires est donnée dans l'Arrêté du 24 Moharram 1431 correspondant au 10 janvier 2010 du journal officiel). La couche de forme réalisée avec ce matériau est de classe de portance PF3.

Le tableau V.5 ne donne aucune indication sur le choix de l'épaisseur de la couche de forme en visant une plate forme S1, réalisée sur un sol terrassé S4 (arase AR1). En revanche le tableau V.4 permet de choisir l'épaisseur pour un tel cas de matériau ; elle est de 80 cm correspondant à l'arase AR1 et classe PF3.

Le coût approximatif d'un m³ de TVC, y compris le transport, l'arrosage et le compactage est de 1400 DA hors taxe. Pour la réalisation d'une couche de forme le

prix est calculé pour un mètre carré, donc on divise par l'épaisseur pour avoir le prix au m².

Pour calculer le prix au m² de couche de forme il faut d'abord calculer le volume V_{TVC} de TVC occupé par une surface d'un m² sur une épaisseur de 0,8 m correspondant à 1m³.

$$V_{TVC} = 1/0,8 = 1,25 \text{ m}^3.$$

Donc 1,25 m³ de couche de forme coute 1400 DA (HT), ce prix concerne le prix des matériaux, le transport, le compactage, l'arrosage,...

Le prix unitaire P_{TVC} est de :

$$P_{TVC} = 1400/1,25*1,17 = 1310,4 \text{ DA (TTC)}$$

Il y a une autre méthode pratique et rapide qui permet de calculer les coûts à partir d'abaques données en annexe 5. Pour cette méthode, il faut connaître les prix élémentaires pour déduire le prix total ; elles permettent de faire une comparaison directe entre la solution traitement et la solution emprunt. Un exemple de calcul est donné en annexe 6. Cette méthode est intéressante mais nous ne l'avons pas utilisé, car comme nous l'avons mentionné précédemment, on ignore les prix élémentaires.

V.5 CONCLUSION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté l'ensemble du travail concernant la caractérisation des sédiments de dragage du barrage de Merdja Sidi Abed traité au ciment CPJ 42,5, qui avait abouti à la faisabilité de leur valorisation en couche de forme. Dans ce 5^{ème} chapitre, nous avons dimensionné une couche de forme réalisée avec des sédiments traités et avec des matériaux locaux non traités suivi d'une étude économique.

Le traitement du sédiment avec 5% de ciment CPJ 42,5 améliore considérablement la portance du matériau ce qui conduit à une épaisseur de la couche de 50 cm, plus faible que celle réalisée avec un matériau local non traité qui est de 80 cm. Ces épaisseurs sont tirées des règlements GTR 2000, en fonction de la portance des matériaux considérés. Après avoir fait le calcul des couts des matériaux et des prestations de la mise en place de la couche de forme, la solution traitement s'avère plus économique. Cela est dû, sans doute à la faible quantité de ciment ajoutée (seulement 5%). On peut conclure aussi que le sédiment répond favorablement au traitement. Bien que nous n'ayons pas considéré tous les coûts supplémentaires, notamment le répandage et le malaxage du ciment, qui peuvent engendrer un coût plus élevé que celui calculé, la solution traitement reste avantageuse, compte tenu de son intérêt environnemental.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire entrent dans le cadre général de la valorisation sédiments dragué des barrages en Algérie. Notre contribution est essentiellement centrée sur les possibilités de la réutilisation dans le domaine des travaux publics.

L'envasement des retenues est la conséquence la plus dramatique des phénomènes de l'érosion. La recherche de solutions nécessite la prise en compte du problème dans son ensemble c'est-à-dire l'étude des causes du comblement et du comportement des sédiments à l'extérieur de la retenue ainsi que dans la cuvette

L'envasement des retenues de barrages en Algérie a pris une ampleur importante, limitant ainsi leur capacité (diminution importante du volume d'eau stockée). Le désenvasement est un moyen de lutte contre l'envasement néanmoins les conséquences engendrées sont le dépôt sédimentaire et les problèmes liés à son stockage.

Confrontées à la nécessité de trouver des granulats en grande quantité et à faible coût, les entreprises routières se sont rapidement intéressées aux matériaux de recyclage. De nombreux sous-produits industriels ou déchets ont trouvé des applications dans les matériaux routiers, après une éventuelle opération de traitement (dépollution, concassage, criblage, etc.). Ainsi, il est possible de bénéficier de ces expériences et des méthodologies développées en laboratoire pour l'étude de la valorisation des sédiments dans les matériaux routiers.

