



**UNIVERSITÉ
DE REIMS
CHAMPAGNE-ARDENNE**
UFR Sciences Exactes et Naturelles

THÈSE
Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne
Discipline : Génie Civil

Par
Abdélaziz SEMCHA

Le 11 Décembre 2006

Valorisation des sédiments de dragage :
Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug.

Directeur de thèse
Jean-Pierre TROALEN

Jury :

Yves DELMAS	Professeur URCA, Reims	
Alain GROVEL	Président CFL, Nantes	<i>Rapporteur</i>
Daniel-René LEVACHER	Professeur Université de Caen	<i>Rapporteur</i>
Belkacem MEKERTA	Maître de Conférences ENSET Oran	
Jean-Pierre TROALEN	Professeur, URCA, Reims	
Frédéric VILLIERAS	Directeur de Recherches CNRS, Iem, Nancy	

N° attribué par la bibliothèque

102RE111111

Remerciements

A vous parents et amis, qui m'avez apporté soutien et sympathie tout au long de ces années de travail, sachez qu'il m'est fort agréable de vous exprimer mes vifs remerciements.

Je remercie particulièrement Monsieur le Professeur Jean-Pierre TROALEN d'avoir accepté de diriger ce travail durant de longues années de collaboration, ainsi que pour son aide dans sa synthèse et sa finalisation.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur Daniel-René LEVACHER et Monsieur Alain GROVEL Président exécutif du Centre Français du Littoral, d'avoir accepté de rapporter sur ce mémoire.

Mes vifs remerciements sont adressés aussi à Monsieur le Professeur Yves DELMAS et Monsieur Frédéric VILLIERAS, Directeur de Recherches CNRS, d'avoir accepté d'examiner mon travail, sans oublier mon collègue Monsieur Belkacem MEKERTA, Maître de Conférences à l'ENSET d'Oran.

Je remercie aussi monsieur Abdelbaki BENZIANE Directeur de mon établissement d'origine l'ENSET d'Oran, pour toutes les facilités qu'il m'a accordées.

Mes vifs remerciements sont adressés aussi à monsieur BOUZIRI et ses collaborateurs de l'Agence Nationale des Barrages chargés de la gestion du barrage de Fergoug pour leur disponibilité.

Mes sincères pensées vont à tous mes amis de l'Université de Reims Champagne Ardenne qui ont fait que mon séjour parmi eux fût très agréable.

Que tous les collègues du Groupe Mécanique Matériaux et Structures (GMMS) E.A. n°2617 de l'UFR Sciences de l'URCA en particulier le Directeur GUO Y. trouvent ici l'expression de ma sympathie, sans oublier les thésards et les petits plaisirs partagés.

Enfin je tiens à exprimer mes plus tendres sentiments à ma femme pour son soutien et sa patience durant mes longues absences.

Résumé

Ce travail est une contribution à l'étude globale des conséquences de l'envasement des barrages en Algérie. Dans une optique de développement durable, l'étude présentée met en évidence les difficultés de la lutte contre l'envasement des retenues et propose des voies de valorisation des vases issues du dragage, dans les domaines du BTP.

Les ouvrages de stockage de l'eau pour les besoins des populations ont une importance capitale pour les régions dont l'économie dépend principalement de l'agriculture et de l'élevage et dont les conditions climatiques ne permettent pas l'exploitation des terres sans un système d'irrigation adéquat. Notre recherche vise principalement la récupération des volumes utiles de stockage des barrages perdus par envasement. Le barrage de Fergoug situé au nord-ouest de l'Algérie et qui, dans un passé récent a permis la floraison de la ville de Perrégaux, a été et reste le théâtre des caprices de l'érosion.

La première expérience de dragage par drague suceuse en Algérie a été faite sur ce barrage. De 1986 à 1989, 10 (dix) millions de m³ de vase ont été extraits. Déposée en aval dans des zones grossièrement aménagées, la vase est entraînée de nouveau par érosion jusqu'à l'embouchure de l'oued à la Macta. Les opérations de dragage étant nécessaires, il en est de même de la prise en charge des retombées du rejet et stockage des matières draguées.

L'étude de la valorisation des sédiments issus des dragages offre des voies pouvant être exploitées. 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. Nous présentons dans cette étude le mode d'activation, ayant abouti aux performances mesurées expérimentalement. D'autre part, les cimenteries algériennes utilisent, pour la production d'un ciment composé de type CEM II de classe élevée, une pouzzolane naturelle. Notre étude nous a amené à la conception d'une pouzzolane artificielle par traitement thermique 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.

Mots clés :

Erosion, envasement, sédimentation, dragage, stockage, entraînement des sédiments, valorisation, traitement thermique, pouzzolanité, ciment, brique.

Abstract

This work is a contribution to the general study of the silting consequences of dams in Algeria. With an optic of durable development we begin with the presentation of the sedimentation phenomena and the studied site. After that we present the study of sediment properties before our proposals for their valorisation in BTP.

The constructions of water storage are very importants for the population needs, in the regions depending on an agricole and a breeding economy and whose climatic conditions make impossible to exploite grounds without using an adequate system of irrigation. Our research concerns the possibilities of recovering the useful volumes of dams storage lost by silting. The dam of Fergoug located at the north-west of Algeria was in a recent past, the source of wealth for the town of Perregaux, but it was and remains the theatre of the erosion consequences.

The first experiment of dredging with a sucker dredger in Algerie was made on this dam. From 1986 to 1989, 10 million m³ of mud were extracted and deposited downstream in coarsely arranged zones. The mud is involved again by erosion to oued la Macta. Since the dredging operations were necessary, it was also necessary for the assumption of responsibility of the repercussions for the rejection and storage of the dredged matters.

The study of the valorization of the dredging sediments offers many ways being able to be exploited. The mud in a solid state, taken in the zone of rejection on Oued El Hammam in the area of Macta, stabilized with cement under particular conditions of temperature, moisture and pressure, gave compressive strengths comparable with those of sandlime brick. We present in this study the mode of activation, having led to the performances measured in experiments. In addition, the Algerian cement factories use, for the production of cement made up of type CEM II of raised class, a natural pozzolana. Our study brought us to the design of an artificial pozzolana by heat treatment of the argillaceous fraction of the muds resulting from the dam of Fergoug. Micro-tubes-test of hardened paste manufactured and tested in uniaxial pressing in order to consider of their pozzolanic reactivity. These results are compared with those obtained with the natural pozzolana of Beni-Saf, under the same experimental conditions.

Key words:

Silting; erosion; dam; sedimentation; dredging; storage; rejection; heat treatment; pozzolana; cement; brick.

Table des matières

TITRE	N° de page
Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.	iii
Table des matières.	iv
Liste des figures.	1
Liste des tableaux.	3
Liste des photographies.	4
Liste des annexes.	5
Liste des principaux symboles et sigles	6
Introduction générale.	8
Première Partie: Causes et Origines de l'envasement.	13
Causes et origine de l'envasement.....	14
Chapitre I: Mécanismes des apports solides et liquides	15
I.1- Estimation des apports liquides et solides.....	15
I.1.1- Les apports liquides	16
I.1.2- Les apports solides.....	17
I.2- Les modèles d'estimation de l'envasement.....	17
I.3- les propriétés rhéologiques des vases.....	20
I.3.1- Les modèles Rhéologiques	21
I.3.2- Entraînement des vases.....	23
I.3.3- Les courants de turbidité.....	24
I.4- Conclusion.....	26
Chapitre II: Moyens de lutte contre l'envasement.....	27
II.1- Particularité de l'Algérie.....	27
II.2- Les matériaux concernés par les dragages d'entretien.....	28
II.3- Les techniques de dévasement.....	31
II.3.1- Etat de la vase avant dragage.....	31
II.3.2- Le soutirage.....	32
II.3.3- Le dragage.....	32
II.4- Stockage des sédiments.....	33
II.4.1- Les paramètres caractérisant une vase.....	35
II.4.2- Relations de passage entre paramètres.....	36
II.5- Conclusion.....	37
Conclusion de la première partie.....	38
Deuxième Partie: Le site du barrage de Fergoug	39
Le site du barrage de Fergoug	40
Chapitre III: Le barrage de Fergoug.....	42
III.1- Le Barrage et la ville de Perrégaux.....	42

III.2- Le Bassin versant de Fergoug.....	44
III.3- Historique du barrage.....	45
III.4 - Géologie du site	49
III.5 – Conclusion.....	51
Chapitre IV: Le devenir des sédiments issus des opérations de dévasement.....	52
IV.1- Entraînement des sédiments en aval	53
IV.2- Les conséquences environnementales.....	53
IV.3- Conclusion	55
Chapitre V: Propriétés des sédiments de la retenue.....	56
V.1- Propriétés géomécaniques des sédiments en place	56
V.1.1- Etude de sondages	56
V.1.2- Identification des sédiments	57
V.1.2.1- Identification physique	57
V.1.2.2- Paramètres mécaniques : Cohésion et indice de liquidité	61
V.1.3.- Description de l'état des matériaux	63
V.1.4- Conclusion	75
V.2- Répartition spatiale des propriétés des sédiments dans la retenue.....	66
V.2.1- Méthodes d'interpolation en plan	66
V.2.2- Position des sondages	67
V.2.3- Courbes d'isovaleurs.....	68
V.2.2.1- Les teneurs en eau	69
V.2.2.2- La cohésion non drainée	73
V.2.4- Conclusion	76
V.3- Propriétés des sédiments issus du dragage	76
V.3.1- Propriétés physiques	76
V.3.2- Essais de Perméabilité	79
V.3.3- Propriétés chimiques et minéralogiques	79
V.3.3.1- Teneur en carbonates.....	80
V.3.3.2- Analyses chimiques globales, oligoéléments inclus	80
V.3.3.3- Analyses minéralogiques	82
V.3.3.4- Les techniques expérimentales utilisées	82
a) La Diffraction des Rayons X	83
b) L'Analyse Thermique Différentielle.....	85
c) L'Analyse Thermo Gravimétrique.....	86
V.3.4- Conclusion	88
Conclusion de la deuxième partie.....	89
Troisième Partie: Valorisation des sédiments	90
Valorisation des sédiments.....	91
Chapitre VI: Application des principes du développement durable (rappel).....	91
VI.1- les objectifs du développement durable	91
VI.2- Les difficultés des prises de décisions.....	92
VI.3- Les prises de décision	92
VI.2- Conclusion	93
Chapitre VII: Valorisation des sédiments	94

VII.1- Approches antérieures d'utilisation des vases du Fergoug	94
VII.2- Industrie du ciment et le BTP	96
VII.2.1-Rappels	97
VII.2.1.1- Compositions minéralogiques des ciments	97
VII.2.1.2- Le clinker portland	99
VII.2.1.3- Hydratation du ciment et formation des hydrates (CSH).....	101
VII.2.1.4- Effets de la portlandite.....	104
VII.2.1.5- Les liants pouzzolaniques	105
VII.2.2- Elaboration d'une pouzzolane de synthèse	
à base de vase calcinée.....	109
VII.2.2.1- Préparation et cuisson de la vase	110
VII.2.2.2- Les mélanges étudiés.....	110
VII.2.2.3- Conception des éprouvettes.....	110
VII.2.2.4-Essais mécaniques.....	112
VII.2.2.5- Caractérisation du ciment composé à	
30% de vase calcinée.....	113
VII.2.2.6- Conclusion.....	115
VII.2.3- Etude comparative de la pouzzolane artificielle à base de	
vase calcinée avec la pouzzolane naturelle de Béni Saf.....	116
VII.2.3.1- La pouzzolane naturelle de Béni Saf	116
VII.2.3.2- Essais mécaniques sur les deux pouzzolanes	117
VII.2.3.2.1- Etude sur pâtes durcies.....	117
VII.2.3.2.2- Etude sur mortiers	119
VII.2.3.3-Analyse du comportement des deux pouzzolanes.....	121
VII.2.3.3.1- Essais sur les pâtes durcies	121
VII.2.3.3.2- Essais sur les mortiers	122
VII.2.3.4- Conclusion	122
VII.2.4- Valorisation en brique autoclavée.....	123
VII.2.4.1- Traitement préalable	123
VII.2.4.1.1- Composite à base de quartz.....	123
VII.2.4.1.2- Composite à base de vase	124
VII.2.4.2- Brique autoclavée à base de vase	124
VII.2.4.2.1- Expérimentation.....	124
VII.2.4.2.2- Résultats et perspectives	125
VII.2.5-Analyse du procédé de traitement en autoclave	
de la brique à base de vase	126
VII.2.5.1-Conditions de traitement hydrothermal.....	126
VII.2.5.1.1- Première étape: hydratation du ciment	127
VII.2.5.1.2-Deuxième étape: Influence du milieu hydrothermal.....	128
VII.2.5.1.3- Interprétation des résultats.....	128
VII.2.5.2- Les réactions probables dans l'autoclave	128
VII.2.5.3- Résultats de l'analyse thermique différentielle	129
VII.2.5.4- Conclusion	134
Conclusion de la troisième partie	135
Conclusion générale	136
Références bibliographies	138
Annexes	141

LISTE DES FIGURES

N° et titre de la figure	N° de page
Figure N°1, a : Evolution du taux d'érosion spécifique et de la pluie annuelle en fonction du temps.....	18
Figure N°1, b : Corrélation « Taux d'érosion-débit liquide annuel ».....	18
Figure N°2, a : Evolution du taux d'érosion spécifique et du débit maximum en fonction du temps.....	19
Figure N°2, b : Corrélation « Taux d'érosion spécifique-débit maximum annuel ».....	19
Figure N°3 : Evolution de la concentration dans la temps.....	21
Figure N°4, a : Modèles rhéologiques (fluides plastiques).....	22
Figure N°4, b : Modèles rhéologiques (fluides pseudo plastiques et plastique de Casson).....	23
Figure N°6 : Comportement des sédiments fins.....	35
Figure N°7 : Ecoulement d'un courant de densité dans une retenue.....	25
Figure N°8 : Granulométrie des vases estuariennes et portuaires : Répartition triangulaire	30
Figure N°9 : Définition des paramètres d'arrangement.....	35
Figure N°10 : Situation géographique de Perrégaux et Fergoug.....	40
Figure N°11 : Le barrage du Fergoug, ses ouvrages annexes et ses affluents.....	44
Figure N°12 : Situation climatique de l'Algérie.....	52
Figure N°13 : Distribution de l'érosion pour différents bassins versants.....	52
Figure N°14 : Cours d'eau en aval de Fergoug s'écoulant vers l'Habra.....	54
Figure N°15 : Implantation des 12 sondages.....	57
Figure n°16 : Synthèse des analyses dimensionnelles.....	58
Figure N°17 : Diagramme de Plasticité de Casagrande.....	58
Figure N°18 : Variation de la teneur en eau naturelle w des sondages en fonction de la profondeur Z	59
Figure N°19 : Variation du poids volumique sec en fonction de la profondeur.....	60
Figure N°20 : Variation du poids humide en fonction de la profondeur.....	61
Figure N°21 : Variation de la cohésion intacte au pic (C_u) en fonction de la profondeur Z	62
Figure N°22 : Indice de liquidité I_L en fonction de la profondeur Z	63
Figure N°23 : Valeur de la cohésion au pic en fonction de l'indice de liquidité.....	64
Figure n°24 : Indice de plasticité I_p en fonction de l'angle de frottement interne.....	65
Figure N°25 : Position des sondages.	68
Figure N°26 : Courbes d'isovaleurs, teneurs en eau. Tranche 0-6m.	69
Figure N°27 : Courbes d'isovaleurs, teneurs en eau. Tranche 6-12m.	70
Figure N°28 : Courbes d'isovaleurs, teneurs en eau. Tranche 12-18m.	71
Figure N°29 : Courbes d'isovaleurs, teneurs en eau. Tranche 18 m-fond.	72
Figure N°30 : Courbes d'isovaleurs, cohésion C_u . Tranche 6-12m.	73
Figure N°31 : Courbes d'isovaleurs, cohésion C_u . Tranche 12-18m.	74
Figure N°32 : Courbes d'isovaleurs, cohésion C_u . Tranche 18 m-fond.	75
Figure N°33 : Granulométrie de la vase de Fergoug.....	77
Figure N°34 : Granulométrie de la vase de la Macta.....	77
Figure N°35 : Classification de la vase de Fergoug et celle de la Macta selon Casagrande....	78
Figure N°36 : Schéma de la diffraction des rayons X.....	83
Figure N°37: Courbe DRX de la vase de Fergoug.....	84
Figure N°38 : Courbe DRX de la vase de la Macta.....	84

Figure N°39 : Courbe ATD de la vase de Fergoug.....	85
Figure N°40 : Courbe ATD de la vase de la Macta.....	86
Figure N°41 : Courbe ATG de la vase de Fergoug.....	87
Figure N°42 : Courbe ATG de la vase de la Macta.....	87
Figure N°43 : Diagramme ternaire Si-Ca-Al des constituants du ciment.....	98
Figure N°44 : Procédé de formation du clinker en four rotatif.....	100
Figure N°45 : Formation des hydrates par hydratation du clinker.....	102
Figure N°46 : ATG & ATD d'un C3S hydraté.....	104
Figure N°47 : Origine des pouzzolanes.....	105
Figure N°48 : Courbe ATD du kaolin.....	106
Figure N°49 : Courbe ATD de la vase de Fergoug.....	107
Figure N°50 : Résistance mécanique et réactivité des pouzzolanes.....	107
Figure N°51 : Résistance mécanique des pouzzolanes comparées aux ciments.....	108
Figure N°52, a : Optimisation de l'eau de gâchage (mélange I).....	111
Figure N°52, b : Optimisation de l'eau de gâchage (les 4 mélanges).....	111
Figure N°53 : Résistances mécaniques des 4 mélanges.....	112
Figure N°54 : Résistance mécanique du ciment composé comparée à celle du témoin.....	113
Figure N°55 : Essai de capillarité sur pâtes et mortiers.....	114
Figure N°56 : Essais de perméabilité sur pâtes et mortiers.....	115
Figure N°57 : Résistances en compression de mortiers en fonction du % de pouzzolane substituée.....	117
Figure N°58 : Résistance en compression des pouzzolanes activées à la chaux.....	119
Figure N°59 : Résistance en compression des ciments pouzzolaniques.....	119
Figure N°60 : Résistances à la traction des mortiers.....	120
Figure N°61 : Résistances à la compression des mortiers.....	121
Figure N°62 : Résistance à la compression e fonction du pourcentage de ciment.....	126
Figure N°63 : Courbes ATD sur le mélange 80% de vase et 20% de ciment.....	130
Figure N°64 : Courbes ATD sur le mélange 70% de vase et 30% de ciment.....	131
Figure N°65 : Courbes ATD sur le mélange 60% de vase et 40% de ciment.....	132
Figure N°66 : Courbes ATD sur le mélange 50% de vase et 50% de ciment.....	133

LISTE DES TABLEAUX

N° et titre du tableau

N° de page

Tableau N°1 : Modèles « Pluie-Débits »	17
Tableau N°2 : Définitions granulométriques des sédiments suivant différents auteurs.....	38
Tableau N°3 : Classification des sols en vue des dragages.....	29
Tableau N°4 : Définition des faciès d'après Allen.....	29
Tableau N°5 : Caractéristiques géographiques de Fergoug.....	40
Tableau N°6 : Fréquences des pluies du bassin versant de Fergoug	45
Tableau N°7 : Evolution de la crue exceptionnelle de 1927.....	45
Tableau N°8 : Coordonnées des sondages.....	67
Tableau N° 9 : Propriétés physiques et géotechniques des échantillons étudiés.....	78
Tableau N°10: Coefficients de perméabilité des vases.....	79
Tableau N°11 : Teneur en carbonates des trois échantillons.....	80
Tableau N°12 : Eléments principaux (%des oxydes). Vase de Fergoug.....	80
Tableau N°13 : Teneur en oligoéléments (ppm). Vase de Fergoug	81
Tableau N°14 : Analyse chimique par L.T.P.O.	81
Tableau N°15 : Composition minéralogique des trois échantillons étudié	82
Tableau N°16 : Composition des mélanges ciment- vase calcinée	110
Tableau N°17 : Temps de prise du mélange à 30% de vase calcinée.....	113
Tableau N° 18 : Composition des pâtes de pouzzolane activée à la chaux	118
Tableau N° 19 : Composition des pâtes de ciment pouzzolanique	118
Tableau N°20 : Eau de gâchage des mortiers	120
Tableau N°21 : Temps de prise des mortiers	120
Tableau N°22 : Composition des briques étudiées.....	125

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

N° et titre de la photo	N° de page
Photo N°1 : Ecoulement de la vase à sa sortie d'une vidange de fond (Barrage de Fergoug).....	34
Photo N°2 : Zone de stockage des sédiments. Rejet en cours par drague suceuse ... (Barrage de Fergoug).....	34
Photo N°3 : Barrage de Fergoug en 1958.....	42
Photo N°4 : Barrage de Fergoug en 1986.....	42
Photo N°5 : Barrage de Fergoug en 2004 (état envasé).....	42
Photo N°6 : Barrage de Fergoug en 2004 (état envasé)	42
Photo N°7 : Le mur du barrage avant rupture (1927)	48
Photo N°8 : Le barrage après rupture (1927)	48
Photo N°9 : Vue de la digue en aval	49
Photo N°10 : La cuvette envasée	49
Photo N°11 : La cuvette envasée	49
Photo N°12 : La cuvette envasée (sur oued El Hammam)	49
Photo N°13 : Rejet de la vase draguée.....	53
Photo N14 : Entraînement de la vase déposée en aval.....	53
Photo N°15 : Dépôt de la vase sur les berges des cours d'eau.....	55
Photo N°16 : L'Oued et la plaine de la Macta.....	55
Photo N°17 : Etendue des zones touchées par le dépôt des sédiments.....	55
Photo N°18 : Clinker Portland vu au microscope optique.....	100
Photo N°19 : Clinker Portland vu au M.E.B.	100
Photo N°20 : Hydratation du clinker (formation des hydrates).....	102
Photo N°21 : Autoclave utilisé.....	125
Photo N°22 : Appareillage d'ATD utilisé.....	129

LISTE DES ANNEXES

N° et titre de l'annexe	N° de page
Annexe N°1 : Etude préliminaire d'optimisation des pourcentages des ajouts dans la composition des ciments pouzzolaniques.	142
Annexe N°2 : Etat d'envasement de certains barrages Algériens (en 2004 selon l'ANB).	146
Annexe N°3 : Photographies du barrage de Fergoug envasé (photos A. Semcha).	147
Annexe N°4 : Perrégaux le pays des oranges (Cercle Algérieniste Franche-Comté/Bourgogne).....	153
Annexe N°5 : Répartitions spatiales : Indice de Liquidité.	156
Annexe N°6 : Répartitions spatiales : Angle de frottement interne.	160
Annexe N°7 : Répartitions spatiales : Densité sèche.	163
Annexe N°8 : Liste de barrages Algériens répertoriés en 2006.	166

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES ET SYGLES

URCA : Université de Reims Champagne Ardenne

UFR : Université de Formation et de Recherche

ENSET : Ecole Normale d'Enseignement Technique

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

CFL : Centre Français du Littoral

CNRS : Centre National de Recherche Scientifique

CEM : Ciment conforme à la norme EN 197-1 (ciment minéral selon la norme européenne)

CPA : Ciment Portland Artificiel

HDR : Habilitation à Diriger des Recherches

ANB : Agence Nationale des Barrages (Algérie)

E_s : Erosion spécifique

Q_{max} : Débit liquide maximum

T_s : Taux de la matière sèche

AIPCN : Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation

LI : Lahmeyer International (laboratoire allemand)

MTPC : Ministère des Travaux Publics et de la Construction

LCH : Laboratoire Central d'Hydraulique (France)

LTPO : Laboratoire des Travaux Publics d'Oran

ENRB : Entreprise Nationale de Réalisation des Barrages

DRX : Diffraction des Rayons X

ATD : Analyse thermique Différentielle

ATG : Analyse Thermo – Gravimétrique

Si : Silice

Al : Alumine

Ca : Calcium

C : CaO (monoxyde de calcium)

S : SiO₂ (dioxyde de silicium)

A : Al₂O₃ (oxyde d'aluminium)

F : Fe_2O_3 : (oxyde de fer)

C₃S : Alite (silicate de calcium)

C₂S : Bélite (silicate de calcium)

C₃A : Célite (aluminate de calcium)

C₄AF : Aluminate tétracalcique (alumino-ferrite de calcium)

Ca(OH₂) : Portlandite

C-S-H : Silicate de Calcium Hydraté

INTRODUCTION GENERALE

L'application des principes du développement durable dans les propositions de valorisation de la vase issue du dragage est un moyen d'aboutissement aux fins de ne plus considérer ces matières comme déchets. Les objectifs recherchés sont ceux mêmes d'un développement durable.

Le développement durable : est « un développement qui répond aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ».

Le développement durable est « le fait d'améliorer les conditions d'existence des communautés humaines tout en restant dans les limites de la capacité de charge des écosystèmes ».

Les trois principes du développement durable :

1- Le rythme d'utilisation des ressources naturelles renouvelables ne doit pas excéder celui de leur régénération.

2- Le rythme d'épuisement des ressources non renouvelables ne dépasse pas le rythme de développement des substituts renouvelables.

3- La quantité de pollution et de déchets ne doit pas dépasser celle que peut absorber l'environnement.

Les objectifs du développement durable :

1- Préserver l'environnement par des mesures de protection de la qualité de l'environnement, par la restauration, l'aménagement et le maintien des habitats essentiels aux espèces ainsi que par une gestion durable de l'utilisation des populations animales et végétales exploitées.

2- Améliorer l'éthique sociale, c'est-à-dire permettre la satisfaction des besoins essentiels des communautés humaines présentes et futures et l'amélioration de la qualité de vie, et ce, notamment, par l'accès au logement de qualité.

3- Améliorer l'efficacité économique, c'est-à-dire favoriser une gestion optimale des ressources humaines, naturelles et financières, afin de permettre la satisfaction des besoins des communautés humaines, et ce, notamment, par la responsabilisation des entreprises et des consommateurs.

Problématique des activités de dragage.

La problématique de la valorisation des sédiments issus du dragage a été initialisée en France par JP. Troalen (1998), à partir de 1992 notamment sur les questions de dépollution, traitement et séparation de phases, en vue d'amener les sédiments dragués à un niveau de densification qui permet leur manutention en vue d'un transport et d'un stockage provisoire. Cette étape étant essentielle avant d'entamer tout traitement des sédiments en tant que matière première.

Dans son ouvrage, R. Boutin (2000) définit les dragages comme étant « des terrassements effectués sous l'eau avec des engins flottants au moyen de procédés mécaniques ou par aspiration ». En fait quel que soit le procédé utilisé cette

définition correspond assez bien à l'idée que l'on se fait aujourd'hui du dragage dans notre environnement de plus en plus industrialisé.

Le dragage peut également être défini de façon plus générale comme l'ensemble des actions caractérisées par un prélèvement de matières par excavation sous l'eau et par un déversement de ces produits dans la veine d'eau ou sur le rivage. Cette définition recouvre des activités très diverses telle que la réalisation de canaux d'irrigation pour l'agriculture, l'exploitation minière, les travaux offshore ou la réalisation et l'entretien d'installations pour la navigation.

Les techniques de dragage remontent aux ères très anciennes (néolithique). Plusieurs références historiques relatent la réalisation de travaux hydrauliques durant les quatre premiers millénaires avant Jésus-Christ en Mésopotamie et en Egypte.

Pourquoi draguer ? A la question pourquoi draguer, il est proposé dans ce même ouvrage une réponse très complète en expliquant que le dragage peut avoir les objectifs suivants :

- entretenir et approfondir les voies navigables, les ports et leurs accès existants tant à l'intérieur qu'au large ;
- aménager et créer des ports, des darses, des canaux, des chenaux, des bassins de plaisance et autres voies navigables ;
- améliorer ou maintenir la capacité des débits des cours d'eau en augmentant les profondeurs naturelles ou en rectifiant les cours, en vue d'améliorer la qualité de l'eau et prévenir les inondations ;
- procurer les déblais pour exhausser les niveaux des terres basses et remblayer des terrains marécageux ou très humides et créer ainsi de nouveaux terrains à usages divers ;
- creuser des tranchées dans des zones où la qualité des sols est mauvaise et procurer des déblais pour la construction de routes, barrages, chaussées et fondations en vue de travaux de génie civil;
- étendre des tranchées hors d'eau en empiétant sur la mer et construire des îles artificielles servant à l'installation de terminaux « offshore » et à diverses autres fins ;
- construire des ouvrages de contrôle ou de protection de voies navigables et des régions côtières, telles que les digues, levées, épis, jetées et brise-lames ;
- procurer des remblais pour la protection et l'engraissement des plages et pour la construction de dunes protectrices ;
- procéder à des travaux d'excavation sous l'eau, afin de réaliser des fondations d'ouvrages et des tranchées pour conduites ;
- extraire les sédiments immergés tels que le sable, gravier, coquillages et argile, à des fins de construction et, en outre, les minerais, les métaux précieux et les agents fertilisants etc. ;
- créer des fermes sous-marines pour la production de produits alimentaires riches en protéines ;
- nettoyer les fonds pollués.

Le dragage dans le monde.

Selon F.Rey (1992), ce sont les activités de commerce maritime ou de plaisance qui nécessitent de nombreux travaux de dragage pour l'entretien et l'opérationnalité des chenaux et des ports existants, ainsi que pour la construction de nouvelles infrastructures maritimes et fluviales (ports, marinas, quais...).

Cette activité de dragage génère des volumes considérables de matériaux ; à titre d'exemple nous citons : environ 35 millions de m³ par an en France (1994), 45

millions de m³ par an aux Pays Bas(1997) et 250 millions de m³ par an pour les Etats Unis (1997). Le problème du devenir de ces produits, auquel il faut ajouter nécessairement les coûts liés au transport, est posé de façon inévitable.

Les méthodes actuelles de prise en charge de ces problèmes tendent seulement à gérer le caractère opérationnel des installations sans se préoccuper du devenir réel des vases et des boues de dragage. Actuellement deux solutions sont adoptées : le rejet en mer et la mise en dépôt à terre. Pendant longtemps, ce sont les considérations techniques et économiques qui l'ont emporté lors des prises de décisions. Aujourd'hui, une meilleure prise de conscience de la teneur anthropique en substances toxiques contenues dans un grand nombre de ces matériaux, et leurs relations avec des considérations humaines et environnementales, intéresse beaucoup de chercheurs.

Ainsi, au voisinage des zones fortement peuplées, l'expansion des activités industrielles et des municipalités, a entraîné une pollution croissante des sédiments des cours d'eau. Les ports, canaux et cours d'eau sont des réceptacles naturels de tous ces effluents contenant de nombreux résidus qui par la suite se déposent et se fixent dans les sédiments.

En Europe, les études sur la problématique des « sédiments toxiques » sont relativement récentes. Le comportement des matériaux dans le temps, et notamment les phénomènes de transfert de polluants sont encore mal connus. Les notions de pollution des eaux et de toxicité des sédiments sont difficiles à définir. Cela implique un vide réglementaire sur le sujet ainsi que l'absence de normes de référence. La seule « convention de Londres de 1972 » en vigueur qui interdit le rejet des substances dangereuses ou toxiques, ne lève pas l'équivoque sur la toxicité des produits de dragage puisque les seuils de pollution par contamination ne sont pas abordés.

En ce qui concerne le confinement en dépôt terrestre des matériaux de dragage, celui-ci coûte beaucoup plus cher que le rejet en eaux libres. De plus les aires aménagées pour cet usage arrivent à saturation, et d'autres aires sont à prévoir. Or les textes réglementaires donnent la priorité à la valorisation ou au recyclage. Le concept de décharge est complètement revu. En effet les décharges ne doivent recevoir que les déchets ultimes préalablement traités en vue de leur stabilisation. Toutefois, sauf situations imprévues exceptionnelles, les vases de dragage ne rentrent pas dans cette catégorie de déchets.

D'une façon générale, l'évolution de la législation et la prise de conscience collective des nuisances occasionnées par les solutions traditionnelles ainsi que la limite des mises en confinement impose aujourd'hui une recherche sur le devenir de ces produits.

Parmi les procédés cités par F. Rey, le mode de gestion que nous retiendrons en fonction de notre étude est la stabilisation /solidification en vue d'un stockage, avant l'utilisation du matériau issu du dragage en tant que matière première dans un procédé de valorisation.

Le traitement des vases ou des boues portuaires par des procédés de solidification/stabilisation conduit à obtenir un matériau à performances contrôlées, et pourra être utilisé dans certains domaines du génie civil. Dans la mesure où les contaminants sont immobilisés quasi définitivement, ou libérés très lentement, le matériau ne serait pas nuisible à son environnement récepteur. Cette solution permettrait d'économiser certaines ressources naturelles, en se substituant à de matériaux plus nobles.

La réglementation relative aux sédiments de dragage en France.

Dans son mémoire de HDR soutenu en juillet 2006 Boutouil M. écrit :

Certaines activités industrielles à proximité ou sur le bassin versant des sites de sédimentation, peuvent produire des contaminants qui risquent de s'accumuler dans les sédiments qui, par leurs caractéristiques géochimiques et géotechniques, constituent un milieu naturel récepteur. Les sédiments contenant des polluants sous forme de substances chimiques (métaux lourds, PCB, HAP) et devant être extraits, posent deux questions essentielles quant à leur gestion : Quels sont les seuils des teneurs en polluants à partir desquels un matériau est considéré comme « contaminé » ? Ou bien à partir de quel seuil la teneur d'un polluant est dangereuse pour l'environnement réceptif ?

Les réponses à ces questions concernant la fixation des seuils des teneurs en polluants sont confrontées à plusieurs difficultés et en particulier la caractérisation de la toxicité des sédiments et donc à l'évaluation du ou des risques vis-à-vis de la santé de l'homme et de l'ensemble de l'écosystème. Ces difficultés sont matérialisées par la sensibilité des méthodes d'analyse, la variété des formes chimiques des contaminants, la variation des niveaux naturels des contaminants dans les sédiments.

Globalement, l'évaluation de la qualité des sédiments de dragage par rapport à un référentiel commun, demeure une opération délicate puisqu'il n'existe pas de protocole standard français pour évaluer le degré de pollution. Comme en témoigne, outre les difficultés citées ci-dessus, à la fois les multiples références (la loi sur l'eau, l'arrêté du 14 juin 2000), et la question de « rattachement » des sédiments de dragage à une catégorie de déchets (boues de station d'épuration, sols contaminés,...)

En effet, si l'on considère les sédiments de dragage extraits d'un milieu aquatique, ce sont les rubriques 17.05.00 (terres et boues de dragage) et 17.05.02 (boues de dragage) de la réglementation sur les déchets qui s'appliquent (Bedell *et al.*, 2003). Le devenir des matériaux de dragage et de leurs eaux de lixiviation peut être également concerné par le décret « nomenclature » du 29 mars 1993 de la loi sur l'eau (Bedell *et al.*, 2003).

Considérant les sédiments d'origine marine ou estuarienne, c'est l'arrêté du 14 juin 2000 du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement qui fixe les niveaux de référence à prendre en compte lors de l'évaluation de la pollution des sédiments de dragage lorsque ceux-ci sont destinés au rejet en mer. Ce système d'évaluation et la promulgation en arrêté des recommandations du Groupe d'étude et d'Observation sur le Dragage et l'Environnement (GEODE, 1994) qui ont été proposées suite à une étude sur la pollution des principaux ports français dans la période 1986 à 1990.

Les dragages en Algérie:

En matière de stockage d'eau pour l'agriculture ainsi que pour l'alimentation en eau potable, l'Algérie est inévitablement appelée à développer ses infrastructures. Si pour quelque raison un retard notable a été accusé, l'avenir socio-économique est très lié aux efforts à fournir sur les besoins en eau. L'Agence Nationale des Barrages (ANB), dans son diagnostic de Janvier 2004, montre l'ampleur des risques pressentis dans un avenir très proche, si rien n'est entrepris. La construction de nouvelles réserves n'est pas la seule solution à envisager, il faut préserver les capacités

existantes avec le même intérêt. Le **barrage du Fergoug**, dont l'histoire remonte au début de l'ère coloniale, illustre parfaitement les liens du développement de la région de Perrégaux avec la vie du barrage.

Depuis la modification de son profil, le barrage de Fergoug dont la capacité de stockage était de 17 millions de m³ en 1970, a été soumis à un phénomène d'envasement progressif. Au bout de sept années (en 1977) sa capacité a chuté à 9.67 millions de m³ ; soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m³. Après une première **opération de dragage** (1984-1986) où plus de 10 millions de m³ ont été récupérés par dragage et largage de vases, l'envasement du barrage est estimé aujourd'hui à plus de 14 millions de m³. Ce premier dragage a causé beaucoup de désordres en aval, suite au largage des vases.

Cela traduit la complexité du problème : construire l'ouvrage, le protéger, le vidanger régulièrement, préserver le site amont et aval, ... **La valorisation** des produits issus du dragage contribue sans aucun doute au développement de la région et à la résolution des questions liées au largage des vases.

En revenant à l'ouvrage de R. Boutin (2000), dans les réponses formulées à la question pourquoi draguer ? nous constatons que parmi les réponses formulées dans les objectifs cités, ne figure pas l'objectif principal intéressant les infrastructures algériennes de retenue et de stockage de l'eau, à savoir : vider les barrages des sédiments vaseux accumulés pour préserver leurs capacités de stockage de l'eau pour les alimentations diverses des populations. Cette question reste particulière à l'Algérie et son expérience singulière en matière de vidange des retenues de barrage est de fait, par son unicité dans le monde, reste pionnière et que les conséquences serviront de références.

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à l'étude globale des conséquences de l'envasement des barrages en Algérie. Les travaux qui se scindent en quatre parties portent sur la présentation du site étudié et des phénomènes de sédimentation avant l'étude des propriétés des sédiments et des propositions de leur valorisation.

Première partie

Causes et Origines de l'envasement

Causes et origines de l'envasement

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. L'érosion, le transport de matériaux et la sédimentation constituent les trois termes de l'évolution géodynamique de la croûte terrestre conduisant à une pénélplanisation des reliefs montagneux sur l'ensemble du globe. Il y a de multiples manières d'aborder ces thèmes et notre préoccupation est de donner un éclairage sur les processus et les méthodes de mesures susceptibles de répondre à nos problèmes relatifs à la quantification et l'estimation des matières solides qui causent l'envasement des retenues de barrages.

La définition de l'érosion suivant la trilogie « creusement, transport et accumulation des matériaux » conduit à imaginer un système fluvial idéal comprenant 3 zones (Olivry J.C., 1991):

- La zone 1 correspond à la zone de production des matériaux (amont),
- La zone 2 est celle des transferts des matériaux arrachés en zone 1 (cours d'eau),
- La zone 3 couvre les sites des dépôts de ces matériaux (retenues et estuaires).

Il est à remarquer que la répartition spatiale des processus d'érosion n'est pas nette; plusieurs phénomènes peuvent se produire en même temps dans une zone du système fluvial. On devrait donc étudier les différents processus d'érosion pour chaque zone. Mais pour des raisons de simplification nous évaluerons le bilan de l'érosion au niveau des versants, au niveau des matériaux charriés (transport de fond) et au niveau des matières en suspension.

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.

CHAPITRE I : Mécanismes des apports solides et liquides.

I.1 – Estimation des apports liquides et solides.

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, il est distingué quatre groupes d'érosion: l'érosion *glacière*, 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 de 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. Les caractéristiques des pluies permettent de quantifier la masse des terres transportées. Fournier (cité par Olivry, 1991) établit une formule en prenant en compte les *précipitations* et la *morphologie* du bassin versant :

$$E = (1/36).(Ps^2/Pa)^{2,65} . (H^2 /S)^{0,46} \quad (01)$$

- E: apport solide annuel spécifique moyen (1/km² .an)
- Pa : pluie annuelle (mm)
- Ps : pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux
- H : dénivelée moyenne
- S : superficie (km²)

Certains auteurs ont établi des équations d'estimation des pertes de sol en tenant compte de divers facteurs de l'érosion. En effet, de crue en crue les bassins versants perdent les particules solides issues de l'altération des roches mères et qui vont constituer les sédiments transportés. La nature de l'écoulement ainsi que la quantité de sédiments érodés et transportés sont directement liés à la nature et la morphologie du bassin versant. Sans négliger les formules données par de nombreux chercheurs, nous citons essentiellement l'équation universelle la plus

utilisée dans le monde. Il s'agit de l'équation de Wischmeier et Smith (cité par. Olivry, 1991):

$$A = (0,2242).R.K.LS.C.P \quad (02)$$

A : pertes annuelles en sol (kg/m^2)

R : indice d'agressivité climatique (érosivité)

K : indice de sol (érodibilité)

LS : indice de pente et longueur de pente

C : indice de culture caractérisant la couverture végétale

P : indice des aménagements utilisés pour lutter contre l'érosion

0,2242 : constante permettant l'obtention du résultat en unités numériques

Les données provenant de 100 stations réparties à travers les Etats-Unis, représentés dans la Figure N°12, montrent la variation de l'érosion en fonction du climat. Les zones à climat semi-aride (entre désert et prairies) sont les plus touchées par l'érosion. Une situation analogue caractérise les régions algériennes situées entre l'Atlas tellien (humide) et l'Atlas saharien (aride).

I.1.1- Les apports liquides.

L'arrivée des débits liquides peut être prévue, à l'aide des observations climatiques recueillies sur de longues périodes. Bien que le passage des précipitations aux débits soit complexe ; il dépend de plusieurs paramètres (pluie, nature du bassin versant, végétation et degré d'urbanisation, l'évapotranspiration...), deux possibilités sont offertes: soit déduire une série de débits à partir de celle de la pluie, soit évaluer une crue de fréquence F à partir de celle de la pluie de même fréquence. Cela est possible en s'appuyant sur les méthodes statistiques qui permettent d'associer la même fréquence de la pluie au débit généré par celle-ci. Si l'échelle de temps est suffisamment grande la relation pluie-débits est linéaire.

L'absence ou le manque de mesures directes a souvent conduit l'hydrologue à user de modèles mathématiques (souvent statistiques) pour générer l'information manquante ou simplifier la représentation spatiale.

L'étude fréquentielle a montré que l'on peut associer la même période de retour de la pluie au débit généré par celle-ci. Un intérêt particulier réside dans le calcul des débits exceptionnels.

Des relations pluie-débits d'un bassin versant (Bougous, Bejaia, Algérie) est donnée par Cherrared & Sellaoui (2002), en traitant des données pluviométriques de périodes assez longues et homogènes. Disposant de données pluviométriques et hydrométriques mensuelles et malgré l'absence de données journalières, les auteurs ont recherché l'existence de relations entre les débits du mois «i» et les pluies du mois «i-1» qui sont fortement probables.

La recherche d'une telle relation a fait appel à une procédure de régression multiple à deux variables explicatives (pluie du mois i et celle de i-1). Des transformations de données ont été utilisées à cause de la non linéarité de certains modèles. Les tests statistiques R^2 , t, F et D permettent l'estimation de la justesse du modèle. Le tableau N°1 regroupe les résultats de la régression.

Var	mois	Modèles	N	R	R ²	t _r	t _α	F _c	F _α	D _{obs}	D _α
01	/	$\sqrt{Q} = -1.072 + 0.476 \sqrt{P}$	552	0.80	0.64	31.8	1.64	1013	3.86	0.028	0.037
02	/	$\sqrt{Q} = 1.958 + 0.560 \sqrt{P}$	322	0.72	0.51	18.6	1.65	347.3	3.87	0.031	0.049
03	/	$\sqrt{Q} = -11.031 + 0.607 \sqrt{P}$	46	0.81	0.66	9.38	2.01	88.12	4.06	0.105	0.130
04	/	$\sqrt{Q} = -9.15 + 0.583 \sqrt{P}$	46	0.79	0.63	8.69	2.01	7505	4.06	0.086	0.130
05	/	$Q = -2.054 + 0.1107 P$	12	0.88	0.77	5.86	2.23	34039	4.96	0.152	0.255
06	O	$\text{Ln}Q = -8.170 + 1.792 \text{Ln}P$	38	0.69	0.47	5.70	2.03	32.54	4.12	0.112	0.143
	N	$\text{Ln}Q = -8.146 + 1.920 \text{Ln}P$	45	0.76	0.58	7.79	2.01	60.76	4.07	0.109	0.132
	D	$Q = -10.619 + 0.144P$	46	0.88	0.78	12.6	2.01	161.2	4.06	0.114	0.130
	J	$Q = -7.89 + 0.166 P$	46	0.78	0.62	8.50	2.01	72.34	4.06	0.07	0.130
	M	$\sqrt{Q} = -0.902 + 0.418 \sqrt{P}$	46	0.83	0.68	9.81	2.01	96.31	4.06	0.09	0.130
	A	$\sqrt{Q} = -0.530 + 0.352 \sqrt{P}$	46	0.75	0.56	7.55	2.01	57.02	4.06	0.103	0.130
	M	$Q = -0.9345 + 0.0839 P$	46	0.77	0.59	8.08	2.01	65.35	4.06	0.104	0.130
	J	$\sqrt{Q} = -0.437 + 0.087 \sqrt{P}$	46	0.32	0.11	2.29	2.01	5.28	4.06	0.124	0.130
Reg. Mult.	D	$Q = -16.31 + 0.03P_N + 0.14P_D$	46	0.89	0.80	13.4	2.02	89.88	3.22	0.110	0.130
	J	$Q = -15.52 + 0.04P_D + 0.161P_J$	46	0.85	0.73	9.68	2.02	58.33	3.22	0.060	0.130
	M	$Q = -6.04 + 0.003P_F + 0.16P_M$	46	0.86	0.74	11.0	2.02	62.55	3.22	0.129	0.130
	M	$Q = -2.60 + 0.014P_{AV} + 0.08P_M$	46	0.80	0.64	8.35	2.02	39.26	3.22	0.108	0.130

Reg. Mult. = régression multiple, Q = débit mensuel, P = pluie mensuelle

Tableau N°1 : Modèles « Pluie-Débits »

I.1.2- Les apports solides.

A l'exutoire d'un bassin versant, l'étude de l'érosion se fait essentiellement par la mesure des matières solides qui y transitent. Ces matières sont transportées en suspension ou par charriage au fond du cours d'eau qui draine le bassin versant. Sans entrer dans les détails des descriptions des différentes méthodes de mesures, nous citons quelques points essentiels. Ces matières solides envasent les retenues, les lacs et les ports. Leur étude est liée à celle des débits qui les transportent et qui peuvent être mesurés par les méthodes classiques. Deux possibilités sont offertes pour mesurer les charges solides dans les cours d'eau ou dans les réservoirs :

- les mesures par prélèvement d'échantillons dans le cours d'eau ou le réservoir et par interprétation de l'analyse au laboratoire de ces échantillons.
- Les mesures directes *in situ*.

Il est signalé toutefois que si les prélèvements et les mesures sont correctement réalisables sur les matières en suspension, il est clair que concernant le charriage, les moyens disponibles actuellement ne sont pas très efficaces.

I.2 – Les modèles d'estimation de l'envasement.

Pendant les crues ce sont les débits liquides qui sont importants et qui sont à l'origine du transport des matières solides, que ce soit par suspension ou par charriage. Si les mesures directes sur les suspensions sont aisées, il n'en est pas de même pour le charriage, qui dépend d'une part de la rigidité initiale des particules solides et de leur comportement rhéologique. Le taux d'érosion spécifique « Es », à partir duquel est estimé le volume de l'apport solide dans la retenue peut être modélisé à partir d'observations sur de longues périodes. Les corrélations suivantes, mises au point par Cherrared et Sellaoui (2002) montrent cette possibilité: (Figure

N°1a et 1b), pour la relation (Taux d'érosion – Pluie) et (Figure N°2a et 2b) pour la relation (Taux d'érosion–débit liquide annuel).

$$y = 0.0067 x^2 - 5.3829 x + 1498.2 \quad (R^2 = 0.9511) \quad (03)$$

$$y = 2.0254 x + 102.81 \quad (R^2 = 0.7957) \quad (04)$$

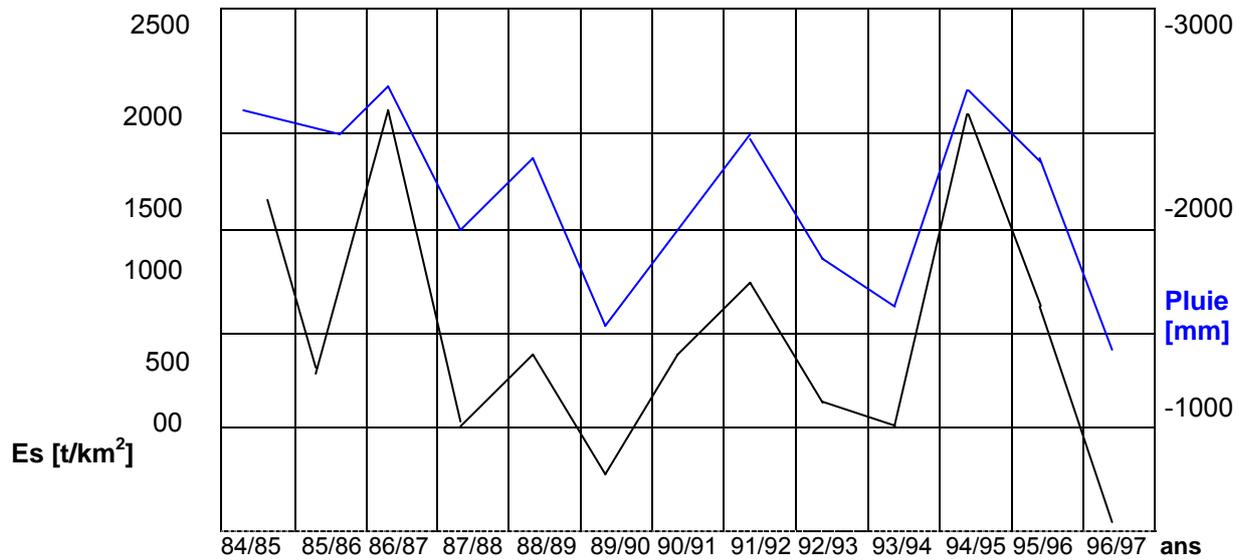


Figure N°1a : Evolution du taux d'érosion spécifique et de la pluie annuelle en fonction du temps.

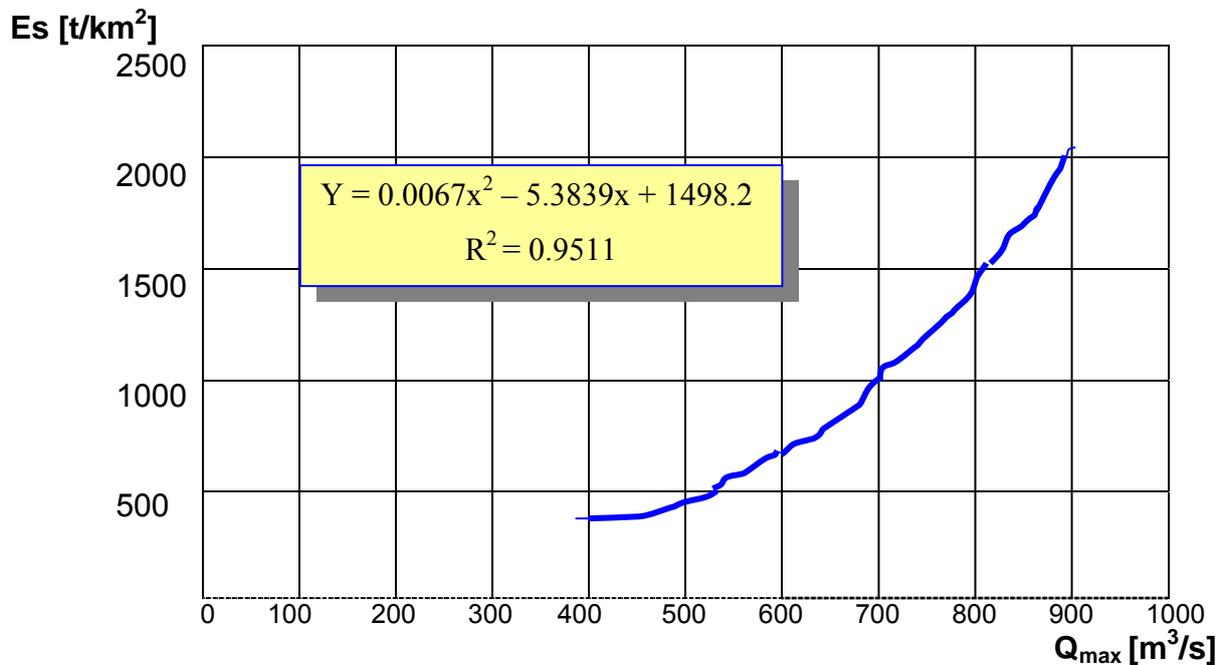


Figure N°1b : Corrélation «taux d'érosion spécifique-Pluie annuelle ».