Les projets d'infrastructures dans le domaine des travaux publics nécessitent d'importantes quantités de matériaux. En Algérie, les matériaux naturels se font rares et coûteux, en effet, dans le but de protéger les nappes phréatiques, le gouvernement a pris des mesures très strictes pour l'extraction de sable de rivières. Afin de répondre aux demandes importantes de matériaux pour la mise en place des nouvelles infrastructures routières (notamment l'autoroute Est-Ouest), il devient nécessaire de trouver des sources de matériaux de remplacement.

Dans le déroulement d'un projet de construction routière, la phase de caractérisation des matériaux est une étape essentielle qui conditionne de nombreux aspects économiques et techniques. Il est en effet primordial de savoir si les sols que l'on rencontre sur le tracé prévisionnel peuvent être utilisés pour constituer les différentes couches routières, en particulier la couche de forme.

Les laboratoires spécialisés dans l'étude des projets routiers utilisent la méthodologie d'étude d'écrite dans le guide des traitements des sols [GTS 2000], qui permet entre autre d'aboutir à la classification du sol en fonction de sa granulométrie et de son argilosité. Nôtre objectif est de valoriser les sédiments du barrage de Merdja Sidi Abed en couche de forme, nous avons appliqué la même méthodologie.

Nous avons dans un premier temps effectué différents essais de caractérisation physico-chimique qui ont permis de souligner certaines de ses propriétés. Le sédiment, visuellement, a l'aspect d'une argile : à l'état brut, il se présente cohérent et sous forme de poudre lors qu'il est séché et broyé. En effet l'analyse granulométrique montre qu'il contient une forte proportion en particules fines (argiles) dont le diamètre est inférieur à $2\mu\text{m}$ de l'ordre de 39%, ce qui a été confirmé par l'analyse X et par microscope électronique à balayage MEB, il est composé essentiellement de Quartz, de calcite et d'argile, les argiles identifiées correspondent à de la kaolinite et également à de la smectite, celle-ci est de nature gonflante et rend le sol sensible à l'eau.

L'étude géotechnique a également permis de déterminer les paramètres nécessaires à leur mise en œuvre (argilosité, masse volumique sèche et teneur en eau Proctor, portance ...) et a abouti à leur classification en tant que matériau de classe A_3 , la valeur de l'indice portant IPI de 13% nous permet de le classer dans l'état hydrique moyen (sous classe A_{3m}). Les caractéristiques géotechniques du sédiment étudié ne satisfont pas les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme telles que indiquées dans les GTS sans traitements, le traitement préconisé dans ce Guide est le traitement à la chaux et / ou aux liants hydrauliques.

Les sédiments issus du dragage du barrage de merdja sont traités au ciment avec un dosage de 5% afin de les réutilisés en couche de forme

En effet, au dosage testé, ils ont été jugés aptes au traitement, la portance est améliorée après immersion, ce qui garantit la pérennité du matériau traité, et ne présente pas de gonflement préjudiciable ni de perte de cohésion en cas de saturation à l'eau, le délai de mise en circulation est rapide (3 jours). Les performances mécaniques sont améliorées

Ce sédiment traité avec 5% de ciment CEM II présente des résistances en compression largement supérieures à celles recommandées en couche de forme et ceci malgré la présence d'argiles gonflantes. Le traitement et le dosage suggéré est donc particulièrement préconisé et afin d'optimiser le traitement, la quantité d'eau recommandée peut être supérieure à l'optimum Proctor.

Nous avons dimensionné une couche de forme réalisée avec des sédiments traités et avec des matériaux locaux non traités ce qui nous conduit à une étude économique.

Le traitement du sédiment avec seulement 5% de ciment CPJ 42,5 améliore considérablement la portance du matériau ce qui conduit à une épaisseur de la couche de 50 cm plus faible que celle réalisée avec un matériau local non traité qui est de 80 cm. Ces épaisseurs sont tirées des règlements GTR 2000. Après avoir fait le calcul des coûts des matériaux et des prestations de la mise en place de la couche de formes, la solution traitement s'avère plus économique, cela est dû, sans doute à la faible quantité de ciment ajoutée (seulement de 5%), on peut conclure aussi que le sédiment répond favorablement au traitement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR, Recueil de Norme AFNOR / Ciment et chaux, Bâtiments et Travaux Publics, Edition 2003.

Abriak N. E., Zentar R., Tran ngoc T., Amélioration de la performance mécanique des sédiments marins pollués pour une valorisation en technique routière (conférence invitée), Colloque SOMAPRO 2007 Sols et matériaux à problèmes, TUNISIE, 9-11 février 2007, pp 255-262.

Achour R., Valorisation et caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage, Thèse delivre conjointement par Mines Douai, l'Université Lille 1 et l'Université de Sherbrooke, 2013.

Agostini F., « Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 2006.

Aloui-Labioud Z., Etude de l'amélioration des caractéristiques Physico-chimiques de la Sebkhia d'Oran en vue d'arrêter son étendue, Thèse Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2014.

Anger B., They F., Levacher D., Pour une caractérisation minimale des sédiments fins : application d'une démarche pour leur valorisation en matériaux routiers XIIèmes, Journées Nationales Génie Côtier – Génie civil, Cherbourg, 12-14 juin 2012, Editions paralia.

AS 1289.C4.1 Methods of testing soils for engineering purposes - Soil classification tests - Determination of the linear shrinkage of a soil - Standard method., Standards Association of Australia, 1977

Bennett R.H., Lehman L., Hulbert M.H., Harvey G.R., Bush S.A., Forde E.B., Crews P. and Sawyer W.B., Interrelationships of organic carbon and submarine geotechnical properties. Marine Geotechnology, Vol 6, N°1: 61-98, 1985.

Ben allal L., Ammari M., FRAR I., Azmani A., Belmokhtar N., : Caractérisation et valorisation des sédiments de dragage des ports de Tanger et Larache (Maroc). Revue Paralia, Volume 4 pp 5.1-5.13, 2011.

Belas N., Belaribi O., Mebrouki A., Bouhamou N., Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons, INVACO2 : Séminaire International, Innovation & Valorisation en Genie Civil & Matériaux de Construction, Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011.

Benamara L., « Conception d'éléments de toiture pour pays en voie de développement », thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, 1990.

Bourabah M. A., Taibi S., Abou-Bekr N., Comportement physique et mécanique des sédiments de dragage pour leur valorisation dans le domaine routier. Application au barrage de Cheurfas (Algérie), Colloque International Sols Non Saturés et Environnement «UNSATlemcen09 » Tlemcen, 27 et 28 Octobre 2009.

BS 1277:2. Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification tests, British Standard, 1990.

CTTP, Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (Fascicule 1, 2 et 3), organisme national de Control Technique des Travaux Publics, 2001

Colin D., Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière. Thèse de doctorat de l'université de CAEN. Octobre 2003.

Consoli N.C., da Silva Lopes L., Heineck K.S., Key parameters for the strength control of lime stabilized soils, J. of mat. Civ. Eng., ASCE, 21:5, pp. 210-216, 2009.

Daho I., Etude du potentiel local en granulats pour une utilisation optimale, Thèse de l'Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2012.

Dalton Jennifer L., Gardner Kevin H., Seager Thomas P., Weimer Mindy L., Spear Jean C.M., Magee Bryan J. “Properties of Portland cement made from contaminated sediments.” Resources, Conservation and Recycling, Vol. 41, Pages 227-241, 2004.

Dang T.A., “Valorisation des sédiments marins bretons comme matériaux de construction” Thèse de doctorat de l'INSA Rennes, 2011.

Fall M.N., Rangeard D., Jauberthie R., Rendell F., Molez L., «Traitement de vase fluviale en vue d'une utilisation routière», 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries SBEIDCO, Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

Fan Z.P., Zhu W., Zhang C.L., Experimental study on influence of organic matter on solidified dredging, Roc and Soil Mechanics, Vol 26, N°8, 1327-1334, 2005.

Feng T.W., “Fall-cone penetration and water content relationships of clays”. Géotechniques, 50 (2), pp.181-187, 2000.

Guide méthodologique, Valorisation des sédiments de dragage en béton, Version avril 2014

GTR. Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Editions du SETRA-LCPC, Fascicules I & II, 2000, 98.

GTS. Guide du traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques. Editions du SETRA-LCPC, 2000.

Hamer K. et Karius V., Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment. Waste Management, Volume 22, Issue 5, PP 521-530, 2002.