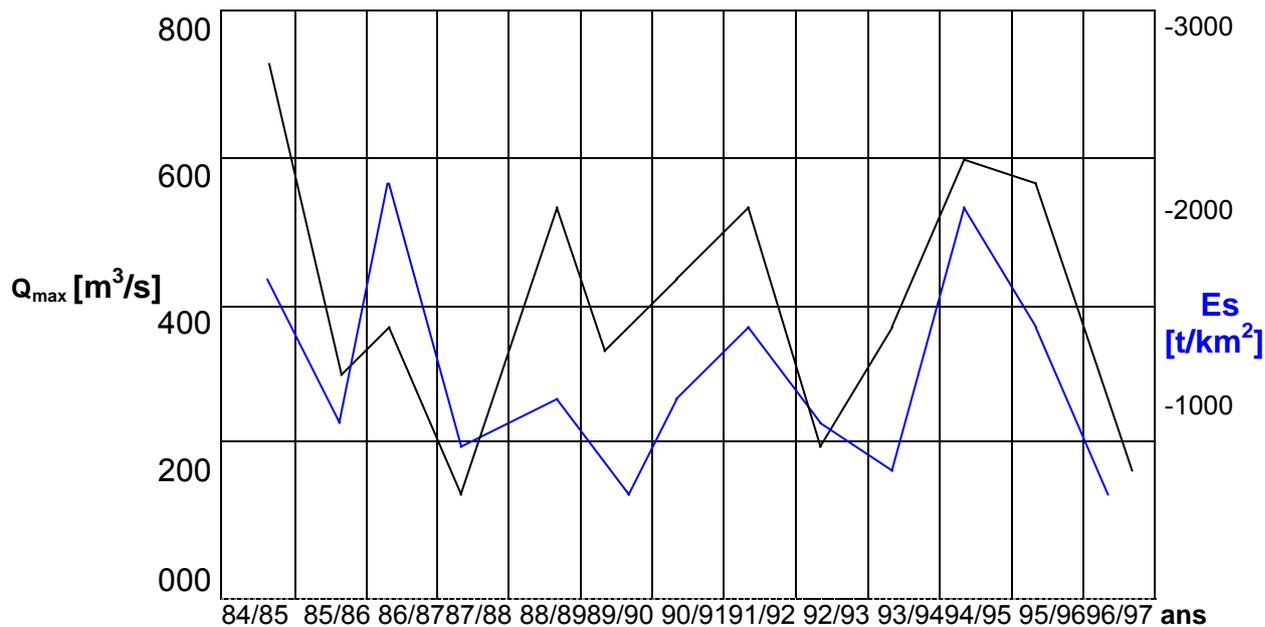


Figure N°2, a : Evolution du taux d'érosion spécifique et du débit maximum en fonction du temps

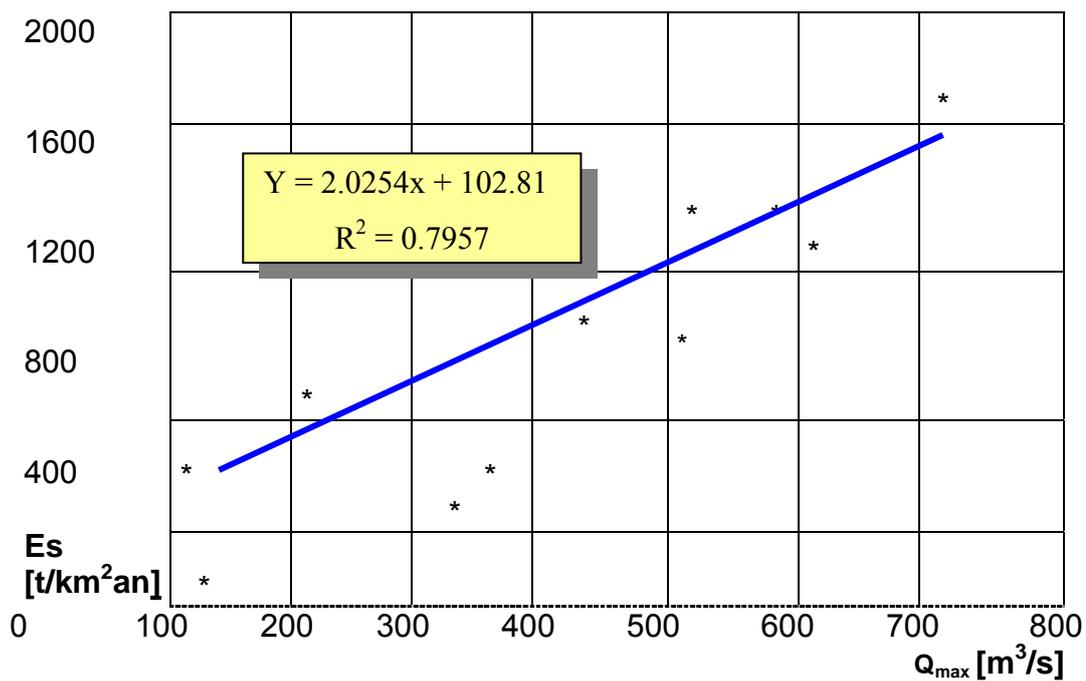


Figure N°2, b : Corrélation «taux d'érosion spécifique- débit maximum annuel ».

Ces résultats ont été élaborés grâce aux informations à base d'observations climatiques, leur validité est donc étroitement liée à celle de ces informations ainsi qu'à la durée des périodes d'observation. L'utilisation de ces modèles dans la prévision de l'arrivée des courants de densité et des moments de soutirage est possible.

Une fois le taux d'érosion spécifique exprimé, le calcul du débit solide par charriage est basé sur la relation de Meyer Peter :

$$Q_s = k (\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (05)$$

Q_s = Débit solide charrié par mètre de largeur du lit [kg/s.m]

τ_c = Contrainte de cisaillement sur le lit [kPa]

τ = Contrainte de cisaillement moyenne réelle [kPa]

Les relations exprimant τ dans le but d'estimer le taux charrié en fonction du débit liquide observé sont :

1) $\tau = \gamma \cdot Rh \cdot I$

2) $\tau = a \cdot \gamma \cdot Rh \cdot I$; $a = 0.8$ (facteur tenant compte de la rugosité du lit de l'oued)

Le volume de l'apport solide dans la retenue pendant une période T peut être estimé par la relation suivante:

$$V_s = E_s \cdot T \cdot S / \gamma_s \quad (06)$$

V_s = Volume de l'apport solide dans la retenue [m^3].

E_s = Erosion spécifique [t/km^2].

T = Période d'observation [an].

γ_s = Poids volumique des grains solides [kg/m^3].

S = Surface du bassin versant du barrage [km^2].

Une application numérique de cette relation au barrage du Fergoug, donnera pour les valeurs suivantes de ces paramètres ($\gamma_s = 2.7 t/m^3$, T = 10 ans, S = 3710 km^2 , $E_s = 1100 t/km^2/an$), la valeur de V_s est de $15.10^6 m^3$.

Une partie est évacuée par les lâchées et les soutirages ($\sim 3 \cdot 10^6 m^3$), ce qui donne *un volume d'envasement de $12 \cdot 10^6 m^3$* . Cette valeur est *confirmée* par mesures directes, à partir de sondages.

I.3 – Propriétés rhéologiques des vases.

Les vases se présentent comme un matériau très fin polydispersé, contenant un pourcentage élevé de précolloïdes et de colloïdes et des traces plus ou moins marquées de matières organiques. En suspension dans les eaux marines ou fluviales ce matériau fin forme des «flocons» très riches en eau et présentant un réseau très lâche. Après décantation sur les fonds, les vases seront soumises à un tassement très lent et leur cohésion (rigidité) variera rapidement en fonction de leur teneur en eau passant par tous les aspects physiques: liquide, visqueux et solide.

Ces matériaux forment des complexes sol-eau très variables dans le temps, ayant des propriétés physiques très différentes de celles des particules élémentaires qui les composent.

Les questions qui nous intéressent sont de trouver quels sont les paramètres caractérisant les sédiments à l'état vaseux et pouvant permettre de prévoir, *à priori*, les effets des vidanges ou du dragage. Ensuite il sera fait état des connaissances actuelles en matière de dépôt, de consolidation et de comportement mécanique des sédiments.

I.3.1- Les modèles rhéologiques.

Les matériaux vaseux forment des complexes sol-eau très variables dans le temps. Leurs propriétés physiques sont très différentes de celles de leurs particules élémentaires isolées.

La sédimentation des particules dans un système dilué présente un comportement différent du tassement-consolidation des suspensions concentrées. Dans le cas d'une suspension diluée, on observe successivement les quatre étapes suivantes (Figure N°3):

- La période de floculation.
- La période de sédimentation à vitesse croissante (loi de Stokes).
- Le tassement du sédiment à vitesse décroissante.
- La consolidation très lente du sédiment.

L'évolution de la concentration suit une loi simple établie par le Laboratoire Central Hydraulique de France (LCHF) : $C = C_s + n_1 \times \log_{10}(h)$ avec h = profondeur en cm, C_s = concentration de la surface de dépôt et C = concentration du dépôt.

Pendant le tassement, n_1 tend à diminuer et la consolidation est modélisée par des segments de droites d'équation : $C = a_i + n_i \times \log_{10}(h)$.

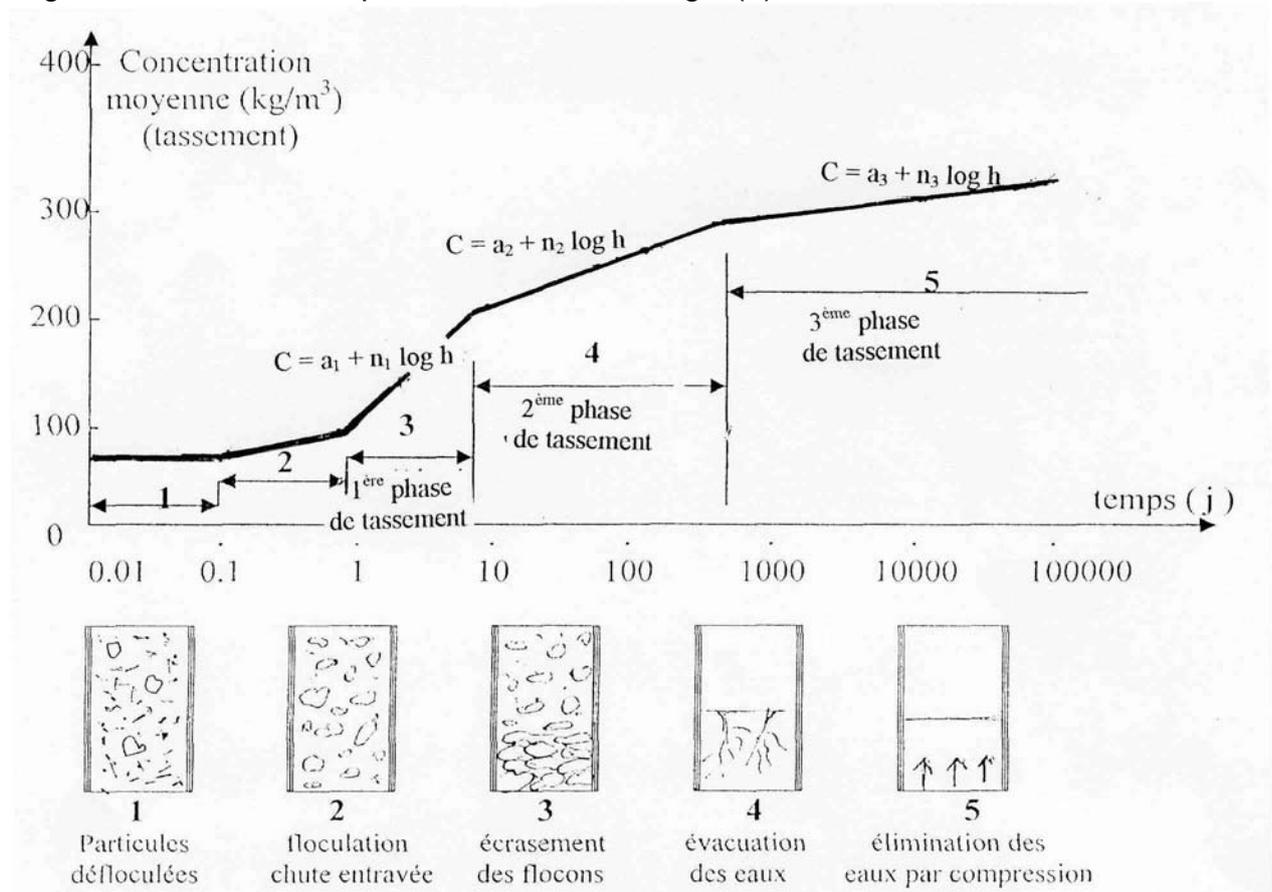


Figure N°3 : Evolution de la concentration dans le temps, (Migniot, 1989).

D'après Migniot, la force de frottement, dans un fluide, représente celle qui produit l'énergie nécessaire pour déplacer une couche sur une autre. Si deux couches parallèles du fluide ayant la même surface S , distantes de dx , se déplacent dans la

même direction à des vitesses différentes v_1 et v_2 , la force F nécessaire pour maintenir cette différence de vitesse dv est :

$$F/S = \eta dv/dx = \tau \quad (07)$$

(pour un fluide newtonien)

η = viscosité dynamique du fluide [poises]

$A = dv/dx$ = gradient de vitesse (vitesse des particules les unes par rapport aux autres)

A représente le taux de cisaillement auquel est soumis le fluide.

F/S = contrainte de cisaillement (force par unité de surface pour produire le cisaillement)

$\tau/A = \eta$ = (contrainte de cisaillement / taux de cisaillement)

$$\text{Une poise} = \frac{1 \text{ dyne/cm}^2}{1 \text{ cm/s}} = \frac{(\tau = 1)}{(A = 1)}$$

Pour un fluide newtonien η est constant (c'est le cas de l'eau). Dans ce cas la relation $\tau = f(A)$ est une droite qui passe par l'origine et dont la viscosité η est la pente de la droite (Figure N°4a).

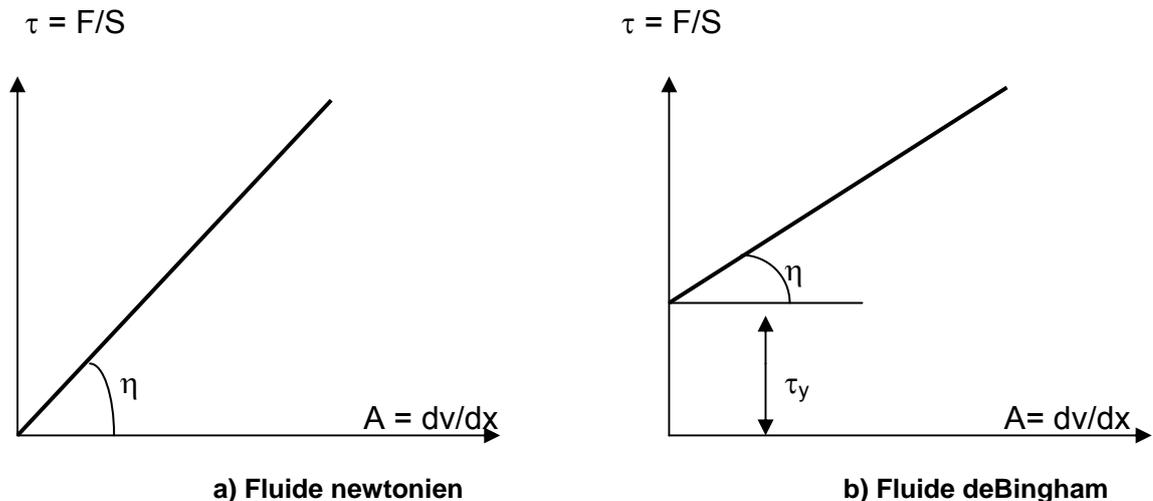


Figure N°4 : Modèles rhéologiques (fluides plastiques).

Pour un fluide plastique, la courbe ne devient linéaire qu'à partir d'une certaine vitesse. Cette vitesse correspond à la contrainte critique d'écoulement (ou de Bingham). Cette contrainte est la « rigidité initiale : τ_y » (yeld value), (Figure N°4b). L'équation du fluide de Bingham s'écrit :

$$\tau = \tau_y + \eta dv/dx \quad (08)$$

τ_y étant la tension en dessous de laquelle il n'y a pas de mouvement.

Il faut remarquer qu'une suspension peut être Newtonienne en faible concentration et devenir plastique Binghamienne pour des concentrations élevées. De plus le dépôt des sédiments peut changer les caractéristiques rhéologiques d'une suspension, de même qu'une action mécanique extérieure pourra modifier leurs propriétés.

En fait, de nombreuses suspensions (dont la mixture de vase) ont une concentration appréciable et ne suivent pas la loi de Bingham, après avoir dépassé la limite d'écoulement, la variation de la contrainte de cisaillement τ en fonction du gradient de vitesse dv/dx n'est pas une loi linéaire, mais se présente suivant une courbe concave ou convexe suivant que la suspension est thixotropique ou dilatante (fluide de Casson). La viscosité de ces mixtures n'est plus constante mais varie en fonction du gradient de vitesse. Certains auteurs admettent alors que la contrainte de cisaillement τ_B peut être définie à partir de la tangente à la courbe rhéologique.

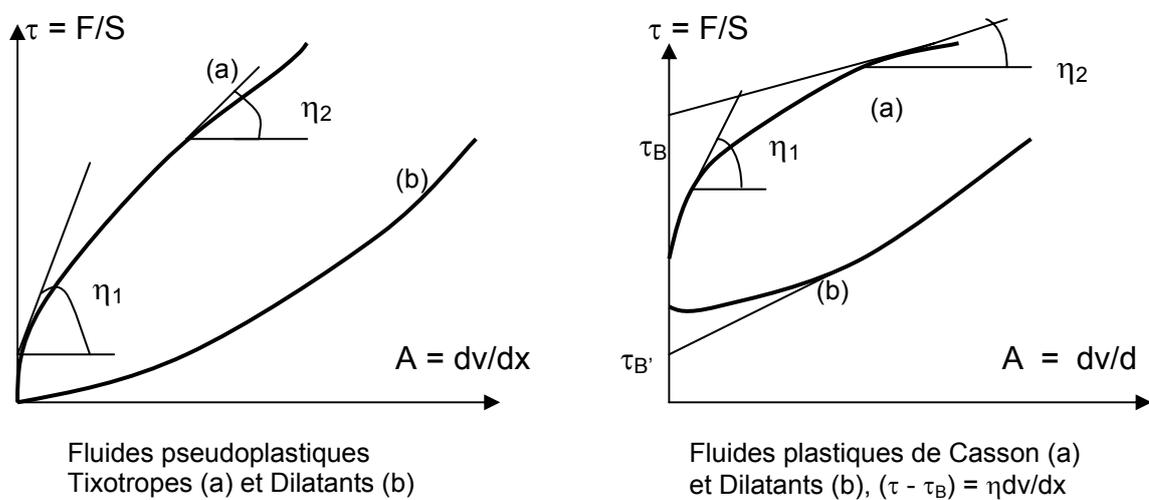


Figure N°5 : Modèles rhéologiques (fluides pseudo plastiques et plastiques de Casson).

Cette valeur arbitraire de la contrainte de cisaillement est différente de la rigidité initiale réelle que l'on peut définir comme correspondant au début de l'entraînement et à laquelle on peut rattacher le comportement des mixtures de vases sous les actions hydrodynamiques.

Pour la description des écoulements en rivières et en retenues, nous nous limitons aux modèles de Newton et de Bingham, étant donné que les concentrations moyennes pendant ces écoulements sont très inférieures aux concentrations limites ($T_s \ll T_{slim}$), (Parzonka, 1984).

1.3.2- Entraînement des vases.

Contrairement aux phénomènes marins (houle de fond), le fond d'une retenue (barrage) n'est pas soumis en permanence à un phénomène d'érosion. Celle-ci n'apparaît effectivement que lors des crues ou des chasses.

Dans le cadre d'une opération de désenvasement, l'entraînement des vases par érosion lors des crues est quantifié par Parthéniadès (cité par Sémiond, 1994) :

$$Q_e = M \cdot [(\tau - \tau_y) / \tau_y] \quad (09)$$

- Q_e = débit d'érosion surfacique (kg/s.m^2)
- M = coefficient d'érodibilité
- τ = contrainte de cisaillement
- τ_y = contrainte critique à partir de laquelle commence l'érosion (l'action érosive n'est observée que si la contrainte de cisaillement imposée à la vase atteint τ_y).

D'autre part, selon le critère de Coulomb, il y a érodibilité pour $\tau_y \geq C_s$, où C_s représente la cohésion spécifique (kPa). Ceci donne la formule : $\tau_y = k.C_s$. (k étant un coefficient à déterminer expérimentalement).

Aussi, τ_y est exprimé en fonction de la concentration en matière sèche : $\tau_y = k'. Ts^6$ (Laboratoire Central Hydraulique de France), k' étant une constante expérimentale à déterminer.

La détermination des constantes k et k' dépendra des modèles de comportement de la cohésion C et de la concentration Ts en fonction de la profondeur.

De façon analogue, il est déterminé la vitesse critique d'érosion (vitesse d'un courant à partir de laquelle l'érosion commence).

I.3.3- Les courants de turbidité.

Sous l'influence de leur poids, les sédiments déposés sur un fond rigide en pente, tendent à se mettre en mouvement par effet de la gravité. C'est la cohésion du matériau qui va s'opposer à ces efforts de gravité.

En effet un sol peu compact, à faible concentration en particules solides, s'écroule sur une pente assez faible, alors qu'un sol suffisamment tassé pourra se maintenir en équilibre le long de pentes plus raides.

Les vases qui s'écroulent sur les fonds sous forme d'un fluide plastique et homogène, peuvent se traduire par une dilution des sédiments dans le milieu aqueux (moins de 250g/l). On passera alors des dépôts à des suspensions dont la rigidité initiale est négligeable. C'est alors que des **courants de turbidité** apparaissent et se propagent sur les fonds à de grandes distances de leur lieu de formation. Ces courants transportent des quantités importantes de matériaux. En effet la masse vaseuse glisse, s'écroule et se fragmente sans qu'il y ait remise en suspension des particules élémentaires.

Il faudra distinguer la différence entre **coulées** et **courants** de turbidité : les courants de turbidité prennent naissance à partir de suspensions n'ayant pas de rigidité initiale, alors que les coulées boueuses sont liées à des sols compacts ou plastiques.

Les courants parcourent de très grandes distances sur des fonds de faible pente et n'érodent que les fonds peu consolidés. Ils transportent de grandes quantités de matières et sont donc agents de sédimentation. Les coulées par contre, prennent naissance à partir d'une rupture de l'équilibre des sols (glissement) et peuvent se transformer en avalanches sous-marines. Elles ont un pouvoir érosif important, surtout si la pente du fond est importante.

La vitesse de formation d'un courant de turbidité peut s'exprimer par :

$$V = K (g'H)^{1/2} \quad \text{avec : } g' = g (\rho_m - \rho_0)/\rho_0 \quad (10)$$

g = accélération de la pesanteur, g' = pesanteur réduite,

ρ_m = densité de la suspension,

ρ_0 = densité de l'eau claire,

H = hauteur des eaux claires,

K = coefficient expérimental ($K = 0.7$ en canal et pour de faibles viscosités).

Ces courants régis par la gravité réduite qui dépend d'une différence de densités, sont aussi appelés **courants de densité**. Ce sont des courants lents : pour une concentration de 50 g/l et une hauteur de suspension $H = 1$ m, la vitesse $V = 0.37$ m/s.

Les courants de turbidité déposent leurs matériaux dès que le nombre de Reynolds de l'écoulement turbide devient inférieur à : $Re = VH/\nu \leq 2000$ (avec ν = viscosité cinématique de la suspension).

Les figure N°6 et N°7, illustrent le comportement des sédiments fins dans la retenue et l'écoulement d'un courant de densité.

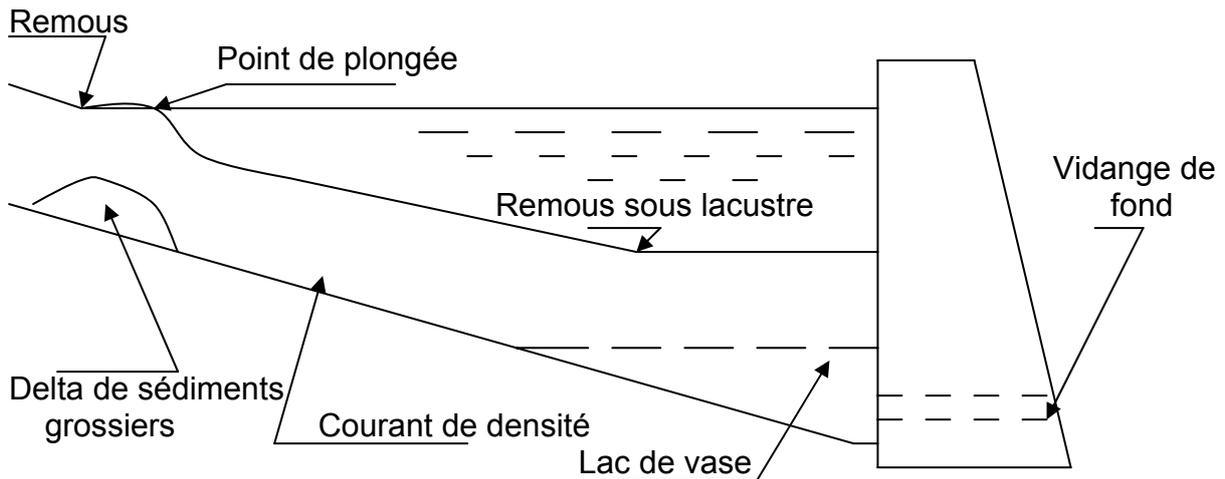


Figure N°6 : Comportement des sédiments fins.

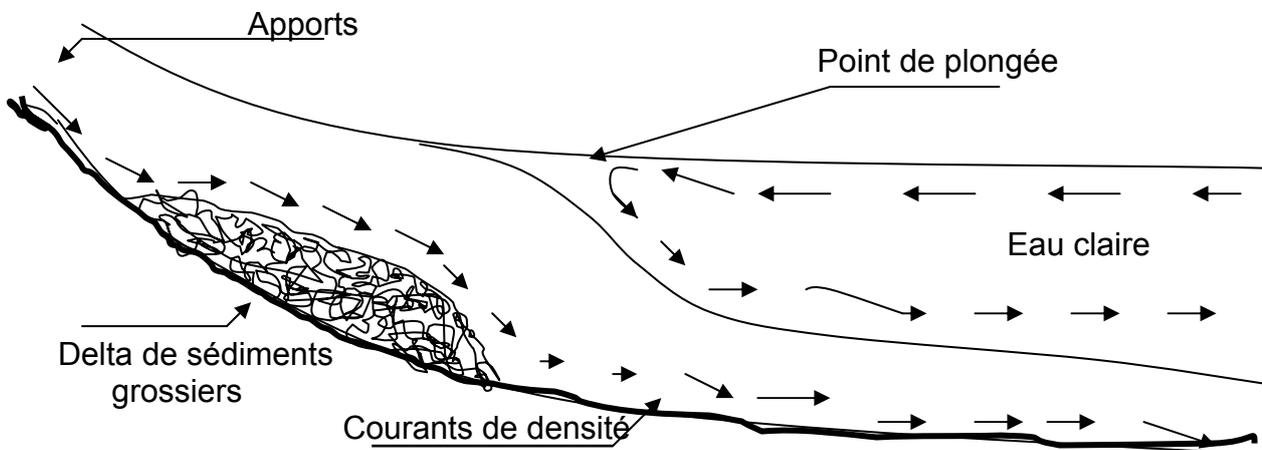


Figure N°7 : Ecoulement d'un courant de densité dans une retenue.

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.

L'étude des processus de l'érosion, du transport solide et de la sédimentation est un préalable à toute tentative de dévasement. 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.

Les sédiments déjà consolidés dans les fonds, nécessiteront plus d'efforts à leur mise en mouvement. Leur remise en suspension est liée au degré de consolidation des couches. Les plus récentes sont les plus érodables et s'adaptent à des moyens de dévasement relativement peu coûteux. Par contre les couches inférieures sont caractérisées par une rigidité initiale ne permettant leur mise en mouvement qu'avec des moyens mécaniques performants.

Une solution a été concrétisée au barrage du Fergoug. Même après un temps de tassement de l'ordre de deux ans, les valeurs de la concentration en particules solides restant inférieures à celles de la limite de liquidité. Les vases superficielles du Fergoug sont facilement érodables par chasse d'eau ou par dragage. Cette particularité représente un atout pour la programmation de cyclique d'opérations de dragage tout en gérant de façon ciblée les moments de soutirage.

CHAPITRE II : Moyens de lutte contre l'envasement.

De nombreux moyens sont mis en œuvre pour lutter contre les désordres causés par les phénomènes de l'envasement. De manière similaire à ceux de l'érosion, nous regroupons les étapes de lutte dans les trois zones :

- 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 constitue notre préoccupation. Il est donc essentiel d'avoir une bonne connaissance des propriétés géomécaniques des matériaux à vidanger pour le choix et l'utilisation adéquate des moyens.

II.1- Particularité des retenues en Algérie.

Selon Remini (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.

Malgré l'insuffisance des études sur ce phénomène particulier aux régions de l'Afrique du nord, beaucoup d'efforts ont été déployés par les services de l'hydraulique dans la lutte contre l'envasement. Il faut remarquer que l'Algérie fait figure de pionnier en cette matière et son expérience singulière dans le monde fait qu'il n'est pas fait référence aux expériences d'autres pays.

Parmi les multiples procédés de lutte expérimentés sur les barrages algériens, à savoir : le reboisement des bassins versants, la surélévation des digues, la construction de barrages de décantation et l'utilisation du barrage à onde de chasse, il a été fait recours à des opérations de dragage.

La première expérience de dragage par drague suceuse, acquise en 1986 et baptisée « Rezoug Youssef », fût 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.

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.

II.2- Les matériaux concernés par les dragages d'entretien.

Migniot dans l'ouvrage de Boutin (2000), décrit l'arrivée des matériaux à draguer par cette phrase : « Transportées par les fleuves ou apportées par les courants de marée, des masses considérables de sédiments fins, d'origine fluviale ou maritime, viennent se déposer chaque année dans les retenues de barrage, les chenaux de navigation et les zones portuaires, nécessitant des dragages d'entretien extrêmement importants ».

Ces sédiments fins sont composés en grande partie de fines particules minérales avec quelques petits éléments de roches auxquels sont mélangés des débris d'origine végétale et animale. Les minéraux proviennent de l'érosion des roches ou des sols et de leur transport sous les effets hydrodynamiques. Des matériaux d'origine industrielle, domestique ou agricole se retrouvent également dans la matrice sédimentaire dans des quantités variables.

Les différents sédiments font l'objet de classifications granulométriques, c'est-à-dire de classification sur la taille des particules. Il existe plusieurs nomenclatures qui varient avec les auteurs et les pays (tableau n°2 & n°3).

	Classification d'après Migniot		Classification fournie dans l'ouvrage d'Aminot <i>et al</i>		Koch et Chang	
Rudites, taille des grains supérieure à 2 mm	Blocs	D>200mm	Blocs (anguleux)	D>20 mm	Graviers	D > 2 mm
	Galets	20<D<200 mm	Graviers (arrondis)	20<D<200 mm		
	Graviers	2<D<20mm				
Arénites, Taille des grains comprise entre 50 ou 63 µm suivant les auteurs	Sables très grossiers	1<D<2 mm	Sables, Sablons	50 ou 63µm<D<2mm	Sables	0,063<D<2 mm
	Sables moyens	0,5<D<1 mm				
	Sables fins	0,25<D<0,5 mm				
	Sables très fins	125<D<250 µm				
		64<D<125 µm				
Lutites ou pélites, Taille des grains inférieure à 50 ou 63 µm suivant les auteurs	Silts	4<D<64 µm	Silts	4<D<64 µm	Silts	2 µm <D< 50 ou 63µm
	Précolloïdes	0,12<D<4 µm	Argiles	D < 2 µm	Argiles	D < 4 µm
	Colloïdes	D<0,12 µm				

Tableau N°2 : Définitions granulométriques des sédiments suivant différents auteurs.

Dénomination		Identification par taille des grains	Commentaires
Blocs, Cailloux	Granuleux (sans cohésion)	> 200 mm 60 à 200 mm	
Graviers		Gros : 20 à 60 mm, Moyens : 6 à 20 mm Fins : 2 à 6 mm	
Sables		Gros : 0,6 à 2 mm Moyens : 0,2 à 0,6 mm Fins : 0,06 à 0,2 mm	
Limons	Doués de cohésion	Gros : 20 à 60 µm Moyens : 6 à 20 µm Fins : 2 à 6 µm	Les limons humides sont pétrissables, une simple pression des doigts pulvérise les mottes séchées
Argiles		< 2 µm	Présentent une cohésion et une plasticité importantes. Un échantillon humide colle aux doigts et paraît lisse et onctueux au toucher. Les fragments secs ne se réduisent pas en poudre. Au cours du séchage ils se contractent et se fissurent en acquérant une haute résistance au cisaillement.
Tourbes et terres organiques	Organiques	Non applicable	Sont identifiables par leur couleur noire ou brune et souvent par leur forte odeur et par la présence de matières fibreuses ou ligneuses.

Tableau N°3 : Classification des sols en vue des dragages
(d'après l'AIPCN).

AIPCN : Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation cité par Boutin (2000).

Les différentes classes de sédiments interviennent rarement seules. On définit alors différents faciès lithologiques qui varient encore avec les auteurs et les pays. Le tableau N°4 donne les plus simples définitions d'après Allen (cité par Boutin, 2000).

Dénomination	Caractéristiques
Sable	Plus de 80 % d'éléments supérieurs à 50 µm
Sable vaseux	De 20 à 80 % d'éléments supérieurs à 50 µm
Vase	Plus de 80 % d'éléments inférieurs à 50 µm

Tableau N°4 : Définition des faciès d'après Allen, (cité par Boutin, 2000).

Pour la problématique de notre étude, c'est-à-dire l'arrivée des sédiments dans la cuvette de la retenue, c'est le comportement des matériaux constitués des fractions fines qui nous intéresse particulièrement. Ce sont les sédiments vaseux.

Le nom de vase est la désignation générale d'une large famille de sédiments fins argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau très supérieures à la limite de liquidité. La vase peut se présenter à l'état de suspension aussi bien que de sol consolidé.

Nous allons retenir finalement la définition proposée par Migniot : « Les vases sont des sédiments complexes qui couvrent une gamme étendue de particules inférieures à 40 microns mais peuvent contenir une quantité notable d'éléments sableux ».

Suivant le système hydrodynamique (fleuve, estuaire, mer) ou la région étudiée la constitution des vases peut être très variable. Le domaine granulométrique est essentiellement celui des silts argileux. La teneur en sable est le plus souvent inférieure à 20%.

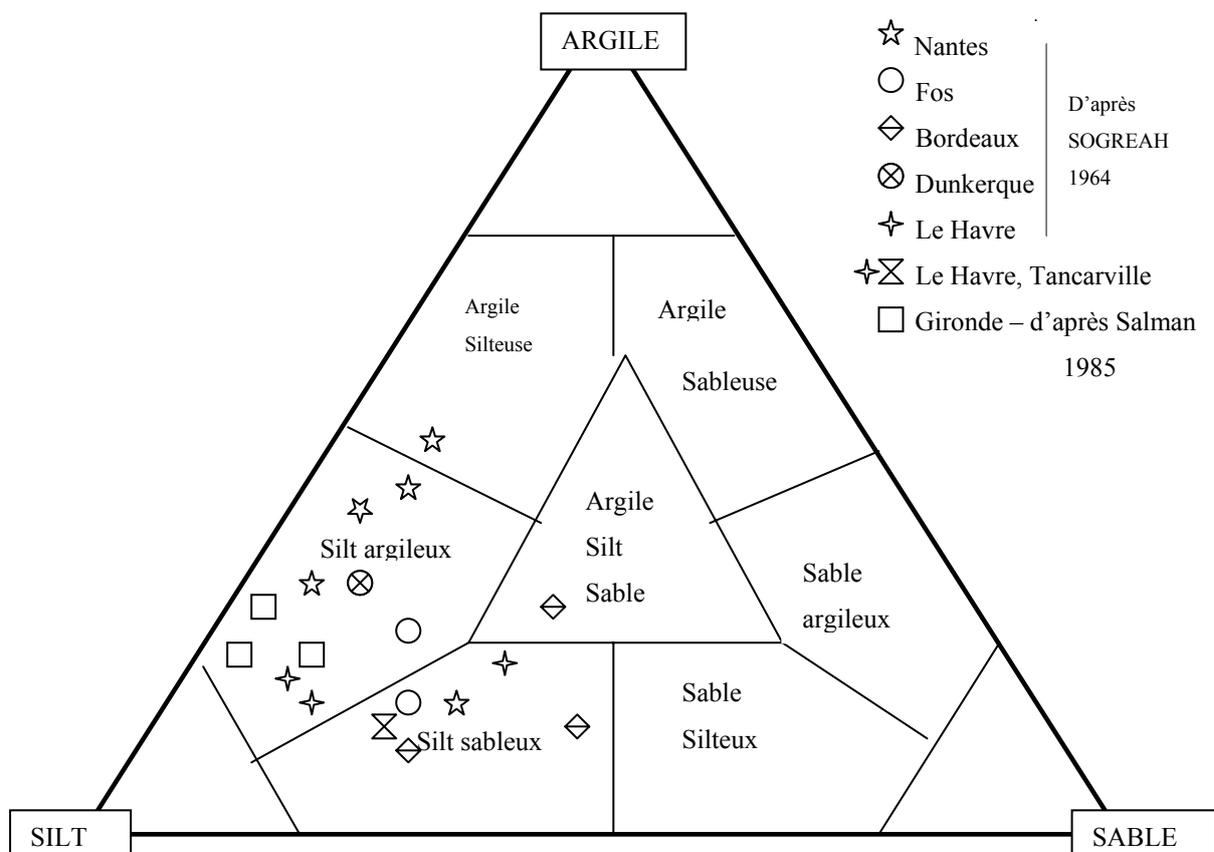


Figure N°8 : Granulométrie des vases estuariennes et portuaires (cité par Boutin 2000).
Représentation triangulaire (coupure argile/silt à 2 µm et celle de silt/sable à 63µm).

La composition argileuse des vases estuariennes et portuaires de nos climats tempérés est un mélange dominant d'illite, de kaolinite et de smectite. La chlorite et plus rarement les interstratifiés peuvent être représentés mais dans des quantités secondaires. Les carbonates sont également un constituant important des vases (5 à 30 % selon les sites). La fraction organique représente suivant les sites de 1 à 8 %.

Les dragages d'entretien concernent donc un matériau complexe aux composants multiples majoritairement constitués de sédiments fins cohésifs. Si les vases estuariennes présentent une distribution granulométrique relativement homogène,

elles n'ont pas pour autant des caractéristiques ou propriétés physiques semblables. Ces dernières évoluent en fonction de l'origine des vases, de leur composition, de leur état, de la composition chimique du milieu récepteur, des contraintes auxquelles elles sont soumises.

II.3 – Les techniques de dévasement.

L'entretien des ports, des estuaires et particulièrement des barrages constitue l'intérêt principal de notre étude. 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.
- 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).

II.3.1- Etat des vases avant dragage.

Avant désenvasement, 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. Ce sont les paramètres suivants qui influent ces propriétés :

- Les dimensions des particules: d'après Mignot, dans la formule du tassement en fonction du temps :

$$T_s = a \cdot \log t + b \quad (11)$$

Le coefficient « a » est une fonction décroissante avec le diamètre « d » des particules pour toutes les phases du tassement.

- Phase de décantation des flocons : $a = 0,01 + 0,05d$
- Phase d'élimination des eaux interstitielles : $a = 0,01 + 0,015d$
- Phase d'élimination des eaux fixées aux micelles : $a = 0,01 + 0,001d$

Ces relations sont issues d'expériences dans des conditions idéales, vu qu'au préalable les particules gênantes ont été retirées. La nature minéralogique a aussi un influence sur le tassement, du fait que ce sont les minéraux constitutifs qui assurent la rétention de l'eau.

- Le milieu aqueux : les éléments chimiques dissous dans l'eau, ont une influence variable sur le tassement des particules en suspension.

- Les condition initiales de sédimentation : pour apprécier l'influence des conditions initiales, les deux paramètres surveillés sont la vitesse de tassement et le tassement final. Les paramètres influents sont la hauteur et la concentration en particules à l'état initial. Plus ces deux paramètres sont élevés plus le tassement final est important, mais plus la vitesse est faible. Le mouvement ascendant de l'eau drainée permettant la consolidation, est gêné.

- Les matières organiques : leur présence est limitative du tassement, par la formation de gaz lors de leur décomposition qui perturbent la concentration des dépôts.

- La présence de sable : elle favorise de façon générale le tassement. Le drainage de l'eau se fait plus facilement lorsque des grains sont dispersés dans les sédiments. La perméabilité est augmentée par leur présence.

II.3.2- Le soutirage.

Selon Remini (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.

La mauvaise utilisation de cette technique de soutirage a entraîné l'obturation des vannes des barrages de Oued El Fodda (1948) et Foug 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 ait enregistré des résultats encourageants est celui d'Ighil Emda: durant les années 1955-1956, plus de 50% des sédiments entrants dans la retenue ont été évacués. Une batterie composée de 8 vannettes de désenvasement et 3 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, 6 vannettes de désenvasement ont été placées dans le barrage de Oued El Fodda en 1961. 4 vannettes de désenvasement et 2 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 parle de «bons» et de «mauvais» soutirages.

II.3.3- 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 10 millions de m³ de vase ont été dragués.

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.

De cette première expérience de dragage en Algérie, sont apparues des désordres sur l'environnement, 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, plus de 650 millions de m³ de sédiments cumulés sont estimés en 2000 et répartis dans les 98 barrages algériens.

II.4 – Stockage des sédiments.

Dans un esprit de développement durable, la gestion de l'environnement doit prendre en compte tous les aspects liés à la mise en dépôt et au stockage des sédiments issus des opérations de dragage.

Grâce aux médias, le grand public est maintenant bien informé des dommages que court l'environnement du fait des « pollutions » dont les origines et les formes sont multiples. Mais le grand public est beaucoup moins sensible au rôle protecteur que le sol peut exercer à l'égard des pollutions si certaines conditions sont respectées.

L'efficacité du sol est moins évidente lorsque la pollution est provoquée par les composants même du sol, ou de sa constitution physique qui altère directement les équilibres des bassins versants vis-à-vis des ruissellements et des infiltrations alimentant les nappes souterraines. Cependant, une attention particulière est attirée sur les désordres pouvant apparaître suite aux dépôts et stockages des matières de granulométrie fine. En effet, dans le cas du dragage du Fergoug, le dépôt des sédiments en aval de la digue a été à l'origine de la grande catastrophe écologique pour toute la plaine située en aval du barrage. Les photos N°1 et N°2 illustrent le

mode de rejet par écoulement vaseux à la sortie d'une vidange de fond et celui par la drague suceuse.



Photo N°1: Ecoulement de la vase à sa sortie d'une vidange de fond.
(Barrage de Fergoug).



Photo N°2 : Zone de stockage des sédiments
-Rejet en cours par drague suceuse-
(Barrage de Fergoug).

En réponse aux problèmes que suscite le devenir des quantités considérables de sédiments dragués et la non adaptation des solutions antérieures de leur mise en dépôt, des mesures nouvelles de protection de ces matières contre la lixiviation des dépôts par les eaux de pluie et de ruissellement, ont été prises.

Troalen (1998) propose des traitements préalables de densification des vases et la prévision d'aires de stockages aménagées. « La mise en dépôt en remblais (si non pollués) de mélanges vases-limons une fois densifiés, est tout à fait réalisable avec des caractéristiques physiques et mécaniques largement suffisantes ($R_c > 350$ kPa, R_c étant la résistance à la compression) pour permettre leur mise en place, une circulation et un trafic même important. De plus les mélanges vases-limon ont une composition minéralogique telle, qu'une fois liée à la fraction organique apportée par les vases, il est possible d'envisager une végétalisation immédiate dans le cas d'utilisation en remblais de ces mélanges. Dans le cas de la mise en dépôt, il s'agit cette fois de stocks de mélanges vases-limons pollués et en attente de dépollution avant leur valorisation et leur réutilisation éventuelle... ».

II.4.1 – Les paramètres caractérisant une vase.

Ci-après sont présentés les principaux paramètres permettant de caractériser une vase et de préciser les caractéristiques volumétriques et dynamiques des rejets.

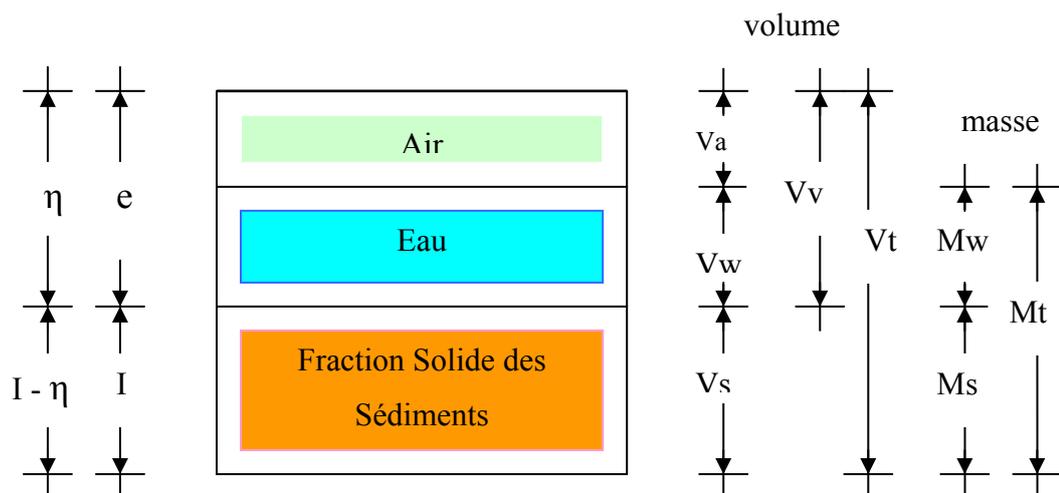


Figure N°9 : Définition de paramètres d'arrangement.

$\rho_d = C = M_s / T_s$: masse volumique sèche

T_s = teneur en sédiments secs

$\rho_s = M_s / V_t$: masse volumique des grains solides

$\rho_h = M_t / V_t$: masse volumique humide

$\rho_w = M_w / V_w$: masse volumique de l'eau

$W_t = (M_w / M_t) \times 100$: teneur en eau rapportée à la masse totale de l'échantillon

$W_s = (M_w / M_s) \times 100$: teneur en eau rapportée à la masse de sédiment sec de l'échantillon

$d_e = (\rho_h / \rho_w)$ = densité de l'échantillon par rapport à l'eau pure (ρ_w = masse volumique de l'eau pure)

$e = V_v / V_s$: indice des vides

$\eta = V_v / V_t$: porosité

$e = \eta / (\eta - 1)$, $\eta = e / (1 + e)$

$S_r = (V_w / V_v) \times 100$: degré de saturation

Les paramètres ci-dessus définis permettent de caractériser les proportions en air, en eau et en sédiment d'un échantillon. Ces paramètres sont également dénommés paramètres d'arrangement.

Nous pouvons rencontrer toutefois des appellations différentes pour la même grandeur : plutôt que « masse volumique sèche », nous utiliserons par exemple « concentration en matière sèche » qui désigne exactement la même grandeur physique. Migniot utilise « teneur en sédiments secs Ts » pour ce même paramètre.

1.3.4.2 – Relations de passage entre paramètres.

Dans le cas où la vase est saturée d'eau, les vides sont entièrement remplis d'eau et nous avons alors $V_v = V_w$. Il en découle les relations de passage suivantes qui montrent que l'on peut utiliser indifféremment ρ_h , e , η , W_s , ou W_t si ρ_w et ρ_s sont connus.

$$C = \rho_s / (1 + e) = \left\{ (1 / \rho_s) + (W_s / 100 \rho_w) \right\}^{-1} = \left\{ (1 / \rho_s) + W_t / (100 - W_t) \rho_w \right\}^{-1} \quad (12)$$

$$e = (\rho_s / C) - 1 = W_s \cdot \rho_s / 100 \rho_w = W_t \cdot \rho_s / (100 - W_t) \rho_w \quad (13)$$

$$W_t = 100 \left\{ 1 + (\rho_s / \rho_w) (C / (\rho_s - C)) \right\}^{-1} = 100 \left(1 + \rho_s / e \rho_w \right)^{-1} \quad (14)$$

$$W_t = 100 W_s / (100 + W_s) = 100 W_t / (100 - W_t) \quad (15)$$

$$\rho_h = \left\{ (\rho_s - \rho_w) / \rho_s \right\} \cdot C + \rho_w = \left\{ \rho_s / (1 + e) \right\} + \left\{ e / (1 + e) \right\} \cdot \rho_w \quad (16)$$

$$\rho_h = (100 + W_s) / \left\{ (100 / \rho_s) + (W_s / \rho_w) \right\} = \left[(1 / \rho_s) + (W_t / 100) \cdot \left\{ (1 / \rho_w) - (1 / \rho_s) \right\} \right]^{-1} \quad (17)$$

L'utilisation de ces relations de passage suppose que l'on connaisse ρ_s et ρ_w . La masse volumique des grains solides sera la combinaison de celles des éléments qui la constituent. Pour la masse volumique de l'eau, c'est suivant la température qu'elle varie, car s'agissant d'eau de pluie, la salinité (sels dissous lors des écoulements) a un rôle secondaire.

II.5 – Conclusion.

La dégradation des ouvrages de retenue qui se traduit par la perte rapide des volumes de stockage débouche toujours sur un processus d'érosion. C'est l'érosion pluviale qui sévit dans toutes les zones climatiques et qui a pour effet de décaper les horizons des surfaces les plus fertiles, et même, dans les cas graves (celui du Fergoug en est un), la totalité du profil. Dans certains cas, l'érosion pluviale est sélective: elle élimine de façon préférentielle la fraction la plus fine et la matière organique, laissant sur place les fractions grossières.

On peut affirmer qu'aucune région, quel que soit son climat n'est à l'abri de l'érosion pluviale: la plupart des pays concernés ont pris les mesures qui s'imposent, tantôt *préventives* telles que celles qui visent à préserver l'ouvrage, tantôt *curatives* (cas beaucoup plus dramatique en particulier pour l'Algérie) quand il faut remédier aux cas graves.

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 (en zones 1 et 2). 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 ainsi que le stockage des matières récupérées.

Conclusion de la première partie.

Cette première partie a été consacrée à la compréhension des phénomènes de sédimentation dans les retenues et les cours d'eau.

Dans l'étude globale de la valorisation des matériaux issus du dragage, il nous paraît essentiel de partir des processus d'érosion et de sédimentation dans les zones privilégiées telles que les retenues de barrages pour estimer les quantités des matières solides déposées au fil des années. La valorisation de ces matériaux considérés jusqu'alors comme déchets inexploitable implique la connaissance aussi précise que possible du cycle de leur production, les moyens à mettre en œuvre pour leur valorisation y sont directement liés.

L'information manquante sur les quantités charriées peut trouver une estimation à l'aide des modèles statistiques établis à partir d'observations pluviométriques antérieures ainsi qu'à partir des corrélations pluie-débits-érosion spécifique. Nous estimons qu'une grande partie des volumes de vase arrivant au pied du barrage est le résultat des courants de turbidité. Une étude rhéologique de l'entraînement des sédiments à partir de l'entrée de l'estuaire que constitue la cuvette, jusqu'à la digue, permet de déterminer les paramètres d'utilisation à bon escient des soutirages.

La lutte contre l'envasement des barrages en particulier par des opérations de dragage a mis en évidence la particularité des sites algériens du fait qu'il s'agit d'un dragage d'entretien, ce qui est une première expérience internationale. Les conséquences des premières opérations ont eu des retombées dramatiques sur l'environnement. Il est fait appel aux expériences du dragage des fonds marins et des chenaux. Une même terminologie est adoptée pour caractériser les paramètres de la vase.

Deuxième partie

Le site du barrage de Fergoug

Le site du barrage de Fergoug

Cette partie est consacrée à mettre en évidence l'importance du barrage pour la région à travers sa conception, son historique et son état actuel. L'accent est mis sur les questions de l'heure, à savoir les erreurs antérieures dans la gestion globale des conséquences de l'envasement du barrage ont conduit à une situation dramatique de la plaine de l'Habra en aval du barrage. Enfin il est nécessaire de remédier aux différentes questions liées à l'environnement dans la région. Le site de Fergoug est localisé sur la figure N° 10, entre Les villes d'Oran (au nord-ouest), de Mostaganem (au nord-est) et Mascara (au sud).



Figure N°10 : Situation géographique de Perrégaux et Fergoug.

Le barrage de Fergoug doit sa dénomination à la localité « Douar Fergoug », dans la wilaya (région) de Mascara, à une centaine de kilomètres à l'est d'Oran. Les caractéristiques géographiques de la localité du Fergoug sont les suivantes :

Latitude : 35.5231	Longitude : 0.0414	Altitude (pieds) : 2420
Lat. (DMS) : 35°31'23 N	Long. (DMS) : 0°2'29 E	Altitude (mètres): 730
Time zone (est) : UTC + 1		
Population approximative sur un rayon de 7 km autour de ce point : 14292 habitants		

Tableau N°5 : Caractéristiques géographiques de Fergoug.

La connaissance du site à travers sa localisation, le degré d'urbanisation et la taille du bassin versant, la nature géologique des formations soumises à l'érosion, son historique mettant en évidence son importance économique..., sont autant d'éléments qui peuvent caractériser les sédiments à valoriser, en matière d'ordre de grandeur des volumes à traiter et des moyens à mettre en œuvre dans le cadre global de la valorisation des déchets solides.

CH. III : Le barrage de Fergoug

III. 1- Le barrage et la ville de Perrégaux.

Le barrage de l'Oued Fergoug, situé à 20 km en amont de Perrégaux sur la route de Mascara, est construit dès l'installation des premiers colons dans cette région.

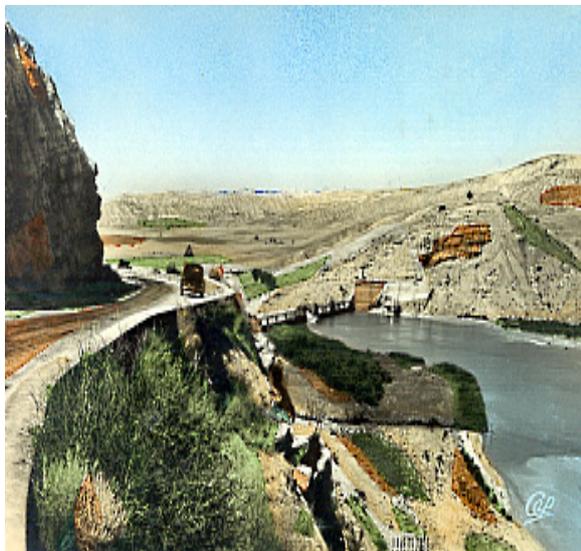


Photo N°3 : Barrage de Fergoug en 1958.



Photo N°4 : Barrage de Fergoug en 1986.



Photo N°5 : Barrage de Fergoug en 2004 (état envasé).



Photo N°6 : Barrage de Fergoug en 2004 (état envasé).

La construction du barrage de Fergoug a été à l'origine de la naissance et la prospérité de la ville de Perrégaux (actuellement Mohammadia).

L'extrait suivant d'un document publié sur le site « PERREGAUX LE PAYS DES ORANGES- sur site le 12/12/2001 source : «PNHA 22 janvier 1992», Blason : pnha, n°86, janvier 1998 », décrit clairement l'intérêt du barrage pour le région :

En 1880, Guy de Maupassant se trouvait en Algérie. D'Oran, il décidait de se rendre à Saïda et rapportait plus tard dans ses nouvelles parues sous le titre *Au Soleil *:

" J'ai donc pris, avec un billet pour Saïda, le petit chemin de fer à voie étroite qui grimpe sur les hauts plateaux.

Après quelques heures de route on atteint les premières pentes de l'Atlas. Le train monte, souffle, ne marche plus qu'à peine, serpente sur le flanc des côtes arides, passe auprès d'un lac immense formé par trois rivières que garde, amassées dans trois vallées le fameux barrage de l'Habra. Un mur colossal, long de cinq cents mètres, contient, suspendus au-dessus d'une plaine démesurée, quatorze millions de mètres cubes d'eau.

(Ce barrage s'est écroulé l'an suivant, noyant des centaines d'hommes, ruinant un pays entier. C'était au moment d'une grande souscription nationale pour des inondés hongrois ou espagnols. Personne ne s'est occupé de ce désastre français)".

On sent bien à travers cette description que Maupassant voyageait accompagné d'un guide touristique. Louis Piesse évoquait longuement le barrage de Perrégaux dans le guide Joanne de 1882, Itinéraire de l'Algérie: " En quittant Perrégaux, le chemin franchit l'Habra sur un pont en fer de 40 mètres et s'engage, par une montée, entre la route de l'Oued-El-Hammam à droite, et les berges escarpées de l'Habra à gauche; elle s'élève jusqu'au col des juifs,...

La route de Perrégaux à l'Oued-El-Hammam offre des sites très pittoresques. Le barrage de l'Oued-Fergoug est d'un effet saisissant: la voie longe sur ce point le magnifique lac formé par le barrage et se trouve comme suspendue sur le flanc d'un escarpement de rochers presque à pic.