- Holtz R.D., Kovacs W.D.**, An introduction to geotechnical engineering, ed. Newmark, 1981.
- Husein Malkaw A.L., Alawneh A.S., Abu-Safaqah O.T.**, Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil, Applied Clay Science, 1999, 14:257-278.
- Kamali S., Bernard F., Abriak N.E., Degrugilliers P.**, “Marine dredged sediments as new materials resource for road construction.” Waste Management, Vol. 28, Pages 919-928, 2008.
- Labioud Z.**, Utilisation de la vase du barrage de BOUHANIFIA comme fertilisant, Séminaire national sur la micro irrigation-SNMB, Blida, 2000.
- Labioud Z.**, Traitement de la vase du barrage Bouhanifia en vue de sa valorisation Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 03.pp7-12, 2004.
- Lafhaj Z., et al.**, « Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol process and valorization in clay bricks », Construction and Building Materials, 2007, volume 148 pages 606-612.
- Marot F.**, Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques. Orleans, France: BRGM, 1998
- Mekerta B., Semcha A., Benaissa A., Kazi – Aouel - Benslafa F.**, Comportement mécanique des sédiments de dragage pour leur valorisation en technique routière, SBEIDCO 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria), October 12-14, 200.
- Mrabet A.et Labioud Z.**, processus d’envasement des barrages cas du barrage Chorffa, Quatrième colloque internationale sur les ressources en eau dans le bassin méditerranéen 22, 23 et 24 mars 2008
- Nguyen T. B.**, Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée - Comportement mécanique et environnemental, Université Paul Sabatier Toulouse, 2008.
- Oumrani N.**, Influence des sédiments sur la stabilité d’un barrage en exploitation cas du barrage CHEURFAS II, Thèse université de Tlemcen, 2009.
- Paria S., Pak K.Y.**, Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using portland ciment : a literature review, Environ Rev, Vol 14: 217-255, 2006.
- Remini B.**, Une nouvelle approche de lutte contre l’envasement des barrages : la technique des obstacles émergés, Larhyss journal, issn 1112-3680, n° 09, décembre 2011, pp. 43-53.
- Remini B.**, Evolution de la sédimentation dans les retenues de barrage et le soutirage des particules fines, courrier du savoir – n°02, juin 2002, pp. 29-34.

Remini W., Remini B., La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 02, pp. 45-54, Juin 2003.

Remini B., Hallouche W., Préviation de l'envasement dans les barrages du Maghreb, Larhyss journal, issn 1112-3680, n° 04, juin 2005, pp.69-80.

Rogers C.D.F., Boardman D.I., Papadimitriou G., Stress path testing of realistically cured lime and lime/cement stabilized clay, J. of mat. Civ. Eng., ASCE, 18:2, pp. 259-266, 2006.

Saadani S., Comportement des bétons à base de granulats recyclés, thèse de l'université Mentouri Constantine

Samara M., et al., « Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment », Journal of Hazardous Materials, Volume 163 pages 701-710, 2009

Sayah D. M., Présentation du secteur des carrières en Algérie, Journées d'études franco-algériennes des mines et carrières Oran 17 – 18 mai 2008.

Semcha A., Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. Thèse de l'université de Reims Champagne-Ardenne, 2006.

Scordia P.Y., Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers, Thèse l'Ecole Centrale de Lille, 2008.

Shneider G., Le curage des sédiments des cours d'eau. Le courrier de l'environnement de l'INRA, vol. 43, pp. 146-147, 2001.

Sora I.N., Pelosato R., Batto D., Dotelli G., Chemistry and microstructure of cement pastes admixed with organic liquids, J. Eu, Ceram Sol, 22: 1463-1473, 2002.

Tran N.T., Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Université d'Artois, 2009.

Wang D., Solidification et valorisation des sédiments du port de Dunkerque en travaux routiers, Ecole des Mines de Douai et l'Université de Lille 1, 2011.

Zentar R., Abriak N.E., Dubois V., « Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments, Applied Clay Science, Vol 42, Issues 3-4, 2009.

Zentar R., Dubois V., Abriak N. E., "Mechanical behaviour and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments". Resources Conservation & Recycling 52 pp 947 – 954, 2008.

ANNEXES

ANNEXE 2 : Classe des PST

Cas de P.S.T	Schéma	Description	Classe de l'arsée	Commentaires
P.S.T. n°0		Sols A, R ₀ , R ₁ , R ₂ , R ₃ , C ₁ se trouvent dans un état hydrique (H). Contexte Zones touchées, masticageuses ou inondées. PST dont la portance ne peut être quasi nulle au moment de la réalisation de la chaussée ou au cours de la vie de l'ouvrage.	AR0	La solution de franchissement de ces zones doit être recherchée par une opération de terrassement (pouge, substitution) et/ou de drainage (fosse profonde, rattachement de la nappe...) de manière à pouvoir réaliser le nouveau support obtenu au moins en classe AR1.
P.S.T. n°1		Sols Matériaux des classes A, R ₀ , R ₁ , R ₂ , R ₃ , C ₁ , R ₀ , R ₁ , R ₂ et certains matériaux C ₂ , R ₂ et R ₃ dans un état hydrique (H). Contexte PST en matériaux sensibles de mauvaise portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) et sans possibilité d'amélioration à long terme (B).	AR1	Dans ce cas de PST, il convient : - soit de procéder à une amélioration du matériau jusqu'à 0,5 m d'épaisseur par un traitement principalement à la chaux vive et selon une technique remblai. On est amené au cas de PST 2, 3 ou 4 selon le contexte ; - soit d'insérer une couche de forme en matériau granuleux insensible à l'eau de forte épaisseur (en admettant une légère réduction) et l'ombrer par une géotextile anticantonnement à l'interface PST - couche de forme.
P.S.T. n°2		Sols Matériaux des classes A, R ₀ , R ₁ , R ₂ , R ₃ , C ₁ , R ₀ , R ₁ , R ₂ , R ₃ et certains matériaux C ₂ , R ₂ et R ₃ dans un état hydrique (m). Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A). Cette portance peut cependant chuter à long terme sous l'action des infiltrations des eaux pluviales et d'une remontée de la nappe (B).	AR1	Même que les exigences requises à court terme pour la plate-forme support peuvent être éventuellement obtenues au niveau de l'arsée, il est cependant quasiment toujours nécessaire de prévoir l'amélioration d'une couche de forme. Si l'on peut réaliser un traitement de la nappe à une profondeur suffisante, on est ramené au cas de PST 2.
P.S.T. n°3		Sols Mêmes matériaux que dans le cas de PST 2. Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau, de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) mais pouvant chuter à long terme sous l'action de l'infiltration des eaux pluviales (B).	AR1 AR2	En l'absence de mesures de drainage à la base de la chaussée et d'imperméabilisation de l'arsée, même situation que celle décrite dans le cas PST 2. Classement en AR2 si des dispositifs constructifs de drainage à la base de la chaussée et d'imperméabilisation de l'arsée permettent d'évacuer les eaux et d'éviter leur infiltration dans la PST.
P.S.T. n°4		Sols Mêmes matériaux que PST 1 sous réserve que la granulométrie permette leur traitement. Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau (en remblai ou rapportés en fond de déblai hors nappe) améliorés à la chaux ou au ciment hydraulique selon une technique "remblai" et sur une épaisseur de 0,30 à 0,50 m. L'action du traitement est cependant durable.	AR2	La portance de l'arsée peut être localement élevée mais la dispersion majorée par un classement supérieur. La décision de réalisation d'une couche de forme sur cette PST dépend du projet et des valeurs de portance de l'arsée mesurées à court terme (après prise du fait).
P.S.T. n°5		Sols U ₁ et U ₂ et certains matériaux rocheux de la classe R ₄ . Contexte PST en matériaux sableux fins insensibles à l'eau, forte nappe, posant des problèmes de traçabilité.	AR2 AR3	La portance de l'arsée de cette PST dépend beaucoup de la nature des matériaux. Classement en AR2 si le module CV2 de l'arsée est supérieur à 120 MPa. Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme sur cette PST ne s'impose que pour satisfaire les exigences de traçabilité.
P.S.T. n°6		Sols Matériaux des classes D ₁ , R ₄ , R ₅ , R ₆ , R ₇ , R ₈ , R ₉ , R ₁₀ , R ₁₁ ainsi que certains matériaux C ₃ , R ₄ , R ₅ et R ₆ . Contexte PST en matériaux granuleux ou rocheux insensibles à l'eau mais posant des problèmes de réglage étouffé de traçabilité.	AR3 AR4	Classement en AR3 si CV2 > 120 MPa et en AR4 si CV2 > 200 MPa. Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme ne s'impose que pour les exigences à court terme (essentiellement de traçabilité) et peut donc se réduire à une couche de lit réglage.

(A) Comportement de la PST à la mise en œuvre de la couche de forme

(B) Situation pendant la "phase de construction" de la chaussée.