C'est à Perrégaux que le touriste partira pour visiter le barrage (12 km). En suivant la route accidentée qui conduit à Mascara par Oued-El-Hammam, on aperçoit, longtemps avant d'y arriver, et se détachant sur un fond de montagnes boisées, une ligne blanche qui grandit immensément à mesure que l'on approche: c'est le barrage de l'Habra.

*Ce barrage construit au-dessous de la réunion de l'Oued-Hammam, de l'Oued-Tezou et de l'Oued-Fergoug, qui prend alors le nom de l'Habra, a une longueur de 478 mètres, y compris les 128 mètres du déversoir; sa hauteur est de 40 mètres; la partie bétonnée est de 7 mètres; enfin l'épaisseur de ce mur cyclopéen est de 38 mètres 90 cm à la base. L'eau arrêtée derrière le barrage forme un immense lac dont les bords semblent attendre des constructions, lac qui, se divisant en trois branches, remonte la vallée de l'Oued-Hammam pendant 7 km, celle de Taourzout pendant trois ou quatre, celle de l'Oued-Fergoug pendant 7. **Les flots qu'apportent les trois oueds sont troubles, mais ils se reposent dans le lac et ils en ressortent bleus.** La contenance du bassin est de 14 millions de mètres cubes. Cette eau s'écoule vers le bief inférieur par de puissantes vannes qu'un seul homme peut ouvrir au moyen d'un ingénieux mécanisme.*

En 1872, la construction du barrage réservoir de l'Oued Fergoug va changer la face de la région en apportant la fertilité dans une plaine brûlée par le soleil. A dater de 1875, le pays prospère rapidement.

Depuis cette époque, Perrégaux progresse sans cesse, la ville s'embellit, les monuments publics et les édifices privés dénotent un confort qui n'exclut pas un brin de coquetterie. Le jardin public est tracé avec un véritable goût artistique : ses allées plantées de caoutchoutiers, de ficus et d'autres essences convergent vers le centre où s'élèvent un bassin pourvu d'un jet d'eau et un kiosque à musique autour duquel des générations danseront. Les trottoirs des boulevards et des rues sont bordés d'arbres magnifiques qui transforment les chaussées en allées ombragées sous d'épais feuillages. On sent qu'il fait bon vivre dans cette charmante cité si hospitalière aux étrangers.

III.2 - Le Bassin versant de Fergoug :

Un bassin versant est l'ensemble des dénivellations du relief qui fusionnent en un système hydraulique unique délimitant un déversement superficiel.

Les caractéristiques morphologiques du bassin versant de la retenue du Fergoug sont : une superficie totale estimée à 8430 km² dont 7860 pour le bassin versant de l'Oued El Hammam et 570 pour celui de l'Oued Fergoug. L'altitude moyenne est 790 m avec comme altitude maximale de 1454 m.

Le relief est accidenté, les versants sont abrupts et le couvert végétal est clairsemé. Ce bassin versant est sous la dominance du climat de l'Atlas tellien dont la température moyenne est de 15,5 °C avec des écarts extrêmes allant de -9°C en hiver à +46°C en été. L'enneigement est en moyenne d'une semaine par an et les précipitations de moyennes de 450 mm par an.

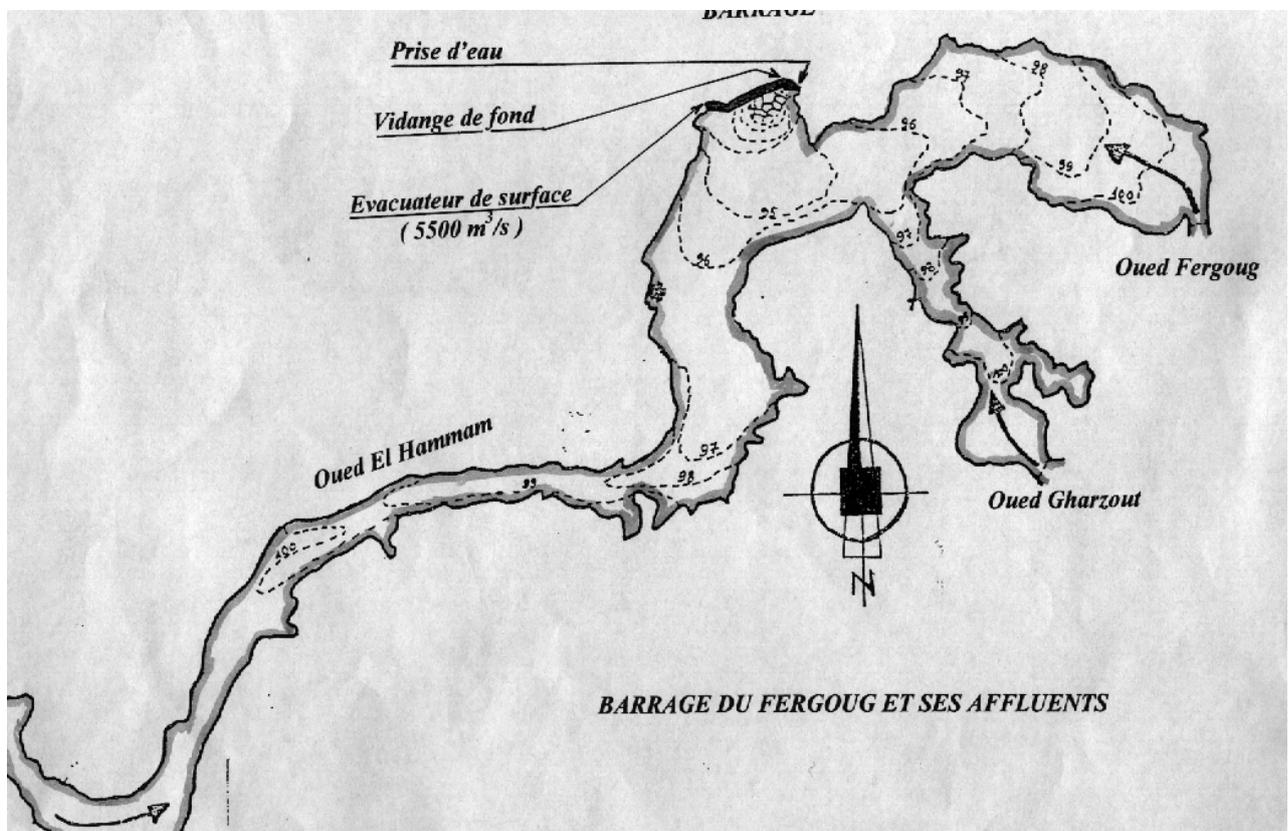


Figure N°11 : Le barrage du Fergoug, ses ouvrages annexes et ses affluents.

Les pluies torrentielles sont fréquentes et sont exprimées comme suit :

Fréquence	10 ans (décennale)	100 ans (centennales)	500ans (bimillénaire)
Hauteur	80 mm	120 mm	150 mm

Tableau N° 6: Fréquences des pluies du bassin versant de Fergoug

En Novembre 1927, une crue exceptionnelle a montré l'évolution suivante :

Date	24 Nov.	25 Nov.	26 Nov.	Total
Hauteur	14 mm	16 mm	160 mm	190 mm

Tableau N° 7: Evolution de la crue exceptionnelle de 1927

III.3 - Historique du barrage.

Il n'était pas envisagé de créer un centre de colonisation sans étudier au préalable le problème vitale de l'eau, dans une région où l'été est synonyme de sécheresse. La construction d'un barrage sur l'Habra en amont du futur centre de Perrégaux était déjà évoquée dans le procès verbal d'enquête du 14 avril 1853 sur la création du futur centre de Perrégaux:

« ... l'étude relative au barrage qui doit relever le niveau des eaux de l'Habra et les verser dans la plaine, n'est pas encore faite et sera commencée seulement cette année... des fonds sont alloués pour l'étude du barrage et des grands canaux d'arrosage au moyen desquels on pourra porter au loin les eaux de l'Habra, qui dès lors deviendront une cause de fertilité au lieu d'être une source d'infections et de maladies... Le village sera alimenté par les eaux de la rivière qui sont saines et ne sont nullement saumâtres. Ces eaux peuvent être amenées par les canaux d'irrigation très près du village et probablement sur le plateau même ...»

Alimentée par l'Oued Habra, la plaine de l'Habra était constituée de terres marécageuses qu'il fallait assainir et irriguer. Cette opération s'inscrivait dans le cadre d'un projet gigantesque, insufflé par les premiers colons installés à Perrégaux.

La construction du barrage dans la localité du Fergoug suscitée une grande polémique qui a été qualifiée d'historique : en effet, parmi les pionniers de 1863, on note un certain Dupré de Saint-Maur qui donna son nom au petit barrage situé au nord-ouest de Perrégaux. Cette même année, Monsieur Dupré de Saint-Maur, riche concessionnaire de la société de l'Habra, propose au conseil général la construction d'un barrage dans la plaine de l'Habra sur l'oued Fergoug. Le colonel Deligny, commandant la province, estime le projet peu urgent et inique. Dupré de Saint-Maur ne se décourage pas et ouvre une souscription dans l'écho d'Oran, afin de construire le barrage aux frais des volontaires. L'autorité militaire, s'estimant outragée, fit passer en justice l'instigateur du projet et l'imprimeur. Monsieur Dupré de Saint-Maur était concessionnaire dans la société de l'Habra. Il était aussi propriétaire de 2 000 hectares à Harbal près d'Oran. " *Je ne viens pas chercher fortune, affirmait-il, je viens ici risquer une fraction de la mienne. Il est digne de savoir exposer ses capitaux pour rendre productive une terre arrosée du sang de tant de Français* ".

Enfin la construction du barrage débuta en 1865.

L'ouvrage construit de 1865 à 1871, était un barrage-poids en maçonnerie hydraulique de 316 mètres de long flanqué en rive droite d'un mur de 30 mètres faisant un angle de 120° avec l'ouvrage central, et en rive gauche d'un déversoir de 125 mètres de long faisant un angle de 35° avec le prolongement de l'axe du barrage. Le déversoir était fait de deux murs verticaux réunis par un glacis en pente; sa crête était à 1,60 mètre en contrebas de la plate-forme du barrage. La hauteur au dessus du thalweg était de 35 mètres; la hauteur totale au dessus du point le plus bas des fondations était de 43 mètres, la largeur maximum des fondations atteignait 33 mètres. La capacité totale de la cuvette était évaluée à 30 millions de mètres cubes. Le déversoir est un des éléments nécessaires d'un barrage réservoir; son but est de servir à l'écoulement des eaux de crues lorsque le réservoir est plein. Il est construit en fonction du volume des grandes eaux. Sur l'Habra, le débit des crues était estimé entre 4 et 500 m³/s.

De nombreuses catastrophes sont survenues :

Le 10 mars 1872, une crue exceptionnelle estimée à 700 m³/s provoqua la rupture du déversoir en créant une brèche de 55 mètres de longueur sur 12 mètres de hauteur. Le débit d'eau sortant de la brèche fut évalué à 5600 mètres cubes par seconde et plus de 200 000 m³ de déblais furent entraînés. Il fut reconstruit sous forme d'un mur unique, profilé pour éviter les affouillements, basés sur de solides fondations après remplissage des excavations découvertes dans le rocher, et définitivement terminé en mai 1873.

Le 15 décembre 1881, le barrage cédait à nouveau. Une crue de 850m³/s emporta 125 mètres du barrage sur la rive droite. Deux cent cinquante personnes furent noyées, ponts, et maisons emportés par les flots déchaînés. La reconstruction du barrage dura deux années, de 1883 à 1885, avec modification du profil et coûta 1.300.000 de Francs. Sur la colline située sur la rive droite du barrage, on distingue une sorte de tour. Elle fait partie de " l'ingénieux mécanisme " décrit par Louis Piesse : le débit des eaux est réglé par deux énormes robinets et deux grandes vannes de chasse permettant d'évacuer les eaux en peu de temps. La tour située au sommet du mamelon est une cuve à eau où le liquide est élevé au moyen d'une pompe à bras. Cette eau est destinée au fonctionnement des deux presses hydrauliques qui commandent la manoeuvre des vannes rendue très facile puisqu'un seul homme peut alternativement les ouvrir et les fermer en quelques minutes.

Il avait plu toute la semaine et en ce vendredi 25 novembre 1927, le niveau de l'eau ne cessait de monter obligeant les responsables du barrage à ouvrir les vannes d'évacuation à leur débit maximum. Cette opération ne suffit pas à diminuer la pression qui s'exerçait sur le barrage-poids. En 22 heures et 20 minutes, le plan d'eau s'éleva de 27 m 85! Le samedi matin, à 10 h. 45, le barrage de l'Oued Fergoug, de 32 m de hauteur, se mettait à vibrer. Soudain le barrage fléchissait dans son milieu, s'ouvrait, et une énorme trombe d'eau jaillissait au point de rupture. Le barrage est rompu. Une brèche de 16 m de hauteur sur 200 m de largeur, s'est formée au milieu du barrage. Une vague gigantesque se précipite vers Perrégaux emmenant avec elle les cinq à six mille mètres cubes de maçonnerie arrachés au barrage. Le débit de ce raz de marée terrestre atteint 2500 mètres cubes à la seconde. L'ingénieur subdivisionnaire Avargues a pu prévenir par téléphone le maire de Perrégaux, Monsieur Pascal Serres, qui fit donner l'alarme. Les cloches de

l'église Saint-Martin résonnaient à tout-va ainsi que le sifflet du dépôt de chemin de fer. A Perrégaux, la population s'est réfugiée sur les hauteurs de la colline des planteurs, ou dans les étages des maisons qui lui paraissait être suffisamment solides pour résister à un tel cataclysme. Enfin, trois quarts d'heure après l'annonce de la rupture du barrage, les flots torrentiels déferlaient dans les rues de Perrégaux, dans un vacarme assourdissant et angoissant.

La vague, puissante et dévastatrice, emporte sur son passage le pont métallique du chemin de fer; au dépôt des chemins de fer de l'état, les locomotives et les wagons sont soulevés, renversés, transportés jusque dans les rues de la ville. Les routes sont coupées, les vergers arrachés, les récoltes anéanties. L'eau submerge et dégrade la route Perrégaux-Oran. Dans la ville, une cinquantaine de maisons n'ont pas résisté et se sont effondrées sous le choc et la poussée de cette force naturelle que l'on avait essayé de maîtriser. Dans les rues, la hauteur des eaux boueuses atteint deux mètres. Grâce à l'appel téléphonique de l'ingénieur du barrage, mais aussi du fait que la catastrophe se soit déroulée de jour, il n'y eut pas de victime à Perrégaux. On dénombra cependant quelques noyés dans la plaine, des indigènes essentiellement. Dans la plaine, la vague a perdu de sa puissance et sa hauteur n'est plus que d'un mètre. Sa puissance s'est affaiblie en rencontrant sur son parcours différents obstacles: les routes et les voies de chemin de fer surélevées de Perrégaux à Mostaganem et à Sahouria, ont fait office de barrages tout au long de sa progression. Finalement le flot s'étale sur 20 km de largeur, couvrant la plaine de l'Habra d'une épaisse couche de limon. En ville, l'eau s'est retirée. La boue et la vase ont recouvert les rues, ont envahi les caves et les rez-de-chaussées dont les planchers se sont écroulés. Les secours s'organisent. Le 32^e bataillon du génie de Hussein Dey, prévenu à 17 heures, envoie à Perrégaux, sur ordre du Général commandant le 19^e corps d'armée, un détachement constitué d'un chef de bataillon, de trois officiers et de 150 hommes. Le 28 novembre, le détachement est rejoint par des télégraphistes et des sapeurs du 45^e bataillon du génie. Le lendemain, le 29 novembre, la compagnie de pionniers du 1er Régiment Etranger arrive à Perrégaux et cantonne sur wagons. La légion Etrangère et une compagnie du 15^{ème} Génie remettent en état la voie entre Perrégaux et Bou-Henni. Le Génie travaille à la remise en état de la gare de l'Etat.

Il pleut depuis huit jours en ce 30 décembre 1927; à Perrégaux, l'oued Habra coule à pleins bords. Le pont du chemin de fer menace d'être emporté d'un moment à l'autre. Par crainte d'une catastrophe, la compagnie P.L.M. a cessé dès le matin toute exploitation entre Perrégaux et Bou-Henni. Elle a en conséquence arrêté à 9h50, en gare de Bou-Henni, l'express Oran-Alger ; le 31 décembre une nouvelle crue enlève le pont mixte constitué de route et rail sur 55m de longueur et 15 de large. Les télégraphistes rétablissent les communications, en particulier sur la ligne Perrégaux Mascara où elles sont coupées sur 2 km. Le 31 décembre, le barrage de Saint-Maur, à 2 Km en aval de Perrégaux, cède à son tour.

Dès le 31 décembre, on décide de construire sur l'Habra deux ponts distincts. A l'emplacement de l'ancien pont, on projette de construire 3 travées de pont Pigeaud, expédiées de métropole. Mais la rivière emporte une des deux culées du pont le 6 janvier 1928, puis l'autre le 26 janvier. La brèche atteint alors 370 m. Le pont portant le nom de pont Tesson, en béton armé, a tenu bon malgré une brèche de 16 mètres derrière la culée de la rive droite. En 10 jours, les sapeurs réalisent un pont sur

pilotis, seul lien de communication terrestre avec Oran en attendant les ponts Pigeaud. Le premier pont Pigeaud est construit 500 m en amont de l'ancien pont, sur une partie de l'oued dont la largeur est de 77m. Les travaux débutent le 15 janvier et le premier pont est terminé le 23 mars 1928. Le 29 mars 1928, le pont route construit sur l'Habra par le 32^e bataillon est terminé et la compagnie PLM reprend de la ligne Alger-Oran avec transbordement à Perrégaux. Quant aux Perrégaulois, l'heure était à la reconstruction et au nettoyage de la ville envasée par des tonnes de boue et de débris de toutes sortes.



Photo N°7: Le mur du barrage avant rupture (1927)

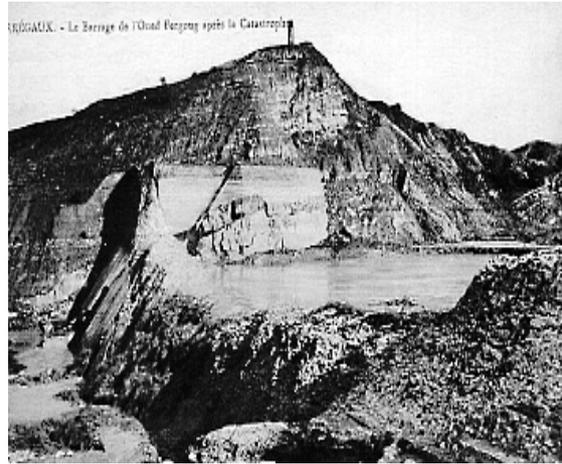


Photo N°8: Le barrage après sa rupture (1927)

Situation actuelle du barrage :

Reconstruit au cours des années 1967 à 1969, l'ouvrage de Fergoug est aujourd'hui un barrage en terre, avec un noyau étanche et un déversoir muni de vannes.

Depuis la modification de son profil, le barrage de Fergoug dont la capacité de stockage était de 17 millions de m³ en 1970, a été soumis à un phénomène d'envasement progressif. Au bout de sept années (en 1977) sa capacité a chuté à 9.67 millions de m³; soit un taux annuel d'envasement dépassant un million de m³. Après une première opération de dragage (1984-1986) où plus de 10 millions de m³ ont été récupérés par dragage et largage de vases, l'envasement du barrage est estimé aujourd'hui à plus de 14 millions de m³. Les photographies N°9 à N°12 montrent l'état d'envasement de la cuvette (la poussée de végétaux dans la cuvette traduit la perte des profondeurs).

En 2005 une deuxième opération de dragage est lancée visant à récupérer une partie des volumes perdus tout en connaissant les conséquences environnementales que cela implique.



Photo N°9 : Vue de la digue en 2006



Photo N°10 : La cuvette envasée



Photo N°11: La cuvette envasée



Photo N°12: La cuvette envasés (sur Oued El Hammam)

III.4 – Géologie du site, d'après (R. Belazreuk et H. Arents, 1999).

Le but de l'étude géologique est de : dégager le site d'implantation, rechercher les zones des matériaux d'emprunt, définir la composition lithographique et les relations spatiales entre les couches de terrains sous-jacents, estimer sommairement les propriétés du terrain de fondation et déceler les variations des niveaux d'épaisseur (leur épandage éventuel et les changements latéraux progressifs)...

Géologie de la région de Perrégaux :

La région de Mohammedia (Perrégaux) est de prépondérances marneuse du Tortonien et argileuse de Helvétien, les monts qui succèdent sont de formation récente due à plusieurs épisodes tectoniques, consécutivement à la montée des trias qui s'est opérée assez récemment dans une ligne de démarcation.

Le départage de la zone de calcaire aptien et albien que vers la rive droite, la confirmation est marneuse du sénonien encaissée dans le grès pliocène, plus au nord la prédominance des marnes s'alternent avec des traînées d'alluvions anciens.

Géologie du bassin versant du barrage de Fergoug :

Cette cuvette est sise dans une zone à tendance marneuse et marneuse gréseuse du sénonien inférieur, l'étendue de la rive gauche présente une composition complexe avec un gîte éventuel de fossiles, dans cette étendue le grès du miocène moyen est localisé dans un espace assez restreint du côté du confluent,

un faible gisement de poudingue d'argile et de basalte apparaît sur la rive droite, plus à l'amont la région est dominée par des marnes du Sénonien et des grès du Miocène supérieur.

La stratigraphie :

Les principaux étages intéressants le site du barrage sont les suivants :

Le barrage actuel repose entièrement sur les grès du Miocène inférieur, l'étage comprend deux niveaux : les argiles rouges et poudingues de base et les grès calcaireux du Cartenien.

Le Cartenien est transgressif et discordant sur les marnes et les calcaires marneux de Crétacé supérieur qui effleurent à quelques centaines de mètres en amont de l'ancien barrage et en rive droite, le Cartenien est subdivisé en cinq niveaux :

Niveau 1 : A la base du cartenien, on trouve des couches rouges argileuses, souvent gypseuses ou béchiques (bréchet de base), leur épaisseur varie de 1 à 7 mètres.

Niveau 2 : Sur les argiles rouges viennent des grès jaunâtres tendres à ciment calcaire, l'épaisseur moyenne est de 3 mètres.

Niveau 3 : Il est essentiellement argileux et argilo sableux avec des passages des grès argileux, l'épaisseur varie de 3 à 8 mètres.

Niveau 4 : Il est formé de gros bancs de grès massif, il s'agit d'un grès grossier jaunâtre à ciment argileux ou grès à ciment calcaire en gros bancs de 1 à 2 mètres d'épaisseur, séparés par des horizons argileux peu épais. Les bancs peuvent être observés à l'affleurement : en rive droite juste à l'amont de l'ancien barrage et en rive gauche au pied du mur et à l'aval.

Niveau 5 : Il a une épaisseur de 40 à 50 mètres et il est constitué par une alternance monotone de bancs de grès massif du niveau 4 par 10 à 12 mètres de grès et de marnes sableuses beiges, les grès sont plus abondants.

Les formations récentes :

Terrasses: Reposant sur l'ancienne terrasse conglomératique, on trouve des sédiments qui forment la haute terrasse de l'oued (en aval et en rive droite, on a pu mettre en évidence une basse terrasse analogue à la précédente, située topographiquement à 10 ou 15 mètres plus bas).

Alluvions: Les alluvions récentes sont peu développées au niveau de l'ouvrage actuel mais s'étendent plus largement en aval. Elles sont constituées de galets de taille variable de grès ou de calcaire dans les sables et vases meubles.

Eboulis: Ils se sont formés à partir du grès Cartenien actuel, ils recouvrent les deux versants. Au pied de l'ancien déversoir, ils constituent une large plage de grès fins (zone de dépôt calme).

Tectonique: Le Cartenien a un pendage variable, assez fort dans le nord - nord ouest ; c'est-à-dire vers l'aval, on peut relever des valeurs extrêmes de l'ordre de 40° mais généralement, il a une valeur moyenne de 20°.

Comme le cartenien les marnes grises bleues ont un pendage vers l'aval difficile à chiffrer, les terrains postérieurs au Miocène sont sub-horizontaux et n'ont pas été affectés par la tectonique.

III.5 – Conclusion

Dans son état actuel, le barrage présentant un fort taux d'envasement, ne répond plus aux fonctions initiales pour lesquelles il fût conçu. Son historique met en évidence l'importance vitale d'un ouvrage de retenue d'eau pour la région à caractère agricole et pastoral. L'inexistence d'autre site d'implantation pour un autre ouvrage de remplacement, ni d'autres moyens de stockage de l'eau impose la nécessité de récupération des volumes perdus par dragage.

L'étude géologique des différentes formations dans le bassin versant apporte les informations nécessaires sur la nature et le comportement prévisionnel des particules piégées dans la cuvette du barrage.

CH. IV : Le devenir des sédiments issus des opérations de désenvasement.

Parmi les régions les plus touchées par l'érosion et l'envasement des retenues, l'Algérie figure parmi les pays les plus fortement défavorisés. Certains barrages ont été complètement abandonnés, d'autres posent actuellement de grandes inquiétudes et finiront par périr si des mesures urgentes ne sont pas entreprises. Remini (2002) donne pour l'année 2000 un volume cumulé de plus de 650 millions de m³ de sédiments se trouvant dans 98 barrages d'Algérie. L'auteur ajoute que l'expérience singulière de l'Algérie la place au premier rang mondial en matière de lutte contre l'envasement. Plusieurs procédés de lutte ont été utilisés à savoir : le reboisement des bassins versants, la surélévation des digues, la construction de barrages de décantation, l'utilisation de barrages à onde de chasse le dragage...

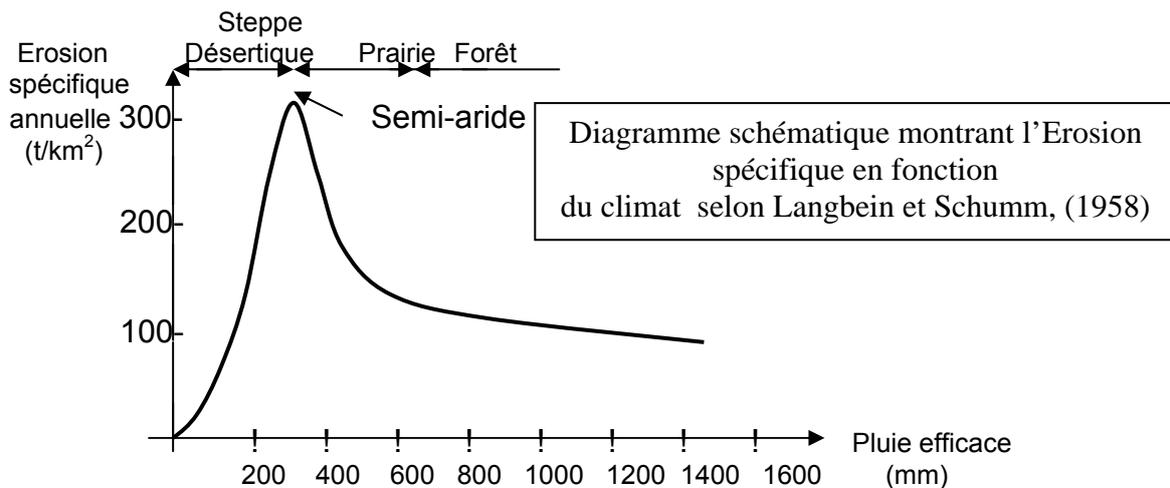


Figure N°12 : Situation climatique de l'Algérie (Semi-aride = Erosion max.).

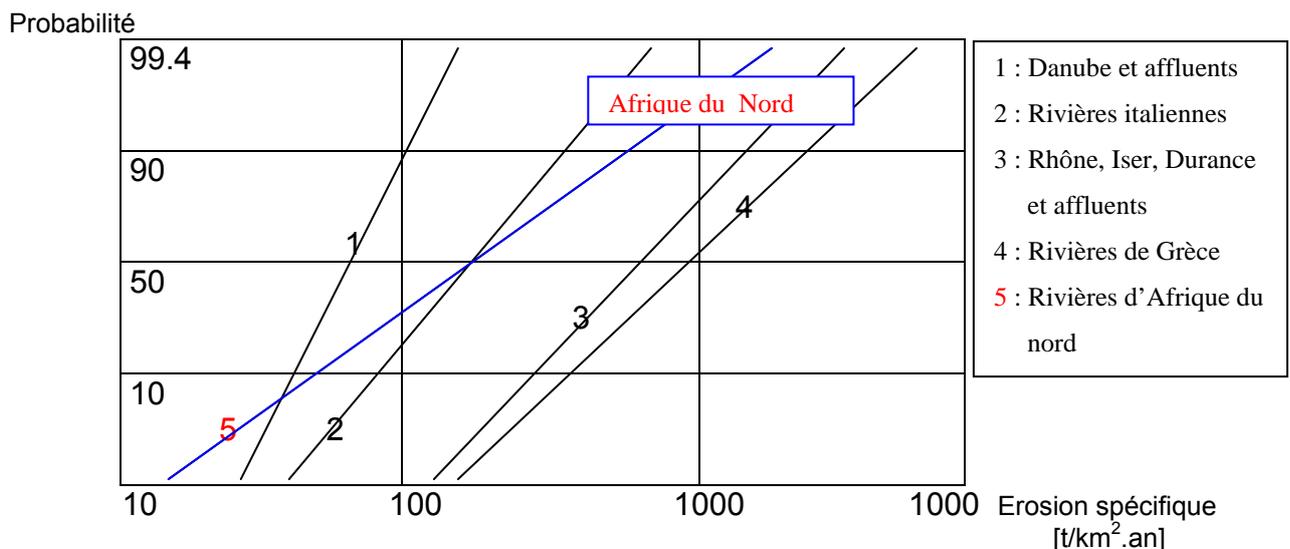


Figure N°13 : Distribution de l'érosion pour différents bassins versants (Demmak 1982).

Les deux figures, N°12 et N°13, montrent la particularité des cours d'eau d'Afrique du Nord : l'érosion est très variable selon les périodes et les sites, ce qui complique les études globales. Chaque site doit être considéré comme isolé. L'Algérie au climat semi-aride est confrontée particulièrement aux conséquences de l'érosion.

IV.1- Entraînement des sédiments en aval.

De 1986 à 1989 un volume de 10 millions de m³ de vase a été dragué par drague suceuse. Ce volume a été pompé puis transporté à l'aide de conduite forcée jusqu'à une aire de stockage – rejet située en aval de la retenue. La plaine de l'Habra en aval du barrage, a été modifiée par l'entraînement et l'accumulation de ces vases.

Depuis sa construction, le barrage de Perrégaux a transformé la région de la grande plaine de l'Habra. De vastes régions défrichées ont été transformées en terres agricoles très fertiles améliorées par la maîtrise de l'irrigation. Mais d'autre part, les différentes ruptures de la digue ont entraîné l'accumulation des boues et leurs dépôts successifs ont été la cause de la formation de zones marécageuses.

Depuis la reconstruction du barrage et sa nouvelle mise en eau en 1970, le barrage résiste mieux aux apports liquides des crues. Malheureusement les particules solides se retrouvent piégées dans la cuvette et accélèrent ainsi l'envasement.

Suite aux dragages, les matériaux déposés sans protection adaptée sont resoumis à l'érosion depuis leurs aires de stockage et leur entraînement vers la plaine de l'Habra continue encore de façon spectaculaire. Les photographies N°16 et N°17, prises à l'embouchure de la Macta montrent l'ampleur du phénomène d'érosion – entraînement des vases.



Photo N°13 : Rejet de la vase draguée.



Photo N14 : Entraînement de la vase déposée

en aval du barrage

IV.2 - Les conséquences environnementales.

La situation écologique est qualifiée de catastrophique. Nous énumérons ci-après les principaux désordres apparus:

- Dépôts et consolidation des vases dans le lit du cours d'eau.

- Le relèvement des lits a provoqué l'inondation des berges aux moindres pluies.
- La consolidation des particules solides a abouti à l'obturation des zones d'infiltration qui alimentent les nappes souterraines d'où l'assèchement des sols sous-jacents.
- Transformation des terres agricoles en marécages.
- Disparition des vergers (principalement les agrumes et les oliveraies) sur toute la région de Perréaux.

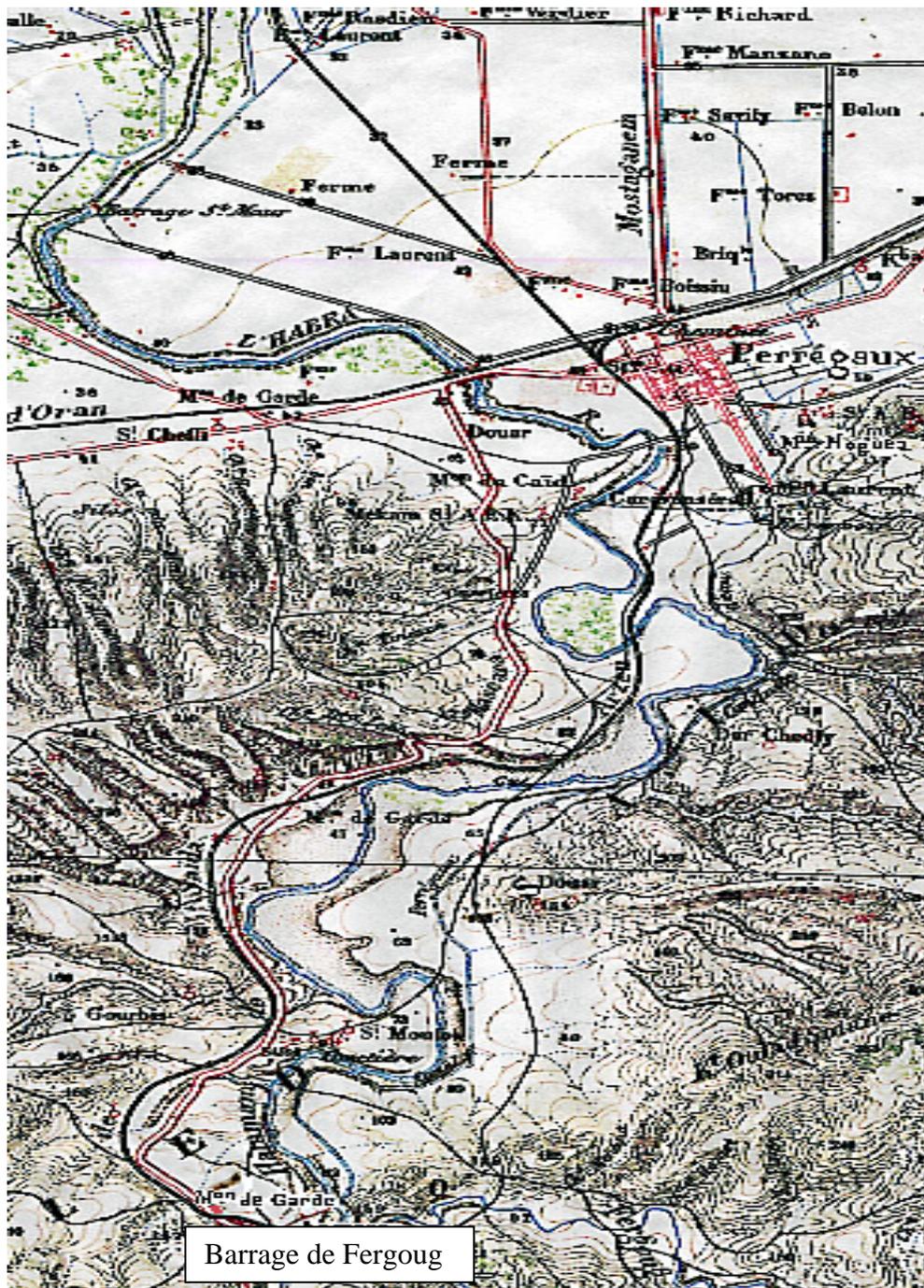


Figure N°14 : Cours d'eau en Aval de Fergoug s'écoulant vers l'Habra.



Photo N°15 : Dépôt de la vase sur les berges des cours d'eau.



Photo N°16: L'Oued et la plaine de la Macta.



Photo N°17: Etendue des zones touchées par le dépôt des sédiments.

IV.3 – Conclusion.

Les différentes photographies présentées, donnent un aperçu réel de la situation aval du barrage de Fergoug. Il apparaît clairement que la plaine de l'Habra ainsi que celle de la Macta jusqu'à son embouchure, sont particulièrement touchées par l'entraînement des particules fines issues de la retenue de Fergoug. Les constats des retombées de l'entraînement des vases et de leur dépôt montrent l'ampleur des problèmes posés. Les solutions à rechercher sont complexes mais urgentes vu que l'érosion continue de crue en crue à accentuer les désordres.

CH.V – Propriétés géomécaniques des sédiments de la retenue

En prévision des opérations de dragage, du choix des moyens et méthodes appropriées, la connaissance de l'état physique des matériaux en place est nécessaire. L'étude géotechnique des sédiments déposés, réalisée sur des sondages effectués dans la retenue de Fergoug a apporté des données précises sur leur état physique. Les sondages ont montré la grande variabilité de l'épaisseur de l'envasement. Les prélèvements ont été conduits de façon à pouvoir opérer sur des échantillons intacts (prélevés sur les carottes) ou peu remaniés. L'identification et la caractérisation géotechnique des sédiments prélevés, ont été menées à partir d'essais normalisés (teneur en eau, masses volumiques, analyse dimensionnelle, limites d'Atterberg, mesure de la cohésion non drainée et de l'angle de frottement interne). La synthèse de ces données et leur interprétation ont mis en évidence deux corrélations, l'une entre « l'indice de liquidité et la cohésion », la seconde entre « l'indice de plasticité et l'angle de frottement interne ». Cet ensemble de résultats permet une meilleure approche des moyens à mettre en œuvre pour réaliser d'autres opérations de dragage et le stockage des produits récupérés.

V.1- Propriétés géomécaniques des sédiments en place.

La distribution des sédiments rencontrés dans les retenues est un phénomène complexe. Les conditions de tassement et de consolidation des dépôts sont influencées par plusieurs facteurs ; la concentration du débit solide qui varie en fonction du climat, de la géologie et de la couverture végétale, de la hauteur du niveau d'eau dans la barrage, la nature des matériaux transportés ...

Dans le but de déterminer la fréquence des dragages, il est nécessaire aux exploitants de connaître la répartition spatiale la plus exacte possible des sédiments dans la retenue afin d'éviter les problèmes d'engorgement voire l'obturation des bouches de prise d'eau.

V.1.1- Etude des sondages.

L'E.N.R.B. (Entreprise Nationale de Réalisation des Barrages) a réalisé en 1984, en prévision du premier dragage de la retenue de Fergoug, 12 sondages profonds (entre 6 et 28 m), localisés sur la figure n°15, avec l'objectif d'obtenir un échantillonnage réellement caractéristique des sédiments déposés dans la retenue.

A partir des résultats d'essais de laboratoire systématiques normalisés, notre analyse s'est intéressée aux paramètres d'état physique et au comportement mécanique. Ce sont principalement :

- la teneur en eau naturelle,
- la mesure du poids volumique (à l'état sec et à l'état humide),
- les analyses dimensionnelles (granulométrie, sédimentométrie),
- les limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité ; indices de plasticité et de liquidité),
- la mesure de la cohésion intacte non drainée,
- la détermination de l'angle de frottement interne.

V.1.2 – Identification des sédiments.

D'un point de vue descriptif sommaire, les sédiments rencontrés sont essentiellement constitués de particules fines de la taille des argiles ; on peut rencontrer localement des passages beaucoup plus grossiers, allant jusqu'à des graves sableuses ou plus couramment des passages sableux.

V.1.2.1 - Identification physique.

Nous disposons de 131 analyses dimensionnelles effectuées sur les échantillons provenant de l'ensemble des sondages réalisés sur la retenue. La synthèse des résultats de ces analyses est présentée sous forme de courbes granulométriques groupées en familles. Nous avons mis en évidence trois principales familles de sédiments : argiles sablo-limoneuses, argiles sablo-graveleuses et sables argilo-graveleux. Il s'agit d'argiles au sens granulométrique du terme, c'est-à-dire des « argiles G » (figure N°16).

Ces sédiments sont principalement constitués par un mélange « *hydroplastique, organo-minéral cohésif, continu et rigide, susceptible de thixotropie, fait d'eau et de particules mal classées, appartenant aux argiles G, aux poudres et sablons, et aux sables et graviers. Ce milieu est le siège d'une intense activité microbiologique* » (Lucas, Cros et Lang, 1976).

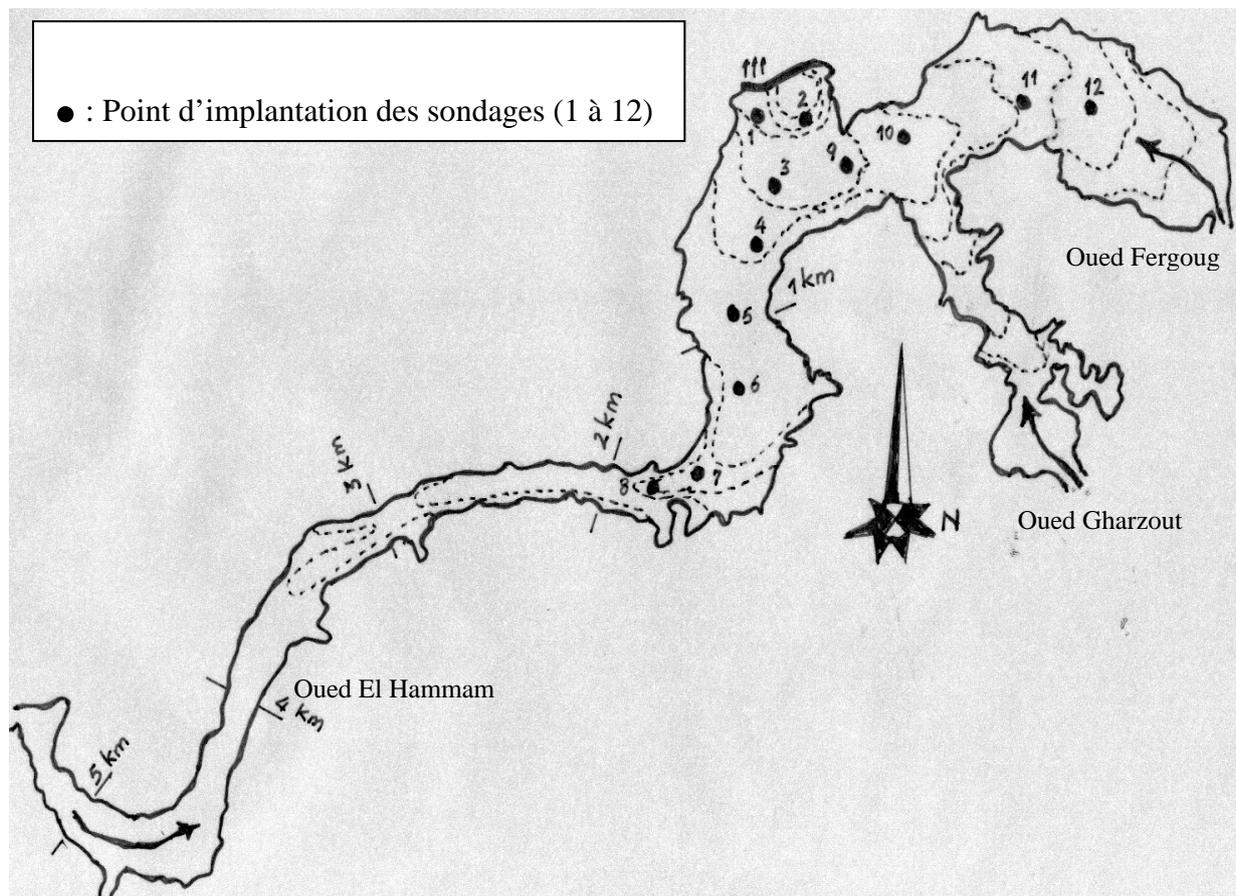


Figure N°15 : Implantation des 12 sondages.

- Les points 1 à 12 représentent la localisation des 12 sondages. Dans la figure N°25, ces mêmes points sont notés S1 à S12.

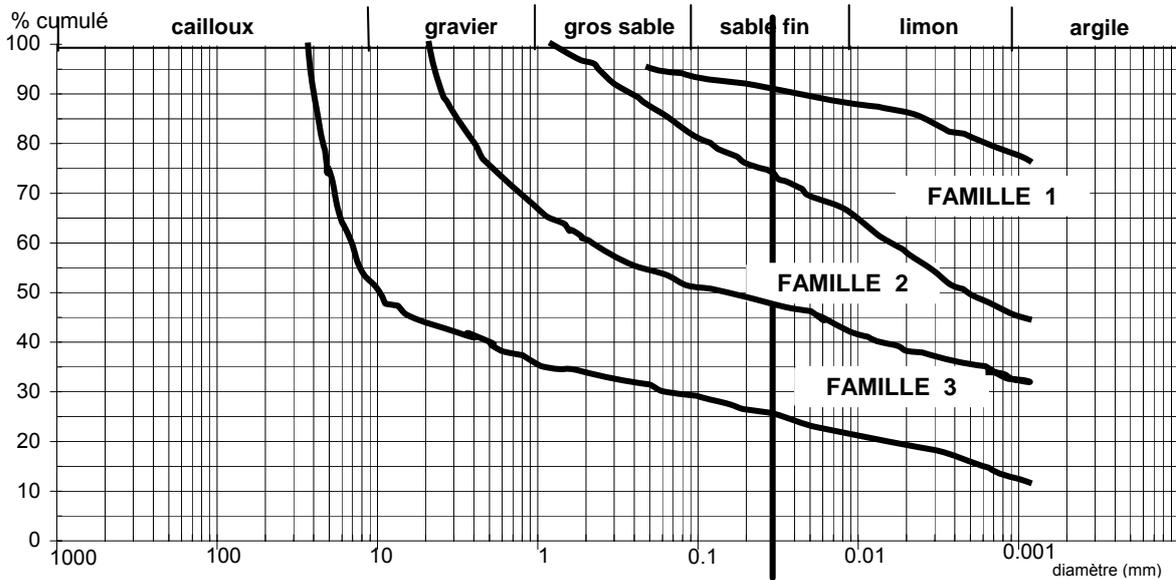


Figure N°16 : Synthèse des analyses dimensionnelles.

Les argiles sablo-limoneuses correspondent à la famille 1 (environ 85% des analyses).

Les argiles sablo-graveleuses correspondent à la famille 2 (5% des analyses).

Les sables argilo-graveleux correspondent à la famille 3 (10% des analyses).

La figure N°17 (Diagramme de plasticité) montre l'appartenance et la répartition des échantillons issus des sondages. Deux classes de dénomination émergent : argiles peu plastiques Ap et argiles très plastiques At. La presque totalité (> 95%) des échantillons est proche de la ligne A et se répartit de part et d'autre de la ligne des 50% (W_L).

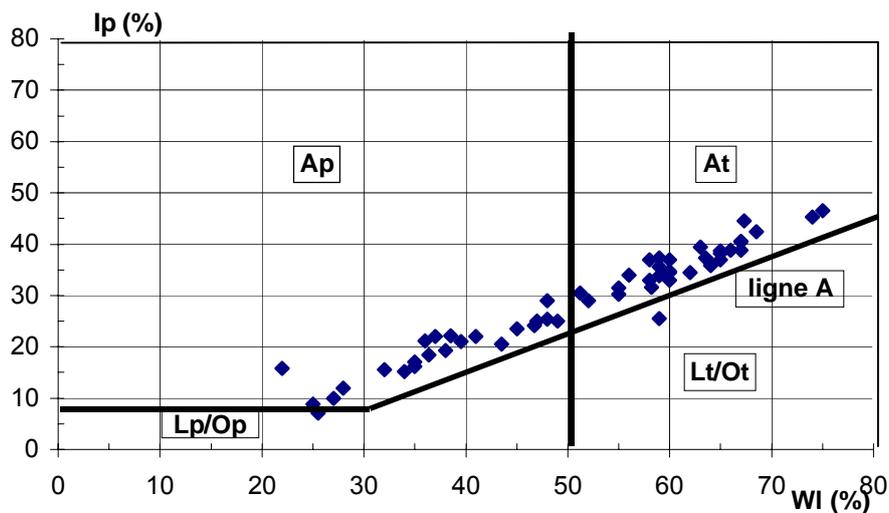


Figure N°17 : Diagramme de plasticité de Casagrande.

Selon les résultats représentés sur la figure N°17, il n'apparaît pas de localisation préférentielle pour la fraction inférieure à 400 µm (Limites d'Atterberg) des sédiments prélevés par sondage dans la retenue. Cependant à partir du diagramme de plasticité, nous pouvons mettre en évidence une relation entre l'indice de plasticité I_p et la limite de liquidité W_L :

$$I_p = 0,72 W_L - 8 \quad (18)$$

Les mesures de la teneur en eau naturelle, réalisées sur les carottes de sondages, montrent que les valeurs diminuent en fonction de la profondeur Z (figure n°18). Nous appelons « profondeur Z » la longueur du prélèvement (sondage), la cote zéro (0) est celle de l'interface eau-sédiment. La valeur de la teneur en eau reste assez élevée, en moyenne 65 % jusqu'à 6 – 7 m, pour atteindre environ 25 % à partir de 12 – 13 m de profondeur. La variabilité des valeurs de la teneur en eau naturelle peut s'expliquer par des changements de la nature des sédiments, et par leur répartition spatiale des constituants et leur état de consolidation des sédiments. Les variations lithologiques, verticales ou horizontales, peuvent en effet être plus ou moins brutales, ce qui entraîne des modifications conséquentes tant du point de vue dimensionnel, que des valeurs de la liquidité (passage d'une phase fine à une phase plus grossière, et réciproquement). La nature de ces sédiments est, bien entendu, directement liée aux apports en matières solides (issus du bassin versant) et à la dynamique sédimentaire dans la retenue.

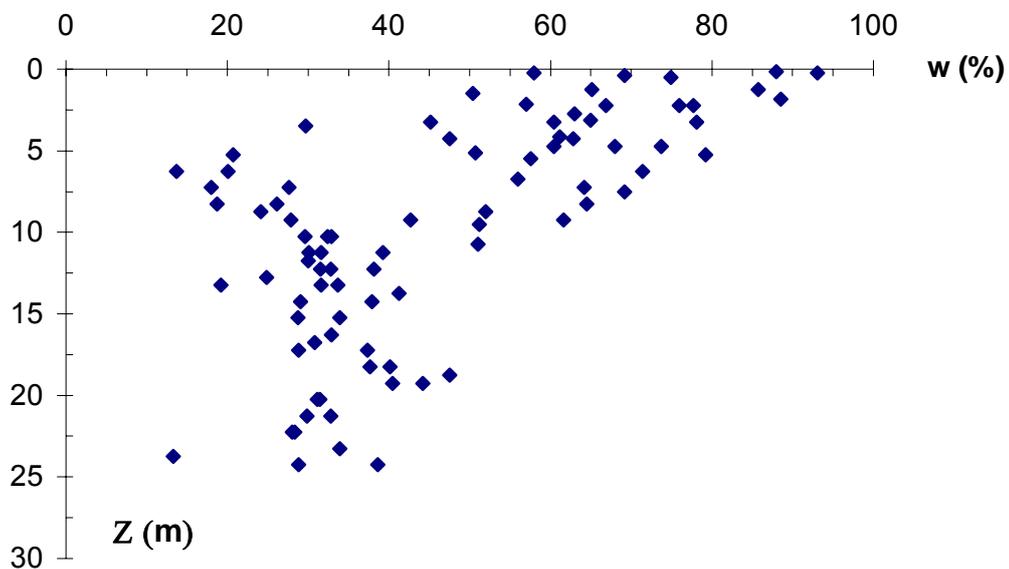


Figure N°18 : Variation de la teneur en eau naturelle w des sondages en fonction de la profondeur Z .

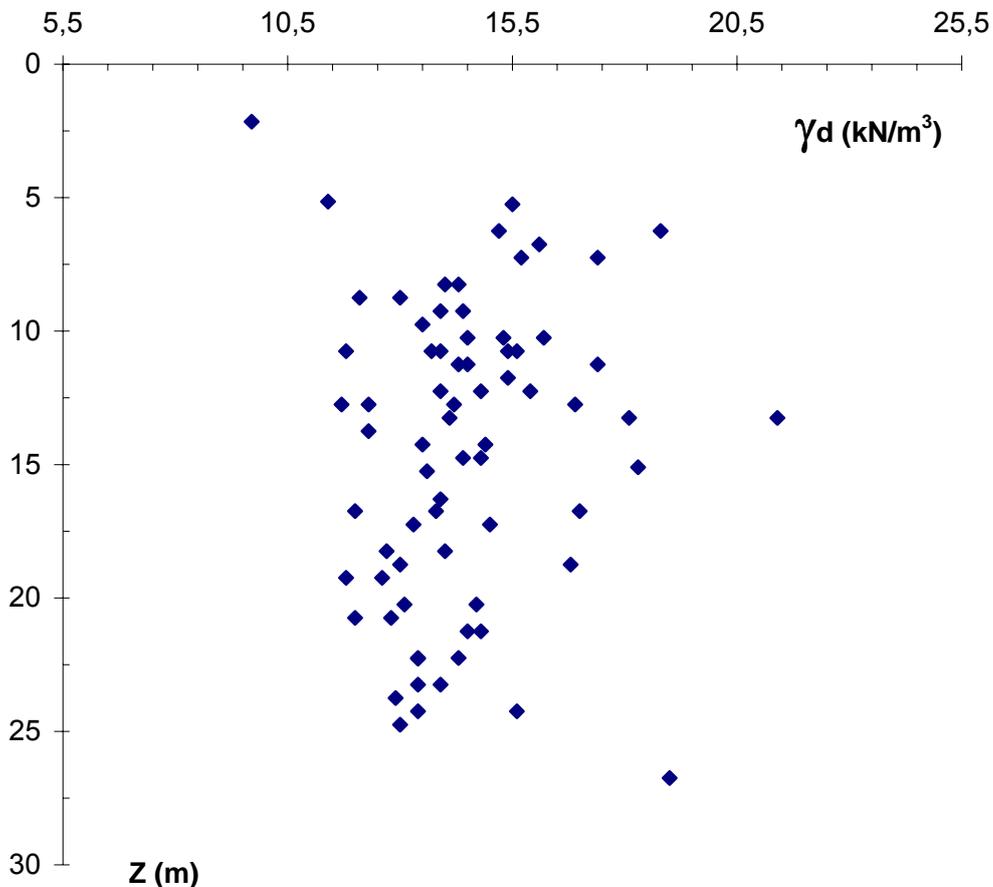


Figure N°19 : Variation du poids volumique sec en fonction de la profondeur.

Les valeurs des poids volumiques secs et humides mesurés sur les sédiments prélevés lors des sondages sont représentés en fonction de la profondeur (figures N°19 et N°20). L'analyse de ces résultats montre une variabilité dans la répartition des valeurs des poids volumiques, avec globalement une tendance inverse de celle observée pour les teneurs en eau naturelle, c'est-à-dire une augmentation progressive des valeurs avec la profondeur. Le poids volumique sec passe d'environ 10 kN/m³ en surface, à 16 kN/m³ vers 25 m.