ANNEXE 3 : Condition d'utilisation des matériaux en couche de forme

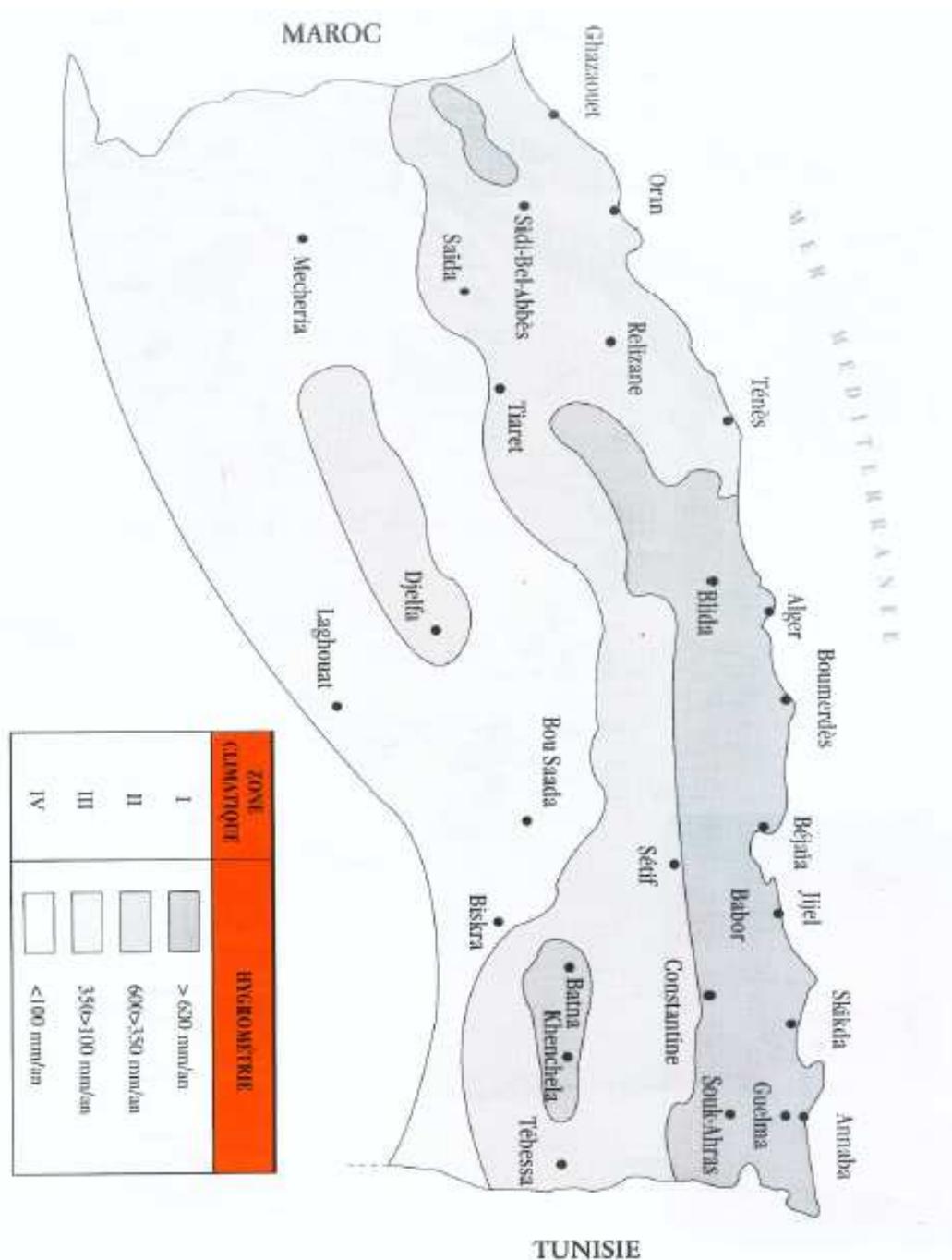
A₃, A₄

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plateforme support de chaussée					
					PST n° 1		PST n° 2		PST n° 3	
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2	AR 2
A _{3h}	La sensibilité à l'eau et la plasticité élevée des sols de cette classe implique un traitement associant chaux et liant hydraulique pour pouvoir les utiliser en couche de forme. Pour les plus plastiques d'entre eux un traitement à la chaux seule peut être envisagé notamment s'il n'y a pas de risques d'apparition de gel peu après la réalisation. Ces sols se traitent exclusivement en place. Lorsqu'ils sont dans un état humide, la chaux est très efficace pour faciliter leur malaxage et ajuster leur état hydrique. Lorsqu'ils sont dans un état sec leur emploi en couche de forme est à déconseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	+ pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)					
		= ou - pas de pluie	Solution 1 : T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté Solution 2 : T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 3 2		e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3	
A _{3m}	La sensibilité à l'eau et la plasticité élevée des sols de cette classe implique un traitement associant chaux et liant hydraulique pour pouvoir les utiliser en couche de forme. Pour les plus plastiques d'entre eux un traitement à la chaux seule peut être envisagé notamment s'il n'y a pas de risques d'apparition de gel peu après la réalisation. Ces sols se traitent exclusivement en place. Lorsqu'ils sont dans un état humide, la chaux est très efficace pour faciliter leur malaxage et ajuster leur état hydrique. Lorsqu'ils sont dans un état sec leur emploi en couche de forme est à déconseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	++ pluie forte	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)					
		+ ou - faible pluie ou faible évaporation	Solution 1 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 3 2		e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3	
		- évaporation importante	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON		(2) e = 0,5 PF2	(2) e = 0,5 PF2	(3)	(3)	
A _{3s}	Sols normalement inutilisables en couche de forme									
A ₄	Sols normalement inutilisables en couche de forme									