Dans le cas du poids volumique humide, pour les mêmes profondeurs, la variation est moins importante et comprise entre 16 kN/m³ en surface à 19 kN/m³ à 25 m. La variabilité des valeurs semble moins marquée pour le poids volumique sec que pour le poids volumique humide. Cette constatation est vraisemblablement à mettre en relation avec la répartition spatiale et les caractéristiques dimensionnelles des constituants et l'état de consolidation des sédiments.

V.1.2.2 - Paramètres mécaniques : cohésion et indice de liquidité.

Du point de vue du comportement mécanique, les valeurs de la cohésion non drainée ont été obtenues à partir d'essais de cisaillement rectiligne à la boîte (cisaillement direct) réalisés sur des sédiments prélevés en sondage. La figure N°21 regroupe l'ensemble des valeurs au pic de cette cohésion (C_u). De la surface du sédiment jusqu'à 10 m de profondeur, la cohésion est pratiquement inexistante.

A partir de 10 m, les valeurs augmentent de façon assez régulière, même si la variabilité reste importante. Entre 15 et 25 m, les valeurs se répartissent entre 12 et 65 kPa. Comme pour les paramètres décrits auparavant, la valeur de la cohésion non drainée est représentative de l'état physique et dimensionnel des sédiments ainsi que de leur état de consolidation.

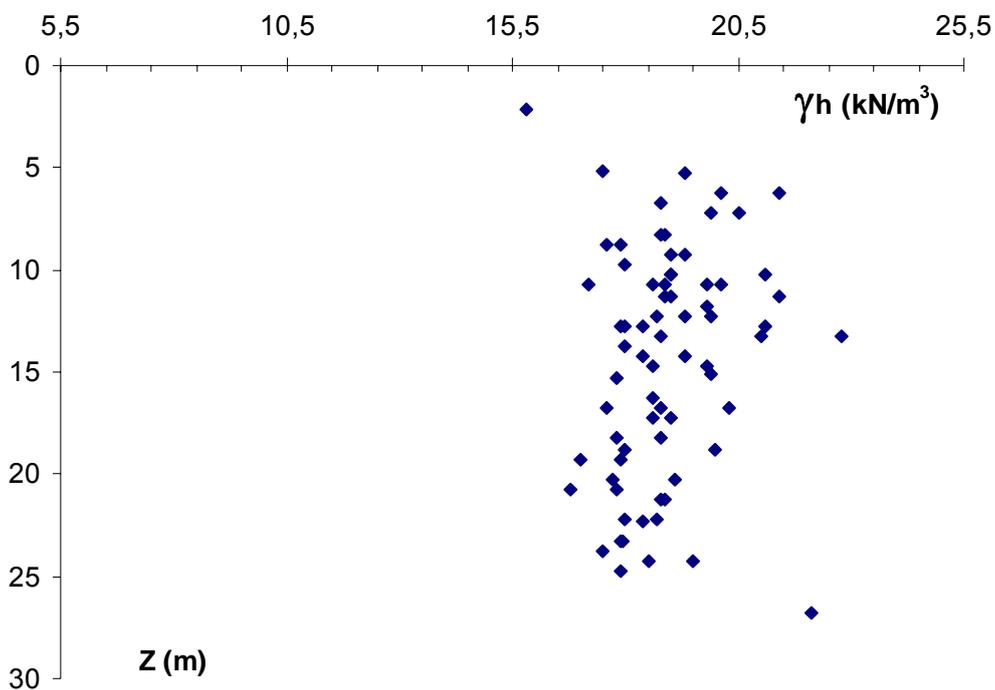


Figure N°20 : Variation du poids volumique humide en fonction de la profondeur.

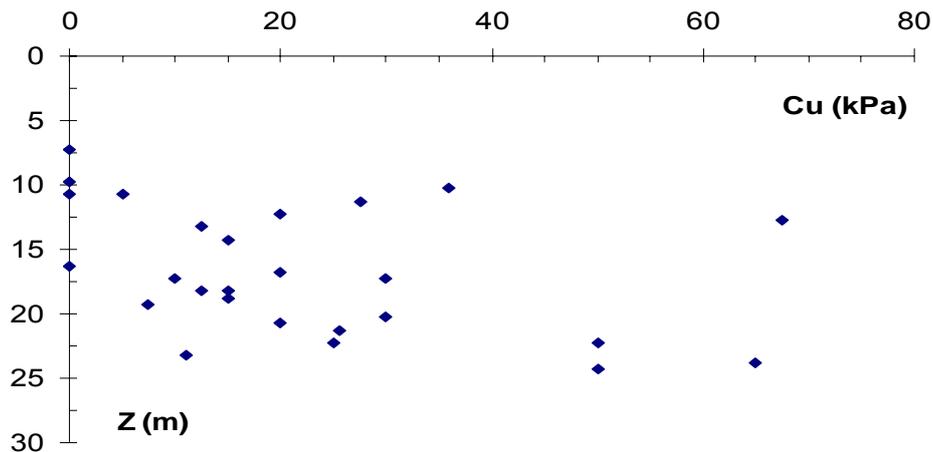


Figure N°21 : Variation de la cohésion intacte au pic (Cu) en fonction de la profondeur Z.

La figure N°22 montre l'évolution de l'indice de liquidité avec la profondeur pour l'ensemble des sondages. L'indice de liquidité (I_l) est défini par la formule :

$$I_l = (w - w_p) / I_p \quad (19)$$

où w est la teneur en eau naturelle à l'état intact, w_p est la limite de plasticité et I_p est l'indice de plasticité.

L'utilisation de cet indice de liquidité est préférable à celui de l'indice de consistance [$I_c = (w - w_l) / I_p$], w_l étant la limite de liquidité. En effet, l'essentiel des sédiments prélevés est dans un état physique proche de l'état liquide, c'est-à-dire proche de l'état de vases récentes.

Les valeurs de l'indice de liquidité montrent une grande variabilité. Nous remarquons que la tendance la mieux marquée correspond à une diminution de l'indice de liquidité en fonction de la profondeur. C'est-à-dire que la consistance augmente progressivement à partir de la surface. Cependant, nous ne pouvons pas ignorer la présence d'une évolution à tendance inverse, même si celle-ci est moins marquée. Ces deux observations ne sont pas contradictoires : de même que pour la cohésion non drainée, les valeurs de l'indice de liquidité correspondent à l'acquisition par les sédiments, de nouvelles propriétés physiques et mécaniques qui sont à relier au début de la phase de consolidation primaire.

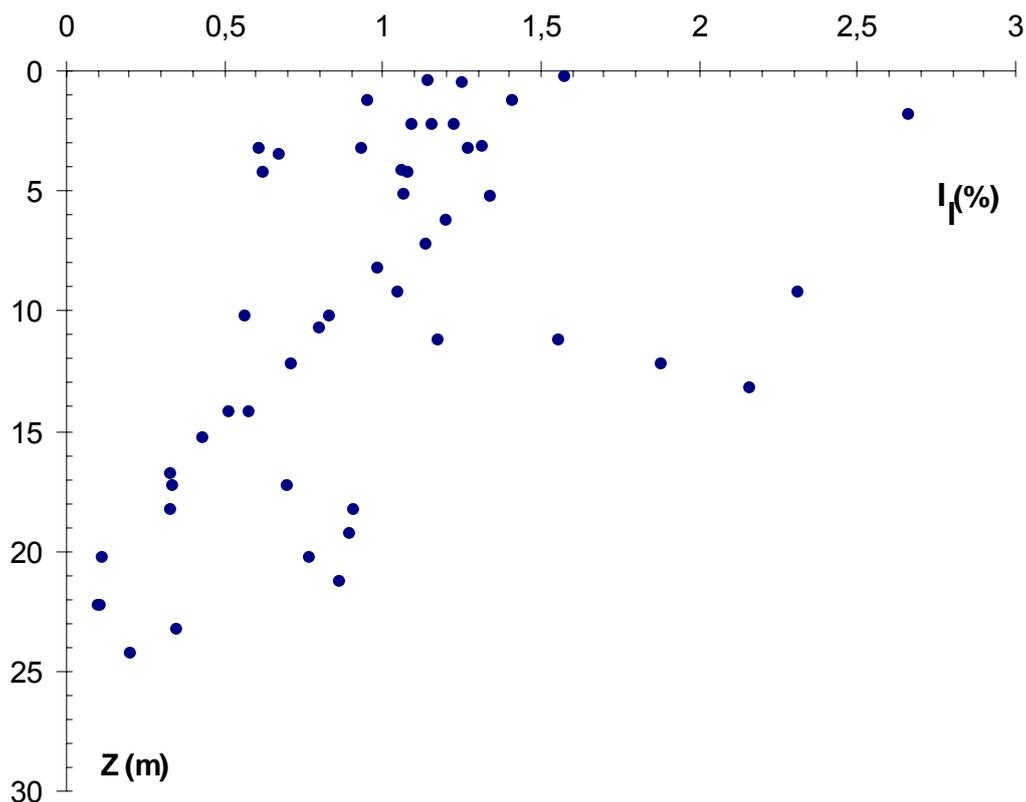


Figure N°22 : Indice de liquidité I_L en fonction de la profondeur Z .

V.1.3 – Description de l'état des matériaux.

A partir des résultats précédents, nous avons recherché quels étaient les paramètres définissant les états et intervenant dans la prévision du comportement des sédiments, avant et après dragage. Sur le site de la retenue de Fergoug, la nature des apports en matières solides, intervenus depuis la réalisation des sondages précités et des dragages qui ont suivi, n'a pas subi de variations conséquentes. *A priori*, nous pouvons penser que les sédiments de l'envasement actuel, sur la même zone, auront un comportement analogue ou voisin (Rais et Abidi, 1989). Pour les mêmes raisons, nous pouvons penser que les propriétés de ces sédiments, une fois dragués, provoqueront sur l'environnement, les mêmes effets que ceux engendrés par les opérations antérieures. De plus, nous pouvons même craindre une amplification de ces effets. Enfin, la nouvelle analyse des données que nous proposons ici, doit aboutir à une meilleure approche des conditions de dragage et de stockage.

Afin de mettre en évidence les facteurs intervenant directement sur le comportement des sédiments d'envasement, nous avons analysé les liens entre les paramètres d'état physique (indice de liquidité, indice de plasticité) et les paramètres mécaniques (cohésion non drainée et l'angle de frottement interne).

Il est intéressant de comparer l'évolution de l'indice de liquidité avec celle de la cohésion au pic (figure N°23) et d'autre part, celle de l'angle de frottement interne ϕ

(par essais de cisaillement direct) des sédiments avec l'indice de plasticité (figure N°24). L'étude de l'ensemble des données de sondages pour ces couples de paramètres, a montré que les relations linéaires suivantes étaient possibles.

$$I_l = -0,013 C_u + 0,86 \quad R = 0,33 \quad (20)$$

$$I_p = -0,88 \varphi + 31,62 \quad R = 0,61 \quad (21)$$

R est le coefficient de corrélation.

Dans le cas de la relation (20), la valeur du facteur de corrélation est relativement faible ($R = 0,33$), ce qui explique la dispersion importante des valeurs supérieures à 0,5 de l'indice de liquidité (Figure N°23). Toutefois la corrélation est meilleure lorsqu'elle est calculée pour des valeurs d'indice de liquidité compris entre 0 et 0,5 comme nous pouvons le voir sur la relation suivante :

$$I_l = -0,14 \ln C_u + 0,69 \quad R = 0,7. \quad (22)$$

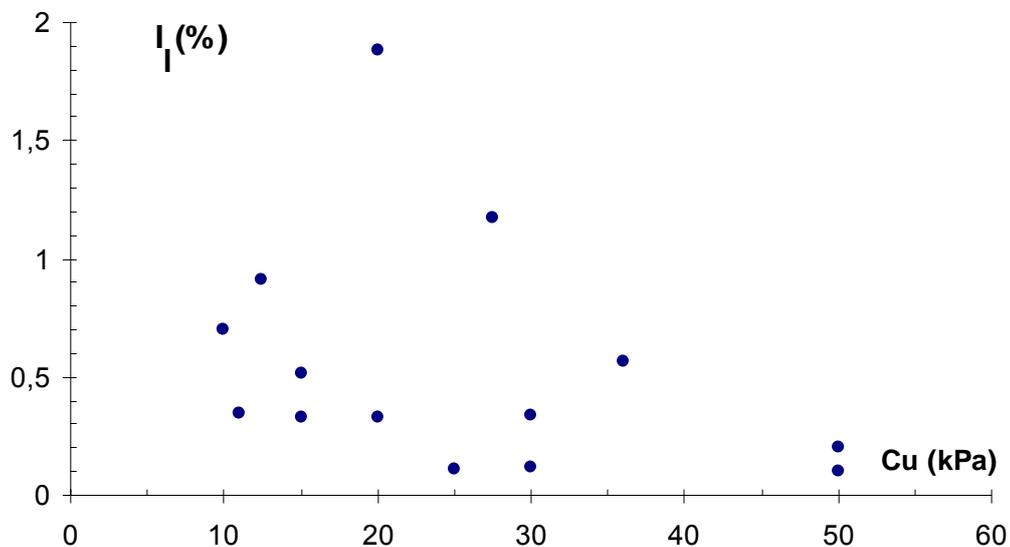


Figure N°23 : Cohésion non drainée au pic en fonction de l'indice de liquidité.

En comparant ces résultats avec ceux présentés sur la figure N°23, on peut remarquer que pour des profondeurs importantes, les sédiments présentent des comportements voisins.

Si nous considérons maintenant la figure N°24, nous notons que l'indice de plasticité se corrèle assez bien avec l'angle de frottement interne ($R = 0,61$). Ceci nous confirme l'existence d'un début de consolidation, ce seuil est atteint pour des valeurs de la limite de plasticité importantes et proches de celles de la limite de liquidité.

Ces différentes relations nous renseignent et peuvent nous permettre de prévoir le comportement de ces sédiments uniquement à partir de la connaissance de leurs propriétés d'identification.

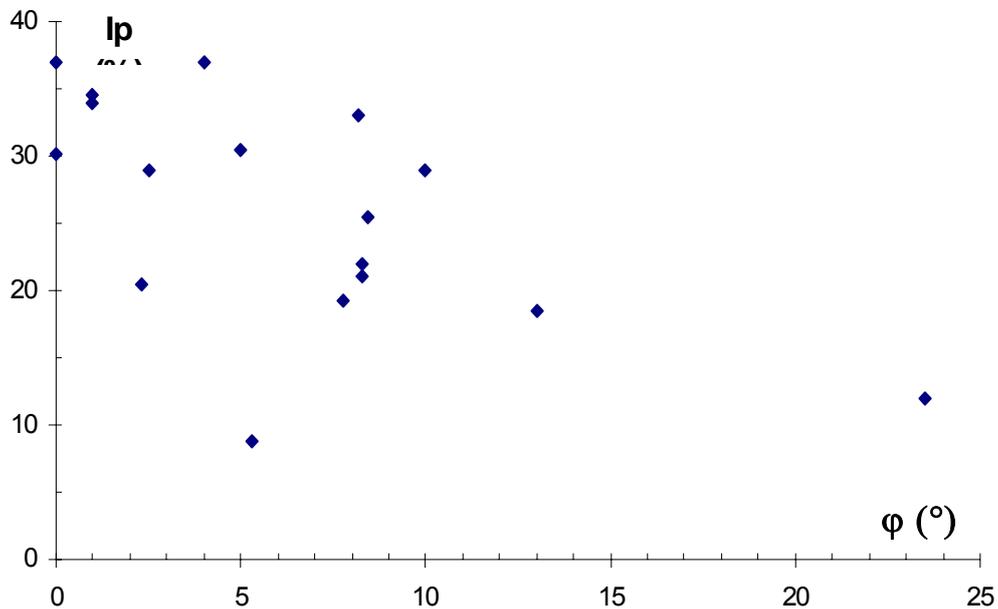


Figure N°24: Indice de plasticité en fonction de l'angle de frottement interne.

V.1.4 – Conclusion.

Les processus de l'envasement, tout comme les méthodologies de dragage, ne sont pas simples à prédire. Ils sont sous la dépendance directe de trois facteurs importants et liés : à savoir, l'évolution des débits liquide et solide, la variation des caractéristiques géotechniques des sédiments dans la retenue et le plan de gestion du barrage (Bessenasse, Kettab et Paquier, 2003). La connaissance du comportement des matériaux déposés dans la retenue est une donnée essentielle. En effet, celle-ci est une aide à la décision lorsqu'il s'agit du choix des méthodes à adopter : pour le désenvasement et le retour aux fonctions initiales d'un site de retenue.

La cohésion non drainée est ici le paramètre fondamental qui nous permet de caractériser l'état « mécanique » du sédiment vis-à-vis d'une sollicitation instantanée. Les résultats que nous avons obtenus pour les sondages sont intéressants et montrent tout d'abord une nette variabilité mécanique au sein des matériaux présents dans la retenue. Nous avons tenté de mettre en évidence la connaissance du comportement des sédiments par rapport à leurs propriétés d'identification.

V.2- Répartition spatiale des propriétés des sédiments dans la retenue.

La répartition des sédiments dans l'espace de la retenue n'étant pas homogène, il est intéressant de connaître préalablement aux opérations de dragage la répartition spatiale de certains paramètres. Cette répartition permettra de cibler les problèmes liés aux dragages ainsi que l'obturation des prises d'eau. Nous présentons ici, la répartition de deux paramètres jugés significatifs : la teneur en eau w et la cohésion non drainée C_u (d'autres paramètres sont présentés en annexe).

Les caractéristiques présentées sont estimées à partir des carottes correspondant à chaque sondage. Les courbes de répartition en plan et en surface, correspondent aux tranches de profondeurs suivantes : 0-6m, 6-12m, 12-18m et plus de 18m, sachant que la profondeur des sondages varie entre 6 et 28 mètres.

V.2.1- Méthodes d'interpolation en plan.

Selon Mekerta (1995), pour une propriété P mesurée en n points de l'espace, l'utilisation d'une méthode d'estimation a pour objectif :

- Connaître la valeur de P en n'importe quel point de l'espace, avec la meilleure fiabilité possible. Ceci permet d'une part de générer un champ de données, en vue de simuler un phénomène, et d'autre part de « reconstituer la réalité », c'est-à-dire de spatialiser les données sous forme de courbes d'isovaleurs ;

- Connaître la précision de ces estimations.

Delhomme, (in Mekerta, 1995), a décrit et analysé les différentes méthodes d'interpolation utilisées en géologie et dans les sciences de l'eau. Nous citons pour mémoire les méthodes analytiques telles que l'interpolation polynomiale et l'interpolation par spline, la méthode des moindres carrés, les méthodes de pondération - en fonction de la distance, par exemple - et les méthodes probabilistes telles que le krigeage.

La comparaison de ces différentes méthodes d'interpolation, sur le plan théorique, montre que les méthodes probabilistes sont les mieux adaptées à rendre compte de l'aspect chaotique des phénomènes, en sciences de l'eau. Le krigeage a en particulier l'avantage d'utiliser, pour l'estimation, la structure spatiale. Il s'adapte donc bien aux phénomènes régionalisés. Au niveau expérimental, par exemple pour des propriétés hydriques du sol, la méthode de krigeage s'est avérée une méthode d'estimation fiable et robuste (Gascuel-Oudou, cités par Mekerta, 1995).

Dans ce qui suit, nous allons montrer quelques courbes d'isovaleurs des deux propriétés retenues (w et C_u), en fonction des coordonnées X et Y des sondages dans la retenue. Grâce au logiciel SURFER et par utilisation de la méthode de Krigeage, on peut tracer ces courbes en plan ou dessiner la surface correspondante. Cela permet de régionaliser le phénomène et d'estimer la valeur de la propriété considérée en n'importe quel point de la retenue.

Les courbes d'isovaleurs obtenues par krigeage montrent clairement l'existence de zones à forte concentration des valeurs du paramètre considéré.

V.2.2- Position des sondages.

Le tableau N°8 donne les coordonnées X et Y, selon Bendaoud (2004), des sondages dans la retenue du Fergoug par rapport à un point fixe choisi (Situé à 2km sur la rive droite).

N° Sondage	A	B	C	S1	S2	S3	S4	S5
X	10651,28	10894,74	11030,43	10706,99	10921,96	10783,69	10700 ,76	10599,31
Y	31609,04	31667,21	31660,75	31483,45	31470,81	31215,54	10993,52	30731,98

N° Sondage	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
X	10625,39	10442,26	10246,55	11095,20	11345,05	11871,20	12167,29
Y	30443,36	30119,02	30068,86	31291,12	31399,11	31523,93	31498 ;25

Tableau N°8 : Coordonnées des sondages.

- Les points A, B, et C sont situés sur la digue et au pied du barrage.
- Les points S1 à S12 représentent la localisation des 12 sondages situés sur la figure n° 15.

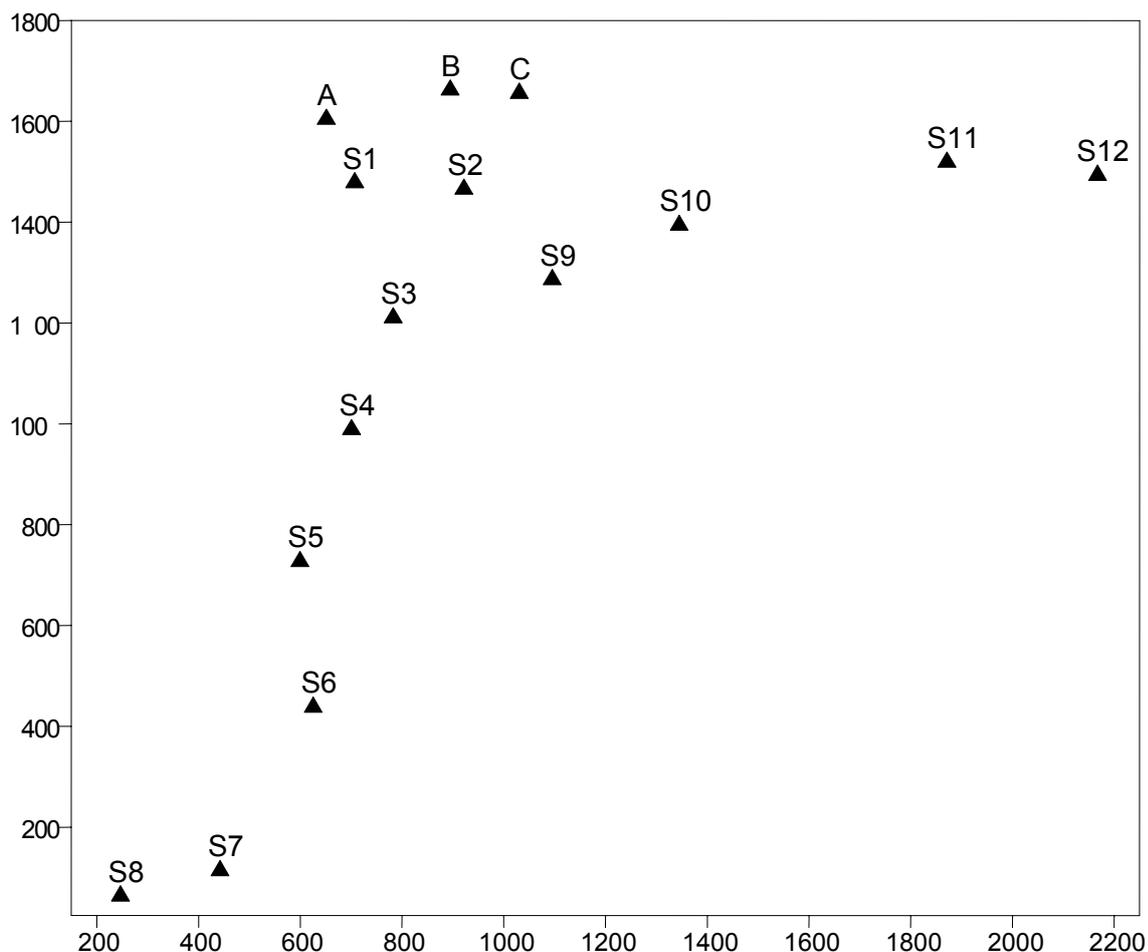


Figure N°25 : Position des sondages

- A - Evacuateur de surface 550 m³/s
- B- Vidange de fond 60 m³/s
- C - Prise d'eau
- S - Point d'implantation du sondage

V.2.3- Courbes d'isovaleurs

Les courbes d'isovaleurs ci-après présentées, correspondent à des tranches de profondeurs :

- Entre 0 – 6 mètres
- Entre 6 et 12 mètres
- Entre 12 et 18 mètres
- Entre 18 mètres et le fond

Ces tranches de profondeurs sont prises au hasard. Il est clair qu'en diminuant l'épaisseur des tranches, nous obtenons une représentation plus précise.

Deux types de courbes sont représentés :

- Courbes d'isovaleurs en plan.
- Courbes d'isovaleurs en surface.

Les deux paramètres considérés sont : la teneur en eau (w) et la cohésion (Cu).

V.2.3.1- Les teneurs en eau.

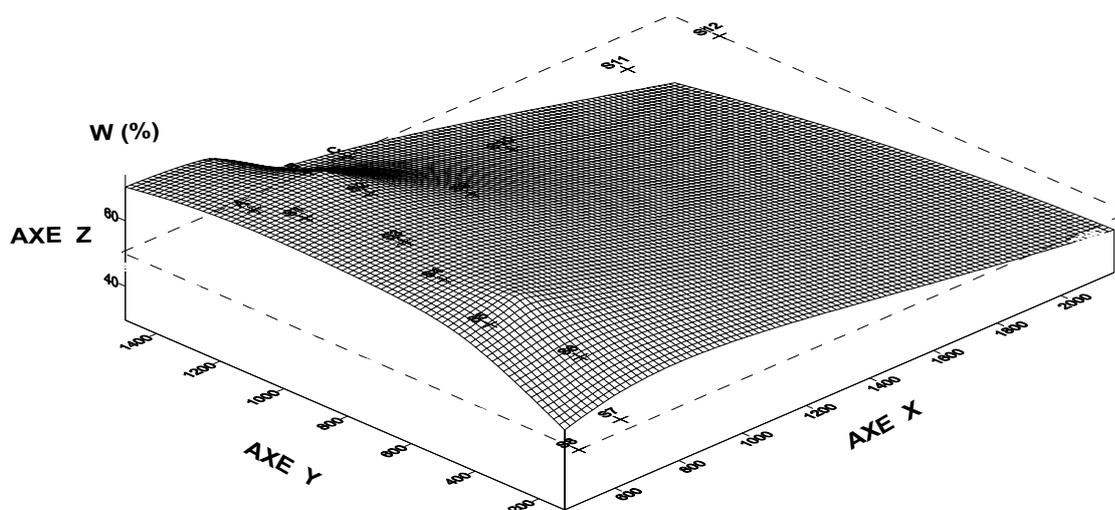
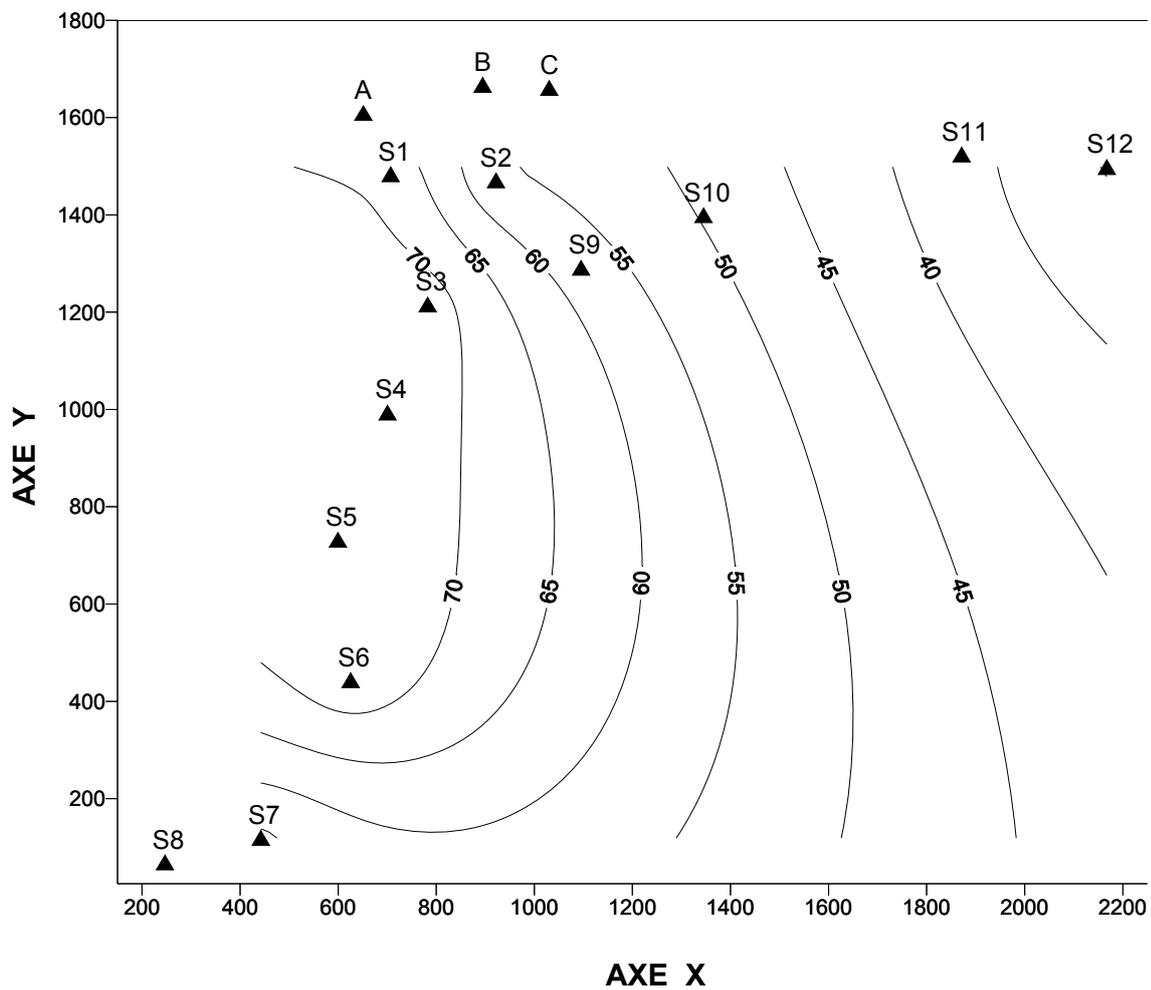


Figure N°26 : Courbes d'isovaleurs : Teneurs en eau.
Tranche de profondeurs entre 0– 6 mètres

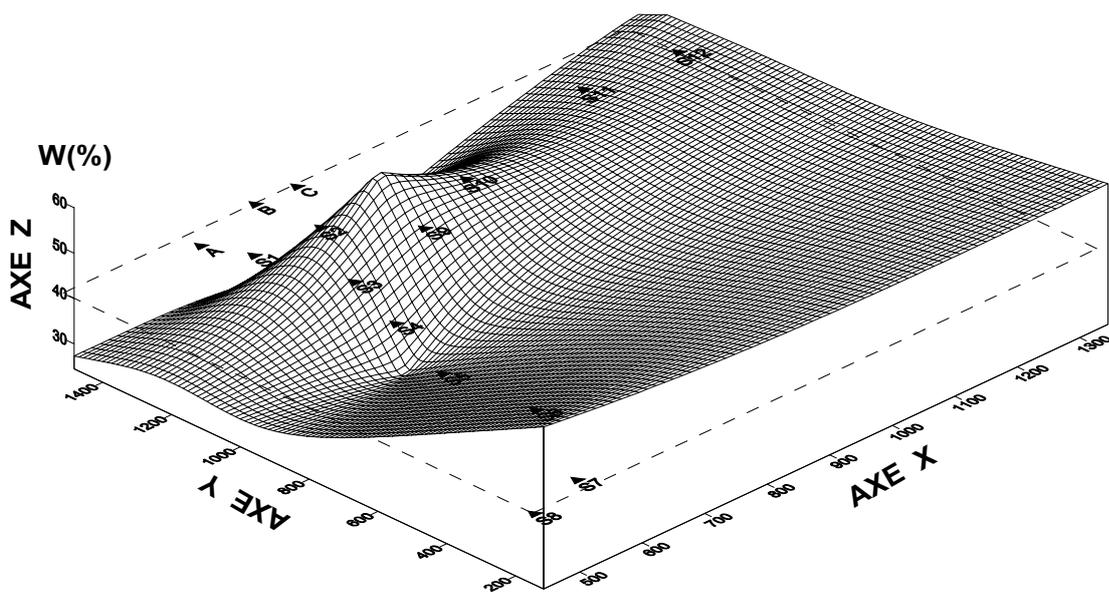
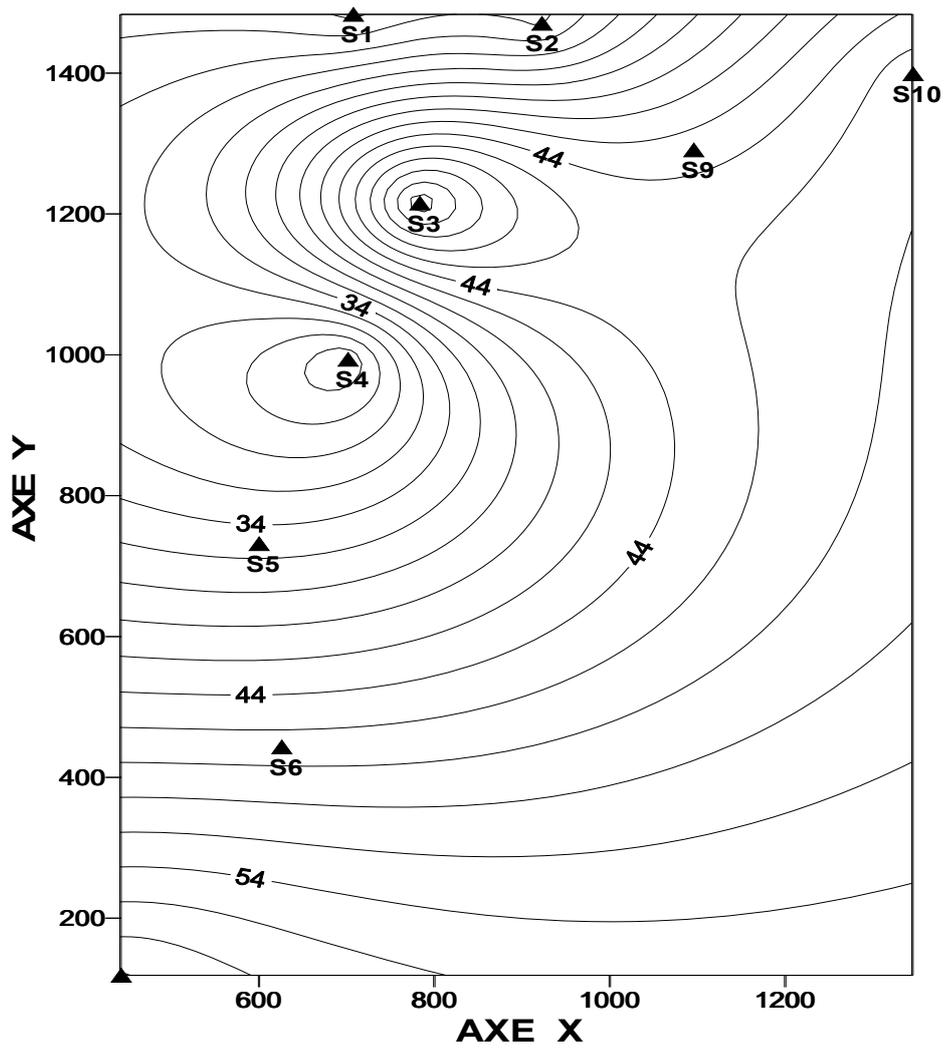


Figure N°27 : Courbes d'isovaleurs : Teneurs en eau.

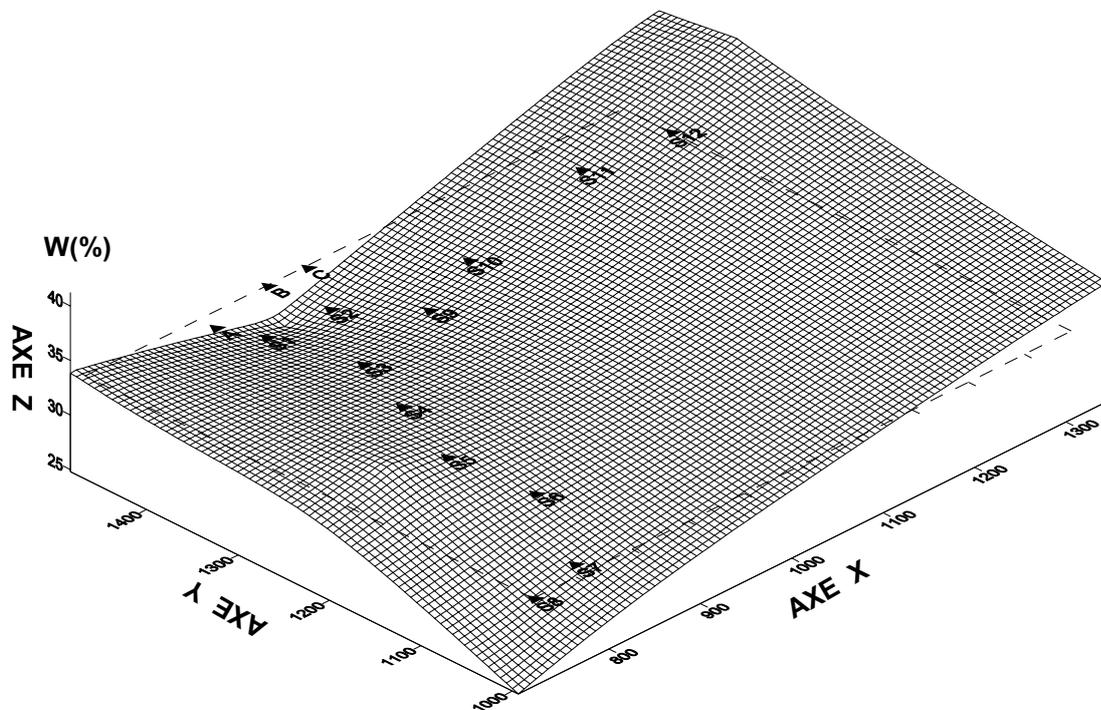
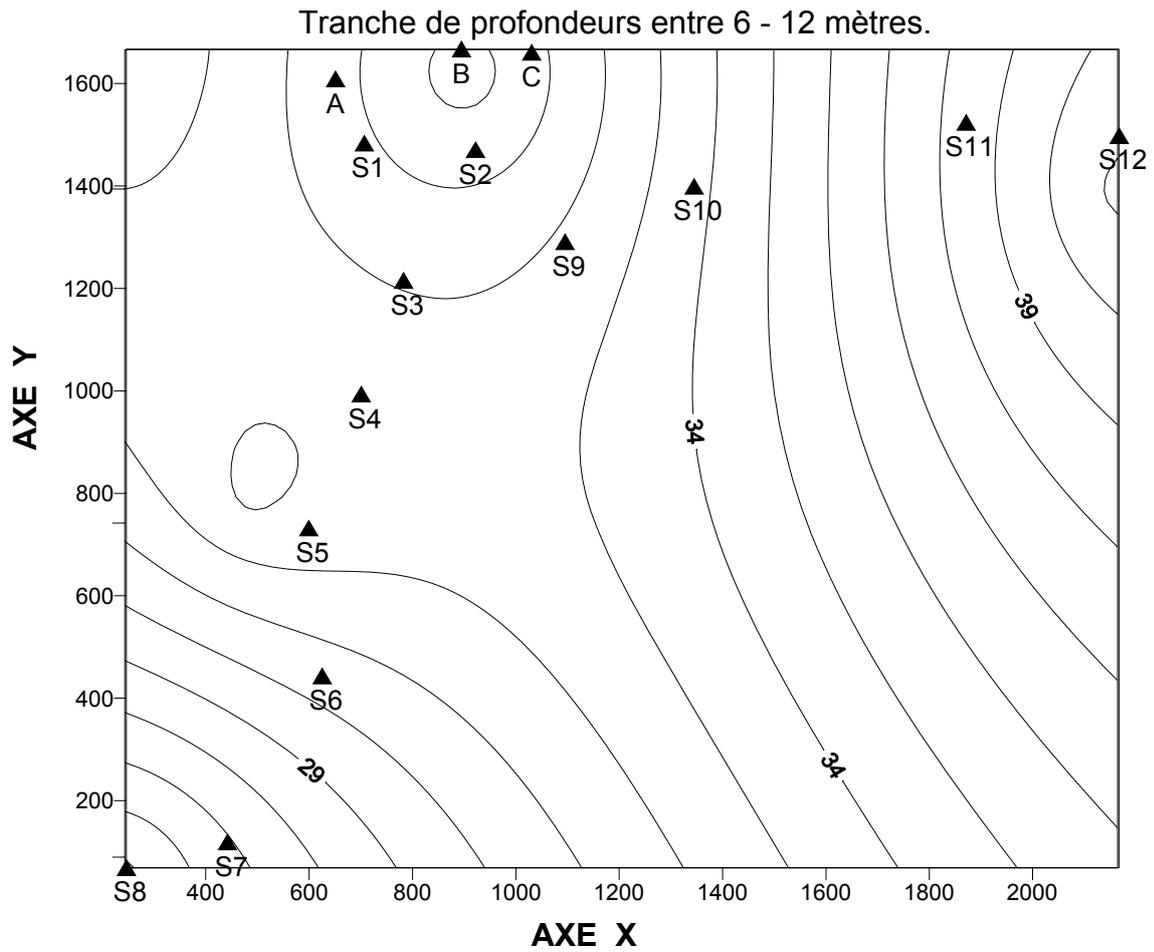


Figure N°28 : Courbes d'isovaleurs : Teneurs en eau.
Tranche de profondeurs entre 12- 18 mètres.

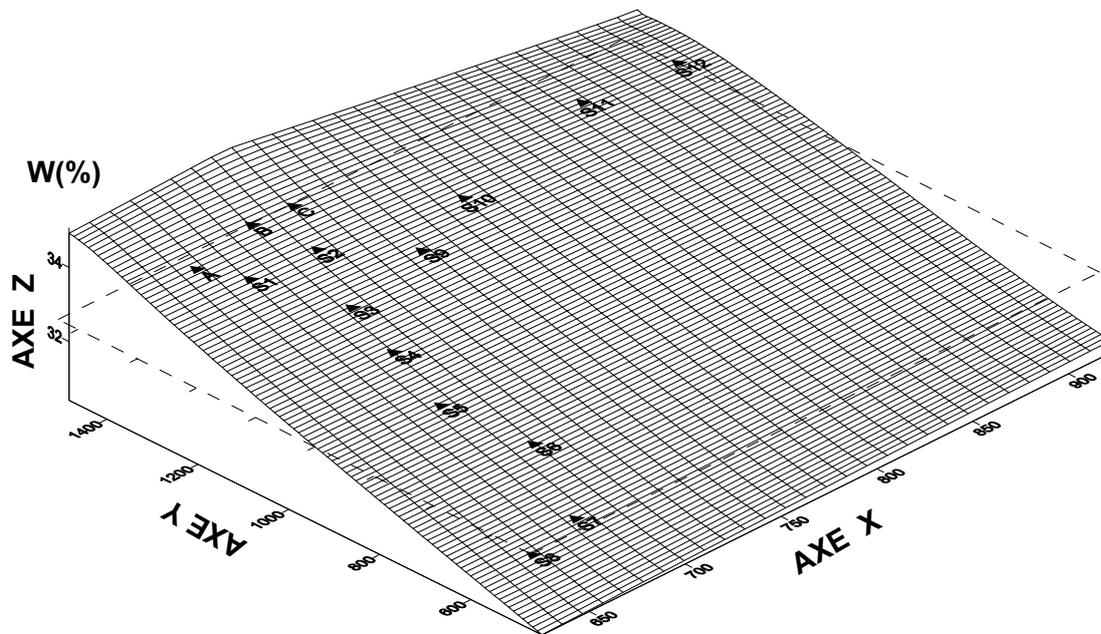
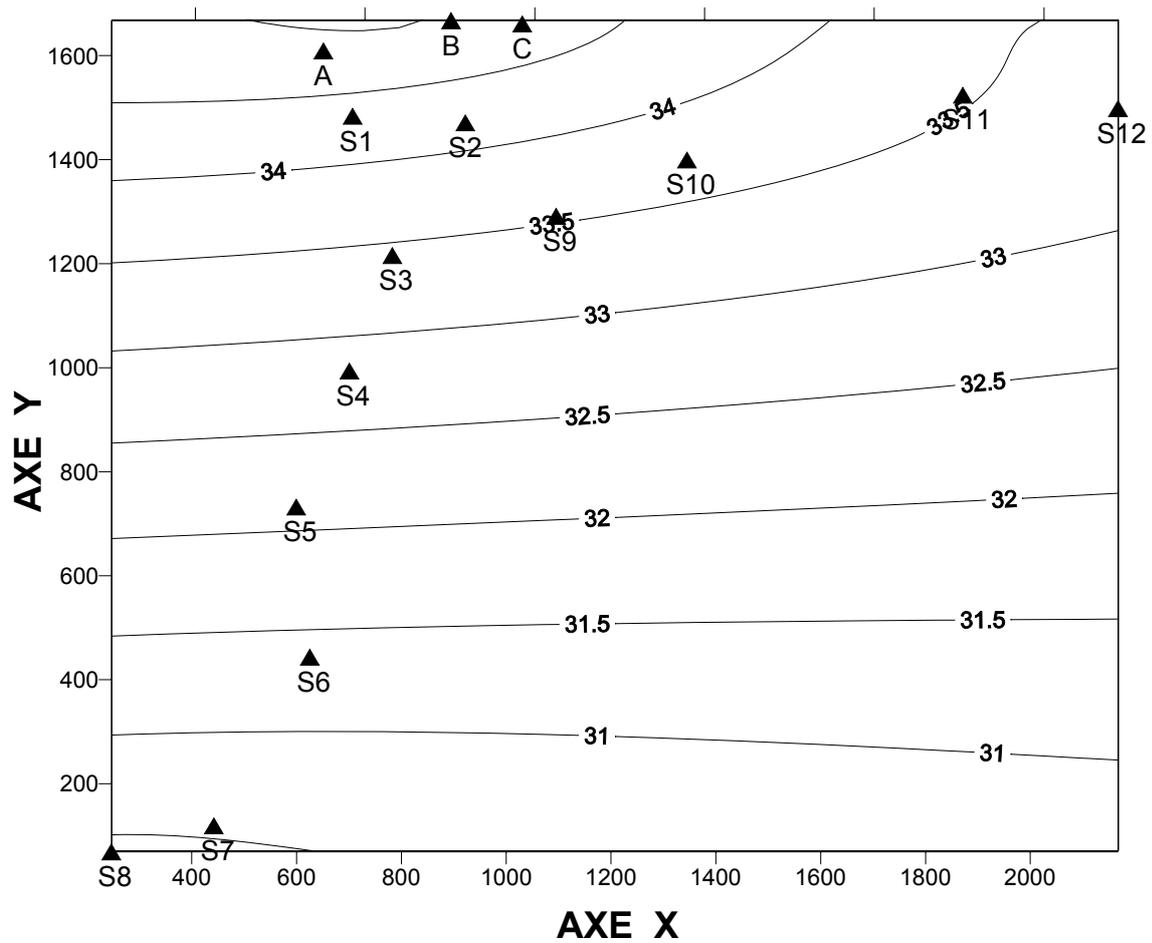


Figure N°29 : Courbes d'isovaleurs : Teneurs en eau.
Tranche de profondeurs entre 18 mètres et le fond.

V.2.3.2- La cohésion non drainée (Cu).

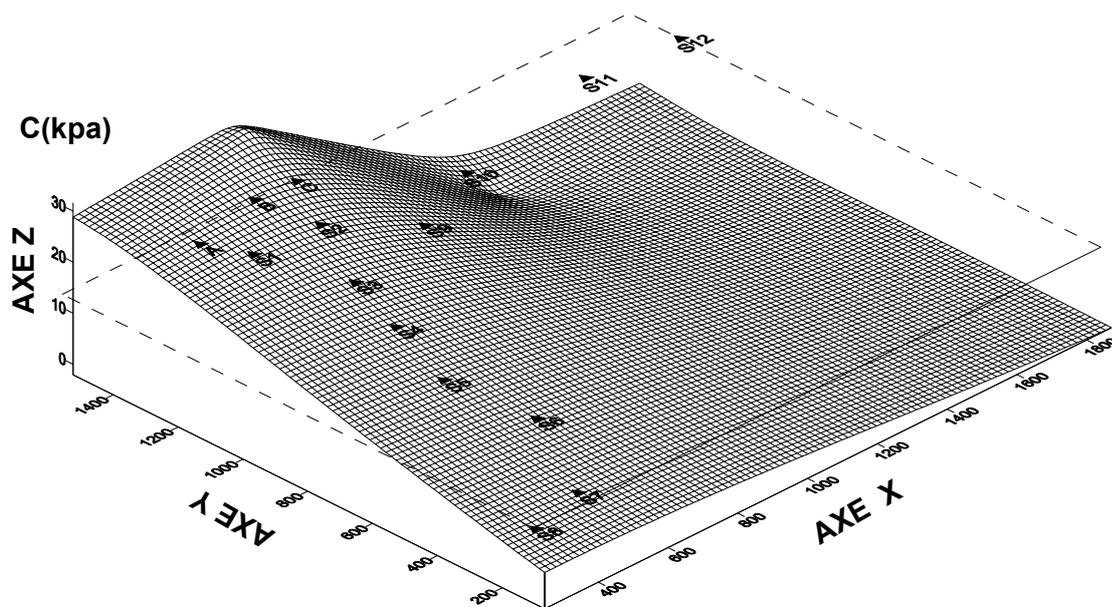
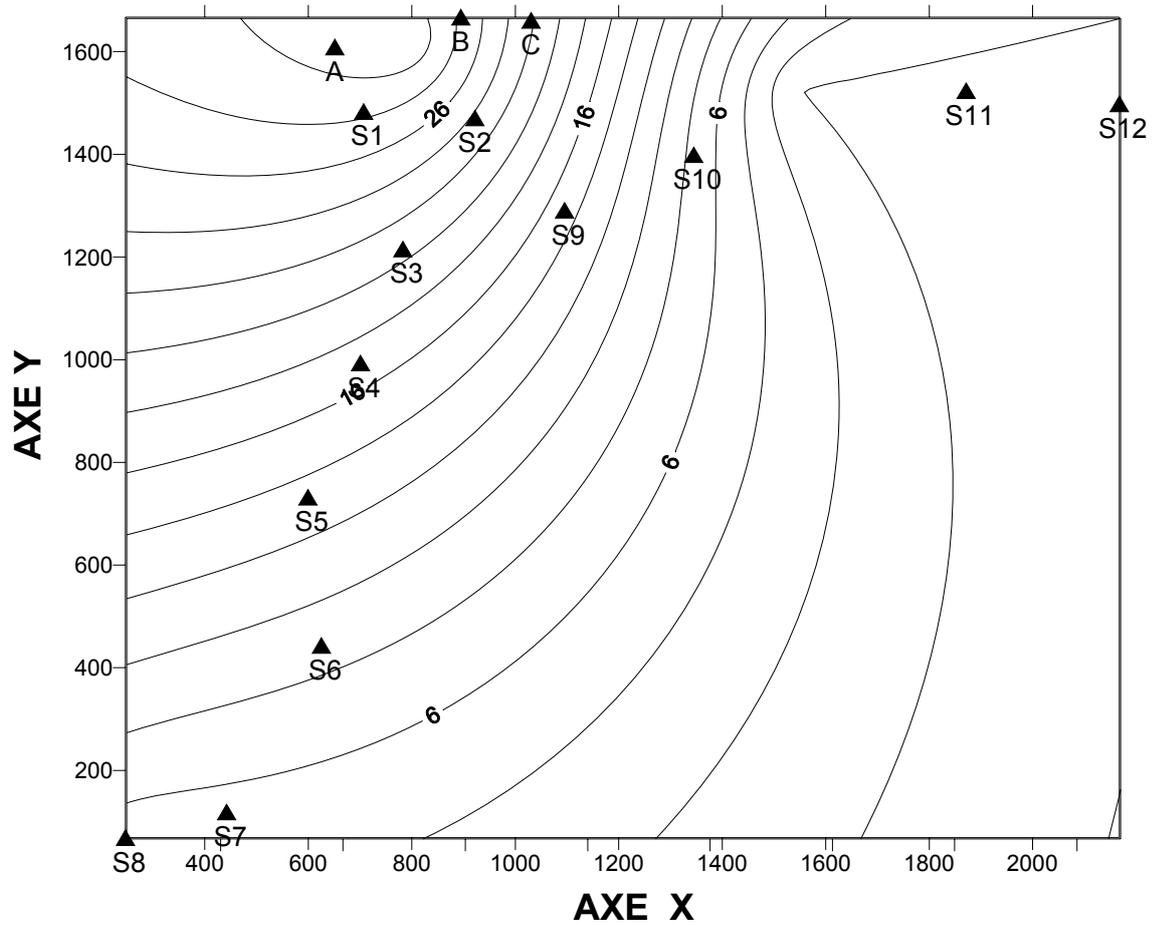


Figure N°30 : Courbes d'isovaleurs : Cohésion Cu.
Tranche de profondeurs entre 6-12 mètres

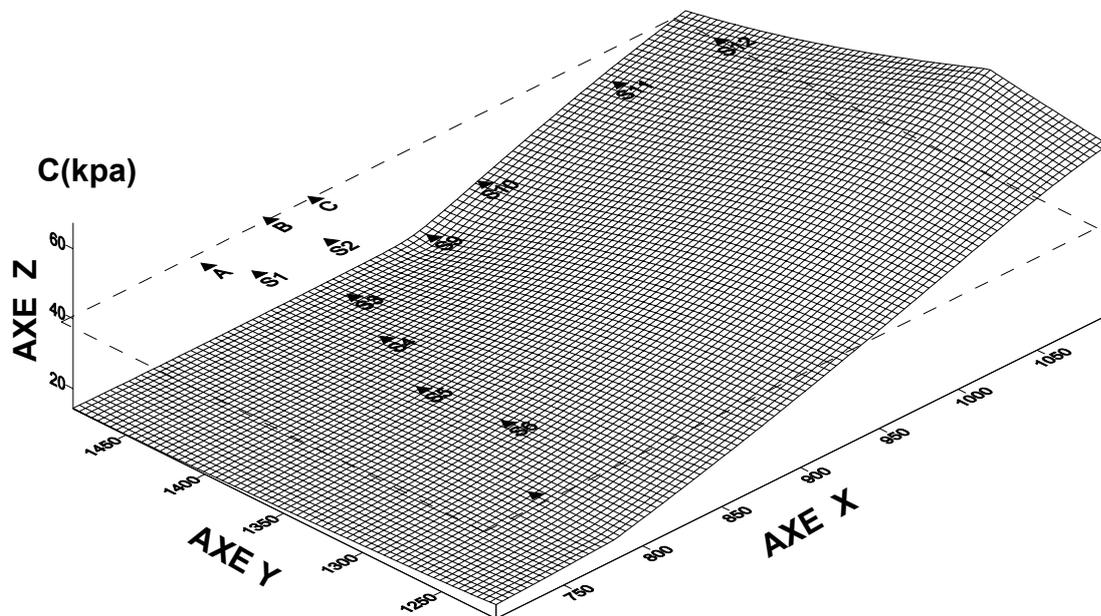
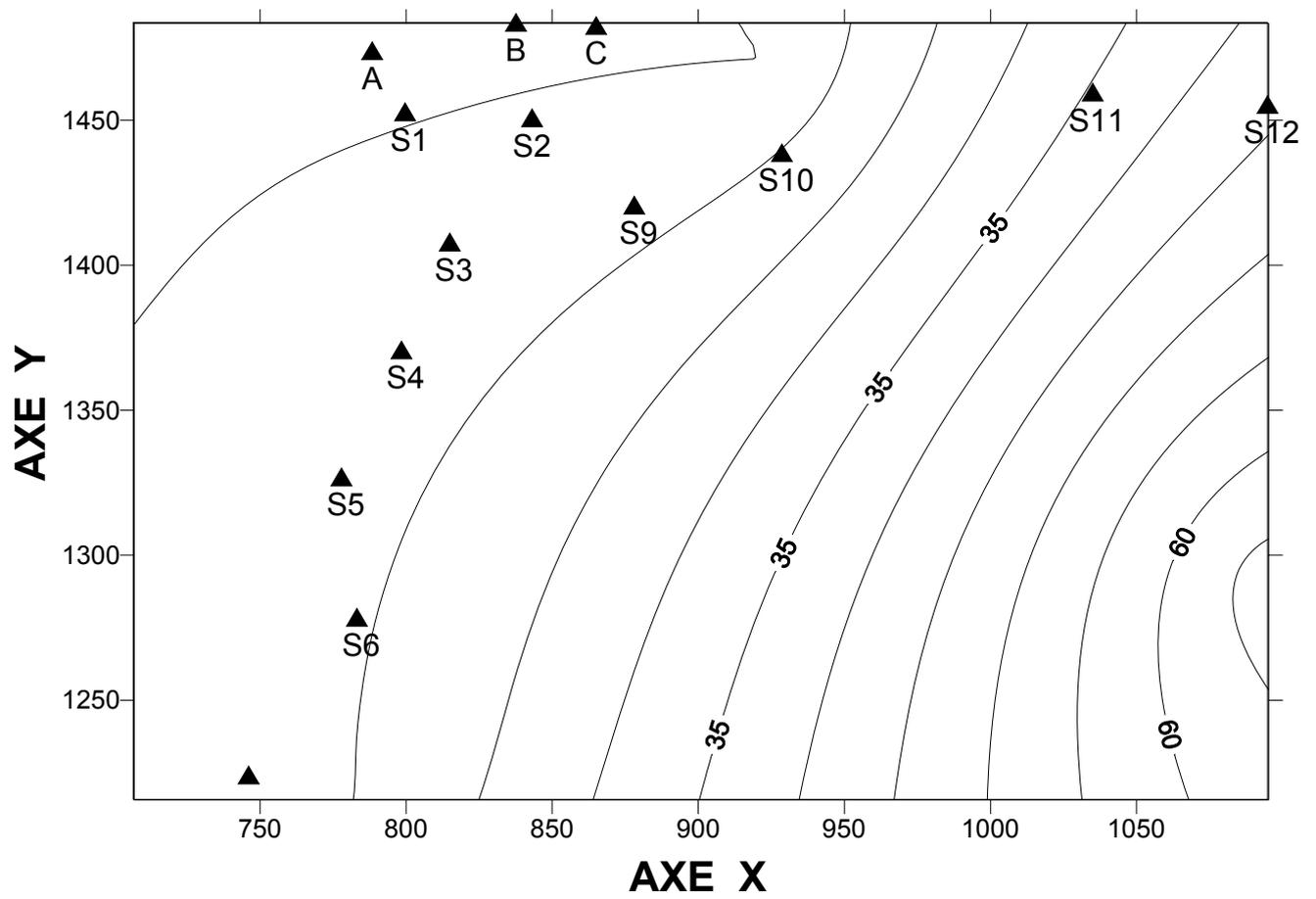


Figure N°31 : Courbes d'isovaleurs : Cohésion Cu.
Tranche de profondeurs entre 12-18 mètres

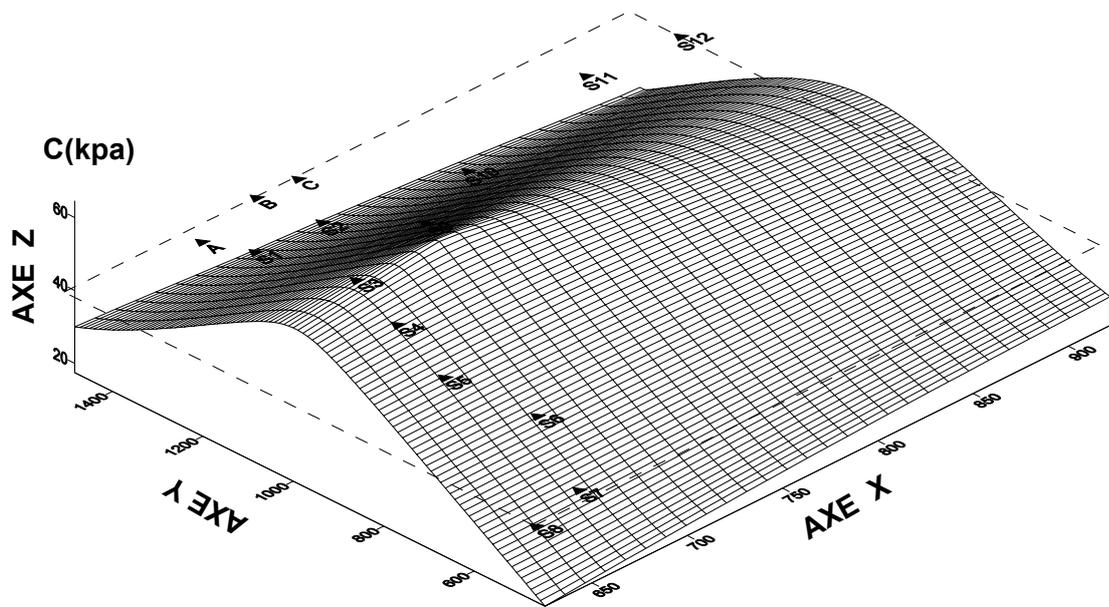
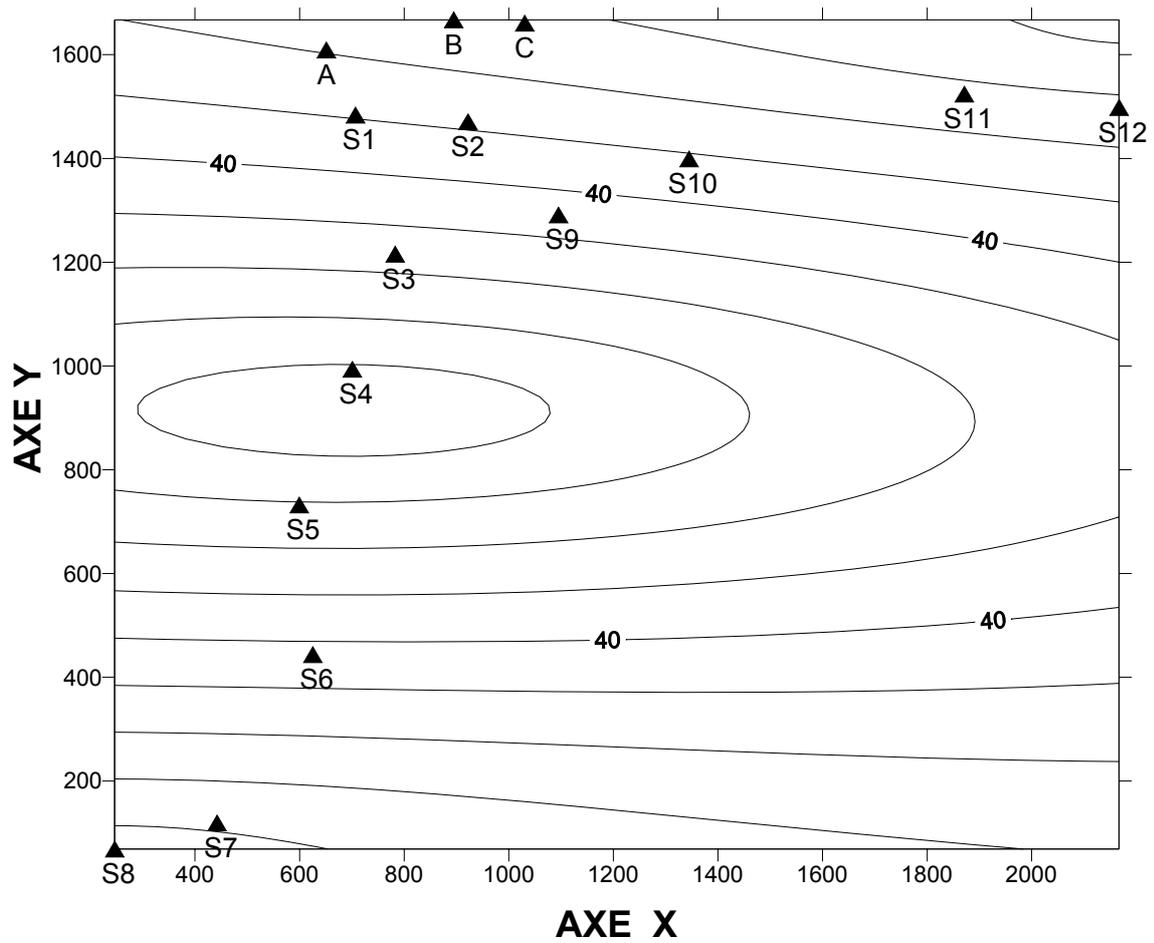


Figure N°32 : Courbes d'isovaleurs : Cohésion Cu.
Tranche de profondeurs entre 18 mètres et le fond

V.2.4- Conclusion.

Nous constatons que cette méthode donne un aperçu proche de la réalité de la situation des sédiments en place dans la cuvette. Toutefois nous signalons les courbes sont d'autant plus précises que le nombre de mesures est élevé. Nous nous sommes contentés des valeurs moyennes calculées pour des tranches de 6 mètres d'épaisseur. Une épaisseur plus faible diversifie et donne plus de précision à l'analyse.

Une première étude des graphes obtenus permet de situer des tendances réelles de la variation des paramètres avec la proximité de la digue au niveau des prises d'eau. A partir d'un front situé au voisinage du sondage S4, nous constatons une tendance différente à cette variation.

Il est ainsi possible d'estimer à l'aide du logiciel Surfer, les valeurs les plus probables des propriétés en tout point de la retenue.

V.3- Propriétés des sédiments issus du dragage.

Les vases étudiées sont prélevées en aval du barrage de Fergoug dans la zone de rejet après dragage. Les essais de caractérisation physiques, chimiques et minéralogiques ont été effectués sur des échantillons prélevés par nos soins et les résultats sont comparés systématiquement à ceux effectués par le laboratoire L.I. (Lahmeyer International).

V.3.1- Propriétés physiques.

Comme caractéristiques physiques permettant une classification de nos échantillons considérés comme sols fins, nous avons retenu les plus importantes à savoir : les analyses dimensionnelles par granulométrie à sec et sédimentométrie après tamisage sous l'eau, les limites d'Atterberg et le poids volumique sec. Les analyses granulométriques ont été effectuées en utilisant un défloculant et à l'état naturel non défloculé. Pour chaque cas d_{50} est relevé.

En étudiant l'entraînement des sédiments et, étant donné que la Macta constitue l'embouchure en mer de l'Oued El Hammam, des échantillons ont été prélevés à la Macta, pour nous permettre une identification comparative à ceux prélevés au niveau du Fergoug.

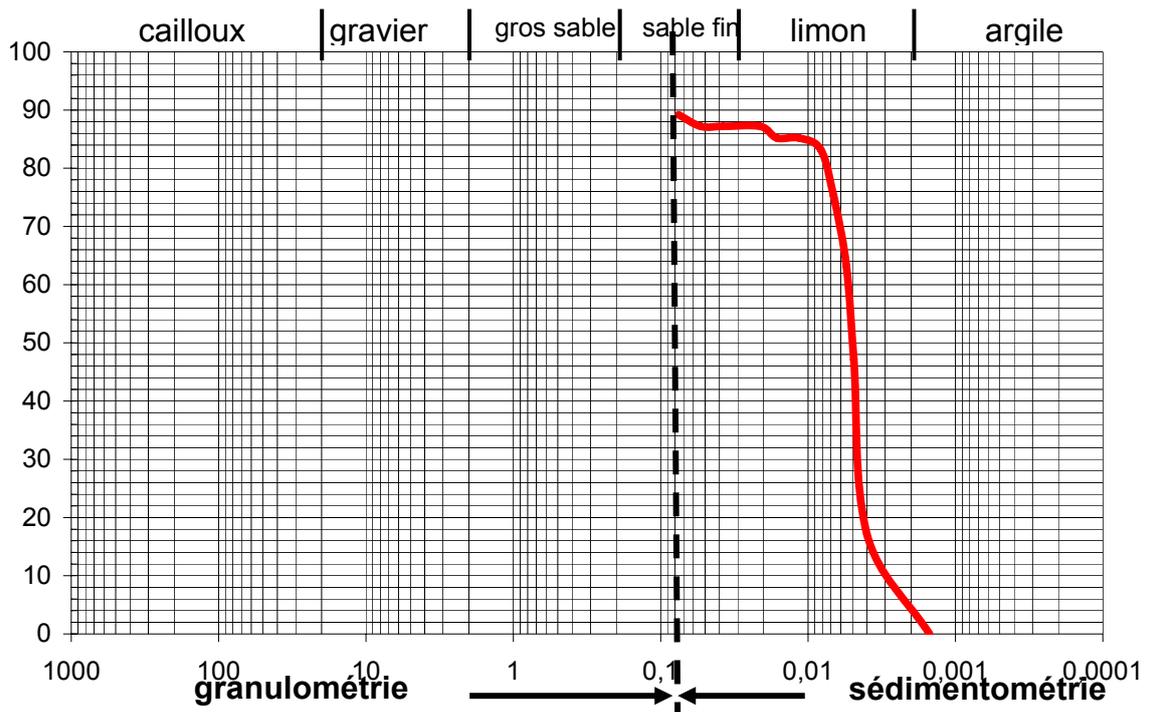


Figure N°33 : Granulométrie de la vase de Fergoug.

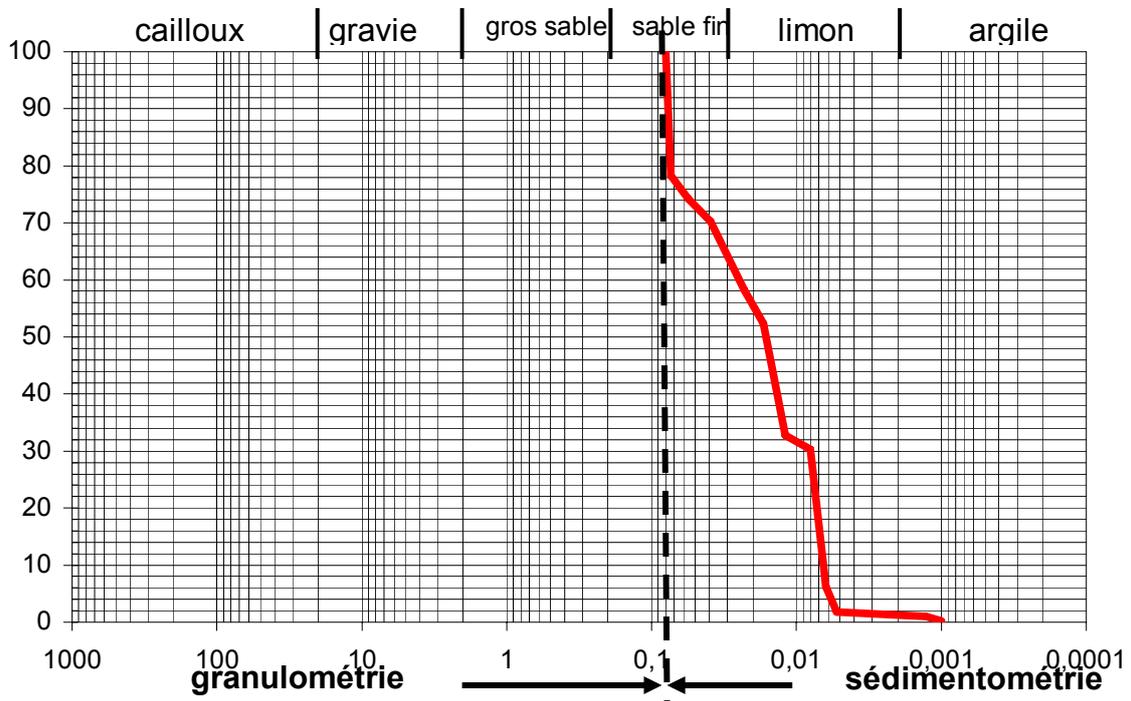


Figure N°34 : Granulométrie de la vase de la Macta.

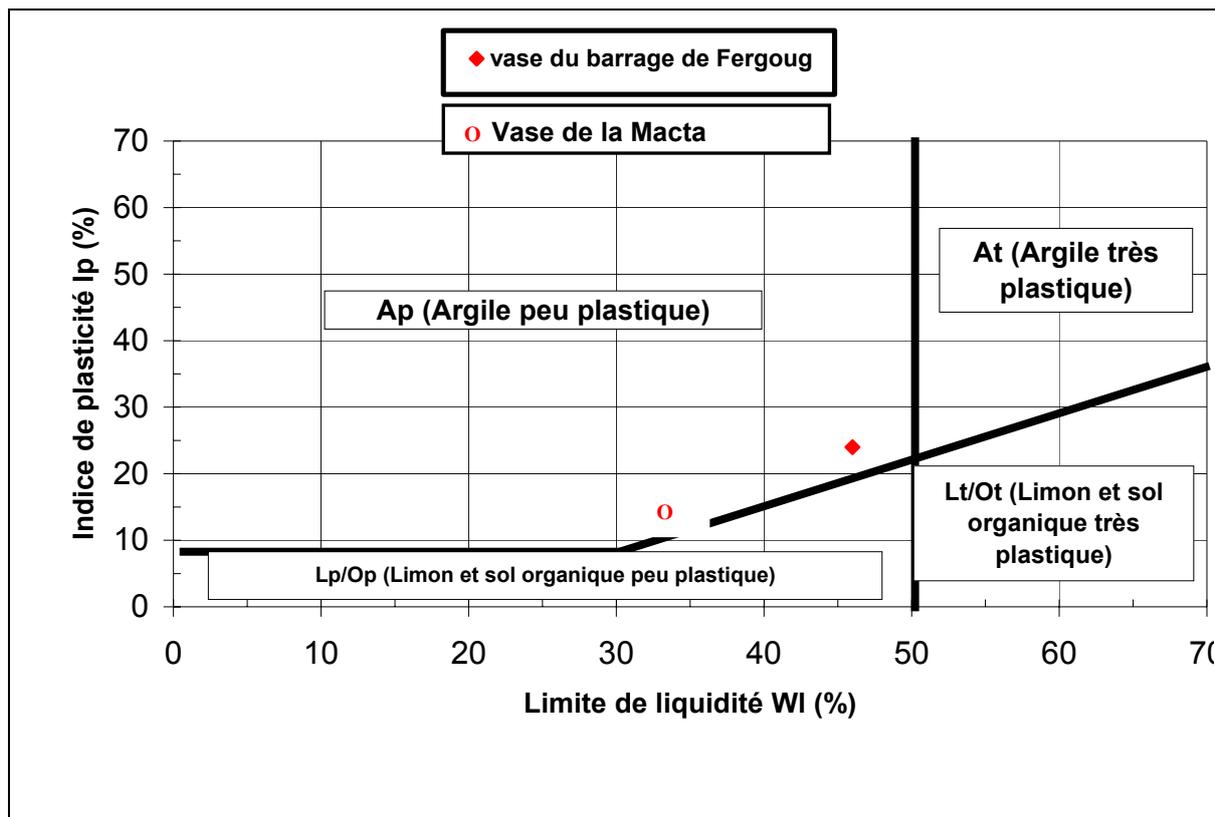


Figure N°35 : Classification de la vase de Fergoug et celle de la Macta selon Casagrande.

Le tableau suivant résume les propriétés physiques et géotechniques des échantillons étudiés :

Lieu du prélèvement géotechniques	Propriétés physiques			Propriétés géotechniques			
	ρ_s	d_{50} (μm)		W_0 %	L_L %	L_P %	I_p %
		Défloqué	Naturel				
Fergoug	2,65	5,25	44,87	46,40	22,40	24,00	18,23
La Macta	2,74	5,65	42,35	33,27	20,07	13,27	20,03

Tableau N°9 : Propriétés physiques et géotechniques des échantillons étudiés.

Les propriétés physiques effectuées obtenues sur nos échantillons prélevés sur les deux sites du Fergoug et la Macta, sont très voisines pour les deux sites et sont en parfaite concordance avec celles des 131 échantillons prélevés par l'E.N.R.B. Nous pouvons à priori prédire que d'une part les particules qui arrivent à la Macta proviennent en majorité de Fergoug par entraînement des vases issues du dragage,

et d'autre part, plusieurs années plus tard, les sédiments ont gardé les mêmes propriétés vu leur provenance du même bassin versant.

V.3.2- Essais de perméabilité.

Les essais de perméabilité à charge constante et à charge variable ont été réalisés sur les deux vases étudiées : le vase de Fergoug et celle de la Macta. Les deux essais sont basés sur la loi de Darcy :

$$\text{- Perméabilité à charge constante : } k = Q \frac{L}{S \times \Delta h} \quad (23)$$

exprimé en cm/s

Avec : k = coefficient de perméabilité

S = section l'échantillon

Δh = perte de charge dans le sol

L = longueur de l'échantillon

$$\text{- Perméabilité à charge variable : } k = \frac{s}{S} \times \frac{1}{T} \ln \frac{h_2}{h_1} \quad (24)$$

exprimé en cm/s

Avec : s = section de la burette

S = section de l'échantillon

T = intervalle de temps

h2 = charge initiale

h1 = charge finale

Les valeurs moyennes des coefficients de perméabilité k obtenus sur les deux vases Sont dans sur le tableau suivant :

	Charge constante k (cm/s)	Charge variable k (cm/s)
Vase de Fergoug	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
Vase de la Macta	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$0,97 \cdot 10^{-5}$

Tableau N°10 : Coefficients de perméabilité des vases.

Les valeurs obtenues du coefficient de perméabilité pour les deux vases sont du même ordre de grandeur. Ces valeurs montrent que dans les deux cas nous avons à faire à des mélanges de sable fin de limon et d'argile. Dans les deux cas ce sont des formations peu perméables.

V.3.3 – Propriétés chimiques et minéralogiques.

Les résultats des analyses chimique et minéralogique que nous allons présenter ont été réalisées à partir d'analyses pétrographiques effectuées par l'institut de géologie générale et appliquée de l'Université de Munich, au profit de l'E.N.R.B. et en prévision de la première opération de dragage de Fergoug.

D'autres analyses effectuées plus récemment sur des échantillons prélevés à Fergoug et à la Macta, par le Laboratoire des Travaux Publics d'Oran (LTPO), permettent la confirmation des compositions et de leur évolution.

V.3.3.1- Teneur en carbonates.

Les analyses furent réalisées sur des échantillons asséchés à 105 °C. Les valeurs obtenues résultent de deux relevés de mesure respectifs dont la concordance peut être clairement observée de façon permanente et qui constituent ainsi des moyennes de base.

La teneur en carbonates est déterminée à l'aide de l'appareil Scheibler grâce à la gazométrie. Cette méthode prend en compte la pression partielle de HCl et se base sur la correction de température. Le poids de la matière à analyser est de 1,000 g. L'étalonnage du dispositif fût réalisé au moyen de poudre de marbre (0,200 g). La proportion de calcite fût mesurée en 30 secondes, à partir du dégagement de CO₂, la proportion de dolomite fût calculée par le dégagement de gaz restant.

Les résultats notés au tableau n°11 sont confirmés par l'analyse chimique globale et les autres types d'analyse.

Echantillon	Calcite	Dolomite	Rapport : Calcite/Dolomite
1	22,0	2,9	7,7
2	18,8	9,0	2,1
3	21,2	3,6	5,8

Tableau N°11 : Teneur en carbonates des 3 échantillons.

V.3.3.2- Analyses chimiques globales, oligoéléments inclus.

La détermination des éléments se fait par calcination des échantillons. Les éléments essentiels (oxydes désignés en %) et les oligoéléments (désignés en ppm) furent analysés séparément. Les données suivantes résultent des valeurs moyennes de 2 analyses qui, dans chaque cas ne présentent que des écarts minimes l'une par rapport à l'autre.

L'analyse chimique globale effectuée sur 3 échantillons a donné les éléments mentionnés sur le tableau n°12 :

Eléments principaux	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Concentration globale mesurée	99,66 %	99,92 %	100,01 %
Na ₂ O	0,69	0,75	1,25
MgO	5,91	7,86	5,49
Al ₂ O ₃	16,70	4,55	16,12
SiO ₂	48,61	65,91	50,18
P ₂ O ₅	0,21	0,21	0,18
K ₂ O	2,89	1,16	2,30
CaO	17,84	16,24	17,47
CrO ₂	0,73	0,30	0,86
MnO	0,10	0,10	0,07

Fe ₂ O ₃	6,51	4,62	6,08
--------------------------------	------	------	------

Tableau N°12 : Eléments principaux (% des oxydes). Vase de Fergoug.

Les Oligoéléments (en ppm) :

Oligoéléments	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
V	137	76	121
Cr	66	47	23
CO	11	7	8
Ni	42	25	18
Ca	29	17	22
Zn	49	62	61
Ge	16	12	19
Pb	9	12	10
Rb	70	20	64
Sr	131	323	367
Ti	6	3	4
Zr	41	42	51

Tableau N°13 : Teneur en oligoéléments (ppm). Vase de Fergoug.

Les analyses réalisées au L.T.P.O. d'Oran dans le but de confirmer les résultats à ceux réalisés par l'ENRB, sont représentées dans le tableau n°14 :

Eléments principaux	Fergoug (%)	La Macta (%)
Silice SiO ₂	53,30	62,63
Chaux CaO	16,64	15,02
Magnésie MgO	0,21	0,14
Alumine Al ₂ O ₃	6,29	4,67
Oxyde de fer Fe ₂ O ₃	1,76	1,82
Sulfates SO ₃	0,11	Nul
Chlorures Cl	/	/
Perte a feu	18,91	16,01
Total	100,22	100,29
Carbonates	30,00	27,27
Anhydre carbonique CO ₂	13,20	12,00
Eau de combinaison H ₂ O	5,71	4,01

Tableau N°14 : Analyse chimique faite par le LTPO.

V. 3.3.3- Analyses minéralogiques.

Les analyses minéralogiques par diffraction des rayons X, effectuées sur les 3 échantillons étudiés à l'Université de Munich ont mis en évidence des constituants principaux (plus de 25 %), secondaires (10-25 %) et accessoires (moins de 10 %).

Des analyses minéralogiques complémentaires effectuées par nos soins ont été réalisées sur des échantillons de la vase de Fergoug et de la Macta et ont donné globalement les compositions suivantes en supposant que toute l'alumine est sous forme de kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Fergoug : 15 % de kaolinite (dont 33 % de silice contenue dans la kaolinite)

La Macta : 11,82 % de kaolinite (dont 25,41 % de silice contenue dans la kaolinite)

Echantillon	Fraction granulométrique (mm)	Constituants principaux	Constituants secondaire	Constituants accessoires
1	0,063	Quartz	Calcite Kaolinite	Illite, Chlorite Dolomite
	0,002	Quartz Calcite	Kaolinite Illite, Chlorite Dolomite	autres composés à base de Micas et minéraux argileux
2	0,063	Quartz	Calcite Dolomite	Kaolinite Illite, Chlorite
	0,002	Dolomite Quartz	Calcite, Kaolinite, Illite, Chlorite	autres composés à base de Micas et minéraux argileux
3	0,063	Quartz	Calcite Kaolinite	Chlorite Illite Dolomite
	0,002	Quartz Calcite Kaolinite	Dolomite Illite	Chlorite et autres composés à base de Micas et minéraux argileux

Tableau N°15 : Composition minéralogique des 3 échantillons étudiés.

V.3.3.4-Les techniques expérimentales utilisées.

L'intensité et l'amplitude des pics observés sur les courbes de DRX, ont mis en évidence la prépondérance du quartz et de la calcite ainsi que la présence de dolomite et kaolinite (figures N°38 et N°39).

L'Analyse Thermique Différentielle (ATD) a permis de détecter la présence de la kaolinite et celle des carbonates (figures N°40 et N°41).

L'analyse Thermo Gravimétrique (ATG) permet l'identification des principaux minéraux grâce à la perte de poids lié à la libération des ions hydroxydes OH^- ou du CO_2 (figures N°42 et N°43).

a) La Diffraction des Rayons X. (DRX)

La matière touchée par les rayons x, émet une radiation secondaire (radiation diffusée) de même longueur d'onde que la radiation incidente (diffusion cohérente). Les minéraux cristallins possèdent une structure atomique régulière et périodique dans les trois dimensions. Chaque espèce cristalline donne un diagramme de diffraction caractéristique ; c'est-à-dire un ensemble de raies dont la disposition et l'intensité sont propres à sa structure. Cette méthode est utilisée pour détecter les structures cristallines présentes dans le produit analysé.

La diffusion du rayonnement par les atomes d'une telle matière se fait suivant des directions privilégiées qui se décrivent en terme de diffraction. Les défauts cristallins ou les structures amorphes ou vitreuses perturbent la périodicité de la structure; ce qui se traduit par un accroissement du caractère diffus des phénomènes de diffraction. Deux atomes identiques appartenant à deux plans réticulaires voisins diffusent des rayonnements identiques avec une différence de marche qui sera fonction de la distance réticulaire. La concordance de phase entre ces deux rayonnements nécessite que cette différence de marche soit un multiple de la longueur d'onde du rayonnement émis. Les conditions de diffraction sont définies par la relation de Bragg :

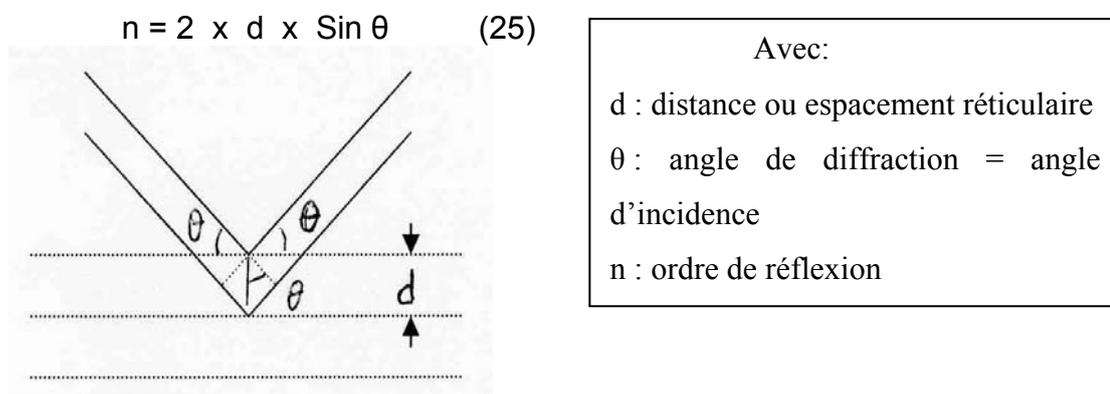


Figure N°36 : Schéma de la diffraction des rayons x.

Une méthode particulière s'applique aux poudres (méthode des poudres). Elle fait appel à un faisceau de rayons x monochromatiques (λ constant). Un échantillon de poudre est constitué d'un grand nombre de petits cristaux orientés au hasard. Il se trouvera donc toujours une famille de plans recevant les rayons x sous un angle θ qui vérifie la relation de Bragg. Si les petits cristaux correspondant à cette famille sont assez nombreux et répartis au hasard, on obtiendra un cône de révolution particulièrement homogène que l'on caractérise par 2θ . Chaque espèce cristalline donne un diagramme de

diffraction caractéristique, c'est-à-dire un ensemble de raies de diffraction dont la position et l'intensité correspondent à sa structure.

Appliquée aux vases de Fergoug et de la Macta, les deux diagrammes obtenus présentent une grande ressemblance et une concordance des raies. Cela explique que vraisemblablement qu'il s'agit de produits de même origine. La seule différence est dans l'intensité de la raie principale (quartz): celle de la Macta est légèrement plus importante.

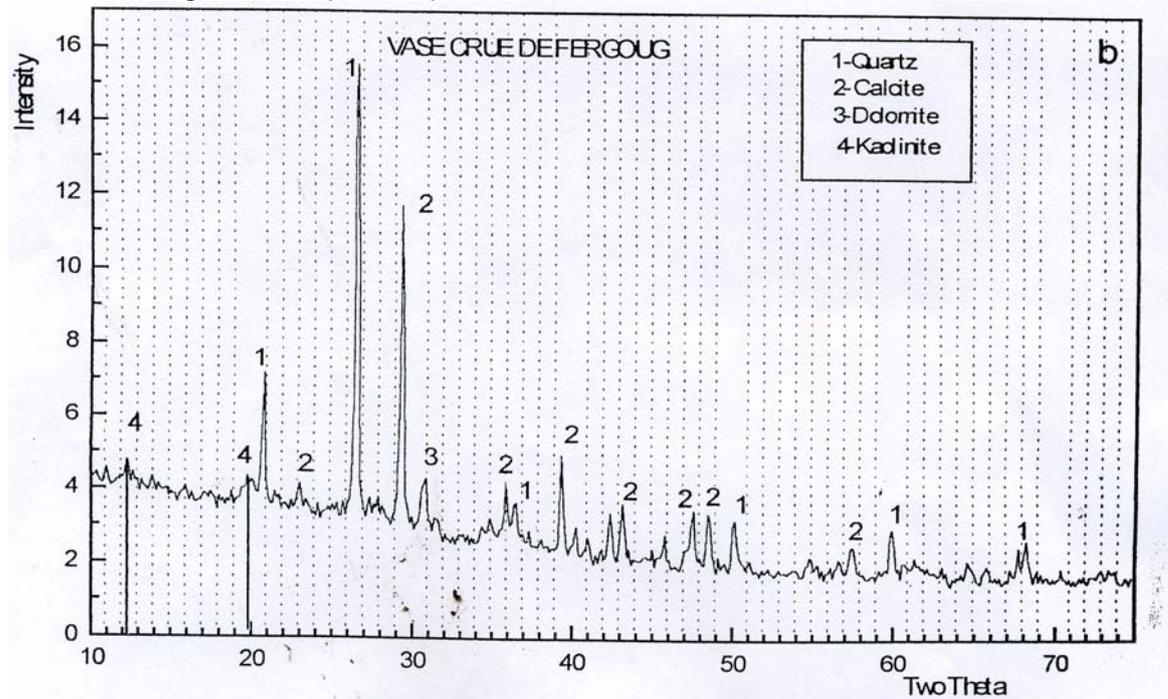


Figure N°37 : Courbe DRX de la vase de Fergoug.

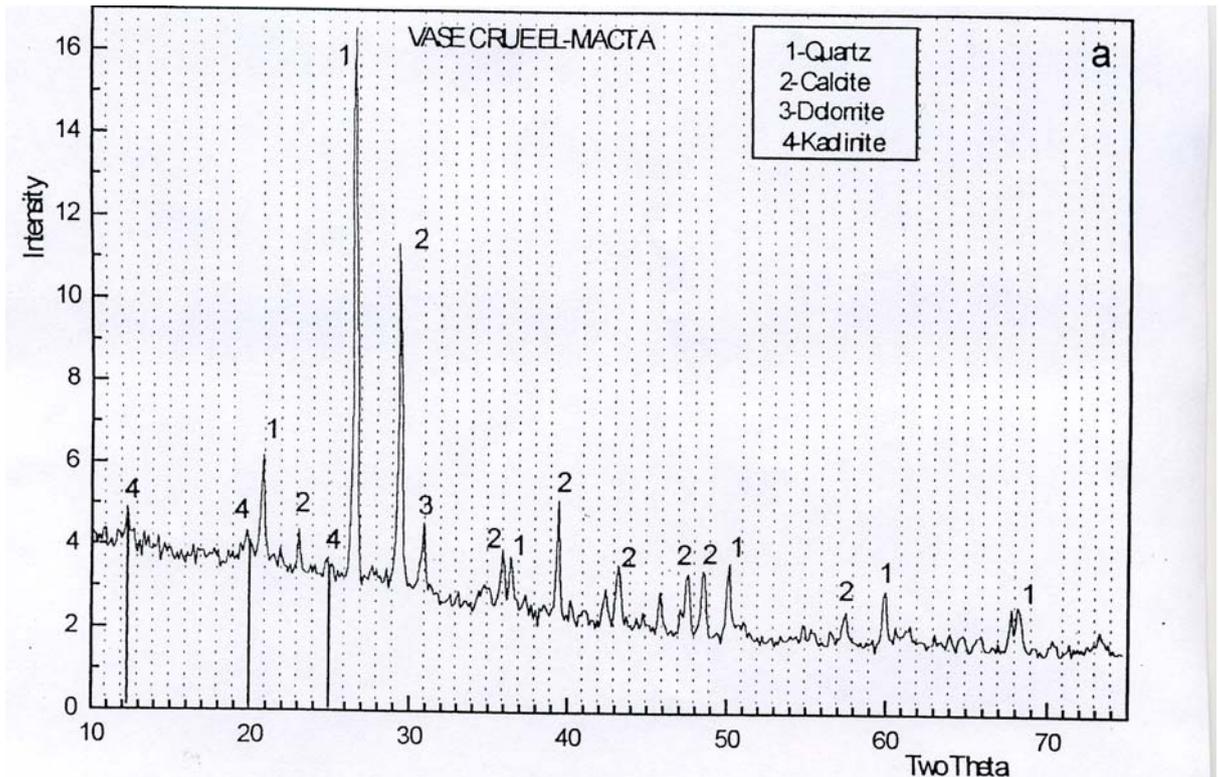


Figure N°38 : Courbe DRX de la vase de la Macta.

b) L'Analyse Thermique Différentielle. (ATD).

La matière analysée est chauffée en même temps qu'un produit inerte. Les transformations des formes cristallines présentes se traduit par la destruction ou la formation de liaisons. Cela se traduit par des réactions endothermiques ou exothermiques caractéristiques du minéral présent. La chaleur dégagée ou libérée est détectée sous forme d'un signal électrique visible en pic caractéristique sur la courbe ATD.

Les thermocouples montés en opposition ne produisent pas de courant électrique dans le circuit tant que la température est identique dans les creusets. Par contre si une réaction thermique se produit dans l'un des échantillons, le potentiel du thermocouple correspondant sera supérieur ou inférieur à celui du témoin et il se crée un courant électrique dans le circuit. L'augmentation ou la diminution de température est ainsi mesurée.

Cette méthode est appliquée dans l'identification des argiles, qui sont des minéraux sédimentaires silicatés comprenant un grand nombre de familles de compositions chimiques assez voisines dont l'étude et la connaissance revêtent une grande importance industrielle.

Sur la courbe ATD de la vase de Fergoug, nous notons des pics endothermiques vers 160°C correspondant au départ de l'eau. Vers 600°C nous observons un pic endothermique correspondant à la kaolinite et autour de 900°C celui des carbonates. Sur les courbes de la vase crue, la présence des impuretés organiques masque la présence de la kaolinite qui sont bien visibles sur les courbes de la vase sans matière organique.

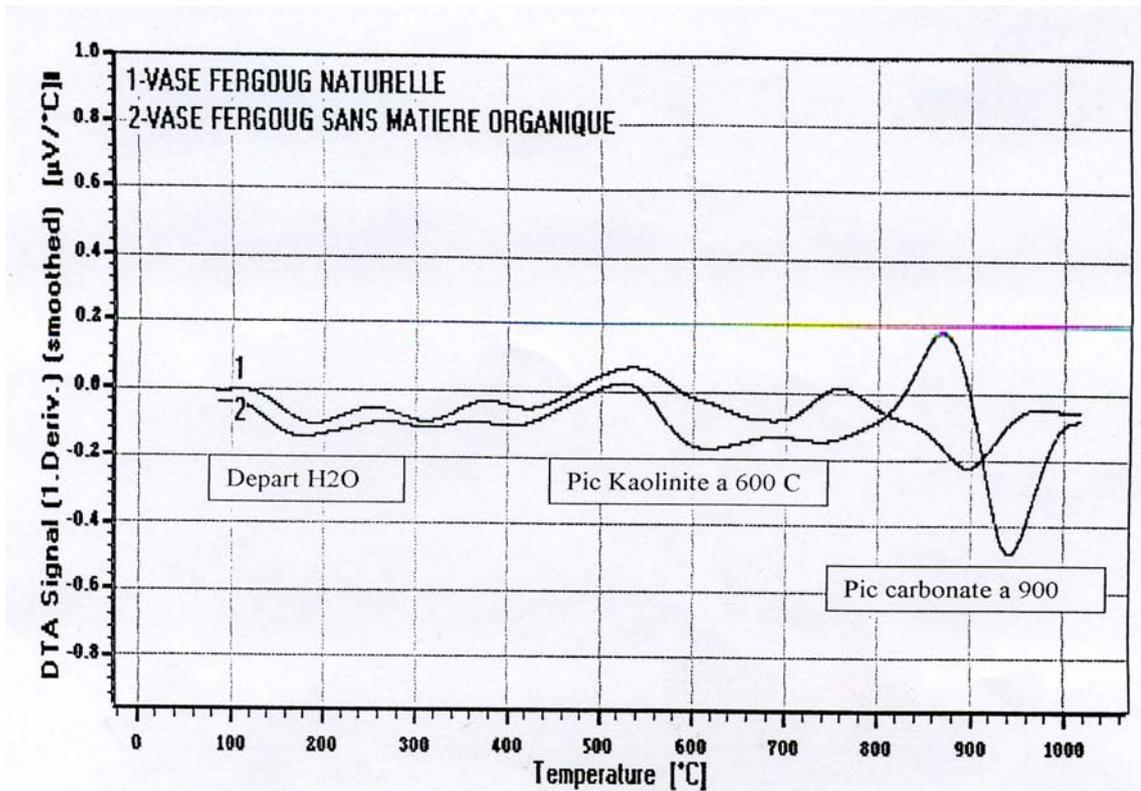


Figure N°39 : Courbe ATD de la vase de Fergoug.

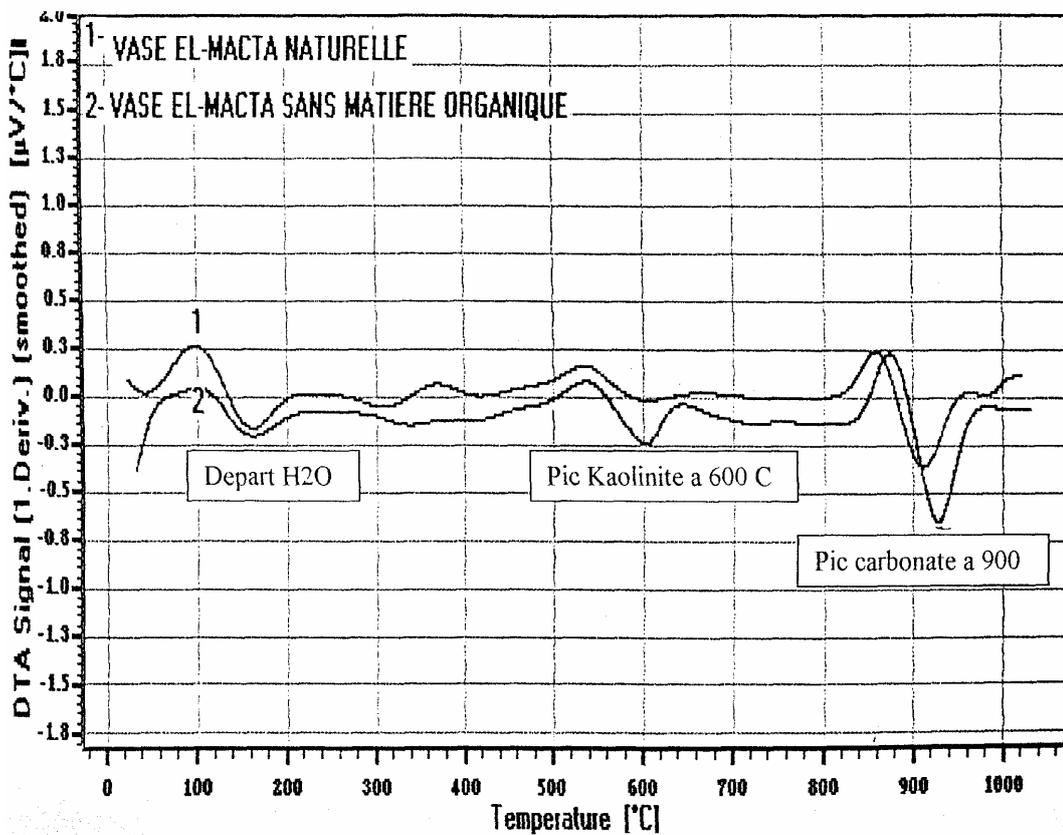


Figure N°40 : Courbe ATD de la vase de la Macta.

c) L'Analyse Thermo Gravimétrique (ATG).

La libération des ions hydroxydes OH^- liés aux cations ainsi que celle du CO_2 s'accompagne par une perte de poids de l'échantillon analysé. La technique d'ATG permet d'identifier les principaux minéraux par cette perte de poids. Elle donne aussi des informations sur la déshydratation des matières premières et permet l'étude des mécanismes mettant en jeu un transfert de masse entre un solide et une phase gazeuse.

Dans notre cas c'est le départ de l'eau sous ses différentes formes qui est recherché. Les résultats sont fonction de l'atmosphère dans laquelle est placé l'échantillon, du volume mort au-dessus des creusets et de la quantité du produit analysé.

Les deux vases analysées donnent des courbes de perte de poids en fonction de la température très semblables. Cela confirme les résultats des autres analyses : les deux vases ont les mêmes origines. Nous observons dans les deux cas : Un amortissement entre 90°C et 150°C dû à la perte de l'eau externe et de 150°C à 450°C une faible variation. Par contre entre 450°C et 600°C nous notons une perte de poids importante caractéristique à la présence de la kaolinite et du quartz. Cette perte de poids continue linéairement marquant la formation du métakaolin. Vers 750°C et 800°C une chute de la courbe correspondant au départ du CO_2 des carbonates.

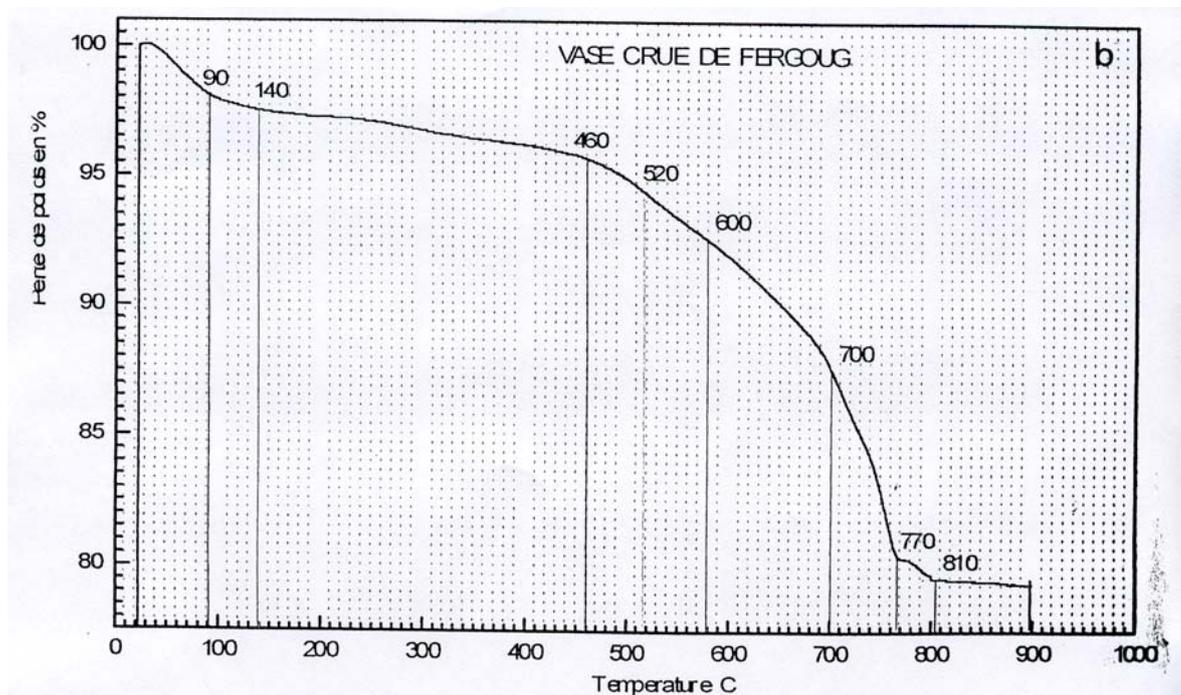


Figure N°41 : Courbe ATG de la vase de Fergoug.

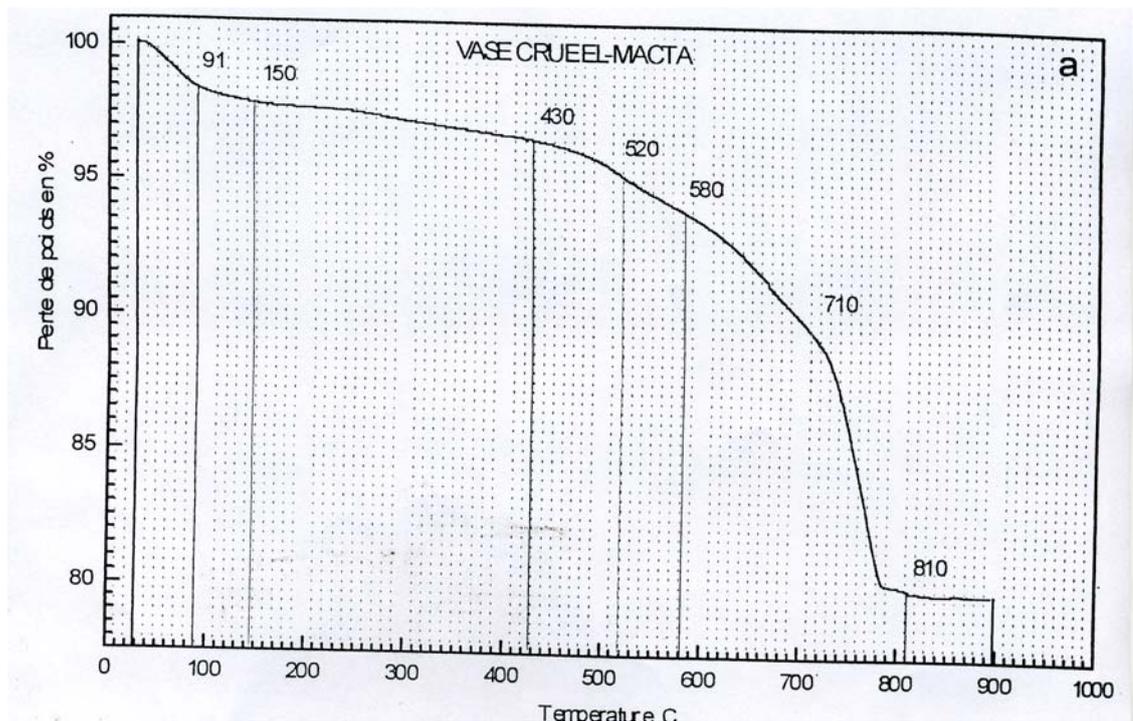


Figure N°42 : Courbe ATG de la vase de la Macta.

V.3.4 – Conclusion.

Les propriétés physiques chimiques et minéralogiques mises en évidence pour les vases étudiées ont révélé d'une part que la vase prélevée à la Macta possède des caractéristiques identiques à celle prélevée à Fergoug. Nous pouvons considérer que probablement en grande partie celle-ci provient de l'entraînement de la vase issue du dragage du Fergoug.

Les différentes techniques utilisées dans l'analyse chimique et minéralogique des échantillons de vase étudiés ont confirmé la présence des minéraux argileux essentiels en prévision des voies de valorisation envisagées.

Conclusion de la deuxième partie

Le barrage du Fergoug, ayant été à l'origine de la création et la prospérité de la ville de Perrégaux, a été exploité pour les besoins de toute la région, aussi bien pour l'irrigation que pour l'alimentation en eau potable des villes voisines telles que Oran et Arzew. Son importance économique est montrée à travers son histoire. L'état avancé de comblement de la retenue impose la prise en charge de toutes les formes de gestion et de valorisation, d'autant plus qu'il n'existe pas de site de remplacement pour une éventuelle construction d'un nouveau barrage. Les opérations de dragage effectuées et à venir provoquent des désordres irréparables si les matériaux extraits restent largués simplement dans l'environnement. La réutilisation des produits extraits du barrage est une préoccupation sérieuse des gestionnaires.

L'étude des sédiments en place réalisée principalement à partir de sondages a montré une variabilité des paramètres d'état et des paramètres mécaniques. Ceci traduit la difficulté des formulations en modèles de comportement pour le choix et l'adoption d'un procédé de dragage. En effet l'état des matériaux en place dépend

des facteurs ayant provoqué les dépôts des sédiments suivant les saisons ainsi que des remaniements antérieurs subis.

Les sédiments du barrage de Fergoug se présentent en général sous forme de sols cohérents gris et bruns. 90% des échantillons analysés sont des argiles sablo-limoneuses avec forte divergence des calibres granulométriques. Les limites d'Atterberg, d'après la classification USCS (United Soil Classification System), ont montré une prépondérance d'argile de plasticité élevée (type CH à plus de 50%) et d'argile de plasticité moyenne (type CL à 40%).

De façon générale, la teneur en eau naturelle des sédiments décroît en fonction de la profondeur et le degré de saturation est très élevé. Les paramètres de résistance au cisaillement présentent certaines différences.

D'autre part, les deux vases ont des compositions minéralogiques contenant les minéraux essentiels contenus dans les liants hydrauliques avec des proportions variables. Le quartz représente l'élément principal des fractions de silt et d'argile.

La possibilité de transformer les structures minérales des vases dans le but d'en fabriquer des liants hydrauliques d'usage courant semble réalisable à condition que la teneur en argile et calcaire soit suffisante. Par comparaison avec d'autres procédés, la vase doit être activée thermiquement, afin de transformer les structures minérales qui sont à l'état naturel stables, en structures amorphes en raison de la fission du CO_2 et du H_2O .

Troisième Partie

Valorisation des Sédiments

Valorisation des Sédiments

L'aménagement hydraulique que représente un barrage-retenu, pour une région à climat semi-aride dont l'économie est directement liée à sa ressource en eau, représente l'ouvrage le plus important. Abandonner l'ouvrage, qui par le passé et encore de nos jours est à l'origine de la prospérité de toute la région, aux caprices de la nature n'est pas envisageable d'autant plus qu'il n'existe pas d'autre site de remplacement. La récupération des volumes de stockage de l'eau perdus par envasement est liée à la gestion efficace des vidanges de fond éliminant une partie importante des sédiments qui se déposent dans la cuvette. La limite de l'efficacité de moyens de chasse dont l'ouvrage est doté a poussé les gestionnaires à l'utilisation de sources extérieures pour draguer le barrage du Fergoug. Il s'agit de volumes considérables de matières solides à prendre en charge et qui ont longtemps été considérés comme déchets.