(1) Sur cette PST, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique "remblai" et se rapporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas de PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas.

(2) Mise en œuvre en 2 couches

ANNEXE 4 : Carte climatique de l'Algérie [CTTP]



ANNEXE 5 : Méthode graphique pour le calcul économique [GTR].

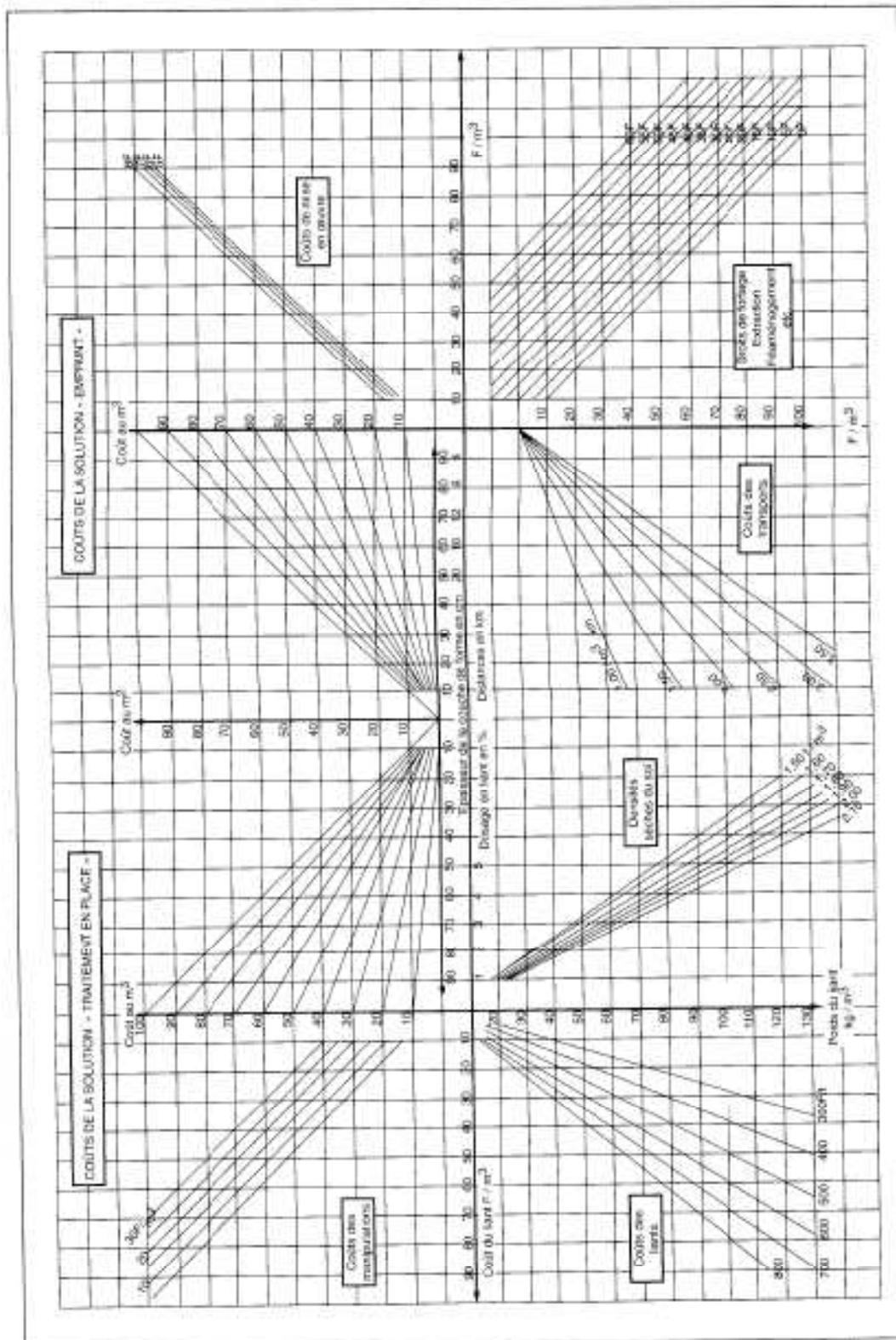


Figure 1. Abaqués permettant une comparaison économique approximative rapide des coûts entre traitement du sol ou recours à des emprunts.