CH. VI : Application des principes du développement durable.

La valorisation des sédiments figure parmi les recommandations dans de nombreuses études effectuées sur le devenir des sédiments dragués ainsi que sur la préservation des ressources en eau et la protection de l'environnement.

Les questions environnementales sont particulièrement liées à ces propositions de valorisation. Les populations, les politiques, les organisations diverses..., sont amenées à dialoguer malgré les difficultés liées à la communication, pour préserver l'environnement dans le cadre global du développement durable.

VI.1- les objectifs du développement durable.

La valorisation des sous-produits issus des dragages doit s'inscrire dans le cadre global du développement durable dont les objectifs sont regroupés en trois classes essentielles :

1- Préserver l'environnement par des mesures de protection de la qualité de l'environnement, par la restauration, l'aménagement et le maintien des habitats essentiels aux espèces ainsi que par une gestion durable de l'utilisation des populations animales et végétales exploitées.

2- Améliorer l'éthique sociale, c'est-à-dire permettre la satisfaction des besoins essentiels des communautés humaines présentes et futures et l'amélioration de la qualité de vie, et ce, notamment, par l'accès au logement de qualité.

3- Améliorer l'efficacité économique, c'est-à-dire favoriser une gestion optimale des ressources humaines, naturelles et financières, afin de permettre la satisfaction des besoins des communautés humaines, et ce, notamment, par la responsabilisation des entreprises et des consommateurs.

VI.2 - Les difficultés des prises de décisions.

Il est nécessaire de souligner que l'application des principes du développement durable dont le « principe de précaution » fait partie, est confrontée à la **difficulté du dialogue** :

« Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine, en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent par l'application du principe de précaution, à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin d'éviter la réalisation du dommage... »

A cette difficulté de dialoguer, s'ajoute la **difficulté de communiquer**. En effet les chargés des dossiers environnementaux (politiques, ONG, voisins...), pour régulièrement présenter leurs dossiers et expliquer les démarches d'amélioration, ils sont confrontés à la difficulté permanente de communication, c'est-à-dire *être capables de transformer les données scientifiques ou techniques en informations compréhensibles et crédibles*.

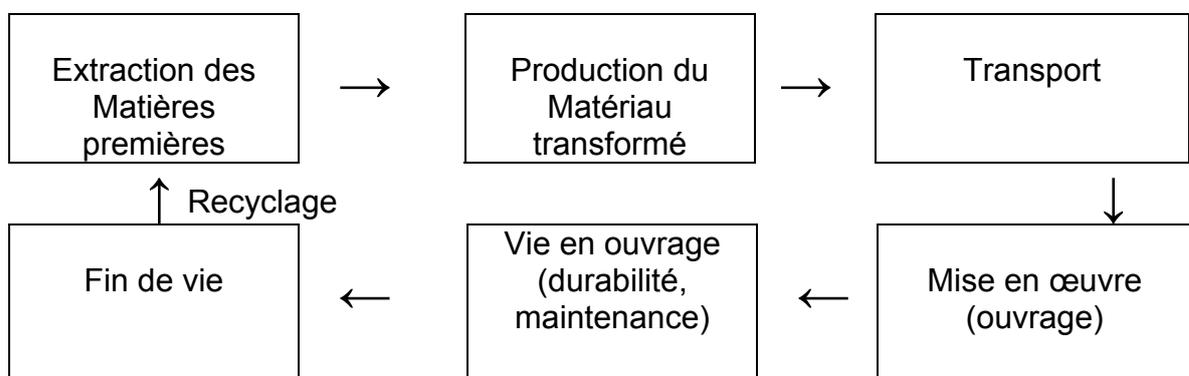
Les mesures devant être appliquées pour l'industrie (industries des matériaux de construction et particulièrement aux ciments et bétons) :

Les grands principes du développement durable sont devenus une réalité complexe et multiforme pour l'industrie. Quelques réponses seulement peuvent être apportées à cette réalité par un secteur industriel :

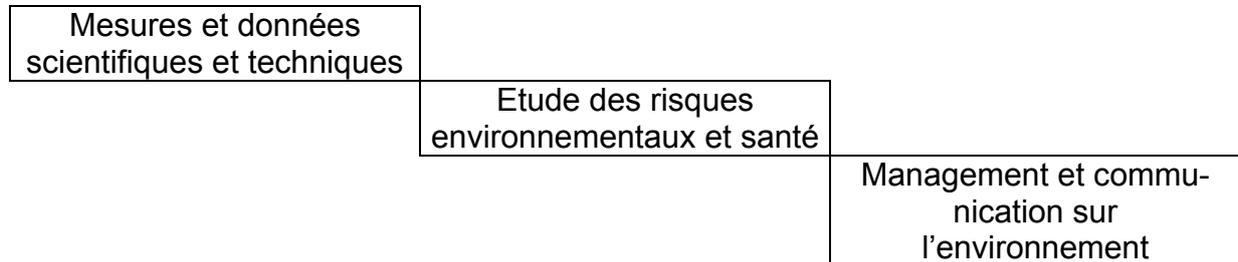
- Limiter les émissions polluantes.
- Travailler sur le recyclage des sous-produits.
- Proposer des solutions qui protègent l'environnement.
- Prendre en charge les questions liées à la santé publique.

VI.3- Les prises des décisions.

L'analyse du cycle de vie (ACV) du produit valorisé dans le cadre d'un développement durable est essentielle pour une prise de décision.



La valorisation d'un produit doit tenir compte aussi de l'environnement et des conséquences relatives à la santé publique dont la problématique est une question de compréhension.



VI.4- Conclusion.

En définitive, accumuler les résultats ne suffit pas; il faut encore comprendre la portée, prendre les mesures appropriées et les faire accepter par les parties prenantes. Il reste toutefois encore à faire en matière de prise de conscience, par les populations et leurs dirigeants, sur les retombées environnementales des actions de développement qui le plus souvent sont régies selon leurs aspects économiques seulement.

CH. VII : Valorisation des sédiments.

Le traitement des vases est l'ensemble des processus utilisés pour améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques. Ce traitement peut se faire de deux façons différentes : soit par stabilisation de la vase en lui ajoutant d'autres produits qui améliorent certaines propriétés, soit par une dépollution. Dans tous les cas l'objectif du traitement est la valorisation de la vase.

La transformation des vases et leur utilisation sont des questions peu développées et restent à l'ordre du jour pour de nouvelles réglementations en adéquation avec les notions de protection de l'environnement et le développement durable. D'après Diagana (1997), les principaux traitements qui ont été expérimentés ou qui sont réellement opérationnels dans le monde actuellement sont :

- la séparation granulométrique par hydro-cyclone (port de Hambourg)
- le recyclage des boues à des fins agricoles et urbaines (port de Rotterdam)
- la méthode d'empreinte (port de Stein)
- l'utilisation d'un hydro cyclone et d'un élutriateur (port de Hambourg)

Parmi ces exemples, le recyclage des boues du port de Rotterdam est remarquable. Les deux tiers environ des matériaux dragués sont transportés par des chalands qui les refoulent sur des sites de déversement situés dans les polders de bas niveau autour de Rotterdam. L'intérêt est double : débarrasser le port des boues et utiliser ces matériaux à des fins utiles telles que la création de zones urbaines et industrielles, terrains de récréations aux alentours des grandes concentrations urbaines, zones agricoles...

VII.1- Approches antérieures d'utilisation des vases du Fergoug.

L'utilisation des sédiments de la retenue de Fergoug dans le domaine agricole et celui des matériaux du génie civil, semble présenter de séduisantes propositions.

En agriculture, des quantités considérables de sédiments peuvent être exploitées directement. Des études récentes, dont celle de Labiod (2002) ont mis en évidence les possibilités réelles d'utilisation de la vase de Fergoug et de celle de Bou-Hanifia comme fertilisant. De plus l'aménagement de pâturages aux abords des cours d'eau pourrait stabiliser les versants et diminuer des effets de l'érosion.

Dans l'industrie du bâtiment, l'exploitation de la vase comme liant hydraulique vu qu'elle renferme les mêmes minéraux essentiels, offre une voie de valorisation concrète. Pour cela, il faut que la teneur en argile et en calcaire soit suffisante. Les domaines d'application de ces nouveaux produits sont divers puisque les critères mécaniques ne sont pas les seuls recherchés ; les performances vis-à-vis de la durabilité offrent de nombreuses possibilités d'investigation. Pour que les expériences acquises puissent être appliquées à nos matières premières, il est nécessaire d'effectuer des essais d'activation thermique sur des échantillons de vase. Le traitement thermique transforme la composition minéralogique du matériau. La combinaison des nouvelles structures amorphes avec la chaux et les nouvelles formations cristallines, aboutissent à la formation de liant hydraulique.

La surveillance du procédé d'activation thermique s'effectue à l'aide de techniques d'analyse minéralogique (DRX, ATD, ATG...). Cela permet de déterminer la température optimale de cuisson. Les essais sur pâtes durcies et sur mortiers sont ensuite effectués pour les essais de résistances mécaniques et de durabilité qui permettront de porter un jugement définitif.

Une possibilité prometteuse consiste à utiliser la vase directement dans la fabrication de briques ou de tuiles. En vertu de leur composition minéralogique, les vases séchées et traitées thermiquement dans des conditions particulières de pression et d'humidité, aboutissent à des résistances comparables à celles des briques et tuiles utilisées en construction. D'habitude, les matières premières utilisées en tuilerie doivent être homogénéisées et traitées par des procédés mécaniques (concassage, tamisage, lavage...). En ce qui concerne les vases, ces opérations sont déjà accomplies du fait du charriage sédimentaire dans les cours d'eau. Ainsi il est admis que la matière première transportée par drague suceuse est pratiquement homogène et ne nécessite pas d'autre traitement. Par contre, il est important d'éviter les impuretés qui pourraient nuire à la qualité du produit fini.

Autres possibilités : Bien qu'il n'existe pas de cadre législatif algérien spécifique à l'utilisation des sous-produits d'incinération, ou d'autres produits présentant une structure argileuse à l'état vaseux ou solide, il est souvent fait recours à la réglementation française ou européenne dans le cadre des recherches sur leur valorisation. En France, d'après Roland (2001), c'est la réglementation sur les cendres volantes « issues de l'incinération des ordures ménagères en lit fluidisé » qui prévaut.

Les directives issues de cette réglementation fixent des seuils à la fraction lixiviable ainsi qu'à des teneurs minimales en composés chimiques polluants pour la « valorisabilité » d'un sous-produit.

Les autres possibilités de valorisation à envisager pour les vases issues des dragages dépendent principalement de leurs teneurs en minéraux argileux ainsi que de leur granulométrie. Les matières qui contiennent entre 45 et 70% de silice, entre 12 et 15% d'alumine et une courbe granulométrique évoluant dans le domaine entre le limon et celui des sables fins, sont utilisées grâce à leur caractère pouzzolanique en techniques routières et dans certains matériaux du génie civil. Dans la plupart des cas il s'agit d'une substitution à un matériau devenu plus rare donc plus coûteux. Dans toutes ces études, la recherche consiste à déterminer des formulations optimales de mélanges à base de boues séchées et éventuellement incinérées pour un comportement mécanique maximum, le plus souvent en matière de résistance à la compression.

Des travaux récents ont montré d'autres applications de la fraction argileuse de la vase de Fergoug dans le traitement des eaux de rejet (Dali Youssef, 2005), la fixation des métaux lourds (Bouabdesselam, 2004).

La présence de polluants dans les vases peut entraîner en cas d'épandage des nuisances que ce soit par contamination des eaux souterraines ou bien par une inhibition de la croissance des végétaux ou encore par transfert dans les plantes et les organismes (contamination de la chaîne alimentaire). Les origines de la présence des métaux et autres polluants dans les vases sont variées et spécifiques à chaque métal. Quelques éléments constituent jusqu'à un certain seuil des oligo-éléments nécessaires à la nutrition des plantes (Zn, Cu, Mn, B, Mo, Co, Se). D'autres sont rapidement toxiques (Cd, Pb, Hg). La concentration totale d'un métal dans un sol ou

dans une eau ne permet pas de déduire les risques de toxicité ou la mobilité dans l'environnement, en fait la toxicité est liée à la forme chimique et les complexes minéraux.

En conclusion, les possibilités d'utilisation des sous-produits issus des opérations de dragage sont réelles et touchent de nombreuses applications. De nombreuses recherches sont menées dans le monde et en Algérie, bien que le cadre réglementaire et normatif sont souvent inexistantes. Dans tous les cas, les questions environnementales et économiques sont la base de référence.

La fraction solide des vases de barrage constitue un matériau économique local très attractif du fait de sa granularité fine économisant les étapes coûteuses de concassage et tamisage, dans les applications en Génie Civil. L'utilisation de ces matériaux en tant que matière première contribue sûrement à la protection de l'environnement des désordres apparus suite au simple rejet des matériaux dragués. La prise en charge ne concernera alors que les déchets ultimes qui ne représentent qu'une fraction réduite.

VII.2- Industrie du ciment et le BTP.

Cette partie est consacrée à la présentation de rappels théoriques et des procédés techniques de valorisation. Nous nous intéressons principalement de la vase de Fergoug bien que les matériaux prélevés à Bou-Hanifia et La Macta ont été étudiés. Les trois sites étudiés représentent des zones de sédimentation de particules provenant de sous bassins versants de la même région. Nous retrouvons les mêmes formations minéralogiques dans les différents prélèvements avec une granulométrie plus grossière pour les sédiments de Bou-Hanifia et un taux d'impuretés plus élevé pour celle de la Macta.

Un traitement thermique à moyenne température de la vase de Fergoug a permis l'aboutissement à des structures amorphes à caractère pouzzolanique. Ce caractère a été mis en évidence à l'aide d'essais mécaniques effectués sur des pâtes durcies confectionnées à partir de ciment ordinaire et de vase calcinée. Le traitement hydrothermal en autoclave d'éléments pressés confectionnés à partir de vase et de ciment a révélé la possibilité de fabrication d'une brique de bonne résistance mécanique. Un élément de toiture pour pays en voie de développement ainsi qu'un béton pouzzolanique ont été étudiés.

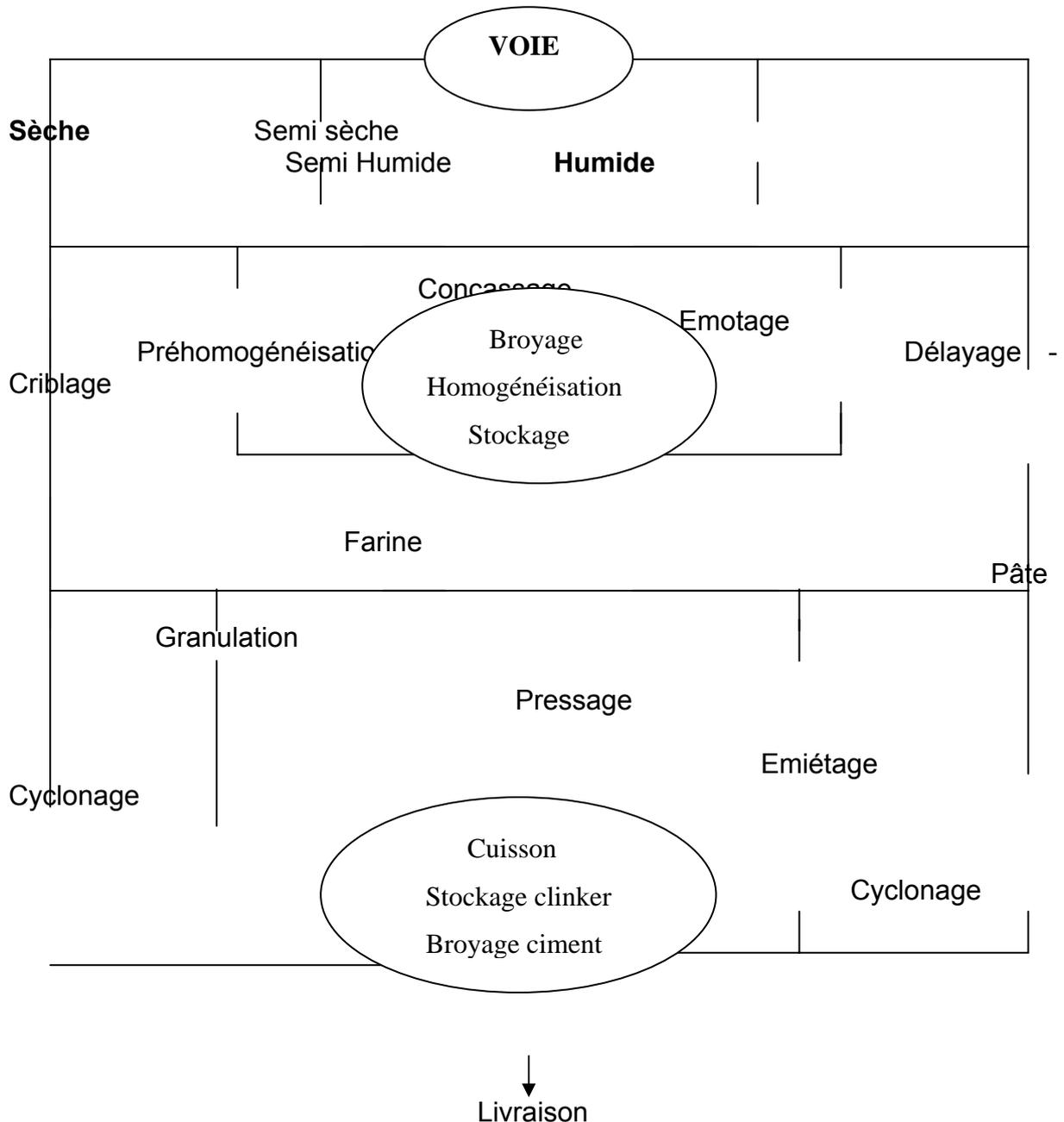
Les analyses chimique et minéralogique de la vase étudiée ont révélé la présence des minéraux essentiels composant les liants hydrauliques courants. Il suffirait d'activer thermiquement les minéraux argileux pour qu'ils réagissent à l'eau si la teneur en calcaire est suffisante, pour former des composés qui font prise et durcissent à température ordinaire.

VII.2.1- Rappels.

VII.2.1.1 : Compositions minéralogiques des ciments.

- Processus de fabrication des ciments :

La fabrication du ciment est faite selon le schéma suivant :



Les constituants du ciment :

Les principaux constituants du ciment sont :

- Le Clinker Portland
- Le Laitier de Haut Fourneau

- Les Pouzzolanes : naturelles et naturelles calcinées (artificielles).
- Les Cendres Volantes : Siliceuses et calciques.
- Les Schistes Calcinés
- Les Calcaires
- La Fumée de Silice

A ces minéraux est ajouté un régulateur de prise dont le rôle est de retarder la réaction d'hydratation du clinker pour permettre la manipulation du béton frais. Il s'agit du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydre (CaSO_4) à l'état naturel ou artificiel.

Les principaux constituants des ciments sont représentés en diagramme ternaire « Silice-Calcium-Alumine » suivant :

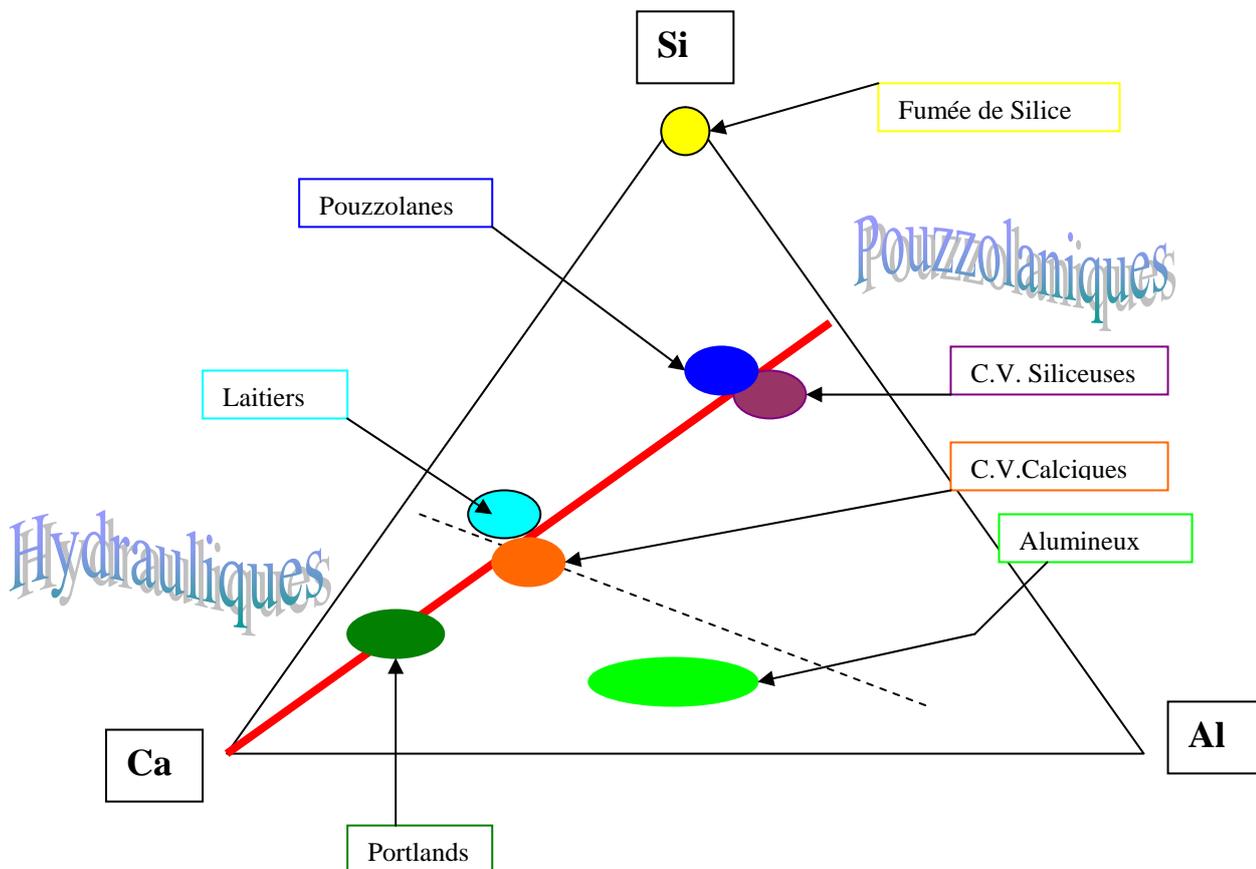


Figure N°43 : Diagramme ternaire Si-Ca-Al des constituants du ciment.

A gauche du trait en pointsillés, les composés ont la propriété de faire prise même sous l'eau. A droite de ce trait, les composés ne font pas prise (ou très lentement) car il leur manque du calcium: ils ont les propriétés pouzzolaniques.

Les principaux constituants entrant dans la composition des ciments sont situés sur le trait en rouge qui représente un rapport Si/Al constant. Ces éléments ne contiennent pas les mêmes quantités de calcium. Aussi ceux qui en contiennent moins (comme les pouzzolanes) seront-ils plus lents à s'hydrater car ils nécessitent un apport calcique plus important.

- Nomenclature cimentaire.

La nomenclature cimentaire utilise des lettres symbolisant les éléments principaux exprimés sous forme d'oxydes :



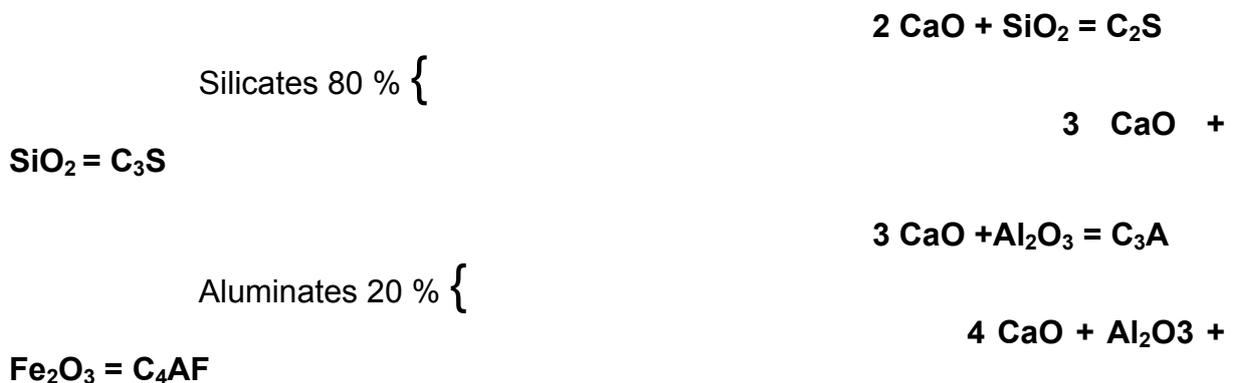
Cela permet une simplification dans l'écriture des équations chimiques de transformation lors de l'hydratation. C'est une simplification qui ne correspond pas à la réalité physique. Ces éléments étant cristallisés pour la majorité d'entre eux. On exprime ainsi les 4 minéraux majeurs du clinker :



VII.2.1.2 : Le clinker Portland.

Les minéraux présentent des spectres caractéristiques en DRX. Ils possèdent des formes minérales variables. Selon les conditions de cuisson et la présence plus ou moins importante d'éléments mineurs (éléments de transition en particulier). On calcule par la formule de « Bogue (1950) » la composition potentielle du clinker en recombinaison des différents oxydes mesurés par fluorescence X. La Figure N°45 schématise le processus de fabrication du clinker en four rotatif.

La composition moyenne du clinker est :



Les principaux minéraux: CaO: 64 % SiO₂ : 21 %, Al₂O₃ : 5 % Fe₂O₃ : 3 %

Les minéraux accessoires: MgO : 2 % SO₃ < 1 % TiO₂ < 1 % mineurs < 1 %

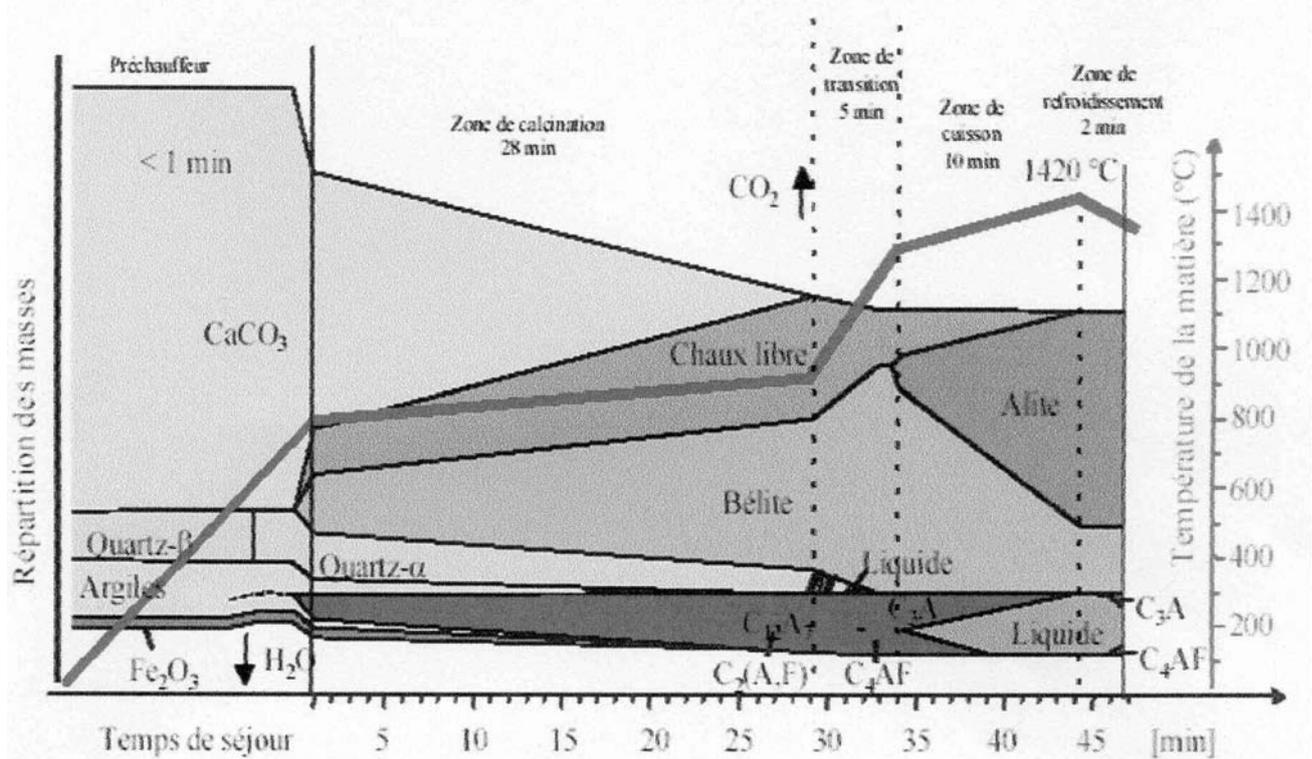
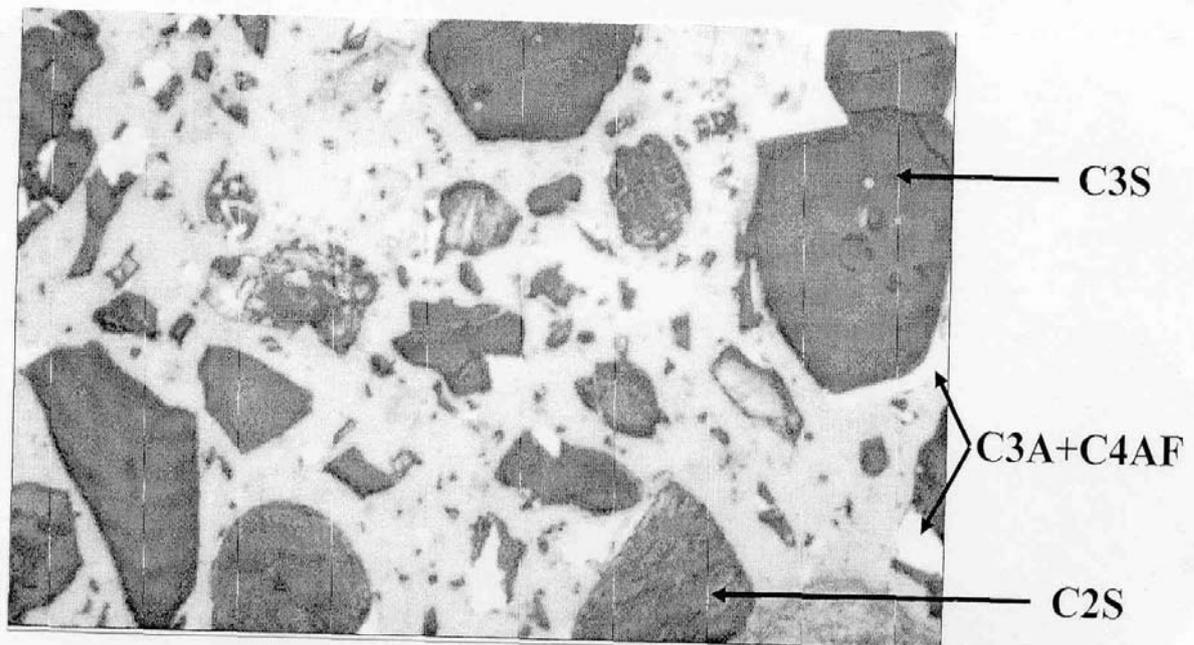
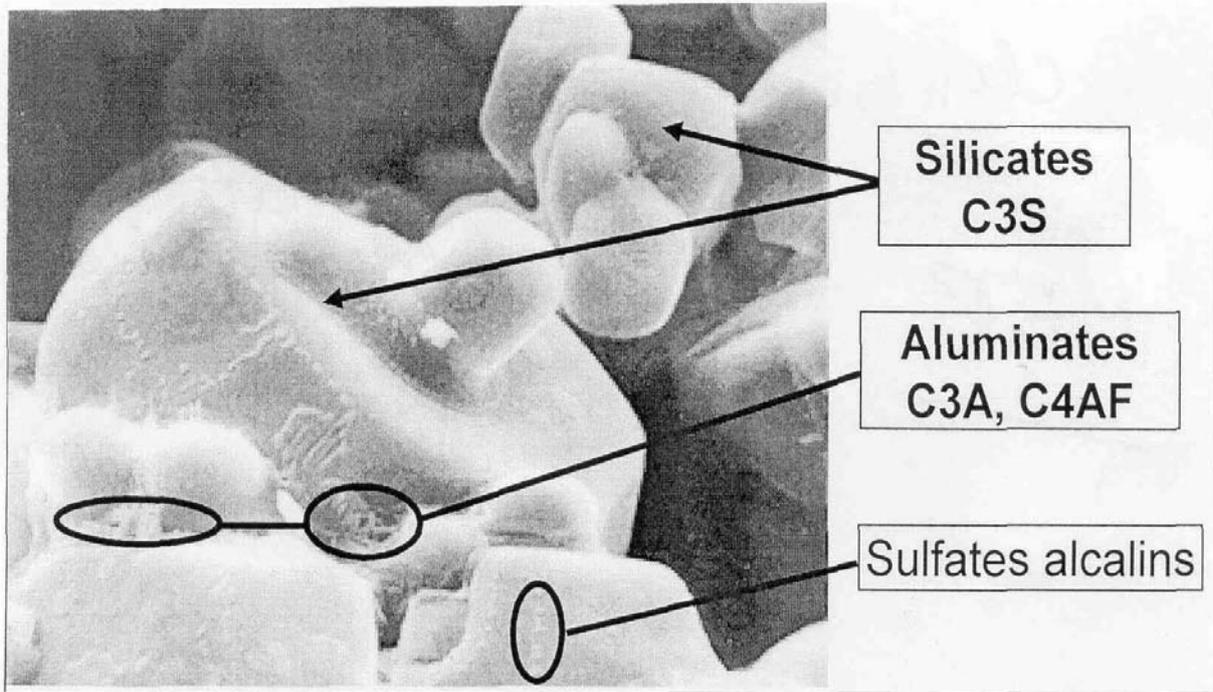


Figure N°44 : Procédé de formation du clinker en four rotatif.



Le C3S est facilement reconnaissable à ses grands cristaux aux contours polygonaux
 Le C2S est plutôt arrondi et présente une macle caractéristique à 120°
 Les (C3A et C4AF), phase interstitielle d'aluminates (blanche) est collée aux cristaux de silicates.

Photo N°18 : Clinker Portland vu au microscope optique.



Les sulfates alcalins sont issus des gaz produits lors de la combustion et viennent se condenser sur les faces des cristaux de silicates de la tempe.

Photo N°19 : Clinker Portland vu au M.E.B.

VII.2.1.3 : Hydratation du ciment : formation des hydrates (CSH)

Dès les premiers instants du gâchage du ciment à l'eau les réactions d'hydratation sont entamées entre les silico-aluminates de calcium qui se présentent sous forme de sels anhydres et l'eau. En fonction de la composition du ciment, l'hydraulicité est définie par l'indice i .

$$i = \text{indice d'hydraulicité} = \frac{\text{Poids de (silice combinée + Alumine + Ferrite)}}{\text{Poids de (chaux caustique réelle + magnésite)}}, (= 0,6)$$

- Formation des hydrates : schématiquement la photo N°20, ci après, montre l'étape intermédiaire (passage par l'ettringite) dans la formation des aluminates hydratés.

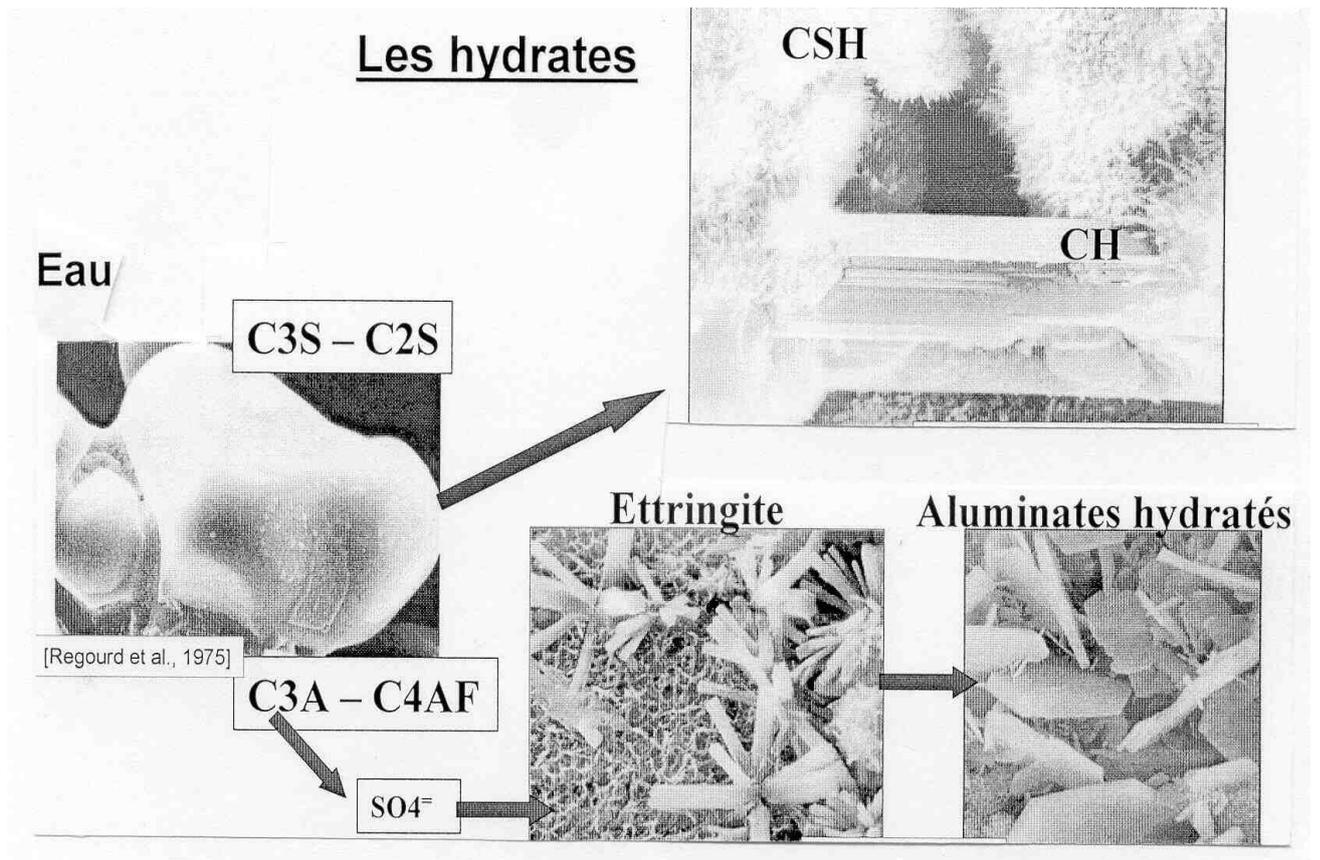


Photo N°20 : Hydratation du clinker (formation des hydrates).

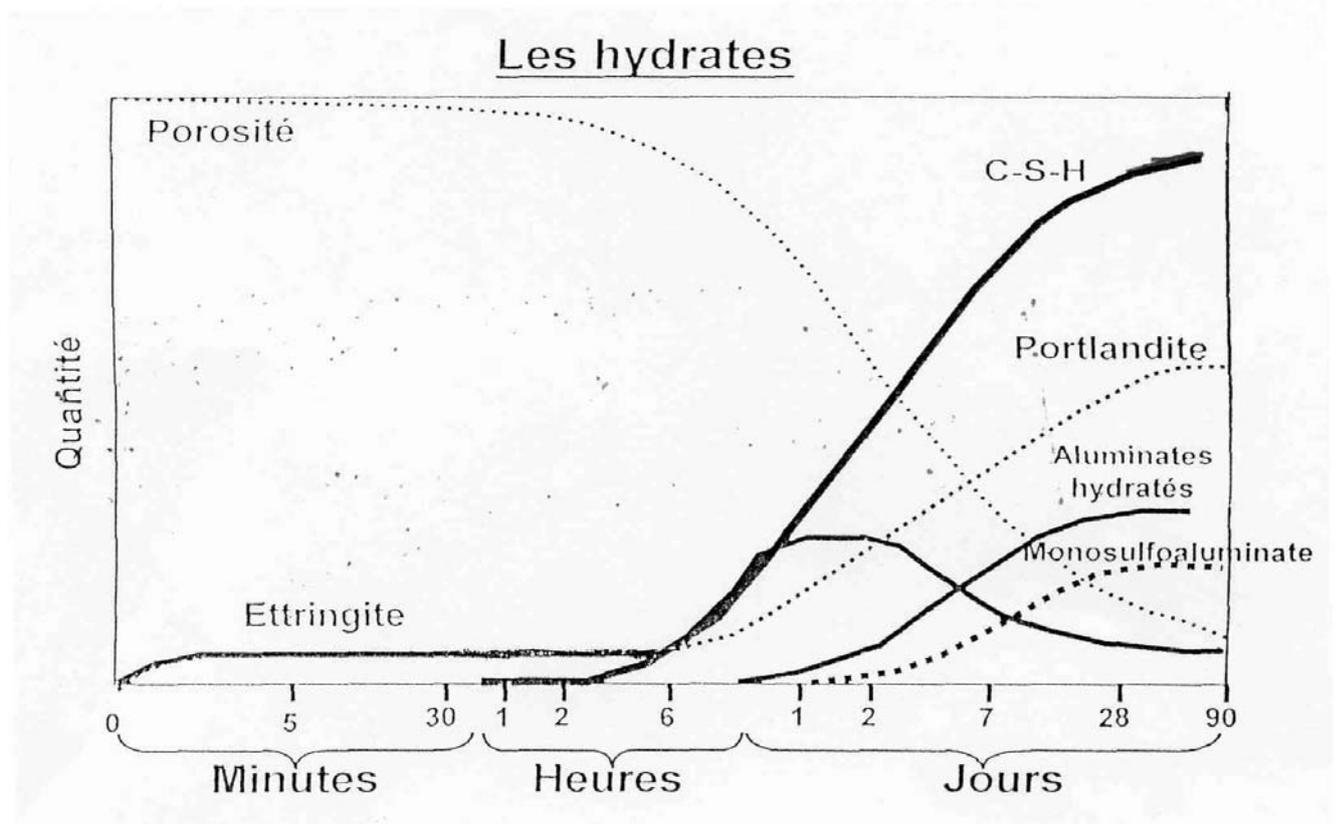


Figure N°45 : Formation des hydrates par hydratation du ciment.

La figure N°45 montre l'évolution dans le temps des différents hydrates. Dès le début de l'hydratation, on observe l'apparition de la portlandite dont la proportion augmente en parallèle des CSH qui apparaissent un peu plus tard. Les aluminates et le monosulfoaluminate apparaissent après les CSH et continuent en plus faible proportion.

Il est clair qu'avec la formation des hydrates, la porosité diminue et continue à diminuer à long terme en tendant vers une valeur minimale.

- Structure des hydrates (C-S-H) : les équations suivantes expriment l'hydratation des silicates de calcium et la formation des silicates de calcium hydratés.



Ca (OH)₂ : Portlandite

CaOx, SiO₂, (H₂O)_y : Silicate de Calcium Hydraté (C-S-H)

Les produits d'hydratation à température ambiante du silicate tricalcique (C3S) et du silicate bicalcique (C2S) sont du silicate de calcium hydraté (Portlandite).

La portlandite a une structure de type brucite (Mg (OH)₂) : feuillets d'octaèdres Ca(OH)₆ reliés par leurs arêtes. La cohésion entre feuillets est assurée par des liaisons hydrogène. Les cristaux de portlandite peuvent atteindre des tailles importantes et sont facilement identifiables dans une pâte de ciment hydraté.

- Composition des C-S-H

Méthode directe :

Le rapport Ca/Si du CSH dans une pâte de ciment hydraté peut être déterminé par microanalyse X en microscopie électronique à transmission (MET). On observe en général des fluctuations de composition à des échelles nanométriques très fortes. Une moyenne du rapport Ca/Si ≈ 1,7 est généralement admise.

Méthode indirecte :

Le rapport Ca/Si est également déterminé de façon indirecte par analyse thermique gravimétrique (ATG). La figure n°46, montre la perte de masse d'une pâte de C3S (silicate tricalcique) complètement hydratée. La perte de masse observée vers 450 °C correspond à la décomposition de la portlandite que l'on peut ainsi quantifier. On en déduit alors un rapport Ca/Si moyen d'environ 1,7 à 1,8.

Nous remarquons également, qu'il est impossible par cette technique de fournir un chiffre quand à la quantité d'eau de structure car il n'est pas possible de distinguer l'eau de constitution de l'eau adsorbée ou de l'eau des pores.

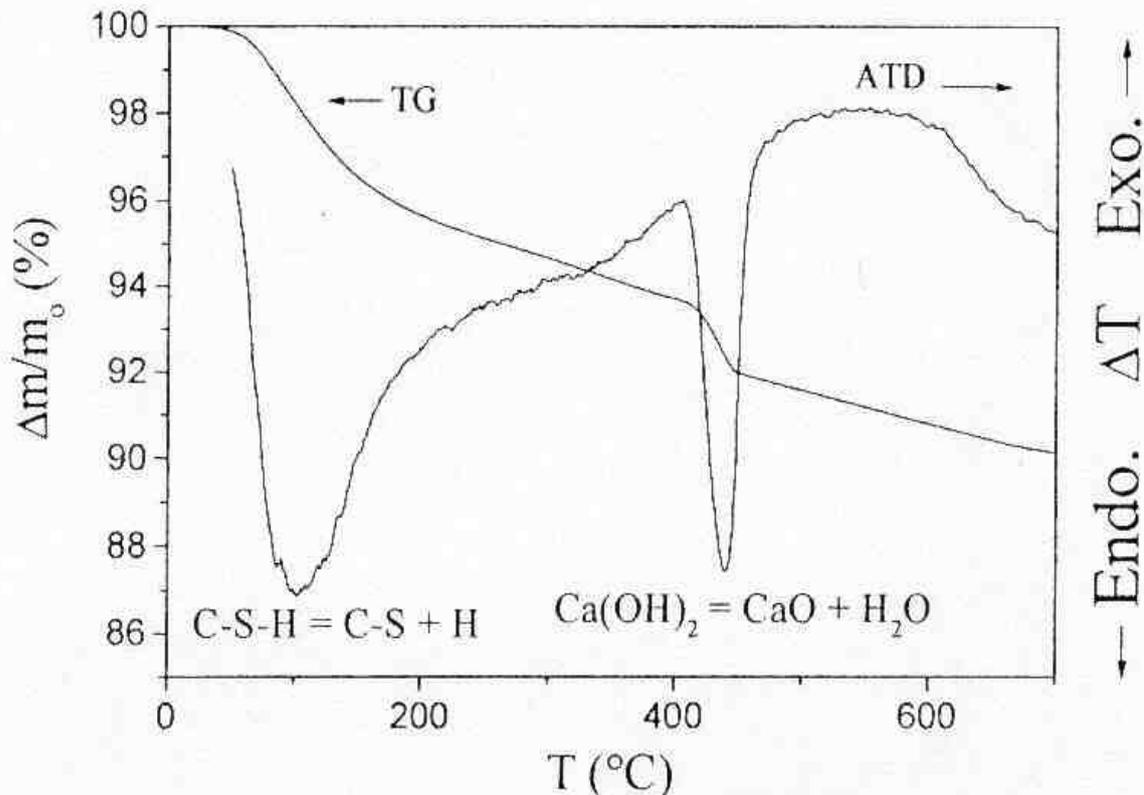
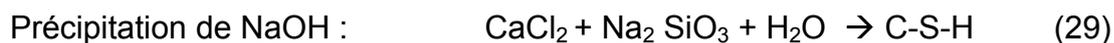


Figure N°46 : ATG & ATD d'un C3S hydraté (Lequeux, 2003).

- Les C-S-H de synthèse : Le silicate de calcium hydraté est aussi obtenu par réaction pouzzolanique et par précipitation de soude (NaOH).



VII.2.1.4 - Effets de la portlandite.

L'hydratation du ciment portland en 28 jours aboutit à la formation de 20 à 25 % de son poids de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Suivant les critères recherchés, cette chaux hydratée peut être bénéfique ou non.

Pour les bétons à l'air libre :

La portlandite formée présente des avantages.

- Protection des aciers du béton armé
- Augmentation de la compacité en se carbonatant à l'air, à condition que l'eau de ressuage s'élimine lentement en provoquant des incrustations de CaCO_3 dans les pores et non des efflorescences.
- Favorise l'addition de constituants secondaires (par ex., active les propriétés hydratantes du laitier).
- Active les pouzzolaniques pour former des C-S-H.

Pour les bétons à l'abri de l'air :

La portlandite peut entraîner des altérations.

- Si le sol en contact du béton est gypseux ou traversé par des eaux séléniteuses ou par l'eau de mer, les sulfates forment avec l'alumine du ciment le sulfoaluminate (sel de Candlot), qui est expansif.

- En présence d'eau pure ou riche en CO_2 , la portlandite est dissoute et entraînée. La porosité augmente.

VII.2.1.5 - Les liants pouzzolaniques.

- Les pouzzolanes.

Les définitions rencontrées mettent en évidence deux propriétés typiques fondamentales du phénomène de pouzzolanité. Un matériau pouzzolanique :

- Est pauvre en oxyde de calcium disponible ou lié.

- En présence d'oxyde de calcium et d'eau fait prise et durcit à température ordinaire.

On englobe ainsi sous un vocabulaire unique outre les sables volcaniques qui constituent la base des liants utilisés dans l'antiquité, tous les produits naturels d'origine sédimentaire et les pouzzolanes artificielles.

Ainsi pour acquérir des propriétés mécaniques, le matériau pouzzolanique doit consommer de l'oxyde de calcium. Toutefois il est reconnu qu'il n'existe pas une relation unique pour tous les produits pouzzolaniques entre la quantité de CaO (ou CaOH) fixée et le résultat mécanique. L'*activité pouzzolanique* définit les phénomènes qui à température ordinaire, transforment en un temps raisonnable, les mélanges de pouzzolanes de chaux et d'eau en matériaux durs et compacts (Dron 1975).

C'est à leur haute teneur en constituants acides, silice et alumine, que les pouzzolanes doivent cette propriété.

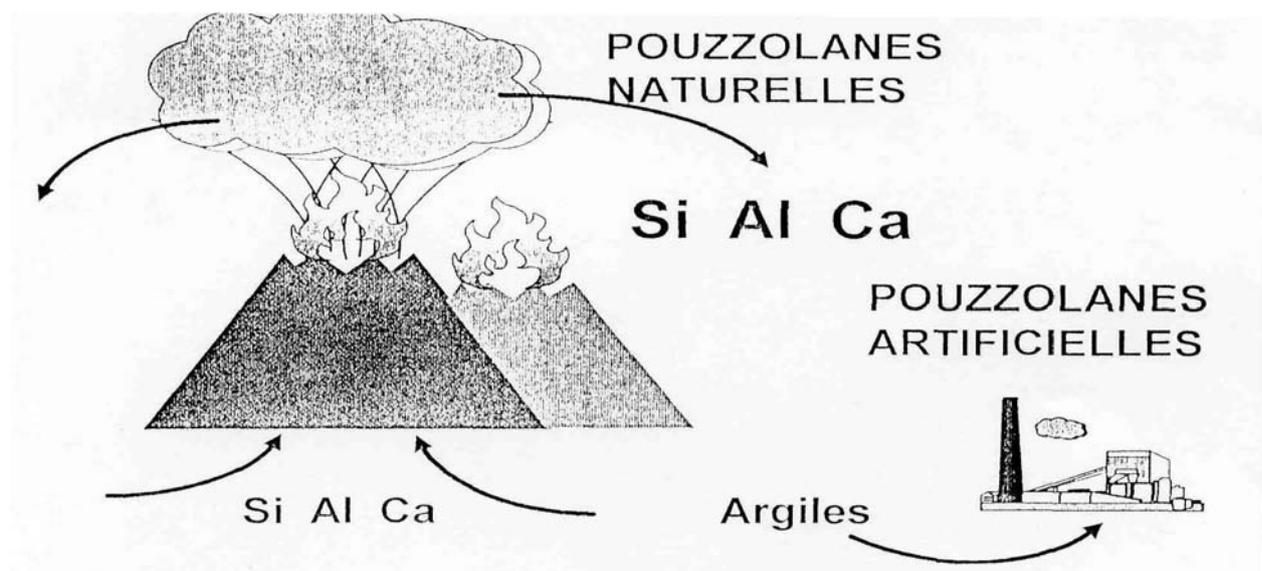
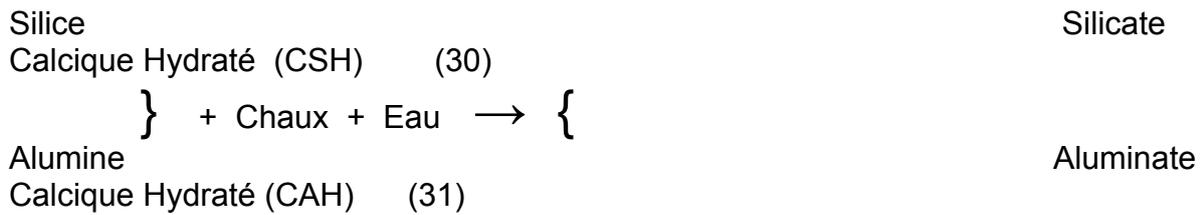


Figure N°47 : Origines des pouzzolanes.

De façon schématique nous pouvons écrire la réaction pouzzolanique suivante :



Cette réaction pouzzolanique n'est observable que sur des matériaux qui comportent des phases minérales dans lesquelles la silice et l'alumine sont partiellement mobilisables. L'activité pouzzolanique des argiles calcinées, amorphes et des cendres volantes essentiellement vitreuses est particulièrement liée à cette particularité. Aujourd'hui, il est admis que le même critère s'applique aux pouzzolanes naturelles et que **seules la silice et l'alumine** des phases vitreuses sont **effectivement réactives**.

- Résistances mécaniques des pouzzolanes activées.

Les pouzzolanes activées à la chaux acquièrent des résistances mécaniques qui sont à l'origine de leurs diverses applications en construction depuis l'antiquité. Pour plusieurs raisons les pouzzolanes qu'elles soient naturelles ou calcinées artificiellement, activées à la chaux, donnent des résistances mécaniques plus faibles que celles des ciments ordinaires. Parmi ces raisons la température de cuisson à laquelle le produit pouzzolanique s'est formé est la plus importante.

D'après Murat (1982), la température de cuisson est optimale entre 700 et 800 °C. Pour une température inférieure à 700 °C, la déshydratation du Kaolin n'est pas totale et pour une température supérieure à 800 °C, il y a diminution du degré d'amorphisation car la recristallisation du métakaolin est entamée.

La figure N°48 montre, pour le kaolin, la structure amorphe du kaolin (métakaolin) est observée entre 600 et 800 °C.

La figure N°49 montre, que pour la vase de Fergoug la zone d'instabilité (structures amorphes) se situe entre 600 et 800 °C.

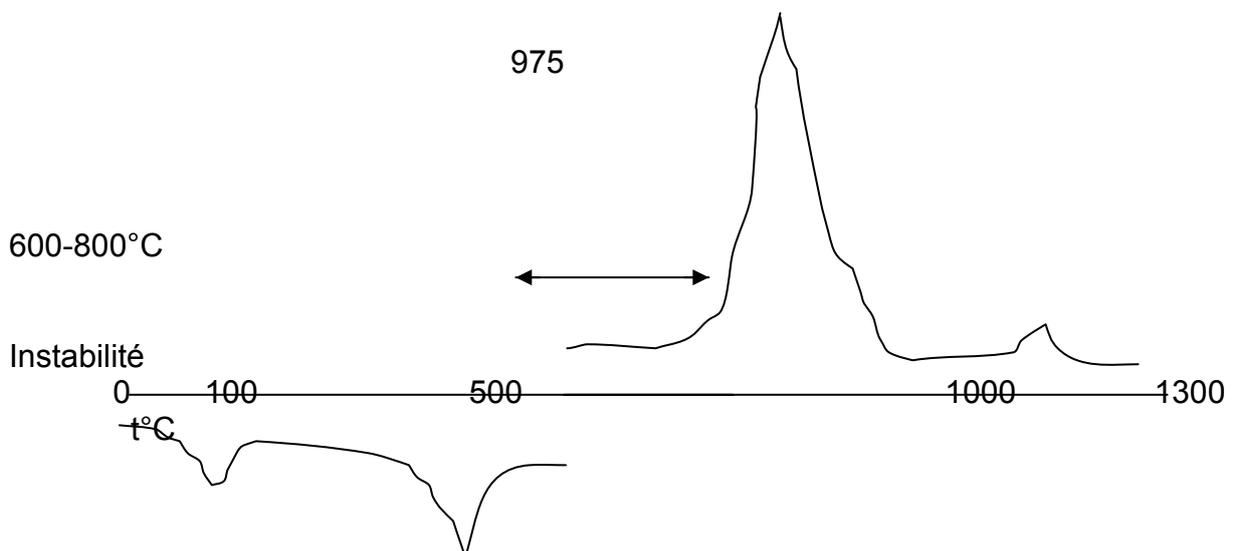


Figure N° 48 : Courbe ATD du Kaolin

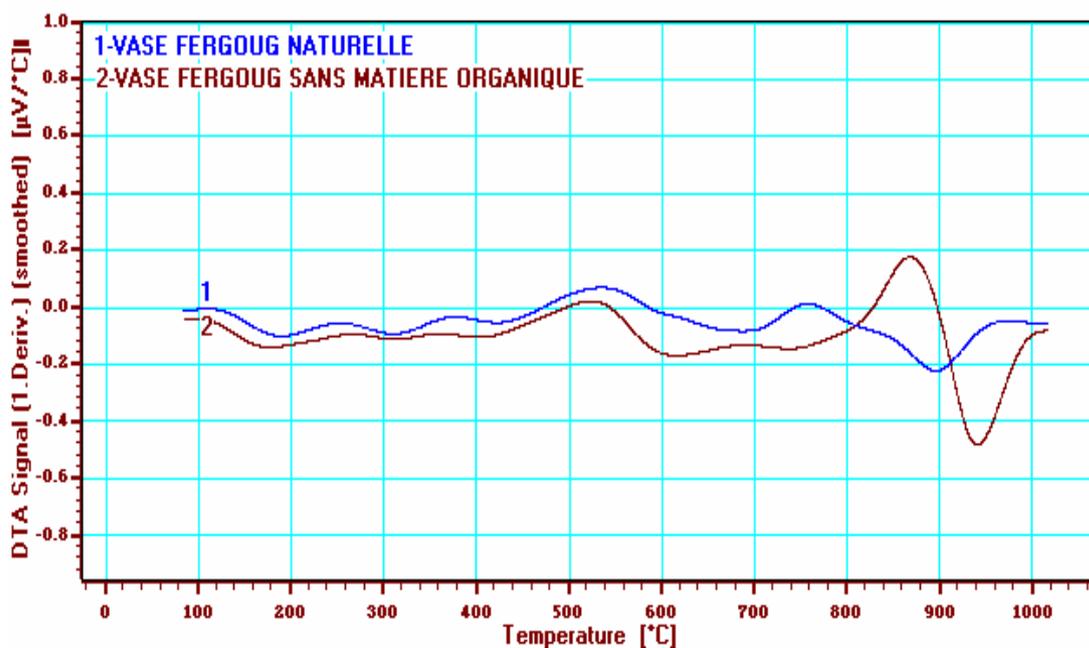


Figure N° 49 : Courbe ATD de la vase de Fergoug

Il est distingué en fonction des structures cristallines des minéraux de base ainsi qu'en fonction des impuretés et de la composition minéralogique des pouzzolanes trois classes de résistances liées à leur réactivité (Figure N°50).

Réactivité des pouzzolanes

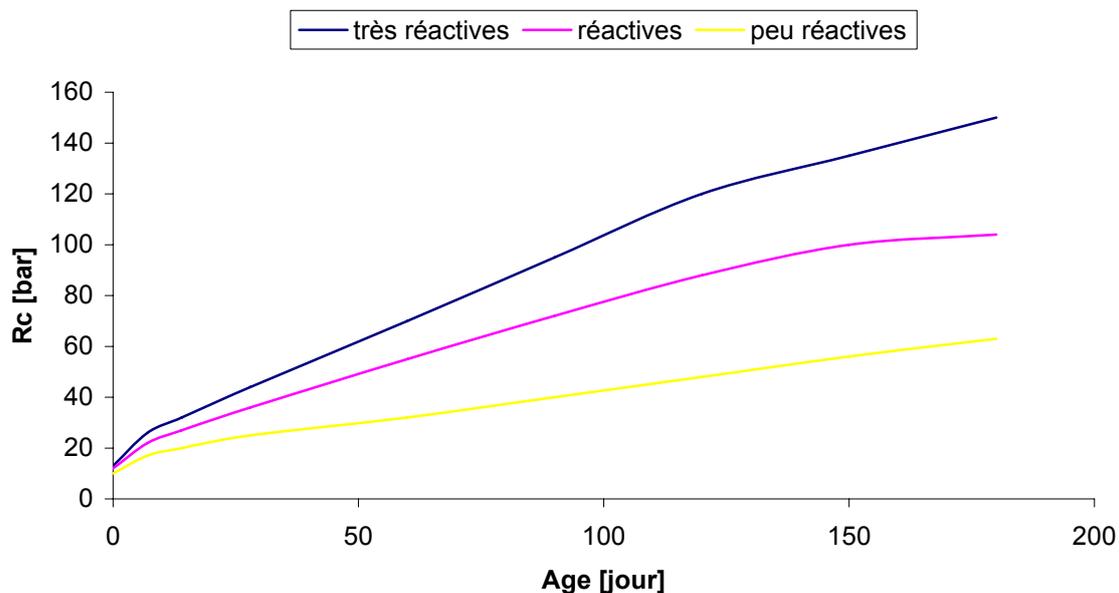


Figure N° 50 : Résistances mécaniques et réactivité des pouzzolanes

Nous remarquons dans cette figure qu'il s'agit des résistances à la compression simple de pouzzolanes activées à la chaux. Les valeurs des résistances des produits les plus réactifs (R_c à 150 jours ~ 14 MPa) restent inférieures à celles des ciments. Par contre les résistances des ciments pouzzolaniques dans lesquels le produit pouzzolanique est incorporé pour améliorer les performances techniques sont nettement plus significatives. La figure N°51 situe les résistances mécaniques des pouzzolanes par rapport à celles des ciments.

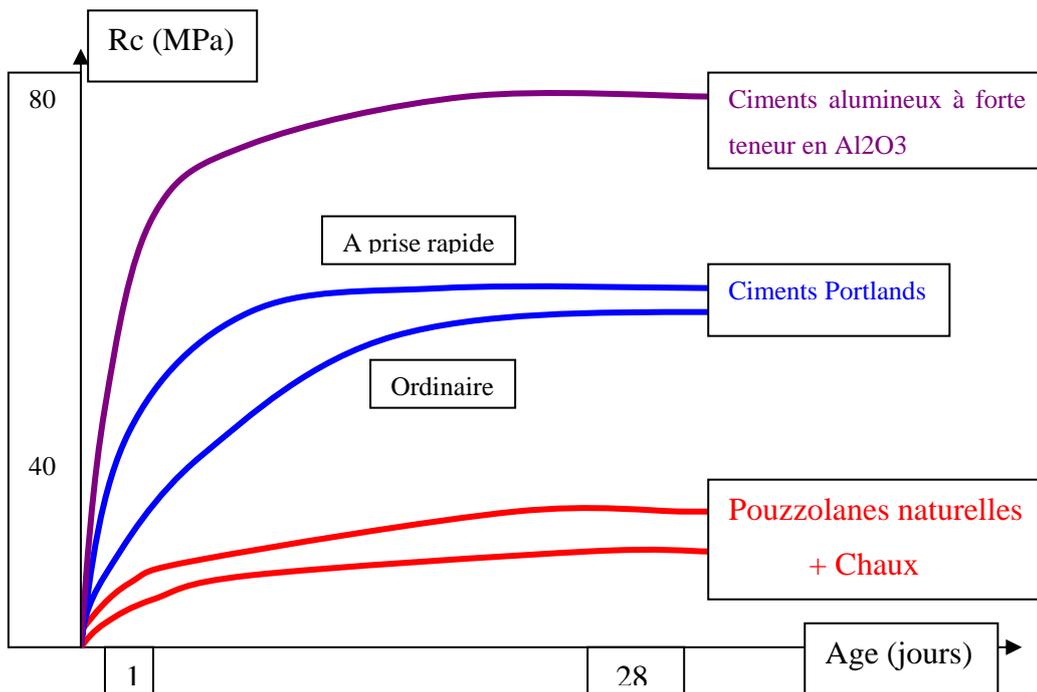


Figure N° 51 : Résistances mécaniques des pouzzolanes comparées aux ciments.

Dans la théorie de Le Chatelier, on admet que le transport de matière s'effectue à l'état dissous, ce qui implique une ionisation préalable et la diffusion de ces ions dans la phase aqueuse dans laquelle les hydrates germent et se développent.

La réactivité d'une phase aqueuse sera définie dans ces conditions comme la quantité de matière qui passe en solution par unité de surface et par unité de temps. L'activité pouzzolanique dont sont liées les résistances mécaniques comprend l'ensemble des réactions physiques et chimiques qui se produisent au contact de l'eau entre la chaux, la silice et l'alumine. Ces réactions passent par une mise en solution préalable. La stabilité du cristal joue un rôle essentiel dans la solubilité. C'est la raison pour laquelle à l'état métastable les argiles calcinées sont plus réactives qu'à l'état naturel plus stable.

La solubilité de la chaux dans l'eau étant élevée (1,23 g de CaO par litre d'eau pure à 20°C), elle se dissout rapidement et l'eau se sature en ions Ca⁺⁺ et OH⁻ en équilibre avec la chaux solide tant qu'il en subsiste en excès. La vitesse de la réaction pouzzolanique dépendra surtout de la solubilité de la silice et de l'alumine qui sont liées à la température, à leur degré de cristallinité et au PH de la solution.

En définitive, nous ne pouvons pas dire que les rapports entre la réactivité et les résistances mécaniques sont simples. On ne peut associer les deux phénomènes « réactivité – résistance » qu'à de courtes échéances compte tenu du fait que les phénomènes de diffusion devancent la réaction pouzzolanique proprement dite. A long terme, il a été observé que les résistances de certaines pour faiblement réactives, ont donné des résistances équivalentes à celles d'autres pouzzolanes plus réactives.

- Les ciments pouzzolaniques :

Ce sont des mélanges de ciment (clinker portland) et de pouzzolanes dont les proportions doivent être telles que la chaux libérée lors de l'hydratation du clinker corresponde aussi exactement que possible, à la quantité que peut combiner la pouzzolane.

Ces ciments sont caractérisés par une basicité plus faible, due à la consommation de la chaux, et par des résistances mécaniques finales comparables à celles des ciments Portland.

L'étude de l'évolution chimique des hydrates formés montre qu'il y a d'abord hydratation du clinker et formation de portlandite puis, ensuite, réaction pouzzolanique.

Les ciments pouzzolaniques sont élaborés avec les deux préoccupations suivantes :

- La détermination de la quantité de produit pouzzolanique à combiner avec le ciment.
- L'évaluation du pouvoir pouzzolanique de l'ajout.

Les ciments pouzzolaniques ont des performances plus recherchées que celles du ciment Portland, du fait de leur porosité plus faible et donc un meilleur comportement vis-à-vis de leur durabilité.

VII.2.2- Elaboration d'une pouzzolane de synthèse à base de vase calcinée.

La substitution d'une certaine quantité de vase calcinée (à caractère pouzzolanique), au ciment Portland dont l'hydratation libère de la chaux (sel de Candlot), permettrait d'obtenir des liants avec des caractéristiques similaires voire meilleures que celles du Portland seul (c'est-à-dire similaires à un CEM II) tout en économisant la même quantité de ciment. En effet la chaux libérée va être fixée par la pouzzolane ajoutée.

A priori l'hydratation du CEM I libère de la chaux à raison de 20 à 25 % de son poids, la substitution de pouzzolane (vase calcinée), est envisagée dans les mêmes proportions.

La composition minéralogique de la vase de Fergoug permet d'envisager la transformation des structures argileuses stables en structures amorphes. Cette transformation lui assurant la réactivité pouzzolanique recherchée pour la substitution envisagée.

Cette partie sera consacrée à la description du processus de préparation et de transformation par traitement thermique d'échantillons de vase ainsi qu'à l'évaluation des performances mécaniques obtenues.

VII.2.2.1- Préparation et cuisson de la vase.

Les vases prélevées dans la zone de rejet (en aval du barrage de Fergoug), après séchage en étuve à 50°C, broyées et tamisées par voie sèche. Les tamisats qui passent à 250 micromètres et qui représentent plus de 95% du prélèvement sont récupérés pour la cuisson.

La calcination a été effectuée par petites quantités, en fonction de la capacité des fours disponibles. Les opérations de cuisson ont nécessité certaines précautions : pour éviter les chocs thermiques la vitesse de cuisson a été réglée à 5 degrés par minute, la température de cuisson (750 °C) a été maintenue constante pendant 5 heures. Le produit ainsi obtenu (vase calcinée) a été conservé à l'abri de l'air et de l'humidité.

Des précautions analogues de conservation du ciment utilisé ont été observées dans le but de conserver fixes les variables dues aux caractéristiques du ciment utilisé. (Conservation en petites quantités prêtes à l'emploi, à l'abri de l'air et de l'humidité).

VII.2.2.2-Les mélanges étudiés.

Pour cerner la réactivité de notre produit pouzzolanique de synthèse obtenu par calcination de la vase, nous avons opté pour la réalisation de trois mélanges de ciment et de vase calcinée, avec un échantillon de ciment seul (tableau n°16).

N° du mélange	% en Ciment	% en Vase Calcinée
1	70	30
2	50	50
3	30	70
4	100	00

Tableau N°16 : Composition des mélanges ciment- vase

VII.2.2.3- Confection des éprouvettes.

Les essais de résistance mécanique peuvent être effectués sur des bétons, des mortiers ou des pâtes de liant durcies. Les bétons et les mortiers font appel à des méthodes de compositions granulaires, dont les erreurs dues aux formulations, aux imprécisions opératoires et sur les caractéristiques des granulats, seront cumulées à celles dues aux pâtes du liant. D'autre part, la calcination de la vase dans des fours de faible capacité a limité notre production de pouzzolane artificielle. C'est pour ces raisons que nous avons réalisé la partie expérimentale sur des éprouvettes de pâte pure de liant.

La quantité d'eau de gâchage variant suivant les proportions de vase calcinée contenue dans chaque mélange, a d'abord été déterminée pour chacun des mélanges par des essais de consistance des pâtes et ensuite optimisée par essais de résistance sur des pâtes durcies à 7 jours. La figure N°53 montre les valeurs

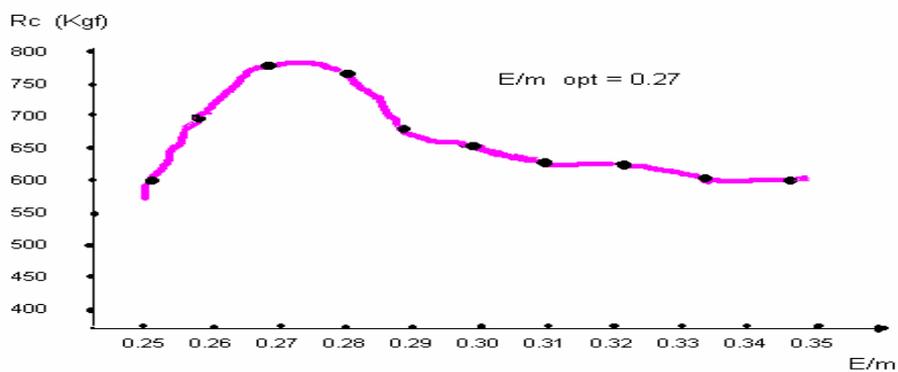
optimales obtenues pour chaque mélange. Ces valeurs ont été maintenues pour la confection des différentes pâtes.

La figure N°53 comprend deux présentations : en (a) est présentée l'optimisation du rapport E/M (eau/mélange) par analogie au rapport E/C (eau/ciment), pour le mélange 1, et en (b) est résumée cette optimisation pour les 4 mélanges.

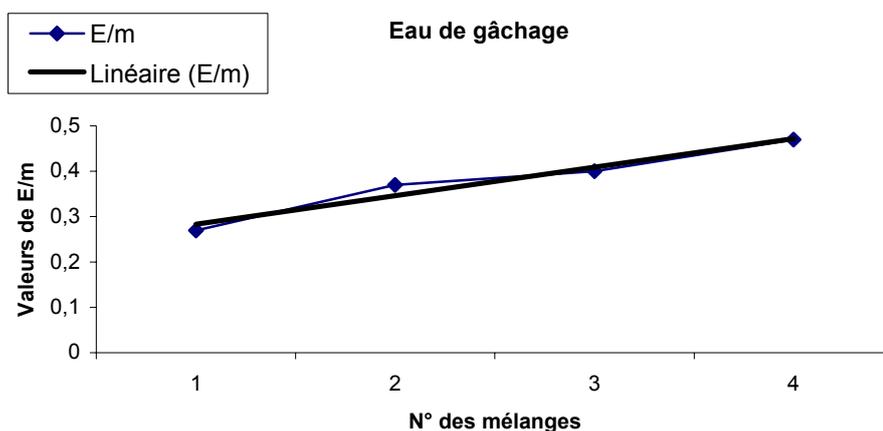
Après dosage des différents mélanges, un premier malaxage à sec a été effectué pour homogénéiser les mélanges, puis la quantité d'eau correspondante est ajoutée progressivement tout en malaxant à faible énergie pour ne pas perdre de particules. Une fois la pâte obtenue, un malaxage énergique est effectué. Les moules sont ensuite remplis avec soin en évitant autant que possible l'emprisonnement de bulles d'air. Pour les différents mélanges, nous avons réalisé des micro-éprouvettes cylindriques de diamètre de 20 mm et de hauteur 40 mm.

Les éprouvettes sont laissées dans les moules pendant 24 heures à l'air libre et, après démoulage elles sont conservées en milieu étanche à 100 % d'humidité jusqu'à J-1. J étant la date de l'essai mécanique. A J-1 les éprouvettes sont séchées et étuvées sans ventilation à 50°C.

Le moulage des micro-éprouvettes a été réalisé à l'aide de tubes en PVC de diamètre intérieur 20 mm. La hauteur des éprouvettes ainsi que le surfacage des bases des cylindres, ont été obtenus par réglages à la tronçonneuse. Une perte importante de matière a été subie pour les deux raisons suivantes : l'opacité des tubes utilisés comme moules a fait que l'air emprisonné pendant le moulage des pâtes à l'état frais, n'a pu être repéré qu'après durcissement, et lors du tronçonnage un grand nombre d'éprouvettes ont été fissurées et éliminées.



(a)



(b)

Figure N°53 : Optimisation de l'eau de gâchage.
(a): mélange1, (b): les 4 mélanges)

VII.2.2.4- Essais mécaniques.

Sachant que les performances dues aux propriétés pouzzolaniques s'acquièrent progressivement dans le temps, des essais de rupture en compression simple, ont été effectués aux échéances suivantes : 7 jours, 15 jours, 28 jours, 60 jours, 90 jours et 120 jours. La valeur de la résistance à la rupture retenue est la moyenne arithmétique d'une dizaine de valeurs expérimentales pour chaque mélange. Nous avons remarqué une dispersion des valeurs de + ou - 20% autour de cette valeur moyenne.

Les essais de compression simple ont été effectués à l'aide d'une presse munie d'anneaux dynamométriques compatibles avec l'ordre de grandeur de la force de rupture prédéfinie lors des essais préliminaires. Les résultats sont présentés sur la figure N°54.

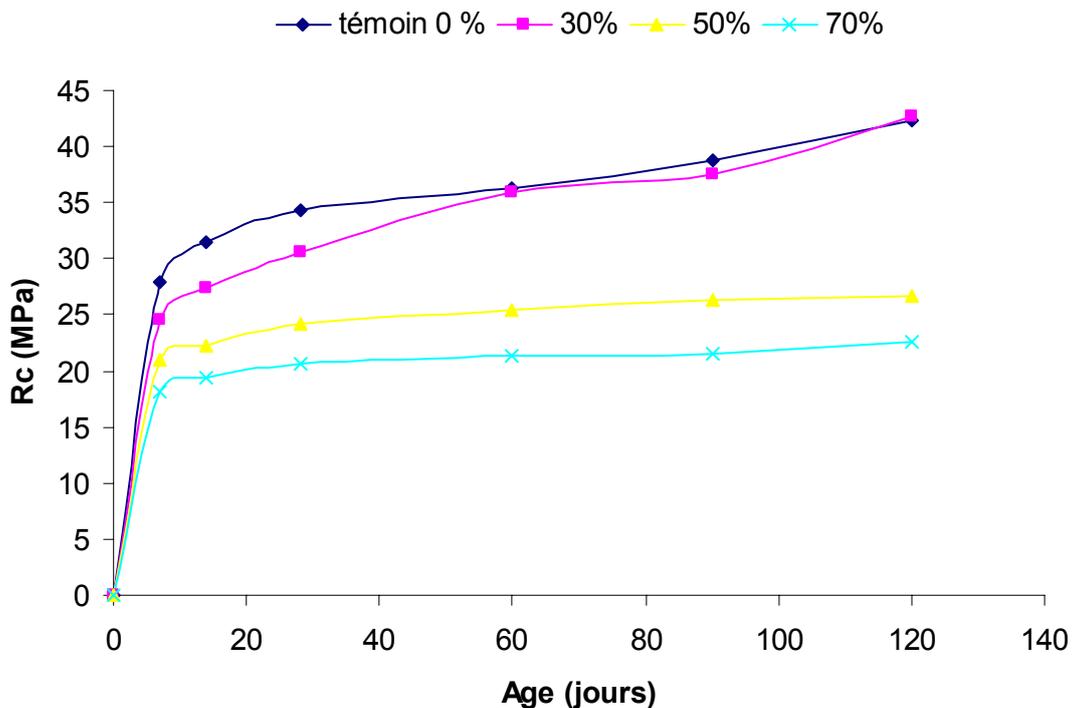


Figure N°54 : Résistances mécaniques des 4 mélanges étudiés.

Nous remarquons sur cette figure que les résistances du mélange à 30 % de vase calcinée rejoignent dès 60 jours celles du témoin et qu'à partir de 120 jours elles dépassent celles du ciment seul. Cela est dû à l'effet pouzzolanique qui n'est observé qu'à de plus longues échéances. Les résistances obtenues à 120 jours dépassent 45 MPa, nous pouvons envisager déjà qu'il pourrait être question de ciment à hautes performances.

Concernant les courbes des deux mélanges à 50 % et 70 % de vase calcinée les résistances obtenues ne dépassant pas 25 et 20 MPa, ces composites peuvent trouver leurs applications dans les sols stabilisés, en particulier en constructions routières et en géotechnique. En effet ce n'est pas toujours l'objectif recherché, la résistance mécanique peut être moindre, en particulier dans les travaux de terrassements et la correction des sols vis-à-vis d'un comportement durable. Ces deux mélanges doivent être caractérisés dans les domaines de la durabilité.

En définitive nous allons retenir le ciment pouzzolanique de synthèse de composition 30 % de vase calcinée et 70 % de ciment portland (CEM I), pour la caractérisation de ses qualités vu qu'il représente un véritable intérêt économique (économie de 30 % de ciment) avec des performances mécaniques similaires, voire meilleures.

VII.2.2.5- Caractérisation du ciment composé à 30 % de vase calcinée.

Le ciment composé obtenu à partir des proportions 70 % de ciment CEM I et 30 % de vase calcinée jouant le rôle de pouzzolane artificielle, est un ciment pouzzolanique de type CEM II. En comparaison avec les résistances du témoin en ciment seul, nous pouvons voir sur la figure N°55, que la résistance caractéristique à 28 jours du CEM I est obtenue sur le CEM II de synthèse à une échéance plus longue (~50 j). En plus à partir de 120 jours nous constatons que la résistance de notre ciment de synthèse dépasse celle du témoin.

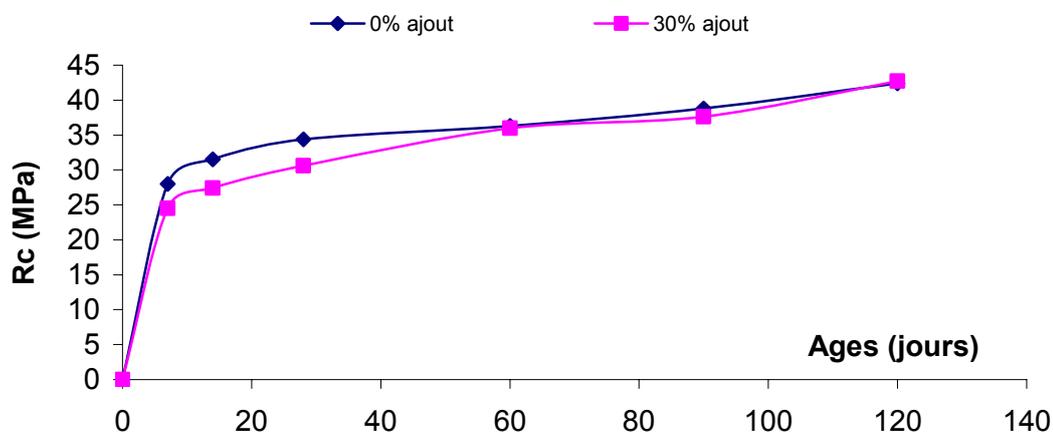


Figure N°55 : Résistance mécanique du ciment composé comparée à celle du témoin.

Temps de prise :

L'ajout de vase calcinée modifie les temps de début et de fin de prise du ciment. Les résultats des essais de prise à l'aiguille de Vicat sont présentés au tableau n°17.

Echantillon	Témoin (CEM I seul)	Ciment composé à 30%
-------------	---------------------	----------------------

Début de prise	57 minutes	3 heures et 53 mn
Fin de prise	2 heures et 14 mn	5 heures et 09 mn

Tableau N°17 : Temps de prise du mélange à 30% de vase calcinée.

Absorption capillaire et perméabilité :

Ces deux essais ont été réalisés sur les deux ciments (témoin et composé à 30%). Des éprouvettes 4x4x16 de mortier normal et d'autres de pâte pure ont été confectionnées pour des essais.

La perméabilité : c'est la faculté d'un matériau à se laisser traverser par l'eau. Elle se traduit par la quantité d'eau pénétrée à travers une unité de surface pendant une durée donnée.

Un tube gradué fixé sur l'éprouvette à sa base de façon étanche (colle + paraffine) rempli d'eau a été utilisé dans cet essai.

L'absorption capillaire : c'est le pouvoir d'un matériau à absorber et retenir l'eau à travers les fissures et les vides capillaires qu'il contient. L'échantillon est posé sur un lit de sable gorgé d'eau de façon permanente. La quantité d'eau absorbée par unité de surface est déterminée par pesées jusqu'à poids constant.

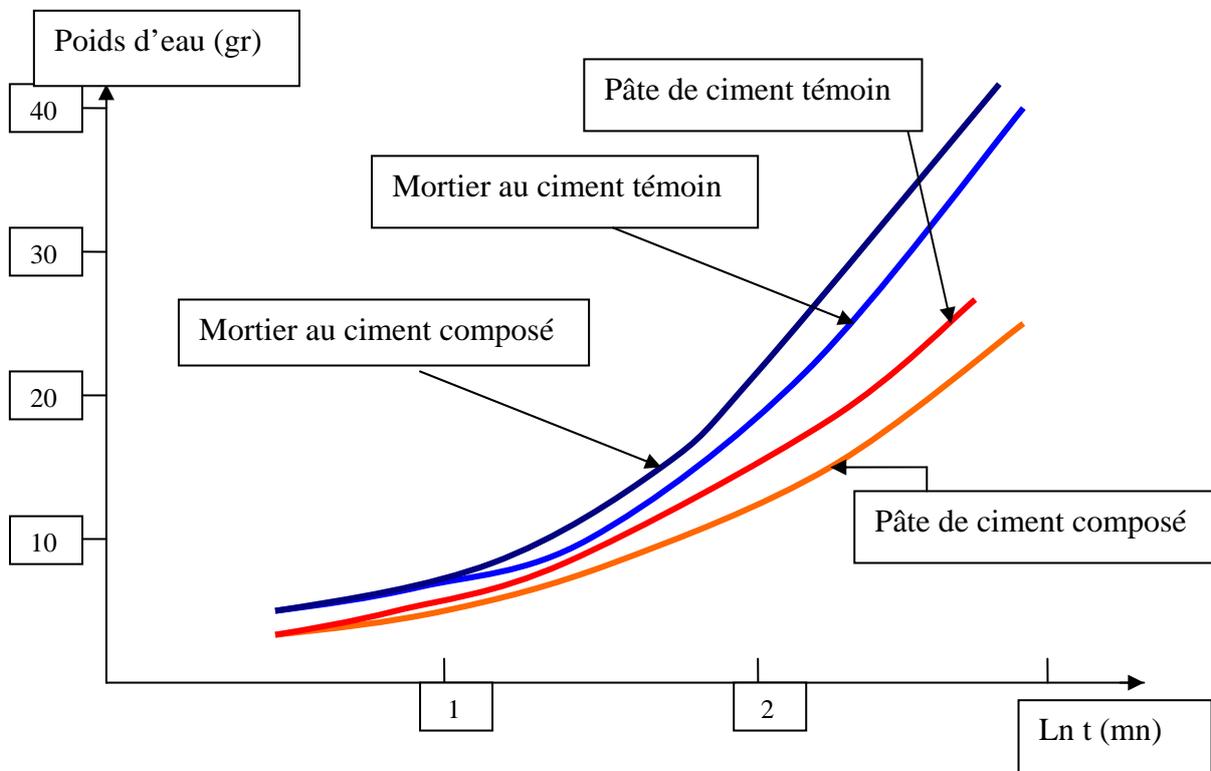


Figure N°56 : Essais de capillarité sur pâtes et mortiers.

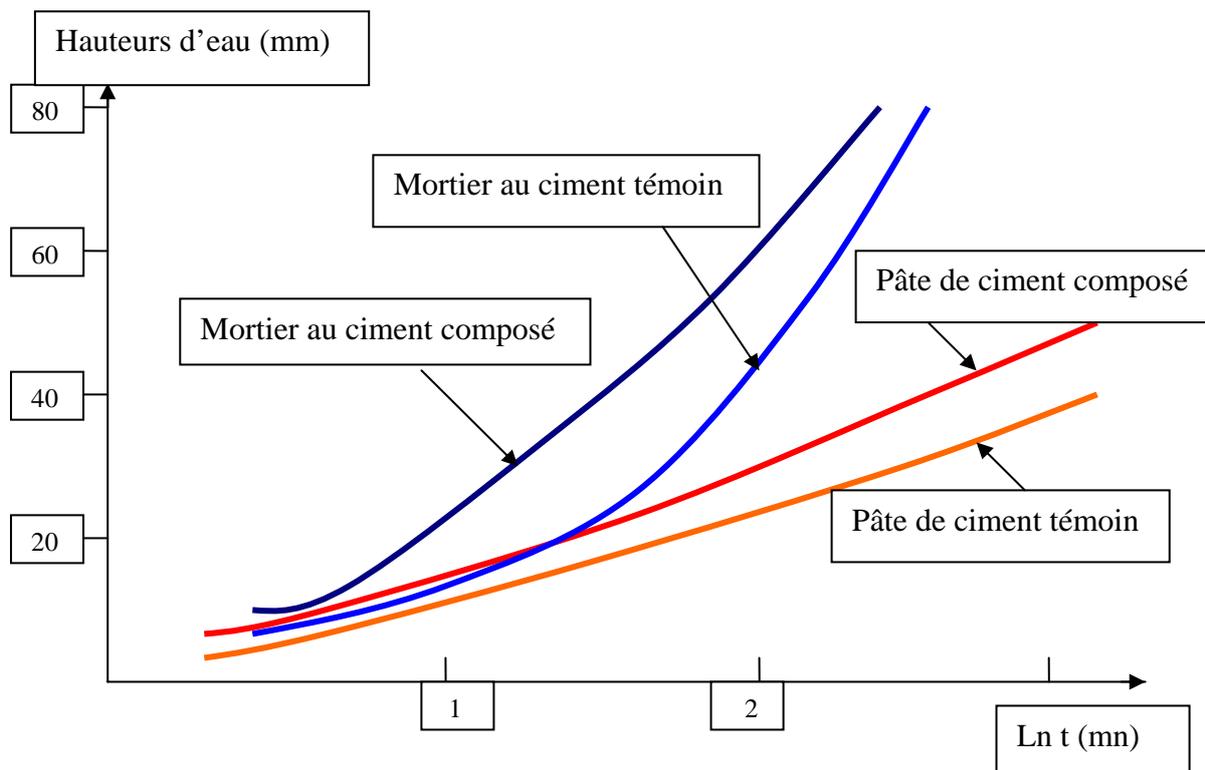


Figure N°57 : Essais de perméabilité sur pâtes et mortiers.

Nous constatons sur ces courbes que de façon générale le ciment seul, que ce soit en absorption capillaire ou en perméabilité a de meilleures performances sauf pour la capillarité des mortiers. Cela est dû aux échéances des essais que nous avons réalisés à 28 jours alors que les performances pouzzolaniques sont attendues à plus long terme. Nous nous proposons en perspective dans le cadre d'une étude de notre produit de synthèse vis-à-vis de la durabilité, d'étudier ces paramètres à de différentes échéances.

VII.2.2.6- Conclusion.

Cette étude expérimentale a nécessité de grands soins dans le maintien des conditions expérimentales constantes ou bien évoluant de la même manière, vu que de nombreux paramètres peuvent créer des différences dans les résistances mécaniques à la compression. Les moyens utilisés ont souvent été improvisés avec le souci de ne faire varier que le paramètre étudié qui est la phase liante pour se permettre dans les différents cas une comparaison fiable.

Les résultats obtenus sur le liant composé de 30% vase calcinée, jouant le rôle de pouzzolane artificielle, et de ciment Portland, sont intéressants. Ceci traduit que moyennant simplement un temps de conservation plus long, nous obtenons de meilleures performances que celles du ciment ordinairement utilisé, avec en plus une

économie non négligeable: Substituer 30 % de constituant à moindre coût au ciment à une échelle industrielle constitue une économie certaine.

VII.2.3- Etude comparative de la pouzzolane artificielle à base de vase calcinée avec la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.

Les cimenteries algériennes utilisent, pour la production d'un ciment composé de type CEM II de classe élevée, une pouzzolane naturelle. Celle-ci est extraite des carrières Fer-Phos dans la région de Béni-Saf (Nord-ouest Algérien). Il nous a semblé opportun de comparer les performances mécaniques du produit pouzzolanique obtenu par le traitement thermique de la fraction argileuse des vases issues du barrage de Fergoug avec celles du produit naturel de Béni-Saf.

Des micro-éprovettes de pâte durcie ont été fabriquées à partir des deux produits pouzzolaniques puis soumises à la compression uniaxiale afin de tester leur réactivité pouzzolanique.

VII.2.3.1- La pouzzolane naturelle de Béni-Saf.

Dans la région de Béni-Saf les formations géologiques d'origine volcanique sont nombreuses. Plusieurs carrières de pouzzolanes y sont exploitées au profit des cimenteries locales et approvisionnent d'autres cimenteries de régions plus éloignées.

Le laboratoire de la cimenterie de Béni-Saf, sous l'égide de la SNMC (Société Nationale de Matériaux de Construction, a effectué plusieurs séries d'essais dans le but de produire à une échelle industrielle un ciment de type CEM II en incorporant au ciment portland (CEM I) de la pouzzolane. Les conclusions suivantes ont été émises:

- Substituer un pourcentage de produit de moindre coût (pouzzolane naturelle) au ciment (CEM I) plus coûteux, diminue son coût de revient.
- L'utilisation de la pouzzolane comme ajout dans les ciments, en plus de l'aspect économique, offre de meilleures performances techniques : le CEM II obtenu est de classe supérieure.
- Une amélioration des résistances mécaniques ainsi que la durabilité chimique des mortiers et bétons ont été constatées. Cela est attribué aux effets physiques et pouzzolaniques de l'ajout.
- La quantité d'ajout doit être définie par des essais préliminaires en fonction des caractéristiques de la pouzzolane substituée et des caractéristiques techniques recherchées.
- Les résistances mécaniques ainsi que la durabilité chimique des mortiers à base de pouzzolane ont nettement été améliorées avec l'augmentation de la finesse de la pouzzolane.

La figure n°58 illustre l'influence de la pouzzolane sur la valeur de la résistance en compression pour des mortiers, en fonction de la quantité de pouzzolane substituée. L'effet pouzzolanique pour les mélanges à 20% et 30% de pouzzolane est remarquable à partir de 45 jours. Cela est dû à la réaction pouzzolanique qui ne s'amorce qu'à partir du moment où la chaux est libérée par l'hydratation du ciment.

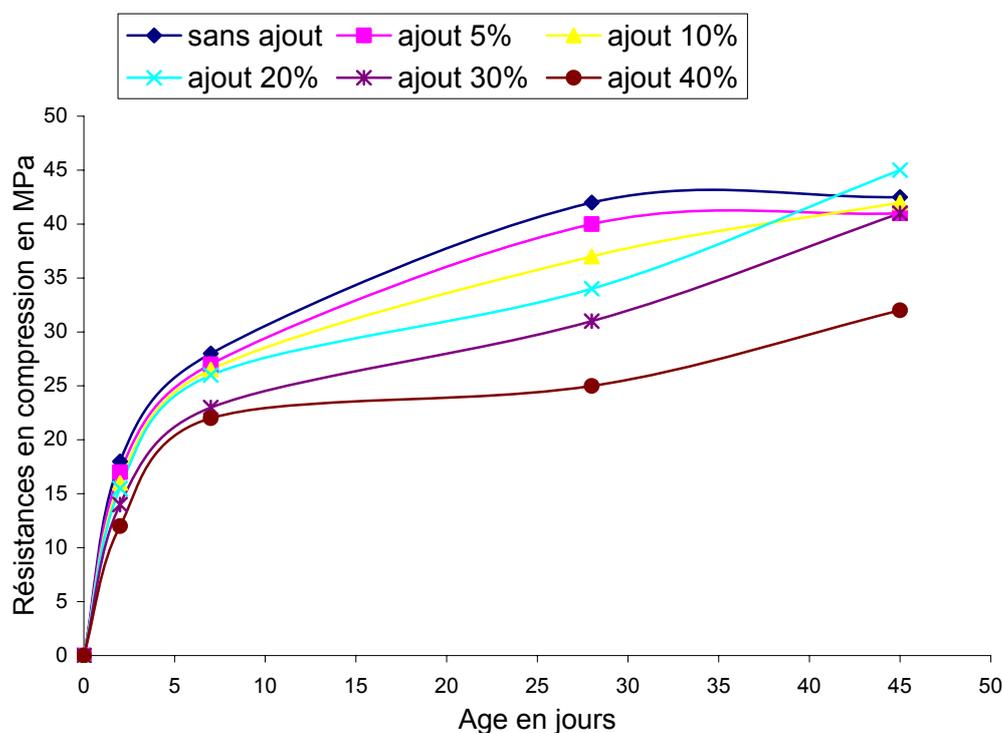


Figure N°58 : Résistances en compression de mortiers en fonction du % de pouzzolane substituée.

VII.2.3.2- Essais mécaniques des deux pouzzolanes.

VII.2.3.2.1-Etude sur pâtes durcies.

Nous avons confectionné, dans les mêmes conditions expérimentales, des éprouvettes de pâte de liant durcies, pour les deux pouzzolanes étudiées. L'étude comparative a été réalisée selon deux procédés :

- a) En utilisant la chaux comme activateur chimique des pouzzolanes : les pâtes étudiées sont constituées par les pouzzolanes mélangées directement avec la chaux.
- b) En utilisant les pouzzolanes en remplacement partiel du ciment : les pâtes sont constituées de ciment Portland (CEM I) auquel nous avons substitué un pourcentage de pouzzolane (ciments pouzzolaniques).

Le ciment utilisé et la chaux proviennent, dans les deux cas, des mêmes lots de fabrication. Les essais mécaniques à 28 jours ont également été réalisés dans des conditions identiques.

- Activation des pouzzolanes par de la chaux :

Pour les deux pouzzolanes, les pourcentages des mélanges sont :

% de pouzzolane	90	85	80	75	70
% de chaux ajoutée	10	15	20	25	30

Tableau N° 18 : Composition des pâtes de pouzzolane activée à la chaux

- Les ciments pouzzolaniques :

Pour les deux pouzzolanes, les pourcentages d'ajout sont :

% de ciment	90	85	80	75	70
% de pouzzolane	10	15	20	25	30

Tableau N° 19 : Composition des pâtes de ciment pouzzolanique

Remarques :

- La quantité d'eau de gâchage a été déterminée à chaque fois par l'essai de consistance.
- Les deux pouzzolanes ont été utilisées avec la même finesse de mouture.
- La conservation et les tests exécutés sur les éprouvettes durcies se sont déroulés dans les mêmes conditions.

Les résultats des essais de compression uniaxiale à la rupture à l'âge de 28 jours sont représentés sur les figures N°59 et N°60.

Pour chacun des différents mélanges, nous avons réalisé des micro-éprouvettes cylindriques de diamètre de 20 mm et de hauteur 40 mm.

Les éprouvettes sont conservées à 100% d'humidité jusqu'à la date d'essai ; elles sont ensuite séchées à 50°C en étuve non ventilée pendant 24 heures. A l'aide d'une tronçonneuse de laboratoire à plateau coulissant et angle de coupe réglable, nous avons obtenu un surfaçage correct des éprouvettes. Les essais de résistance à la compression ont été effectués à l'aide d'une presse munie d'anneaux dynamométriques, compatibles avec l'ordre de grandeur de la force de rupture prédéfinie lors d'essais préliminaires. Les résistances mécaniques ultimes sont mesurées à la rupture, en compression uniaxiale. La valeur retenue pour la résistance à la rupture (Rc) correspond à la moyenne arithmétique calculée sur une

dizaine de valeurs expérimentales obtenues sur chaque mélange. Nous remarquons que ces valeurs sont dispersées de + ou – 10% autour de cette valeur moyenne.

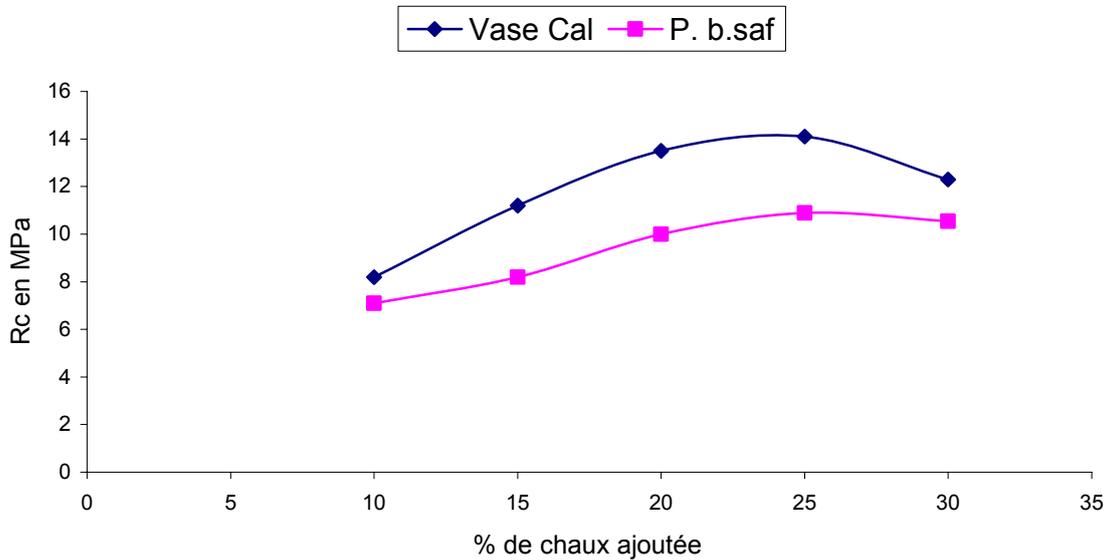


Figure N°58 : Résistance en compression des pouzzolanes activées à la chaux.

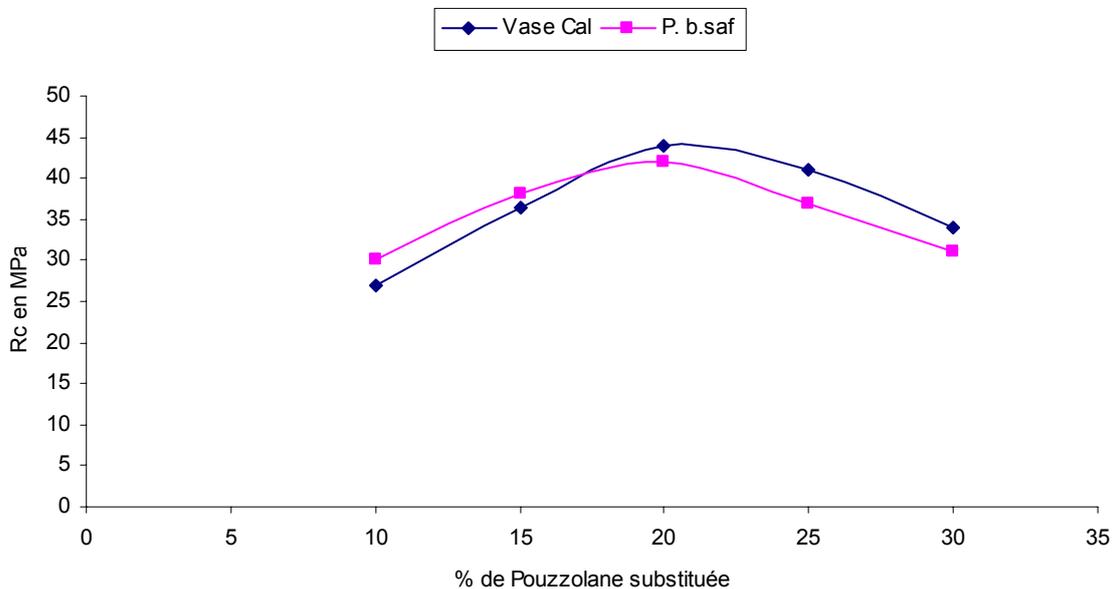


Figure N°59 : Résistances en compression des ciments pouzzolaniques.

VII.2.3.2.2-Etude sur mortiers.

Des résultats précédents la quantité optimale des deux pouzzolanes substituées se situe vers 25 %. Nous avons dans les deux cas confectionné un mortier « Normal » dans les mêmes conditions expérimentales. Le ciment utilisé dans la proportion de

75 % est le même dans les deux cas ainsi que pour le mortier témoin sans pouzzolane ajoutée.

- Quantité d'eau de gâchage : déterminée par essai de consistance (tableau n°20).

Mortier	Témoin	Pouzzolane naturelle	Pouzzolane artificielle
Rapport E/C	0,50	0,59	0,55

Tableau N°20 : Eau de gâchage des mortiers

- Temps de prise : déterminé par essai à l'aiguille de Vicat (tableau n°21).

Mortier	Témoin	Pouzzolane naturelle	Pouzzolane artificielle
Début de prise	3 h 15 mn	2 h 37 mn	3 h 40 mn
Fin de prise	4 h 32 mn	4 h 20 mn	5 h 17 mn

Tableau N°21 : Temps de prise des mortiers

- Essais mécaniques sur les mortiers.

Les essais de traction par flexion puis de compression sur les 2 parties des éprouvettes prismatiques 4 x 4 x 16, confectionnées et conservées dans les mêmes conditions, ont été effectués aux échéances 2, 7, 14 et 28 jours.

Les figures n°61 et n°62 regroupent les résultats de ces essais. Les valeurs des résistances dans le tracé des courbes sont la moyenne de mesures effectuées sur 3 éprouvettes pour chaque mortier. Ceci nous a donné une moyenne de trois valeurs pour les essais de traction par flexion et six valeurs pour ceux à la compression (un moule donnant 3 éprouvettes).

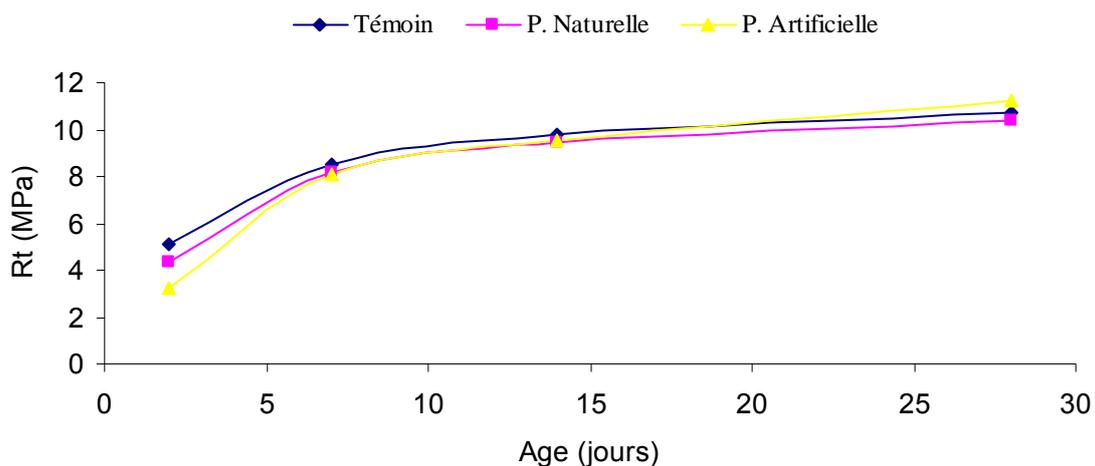


Figure N°60 : Résistances à la traction des mortiers.

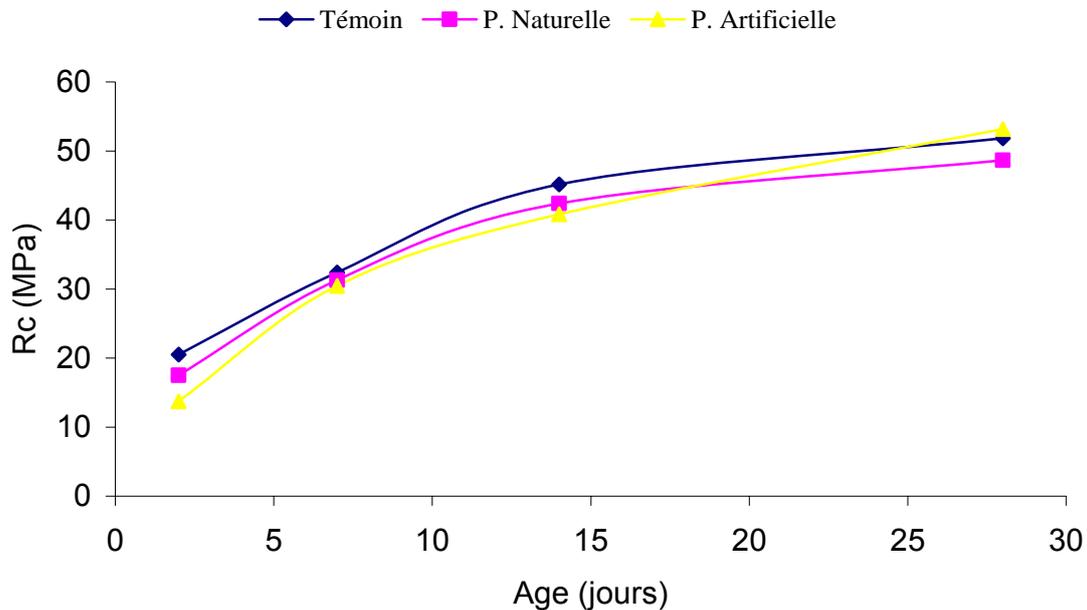


Figure N°61 : Résistances à la compression des mortiers.

VII.2.3.3- Analyse du comportement des deux pouzzolanes.

Dans cette partie l'analyse a été conduite dans les mêmes conditions expérimentales, pour la pouzzolane artificielle à base de vase calcinée et celle naturelle de Béni Saf. Les éprouvettes ont été confectionnées selon deux modèles: à partir de pâtes de liant seul et durci, et à partir d'éprouvettes 4x4x16 de mortier de sable. Les résistances ont été testées à l'âge de 28 jours.

VII.2.3.3.1- Essais sur les pâtes durcies.

Les résistances mécaniques en compression uniaxiale sur les pâtes, obtenues à la rupture sont représentées sur les figures N°59 et N°60. En admettant que les critères de réactivité recherchés se traduisent par les résistances mécaniques, nous pouvons énoncer :

Pour les pouzzolanes activées à la chaux (figure n°59).

- Les valeurs des résistances à la rupture obtenues pour les deux pouzzolanes traduisent le caractère d'hydraulicité acquis.

- Pour les deux pouzzolanes étudiées l'optimum de résistance observé se situe vers 25 % d'ajout de chaux.

- En se référant à la figure N°59, nous constatons qu'à partir des valeurs optimales de résistance, la pouzzolane naturelle de Béni-Saf se situe parmi les pouzzolanes réactives ($R_c \approx 11$ MPa), alors que notre pouzzolane artificielle est, quant à elle, située dans les pouzzolanes très réactives ($R_c \approx 14$ MPa).

Par ailleurs, sachant que les réactions pouzzolaniques sont lentes ou tardives, les résistances mécaniques augmentent, même après l'âge de 28 jours. Dans ce cas, les deux pouzzolanes étudiées sont considérées comme très réactives.

Pour les ciments pouzzolaniques (figure n°60).

- Il s'agit cette fois de ciments pouzzolaniques du type CEM II, pour lesquels l'ajout de pouzzolane améliore les qualités techniques. Sachant que la réaction pouzzolanique intervient après celle de l'hydratation du ciment et que la libération de la chaux, qui réagira ensuite avec la pouzzolane, est ultérieure, c'est donc à long terme que nous obtiendrons les performances recherchées. Ayant comme objectif la seule étude comparative, nous n'avons testé nos éprouvettes qu'à l'échéance de 28 jours. Par ailleurs, les mêmes conditions d'expérimentation ont été respectées.