ANNEXE 6 : Un exemple de calcul pour étude économique avec la méthode graphique [GTR]

EXEMPLE D'APPLICATION AUX COUCHES DE FORME

La figure 3 présente la manière d'utiliser l'abaque de la figure 1 :

- Pour un sol dont la masse volumique en place est de $1,8 \text{ t/m}^3$, un traitement à 5 % de ciment à 500 F/t , un coût des manipulations de traitement de 20 F/m^3 , aboutit à un coût du traitement de 65 F/m^3 , soit un coût de 23 F/m^2 pour une couche de forme traitée de 35 cm d'épaisseur (cas d'une PST2-AR1 et d'une PF2 visée, cf. tableaux du GTR). S'il s'agit d'un traitement mixte, on répète l'opération avec le dosage en chaux retenu et on cumule les résultats.
- De la même façon, en considérant la partie droite de l'abaque, un matériau non traité issu d'un emprunt situé à 12 km , avec un coût de transport de $2,50 \text{ F/m}^3 \cdot \text{km}$, un coût d'exploitation de l'emprunt de 25 F/m^3 et un coût de mise en œuvre de 5 F/m^3 revient à 60 F/m^3 , soit également un coût de 23 F/m^2 pour une épaisseur de couche de forme de 40 cm (valeur exigée dans le GTR pour la même combinaison PST2-AR1-PF2).
- Si, les hypothèses de dimensionnement de la structure étaient PST1-AR1 et recherche d'une PF3, et qu'il est acquis que l'effet d'une amélioration à la chaux de l'arase est durable, l'application des abaques précédents et des tableaux et règles de surclassement du GTR montrerait un net avantage économique de la solution traitement (pour les mêmes hypothèses de coûts et de distances de transport).
- etc.

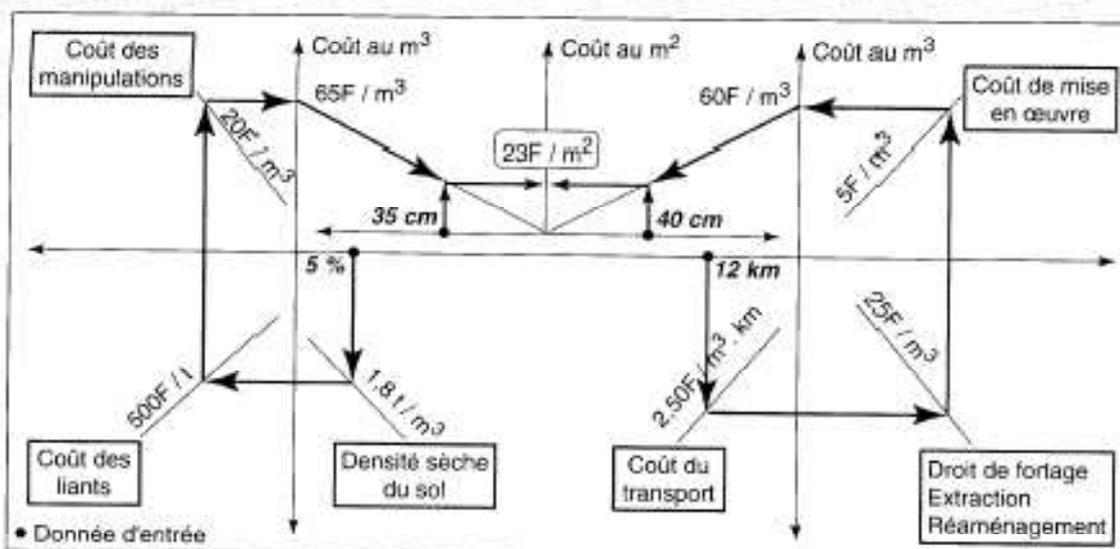


Figure 3. Utilisation des abaques pour une comparaison économique rapide entre traitement et recours aux emprunts dans le cas de la réalisation de couches de forme.