- Les classes de résistance obtenues dans les deux cas sont élevées (45R). Ces ciments sont à classer parmi ceux à Haute Performance.

- Pour les deux pouzzolanes, l'optimum de substitution au ciment est voisin de 20%.

- Les résistances mécaniques obtenues sur les mélanges à base de vase calcinée, à partir de celui à 20%, sont nettement supérieures à celles à base de la pouzzolane de Béni-Saf.

VII.2.3.3.2-Essais sur les mortiers.

Comparées aux valeurs des résistances obtenues sur le mortier témoin, nous constatons :

- En comparant les temps de prise la pouzzolane artificielle, contrairement à celle de Béni-Saf les a augmentés par rapport à ceux du témoin.

- Le mortier à base de pouzzolane naturelle a un comportement proche de celui à base de ciment seul. Sa substitution au ciment constitue une économie sans en faire perdre les caractéristiques de résistance.

- Le mortier à base de vase calcinée aux courtes échéances présente de plus faibles résistances, mais à 28 jours les valeurs obtenues ont dépassé celles de la pouzzolane naturelle et même que l'effet pouzzolanique s'est traduit par des résistances meilleures que celles du témoin.

- Nous signalons toutefois, afin de ne pas conclure hâtivement, que cette partie de caractérisation sur mortiers est à confirmer à de plus longues échéances (l'effet pouzzolanique étant mieux observé à plus longue échéance). Nous présentons en annexe les résultats des premiers essais préliminaires sur mortiers à base des différents liants étudiés.

VII.2.3.4- Conclusion.

La comparaison des résultats obtenus sur les deux matériaux étudiés nous permet 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 de Fergoug calcinée. Les résistances en compression des éprouvettes à base de vase calcinée ont dépassé celles obtenues avec la pouzzolane naturelle de Béni-Saf ; les deux procédés traduisent un véritable intérêt économique.

- Nous expliquons la supériorité des résultats sur la vase calcinée par une meilleure protection de notre produit de synthèse par rapport au naturel. En effet, les

conditions d'extraction à ciel ouvert du gisement de pouzzolane de Béni-Saf ne permettent pas une garantie suffisante vis-à-vis d'impuretés provenant du site même de l'exploitation.

Les bonnes performances présentées par notre pouzzolane artificielle conçue à partir des vases issues du dragage du barrage de Fergoug, sont très encourageantes et sont à confirmer par des essais de durabilité. Il apparaît également souhaitable d'appliquer ce procédé thermique à des fractions fines analogues et récoltées sur d'autres sites envasés (barrages, canaux, réseaux, ...). Cet élargissement du champ d'activité devrait valider et renforcer l'intérêt économique de cette voie de valorisation.

VII.2.4- Valorisation en tant que brique autoclavée.

L'étude des propriétés physico-chimiques des vases étudiées, a permis de cibler leur valorisation en tant que composite capable de résister à des charges de compression, et pouvant être utilisé comme brique de construction.

Le cours d'eau, en aval du barrage de Fergoug traverse la plaine de la Habra et se déverse dans la mer méditerranée, au niveau de la Macta. Les vases issues des dragages sont transportées lors des crues et des grands écoulements jusqu'à la mer. Au fur et à mesure de leur parcours elles se sont déposées dans les fonds du lit du cours d'eau où elles se sont consolidées pendant les périodes sèches. D'année en année ce phénomène de dépôt et consolidation a conduit au colmatage des fonds du lit et des plaines les transformant en de vastes zones marécageuses.

La valorisation de la vase en tant que brique à bâtir et à prix de revient compétitif représente une autre voie d'investigation prometteuse.

VII.2.4.1- Traitement préalable.

VII.2.4.1.1- Composite à base de quartz (Benothmane 1986).

A partir d'un mélange homogène de matériaux à forte teneur en silice et en chaux, et après compactage et traitement hydrothermal en autoclave, des produits durcis sont obtenus suivant le mode opératoire ci-après :

Ingrédients :

- Sable Siliceux sans matières organiques et de granulométrie étendue entre 20 micromètres et 2 millimètres.
- Chaux vive broyée : entre 5% et 8% du poids total.
- Eau : 7% du poids total.

Mode opératoire :

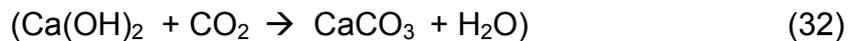
- L'ensemble sable-chaux-eau est bien mélangé et homogénéisé.
- Le produit obtenu est passé sous presse pour un compactage sous une contrainte de 10 MPa.
- Les éléments ainsi obtenus sont traités en autoclave sous une pression de 0,8 MPa et une température de 174 °C. Ce traitement hydrothermal est maintenu pendant 8 à 10 heures.

Remarques :

La durée d'autoclavage et la pression de compactage sont déterminées par des essais préliminaires.

Pendant le séjour en autoclave, sous l'action de la température et de l'humidité, la chaux (Ca(OH)_2) et la silice (SiO_2) réagissent en produisant de l'acide Silicilique amorphe qui, en présence de l'hydroxyde de calcium, donne des silicates de calcium hydraté (CHS). Le CHS ainsi formé permet la liaison des grains de sable pour donner un ensemble solide et compact dont la résistance à la compression varie entre 7,5 et 20 MPa.

La résistance des produits silico-calcaires ainsi obtenus, continue à augmenter après étuvage, par réaction de la chaux en excès avec le CO_2 de l'air (Dron 1978):



VII.2.4.1.2- Composite à base de vase.

Un procédé de conception d'un composite à partir des vases peut être inspiré de celui décrit pour le composite à base de quartz (Benamara 1990).

L'activateur chimique utilisé peut être aussi bien le ciment que la chaux. Les étapes essentielles de la production du composite sont les suivantes :

- Broyage et nettoyage de la vase crue.
- Dosage des mélanges (les proportions sont déterminées par essais préliminaires).
- 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 sont testées à la compression et les résidus analysés.

VII.2.4.2- Brique autoclavée à base de vase.

VII.2.4.2.1-Expérimentation.

- Choix des matières premières :

La vase de la Macta : les analyses effectuées sur les vases de la Macta et celles de Fergoug ont mis en évidence des compositions très voisines. Nous avons opté pour la vase de la Macta, comme matière première à expérimenter, à cause de sa teneur plus forte en silice (62,63% contre 56,30%). Des éprouvettes 4x4x16 ont été confectionnées.

Le ciment : le ciment utilisé est le ciment Portland ordinaire (CEM I).

- Les mélanges étudiés :

Quatre mélanges avec les proportions suivantes (tableau n°22) ont été testés.

Mélange	1 : (80/20)	2 : (70/30)	3 : (60/40)	4 : (50/50)
Composition en %	Vase : 80% Ciment : 20%	Vase : 70% Ciment : 30%	Vase : 60% Ciment : 40%	Vase : 50% Ciment : 50%

Tableau N°22 : Composition des briques étudiées

- Durées de traitement en autoclave :

De manière comparable au traitement du composite à base de quartz, dont la durée de traitement en autoclave n'exécède pas une dizaine d'heures, un traitement hydrothermal dépassant 24 heures ne semble pas présenter un intérêt économique. C'est la raison qui a conduit à traiter et tester le composite à base de vase pour des durées de 6 heures, 15 heures et 24 heures.



Photo N°21 : Autoclave utilisé.

VII.2.4.2.2- Résultats et perspectives.

Les résistances optimales pour les mélanges à 40% de ciment et 60% de vase, ont été enregistrées pour les trois séries d'essai.

Après seulement 24 heures de traitement hydrothermal pour le mélange optimal, une résistance à la compression de l'ordre de 40 MPa est enregistrée. Cette résistance est très suffisante pour un moellon à bâtir.

La résistance obtenue est due aux réactions ayant eu lieu dans l'autoclave. Les gels formés qui sont à l'origine de ces résistances sont le résultat des réactions du quartz avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment.

Un suivi de l'évolution de ces réactions pour les différents mélanges a été possible grâce aux analyses contradictoires effectuées avant et après traitement hydrothermal. Il s'agit essentiellement de trois techniques d'analyse : la diffraction des rayons X, l'analyse thermogravimétrique et l'analyse thermique différentielle.

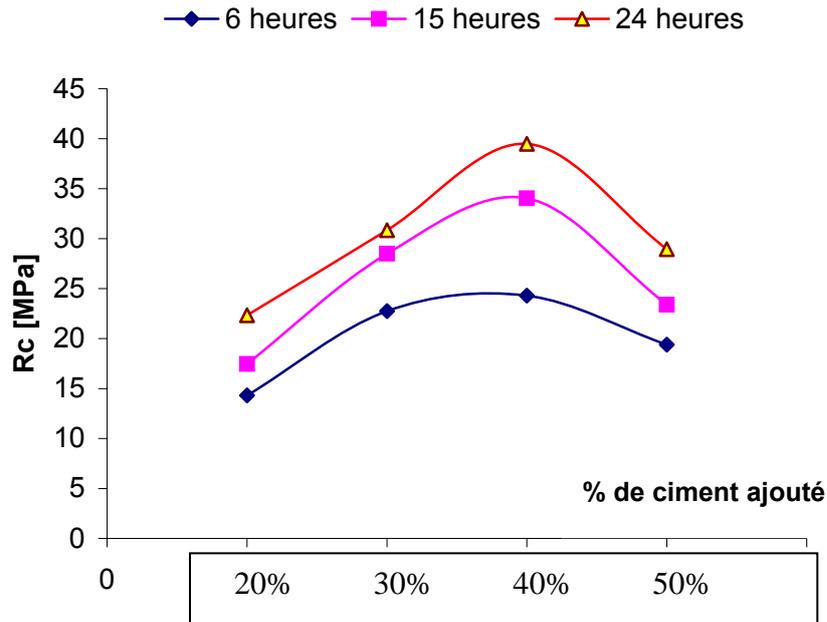


Figure N°63 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage de ciment.

VII.2.5- Analyse du procédé de traitement en autoclave de la brique à base de vase.

La compréhension et le suivi des réactions ayant eu lieu dans l'autoclave entre les composés des différents mélanges étudiés nous ont permis, grâce à la visualisation des pics exothermiques et endothermiques sur les courbes d'analyse thermique différentielle (ATD), de confirmer l'optimisation des mélanges obtenue par les essais mécaniques.

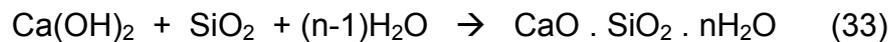
Les matières premières retenues sont deux vases distinctes par les lieux de leur prélèvement, mais ayant la même origine. En effet, les matières prélevées à la Macta (à l'embouchure de l'oued El Hammam dans la mer Méditerranée), ne sont que celles extraites du Fergoug, et charriées jusqu'à la Macta. Ces deux prélèvements : l'un à l'origine de l'extraction et l'autre en bout du parcours, ont pour but de montrer l'abondance et la similitude des matières solides déposées sur le lit du cours d'eau et les plaines aux alentours, sur une centaine de kilomètres (Mekerta *et al*, 2002).

VII.2.5.1- Conditions de traitement hydrothermal.

L'autoclave : c'est une cuve cylindrique en acier pouvant se fermer de façon totalement hermétique pour créer et maintenir un milieu hydrothermal. Il est muni de moyens de mesure et de réglage de la température et de la pression intérieures. La pression intérieure est engendrée par les vapeurs de l'eau chauffée à l'intérieur de l'enceinte fermée. La durée de traitement est programmée à l'aide d'une horloge.

Le *milieu hydrothermal* est favorable aux réactions entre les mélanges « vase-ciment ou vase-chaux ». En milieu et température ambiants, ces mélanges sont inertes et

aucune réaction n'est observée. Par contre dans l'ambiance d'une vapeur d'eau saturante et à une température dépassant 130°C, les constituants de la vase (quartz ou kaolinite) réagissent avec la chaux selon le schéma suivant (Dron, 1978) :



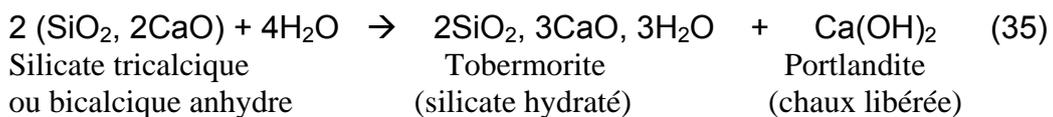
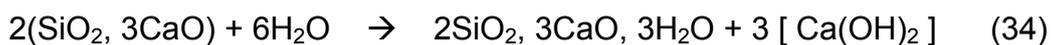
Le silicate de calcium hydraté (CSH) obtenu est peu ou mal cristallisé. Il se présente en général sous forme amorphe à température ordinaire. C'est cette substance non soluble dans l'eau qui est à l'origine des résistances mécaniques.

Le mélange vase-ciment réagit en présence d'eau suivant deux étapes distinctes :

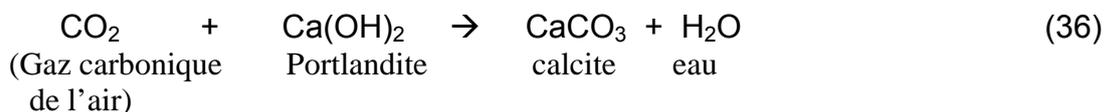
VII.2.5.1.1- Première étape : hydratation du ciment (Silico-aluminate de calcium : CAS).

Dès que le ciment est en présence d'eau les réactions d'hydratation suivantes sont entamées :

- Hydratation des C₂S et C₃S.



L'hydroxyde de chaux (Ca (OH)₂), provenant de l'hydratation du C₃S, du C₂S et de la chaux vive, peut se carbonater à l'air selon la réaction suivante :

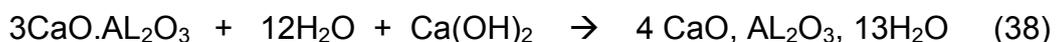


La calcite peut se dissoudre dans l'eau pure en laissant du vide entraînant une diminution des résistances mécaniques.

- Hydratation du C₃A. La réaction est très rapide à 21°C.



En présence de gypse hydraté (Ca(OH)₂) et d'eau, l'aluminate tricalcique subit une hydratation à température ambiante et donne des composés insolubles appelés sulfoaluminates de calcium hydratés sous forme de gel. Ce dernier joue un rôle « protecteur » en retardant l'hydratation, ce qui explique le rôle retardateur du gypse.



(Gel insoluble protecteur)

VII.2.5.1.2- Deuxième étape : Influence du milieu hydrothermal.

La présence des constituants de la vase (silice et kaolinite), entraîne leur réaction en présence d'eau avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment grâce aux conditions de température d'humidité et de pression se trouvant dans l'autoclave. Ce qui aboutit à la formation d'un autre CSH.

Pour obtenir de bonnes résistances mécaniques, la chaux libérée lors des réactions d'hydratation doit être exploitée pour former de nouvelles structures non solubles dans l'eau et ayant des propriétés liantes, soit par ajout d'un métakaolin (pouzzolane), ou bien par ajout d'une poudre riche en argile (kaolinite) qui réagit avec la chaux dans un milieu hydrothermal. C'est cette deuxième alternative que nous voulons exploiter.

VII.2.5.1.3- Interprétation des résultats.

Les résistances mécaniques en compression obtenues sur les éprouvettes conçues à l'aide d'un mélange de vase et de ciment, après pressage et traitement hydrothermal en autoclave d'une durée de 24 heures, ont été largement supérieures à celles d'échantillons de ciment seul sans traitement. Cela permet de dire :

- La vase qui est inerte, mélangée à l'eau et un activateur dans les mêmes proportions étudiées n'a pas d'intérêt notable sans traitement en autoclave.
- C'est le traitement hydrothermal en autoclave dans des conditions particulières de température et de pression, qui transforme la vase siliceuse en un produit réactif.
- Les résistances obtenues sont d'autant plus grandes que les durées de traitement en autoclave plus longues, ce qui traduit l'effet du traitement hydrothermal sur l'apparition et le développement des performances mécaniques, sachant que sans ce traitement et pour un tel mélange, les résistances n'apparaissent pas.
- Pour les trois séries, la résistance maximale est obtenue pour le mélange à 40% de ciment ajouté.
- Pour le mélange à 50% de ciment, les résistances obtenues sur les trois séries ont chuté. Cela s'explique par un excès de chaux résiduelle libérée. Ceci veut dire que le mélange optimal est voisin de celui à 40% de ciment.

VII.2.5.2- Réactions probables dans l'autoclave.

Les réactions suivantes ont été détectées par les analyses ATD effectuées sur les résidus des échantillons récupérés après les écrasements: (Ouhba, 2001).

- Réaction entre le quartz et l'hydroxyde de calcium pour former un silicate de calcium hydraté (CSH) du type tobermorite de 9 A°. (Sur ATD : réaction endothermique vers 250°C et réaction exothermique vers 850°C).
- Réaction entre la silice de la kaolinite et la chaux formant un silicate de calcium hydraté (CSH) du type tobermorite de 11A°. (Sur ATD : forme mal cristallisée entre 90°C et 175°C, et un pic entre 175°C et 200 °C montre une forme mieux cristallisée).
- Réaction entre l'alumine de la kaolinite et la chaux pour donner l'hydrogrenat C_3AH_6 . (Sur ATD : pic à 755°C).
- Réaction entre l'alumine de la kaolinite, la silice du quartz et l'hydroxyde de calcium forme un silico-aluminate de calcium hydraté (C_2ASH_8). (Sur ATD : pic vers 210°C).

VII.2.5.3- Résultats de l'Analyse Thermique Différentielle.

Après séjour en autoclave, les réactions ayant eu lieu entre les différents minéraux sont mises en évidence par l'analyse comparative des différentes courbes ATD issues de l'analyse des fragments récupérés après essais mécaniques.

Les courbes présentées montre l'évolution des pics endothermiques et exothermiques relatifs à la formation ou la destruction des liaisons chimiques, en comparaison avec un échantillon témoin n'ayant pas subi de traitement en autoclave.



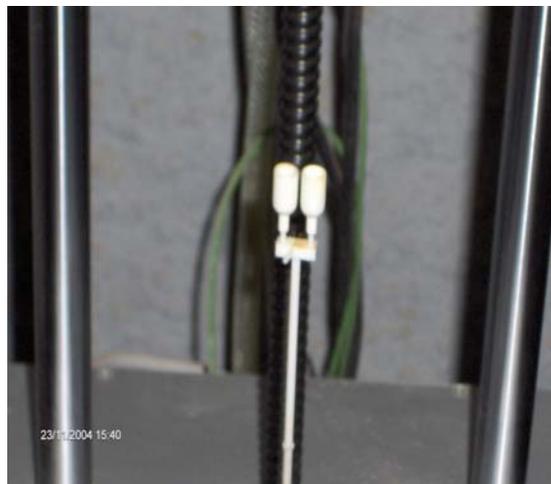
(a)



(b)



(b)



(d)

Photo N°22 : Appareillage d'Analyse Thermique Différentielle utilisé.

a) Ensemble, b) Four, c) Creusets, d) Thermocouple.

Nous présentons ci-après les résultats des analyses par ATD sur les trois produits suivants :

- 1- Produit non autoclavé (na : témoin)
- 2- Produit ayant séjourné 6 heures en autoclave.

3- Produit ayant séjourné 24 heures en autoclave.

(Le produit ayant séjourné 15 heures en autoclave n'apporte pas de renseignement supplémentaire).

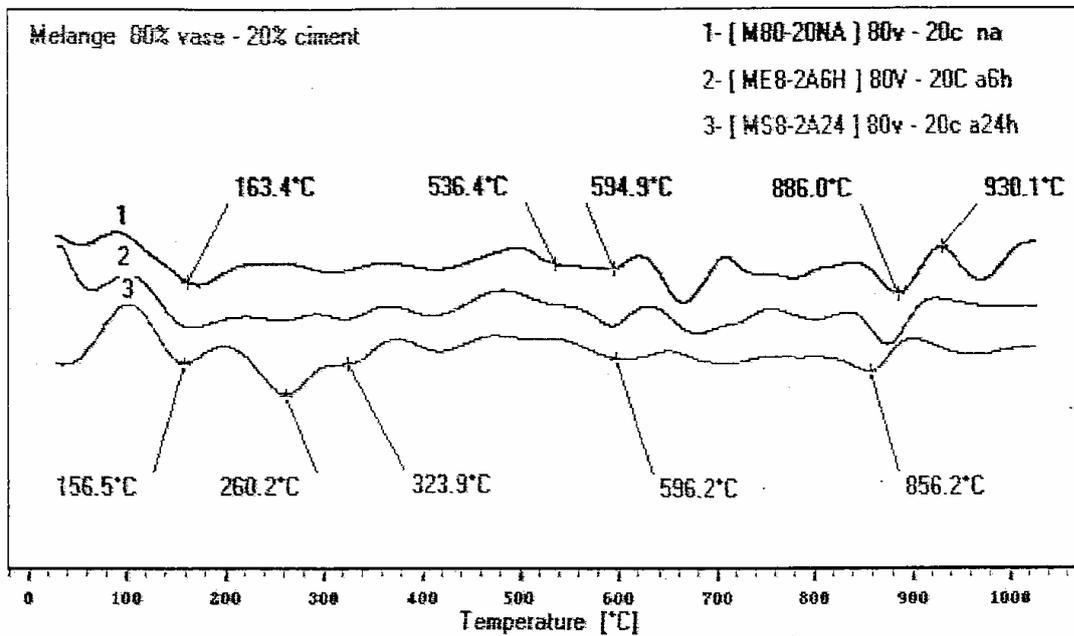


Figure N°63 : Courbes ATD sur le mélange 80% de vase et 20% de ciment.

- Sur la courbe du mélange non autoclavé les pics endothermiques observés entre 500°C et 600°C correspondent à la présence de la chaux et de la kaolinite. Celui observé vers 930°C, exothermique, correspond à la recristallisation de la kaolinite.
- Sur la courbe du mélange autoclavé pendant 6 heures, le pic de la chaux a disparu et celui de la kaolinite a sensiblement diminué. Vers 160°C et 250°C il y a apparition légère de pics correspondant à la formation de la tobermorite de 9A° (CSH).
- Sur la courbe du mélange autoclavé pendant 24 heures, les pics de 160°C et de 250°C ont nettement augmenté. Par contre celui de la chaux (500°C) a complètement disparu et celui de la kaolinite (600°C) persiste légèrement, la kaolinite n'ayant pas consommée totalement par manque de chaux.

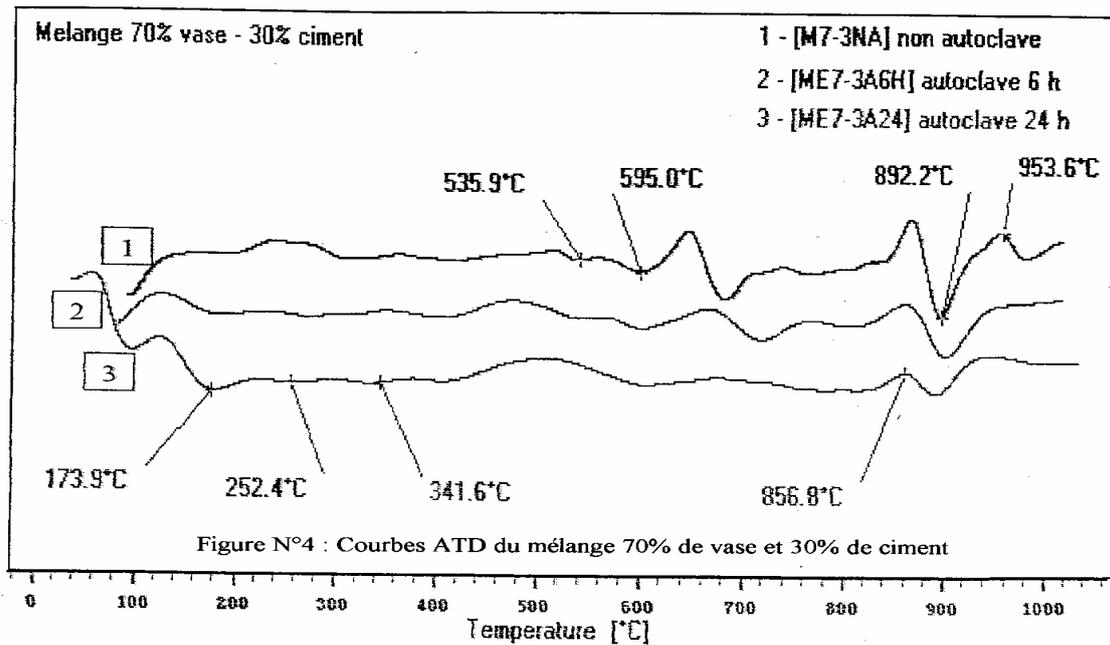


Figure N°64 : Courbes ATD sur le mélange 70% de vase et 30% de ciment.

- Sur la courbe du mélange non autoclavé les pics correspondant à la chaux (536°C), la kaolinite (595°C) et les carbonates (892°C) sont visibles. Vers 950°C le pic exothermique correspond la recristallisation de la kaolinite.
- Sur la courbe du mélange autoclavé pendant 6 heures, les pics correspondant à la chaux et la kaolinite ont diminué. La silice de la kaolinite a réagi avec la chaux pour former le CSH mal cristallisé (tobermorite de 11A°), visible vers 174°C.
- Sur la courbe du mélange autoclavé pendant 24 heures, il y a consommation totale de la chaux et diminution importante de la kaolinite. Vers 252°C il y a apparition d'un léger pic endothermique de la tobermorite de 9A°, il devient important vers 856°C (exothermique). La formation d'un hydrogrenat perceptible à 341°C.

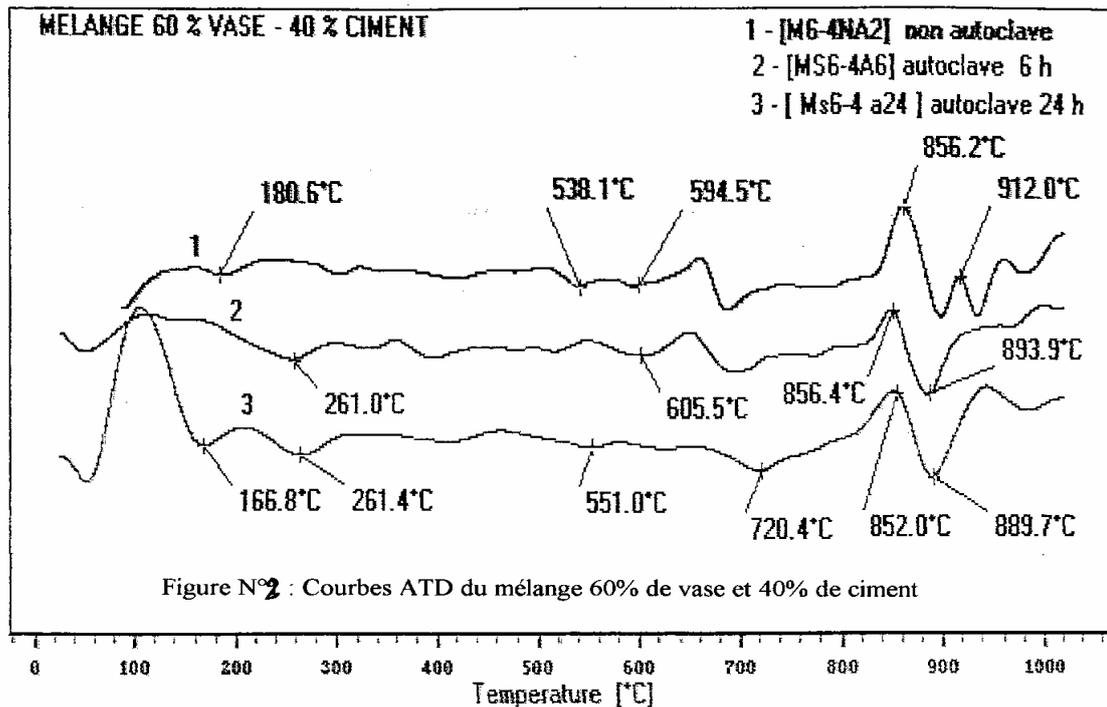


Figure N°65 : Courbes ATD sur le mélange 60% de vase et 40% de ciment.

- Sur la courbe du mélange non autoclavé les pics correspondant à la chaux (538°C), la kaolinite (594°C). Les pics des carbonates sont présents entre 700°C et 900°C.
- Sur la courbe du mélange autoclavé pendant 6 heures, les pics correspondant à la chaux et la kaolinite ont diminué. Il y a formation de tobermorite de 9A° (pic à 260°C).
- Sur la courbe du mélange autoclavé pendant 24 heures, le pic de la kaolinite a complètement disparu avec la formation d'un CSH à 166°C par réaction entre la silice de la kaolinite et la chaux. Le pic de la tobermorite de 9A° est nettement visible et on retrouve également l'hydrogrenat.

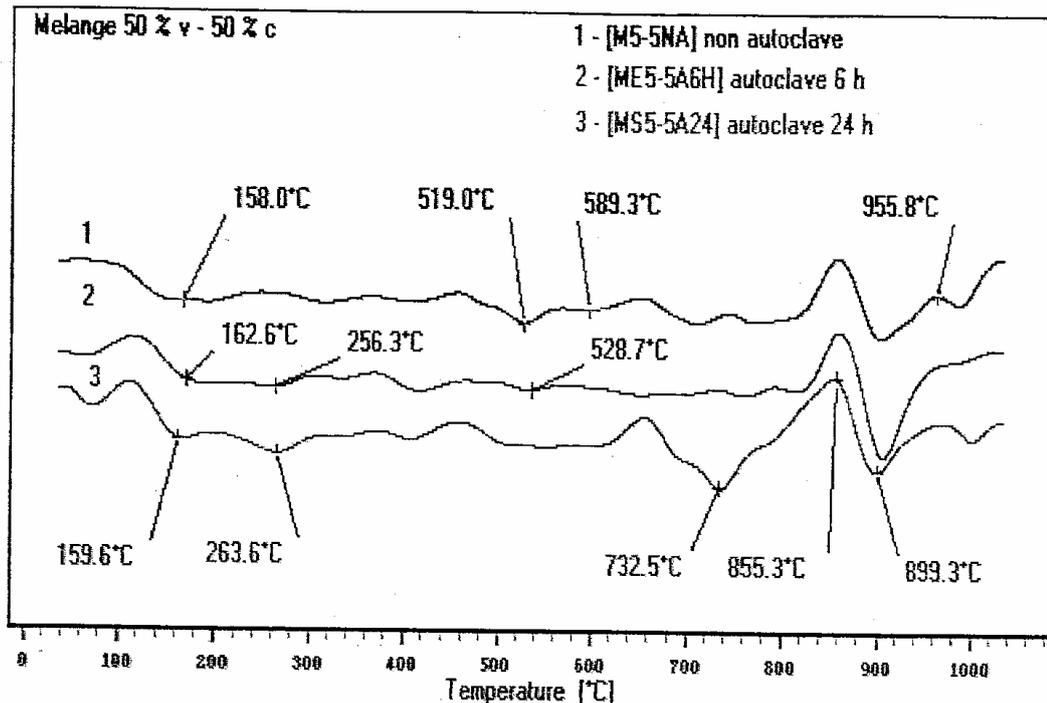


Figure N°66 : Courbes ATD sur le mélange 50% de vase et 50% de ciment.

- Sur la courbe du mélange non autoclavé nous constatons l'apparition à 158°C de pic correspondant au départ de l'eau et à la formation du CHS lors de l'hydratation du ciment, un pic visible à 530°C représentant l'hydroxyde de chaux, un autre pic à 590°C montrant la présence de la kaolinite et enfin à 900°C celui des carbonates. A 955°C il y a recristallisation de la kaolinite.
- Sur la courbe du mélange autoclavé pendant 6 heures, le pic de la kaolinite a disparu et celui de la chaux a diminué mais sans disparaître complètement. A 162°C il y a eu formation de la tobermorite de 11A° mal cristallisée et à 256°C une légère formation de tobermorite de 9A°.
- Sur la courbe du mélange autoclavé pendant 24 heures, le pic à 160°C correspondant au départ de l'eau et la formation du CSH est plus marqué, le pic de 260°C de la tobermorite de 9A° a augmenté et il y a apparition d'un nouveau pic à 730°C correspondant aux carbonates (apparues suite à la carbonatation de la chaux en excès). Ceci montre l'excès de chaux libérée qui s'est traduit par la diminution des résistances mécaniques.

VII.2.5.4- Conclusion.

D'après les résultats des écrasements en compression obtenus c'est le mélange composé de 40% de ciment et 60% de vase qui a donné les meilleures résistances. Théoriquement les réactions chimiques pouvant avoir lieu entre les minéraux présents dans les constituants des mélanges étudiés ont été mises en évidence. En milieu ambiant ces réactions ne pouvant se produire, le recours à un milieu particulier favorisant ces réactions a été nécessaire. C'est grâce à l'utilisation d'un autoclave qui a servi à la création d'un milieu hydrothermal que les réactions ont pu être observées.

Le suivi de l'évolution du comportement (prise et durcissement) des mélanges de vase et de ciment a été réalisé au moyen d'Analyses Thermiques Différentielles (ATD). Ainsi il a été possible de suivre les transformations des structures rassemblées et même confirmer l'optimisation des mélanges pour une résistance mécanique désirée.

La détection par ATD des minéraux mis en présence ainsi que les différentes transformations (structures construites ou détruites) n'étant pas précise, d'autres moyens d'analyses sont utilisés tels que la thermogravimétrie ou la diffractométrie des rayons x.

Conclusion de la troisième partie

Toute proposition de valorisation des sous produits industriels pollués ou causant des nuisances sur l'environnement doit prendre en considération les principes du développement durable. En matière de réglementation en Algérie, peu de textes existent, et les déchets solides concernant notre étude sont considérés comme non polluants et ne sont pas concernés par les textes existants. Les résultats des études et les recommandations formulées sont souvent confrontés aux difficultés de dialogue et de communication.

La synthèse des travaux antérieurs sur les possibilités offertes de traitement et valorisation de la fraction solide des vases issues du dragage du barrage de Fergoug, nous ont dirigé sur deux voies de valorisation dans les domaines des matériaux du génie civil; en pouzzolane de synthèse et en brique autoclavée :

L'effet pouzzolanique de la vase calcinée a été ainsi confirmé par l'apparition d'une phase non cristallisée détectée par les courbes ATD. Le mélange de 30% de vase calcinée et 70% de ciment montre un double intérêt : la même résistance que celle du ciment seul est atteinte avec seulement une plus longue durée de conservation ; et l'effet pouzzolanique de la vase calcinée est confirmé. L'étude comparative des performances de notre pouzzolane de synthèse a révélé de meilleures performances que la pouzzolane naturelle de Béni-Saf exploitée en cimenterie. Les possibilités d'application de cette vase à une échelle industrielle ne dépendent que de l'étude de la disponibilité et la pérennité de la matière première.

Notre étude a été menée sur des échantillons de pâtes de liant composé et de mortier normal. Une étude sur des bétons est envisagée. L'étude de la durabilité de ces produits dans des milieux agressifs devrait permettre de caractériser les domaines d'utilisation de ce composite à base de ciment et de vase calcinée.

Les résultats mécaniques obtenus sur les deux autres mélanges (à 50% et 70% de vase calcinée) sont toutefois notables pour d'autres applications en génie civil, autres que celles d'un ciment de type traditionnel. Il est clair que dans notre étude c'est l'utilisation de la pouzzolane de synthèse à base de vase calcinée au même titre que celle, naturelle de Béni Saf, qui a fait l'objet de notre préoccupation, dans un but de comparaison. De nombreuses autres applications sont à tester.

Le procédé de traitement hydrothermal de la vase de Fergoug, inspiré de celui de la fabrication de la brique silico-calcaire, a montré une nouvelle voie de valorisation. L'étude et le suivi de l'évolution des transformations survenues dans l'autoclave, ont mis en évidence des procédés simples et peu coûteux.

Le comportement à long terme de ces produits doit faire l'objet d'études vis-à-vis de la durabilité.

CONCLUSION GENERALE

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire entrent dans le cadre général de la lutte contre l'envasement des barrages en Algérie. Notre contribution est essentiellement centrée sur les possibilités de la réutilisation dans l'industrie des sédiments dragués. Ces déchets naturels sont ici considérés comme des matières premières minérales potentielles.

C'est la situation actuelle de la plaine de l'Habra, devenue marécageuse dans sa quasi-totalité, qui est à l'origine de notre préoccupation. En effet, les conséquences des premiers dragages du barrage de Fergoug ont eu des retombées désastreuses sur l'économie et l'environnement de la région qui, dans un passé proche, montrait richesse et prospérité grâce depuis la construction de la retenue. Il nous est ainsi apparu un double objectif : proposer des solutions afin d'éviter les erreurs antérieures liées au dragage et remettre l'ouvrage dans ses fonctions initiales (stockage de l'eau).

La réalisation de ce double objectif nécessite des moyens financiers conséquents. C'est pourquoi nous avons envisagé cette réalisation en terme de valorisation des sédiments dragués permettant, à terme, de réduire les coûts de l'entretien des retenues. Pour ces raisons nous avons choisi le site de la retenue de Fergoug comme moteur amont de cette recherche (vases de la retenue) et en aval, celles issues des dragages antérieurs déposées puis entraînées sur la plaine de l'Habra (vases de la Macta).

Avant de nous consacrer aux possibilités de valorisation des sédiments en place, il était nécessaire de comprendre les raisons de l'érosion et les mécanismes de transfert. Les raisons géographique et climatique font que l'Algérie se trouve à la tête des pays touchés par les conséquences de l'érosion et que sa singulière expérience peut servir de référence en matière d'envasement et de dragage des barrages de retenue.

Les solutions envisagées sont étroitement liées aux cycles de production des « matières premières » que constituent les vases. En effet, l'estimation des quantités de matières solides qui arrivent au pied du barrage et dans la retenue, par les phénomènes de l'entraînement dans les cours d'eau et dans la cuvette, a nécessité des rappels théoriques et l'exploitation de résultats de travaux antérieurs, sur l'estimation des apports et des moyens de lutte contre l'envasement.

Dans une deuxième étape nous avons présenté le site de notre étude vis-à-vis de son importance pour la région, en mettant l'accent sur la non existence d'un site de remplacement qui oblige à préserver l'ouvrage dans ses fonctions initiales quels que soient les moyens à mettre en œuvre. Les moyens de reconstruction de l'ouvrage, suite aux différentes ruptures survenues durant son exploitation, ont toujours été réunis. Ceci prouve l'importance de l'ouvrage pour l'économie de la région.

L'étude expérimentale a été consacrée à la caractérisation des propriétés des sédiments en place et après leur dragage. Les sédiments en place ont été étudiés à partir de sondages et ont montré une difficulté de formulation en modèles qui est due à la variabilité des paramètres liée à la non régularité des dépôts. Par contre, les compositions chimique et minéralogique ont permis l'orientation vers la valorisation dans le domaine des matériaux de construction. La synthèse des travaux antérieurs sur le traitement et la transformation des structures minérales, ont montré des

possibilités concrètes de conception de matériaux de construction. Le ciment composé à partir de la pouzzolane artificielle de vase calcinée s'est avéré meilleur que celui à base de pouzzolane naturelle de Béni Saf qui est en exploitation industrielle. De nombreuses cimenteries utilisent la pouzzolane de Béni Saf dans la production d'un ciment composé de type CEM II, bien que parfois cette matière première est transportée à plusieurs centaines de Kilomètres (jusqu'à Oran, Chleff, et même Annaba). Par ailleurs, dans ces mêmes régions de nombreux ouvrages de retenue présentent des situations analogues à celles de Fergoug.

La brique conçue par traitement hydrothermal, grâce aux performances mécaniques mesurées offre aussi une voie certaine de valorisation. Parmi les possibilités de valorisation de cette vase, nous nous sommes consacrés à développer celles présentant des procédés relativement simples et ne nécessitant pas de moyens coûteux. Nous signalons toutefois, que les essais réalisés au laboratoire des matériaux de l'ENSET, ont nécessité une attention particulière vis-à-vis du respect des normes opératoires car souvent des moyens de réalisation de ces essais ont été improvisés.

D'autres possibilités d'utilisation des vases sont envisageables et peuvent faire l'objet de nouveaux axes de recherche soit en utilisant le produit en tant que matière première, soit vis-à-vis de ses caractéristiques naturelles (granulométrie, minéralogie...), soit moyennant des transformations (le plus souvent thermique ou mécanique). Les applications peuvent être aussi diverses dans les domaines allant de l'agriculture (en tant que fertilisant ou comme correcteur des sols sableux pour l'amélioration de la rétention de l'eau, et la végétalisation des terres limitant ainsi l'érosion), aux diverses autres applications dans le BTP (bétons de terre stabilisée, argile expansée comme nouvelle source de granulats légers et durables). Nous citons aussi d'autres applications de la fraction solide de vases issues de dévasement de barrage en tant que produit céramique utilisée comme tuile à faible prix de revient et comme brique rouge.

Par ailleurs, l'aspect « pollution », présence ou non de « matières toxiques », seuils de toxicité... des matériaux dragués puis stockés, ont été signalés brièvement en bibliographie. Bien qu'au départ ces questions ne figuraient pas parmi nos objectifs (vase entrant dans la classe I, nous n'avons pas abordé cette question de pollution, l'analyse minéralogique et chimique n'ayant pas mentionné la présence notable de produits toxiques), elles nous semblent aujourd'hui incontournables au regard du développement du tissu économique de la région de Mascara entraînant des rejets industriels dans les cours d'eau du le même bassin versant.

Enfin nous proposons la confirmation des performances obtenues par l'étude de la durabilité vu que le critère de résistance n'est pas le seul critère recherché. La tenue à l'eau et aux milieux agressifs des matériaux à base de vase ainsi que l'action du gel sont des facteurs déterminants dans l'orientation des domaines d'utilisation de ces matériaux.

Références Bibliographiques

- **Ambroise J.**, 1984: « Elaboration des liants pouzzolaniques à moyenne température et étude de leurs propriétés physico-chimiques », thèse de Doctorat es sciences, INSA Lyon (France).
- **Belazreuk R. et Arents H.**, 1999: « Envasement des barrages Algériens », PFE D'ingénieur en hydraulique, USTO, décembre 1999.
- **Bendaoud M.** : «Etude de corrélation entre les propriétés géomécaniques d'une retenue de barrage», Magister soutenu à l'ENSET, Juin 2004.
- **Benamara L.**, 1990: « Conception d'éléments de toiture pour pays en voie de développement », thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- **Benothmane M.**, 1986: « Etude des bétons silico calcaires », thèse de docteur ingénieur de l'INSA de Lyon.
- **Bessenasse M., Kettab A. et Paquier A.** 2003 : « Modélisation bidimensionnelle du dépôt de sédiments dans un barrage en Algérie ». Congrès International sur la Gestion du Risque Eau en Pays Semi Aride, Tunis, 21 et 22 mai 2003, pp. 105 - 113.
- **Bouabdesselam H.**, 2004: Removal of phenol aqueros solution by actived clay, journal of asian chemical society.
- **Boutin R.**, 2000 : « Dragage et rejets en mer. Les produits de type vase», Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, C 2000, ISBN 2-85978-336-9, Paris.
- **Boutouil M.**, 2006: « Contribution à la connaissance du comportement mécanique et environnemental des sédiments et sols solidifiés / stabilisés », Mémoire de HDR de l'Université de Caen (France), spécialité Génie Civil, soutenu le 17 Juillet 2006.
- **Bruand T.** (d'Uselle), 2001 : « Perrégaux le pays des oranges ». Source : «pnha 22 janvier 1992, Blason : pnha, n°86, janvier 1998 ». Cercle Algérieniste Franche-Comté/Bourgogne.
- **Cherrared M. et Sellaoui A.** : « Etude de l'influence du mode de représentation de la pluviométrie sur les débits d'écoulement d'un cours d'eau : cas du bassin versant Bougous », colloque méditerranéen sur l'eau et l'environnement, Alger 8 et 9 octobre 2002 (CMEE 2002), pp.128 - 137.
- **Dali-Youssef Z.**, 2006: « Synthèse, caractérisation de matériaux type zéolithique, utilisation dans le traitement des eaux de rejet », thèse de doctorat d'état de l'USTO.

- **Demmak A.** 1982: « Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie Septentrionale. Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Pierre et Marie Curie, Paris.
- **Diagana B. H.**, 1997: « Solidification de la vase de la Seine par ajout de limon », mémoire de DEA PAE3S, Septembre 1997.
- **Dron R.**, 1978: « Etude expérimentale du système CaO-SiO₂-Al₂O₃-H₂O », bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées.
- **Dron R.**, 1975: « Les pouzzolanes et la pouzzolanité », revue des matériaux de construction, n°692, Janvier - Février 1975, LCPC, France.
- **E.N.R.B** (1984) : Entreprise Nationale de Réalisation des Barrages. « Prélèvement des échantillons non remaniés de 12 sondages profonds dans la retenue du Fergoug », Alger, (document interne).
- **Labioud Z.**, 2002: « Valorisation des boues de curage du barrage de Bouhanifia », 2^{ème} séminaire national sur les ressources en eau, centre universitaire de Mascara (Algérie), 21 & 22 Avril 2002.
- **Langbein et Schumm**, 1958: In « J.C. Olivry ».
- **Lequeux N.**, 2003: « Les hydrates, Structure des CSH », cours école thématique CNRS et ATILH sur les « matériaux cimentaires », Octobre 2003.
- **L.I.** : Lahmeyer International, Rapport « Réparation et confortement des grands barrages en exploitation », possibilités offertes pour l'utilisation de la vase extraite de la retenue de Fergoug 1984.
- **Lucas G., Cros P. et Lang J.** 1976 : « Les roches sédimentaires volume 2 : Etude microscopique des roches meubles et consolidées », Doin Editeurs, 1976.
- **Mekerta B.**, 1995 : « Etude des propriétés géomécaniques des sédiments de la retenue de Génissiat », thèse de doctorat en Génie Civil et Minier, INPL de Nancy, Juillet 1995.
- **Mekerta B., Semcha A.**, 2002: « Valorisation des matériaux locaux en vue de leur utilisation dans les constructions en génie civil ». Rapport de recherche ANDRU, Algeria, Décembre 2002.
- **Messi A.**, 1988: « Propriétés des ciments pouzzolaniques élaborés à partir de latérites activées thermiquement », thèse de doctorat de l' INSA Lyon (France) 1988.

- **Migniot C.** 1989: « Tassement et rhéologie des vases », La Houille Blanche N° 1 et N°2,1989.
- **Migniot C.** 1994: In « Caractéristiques mécaniques des sédiments EDF Division Technique Générale », rapport de stage DEA Génie Civil et Minier, ENSG de Nancy, par Valéry Ferbier.
- **M.T.P.C.** (1970). - Ministère des Travaux Publics et de la Construction. Direction de l'Hydraulique. Note sur l'état en 1/1/1970 des études et réalisations pour la lutte contre l'envasement des barrages Algériens, Alger (document interne).
- **Murat M.**, 1982: « Activation thermique des argiles en réaction solaire, étude des ciments métakaolins », rapport final de recherche PIRDES-CNRS, PARIS janvier 1982.
- **Olivry J.C.** 1991: « Cours d'initiation à l'étude et à la mesure de l'érosion et des transports solides », INPL, Nancy.
- **Ouhba K.**, 2001: « Etude des propriétés des sédiments d'envasement et leur valorisation. Cas de Fergoug et El Macta », thèse de magister de l'Université de Sciences et de la Technologie d'Oran.
- **Parthéniadès**: In « Etude de l'envasement des barrages...application à la retenue du Génissiat», rapport de DEA, ENSG Nancy, 1994, présenté par Hubert Sémiond.
- **Parzonka W.** : « Caractéristiques rhéologiques des barrages retenues, rhéologie des fluides hétérogènes », C.R. 21^{ème} colloque GFR, PP : 5-26.
- **Péra J.**, 1988: « Liants pouzzolaniques de synthèse », programme interministériel, Laboratoire des matériaux minéraux, INSA Lyon (France) septembre 1988.
- **Rais S. et Abidi M.**, 1989 : « Prévision du transport solide sur un bassin versant. Application à l'envasement d'une retenue ». La Houille Blanche, n° 3/4, pp. 296 – 300.
- **Rey F.**, 1992: «Etude physico-chimique et environnementale du composite vase-chaux et additifs», thèse de doctorat de l'université de Caen, génie civil.
- **Remini B.** 2002: «Quantification du transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser. Application à l'envasement du barrage de Béni Amrane». 2^{ème} CMEE Alger Oct. 2002.
- **Roland C.**, 2001: « Aptitude à la valorisation des cendres d'incinération des boues de l'assainissement », thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- **Sémiond H.**: « Etude de l'envasement des barrages...application à la retenue du Génissiat», rapport de DEA, ENSG Nancy, 1994, présenté par Hubert Sémiond.
- **Troalen J.P.** 1998 : « Comportement et réutilisation des vases d'estuaire (Seine) traitées au limon quaternaire », Process of the 8th Congress of the International Association of Engineering Geology and Environment, sept 98, Vancouver (Canada).

A N N E X E S

ANNEXES

ANNEXE N°1

ETUDE PRELIMINAIRE D'OPTIMISATION DES POURCENTAGES DES AJOUTS DANS LA CONCEPTION DE CIMENTS POZZOLANIQUES.

Cette étude est présentée en annexe du fait qu'il s'agit d'un travail préliminaire à l'étude de mortiers à base de différents ciments pouzzolaniques. Dans nos études précédentes le pourcentage de substituant au ciment Portland traditionnel avarié entre 25% et 30%.

Dans ce même domaine de variation, nous avons étudié un mortier normal pour les deux produits pouzzolaniques de synthèse (à base de vase de Fergoug et celle de la Macta) et pour la pouzzolane naturelle de Béni Saf en comparaison avec un mortier à base de ciment seul, pris comme témoin.

A travers cette étude préliminaire nous constatons que les meilleures résistances mécaniques sont obtenues pour des pourcentages différents selon l'origine de l'ajout. Chaque ciment composé a sa propre composition optimale. Nous signalons toutefois que cette substitution est comprise entre 25% et 30%.

Les résultats sont regroupés dans les figures suivantes :

Correction de la granulométrie du sable pour mortier normal.

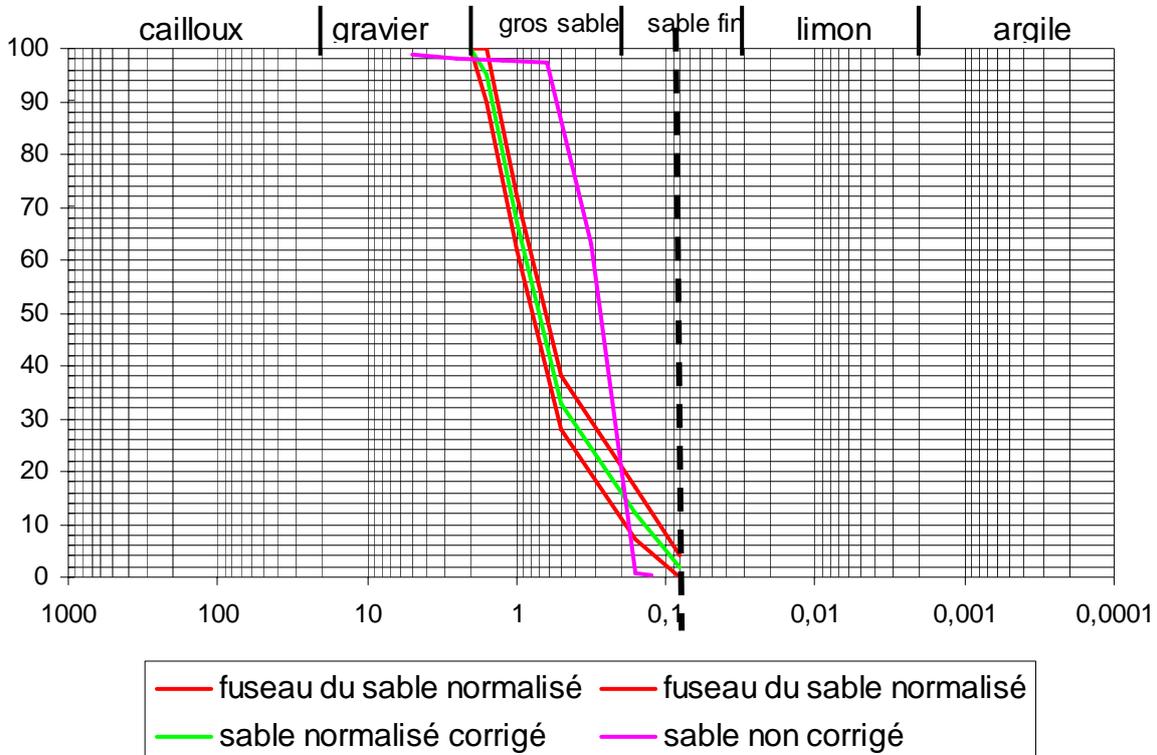


Figure A.1 : Granulométrie du sable utilisé.

Le sable utilisé est un sable siliceux dont la granulométrie a été corrigée par ajout des fractions manquantes au fuseau granulaire du sable normalisé.

Le mortier à base du ciment composé de vase calcinée de Fergoug.

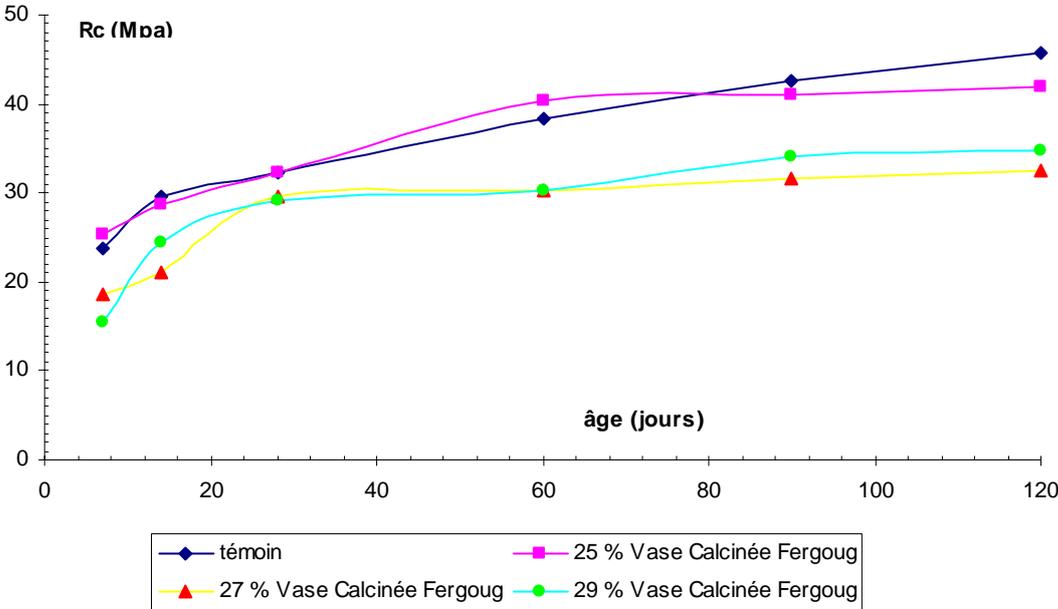


Figure A.2 : $R_c = f(\text{age})$ des mortiers à base de vase calcinée de Fergoug.

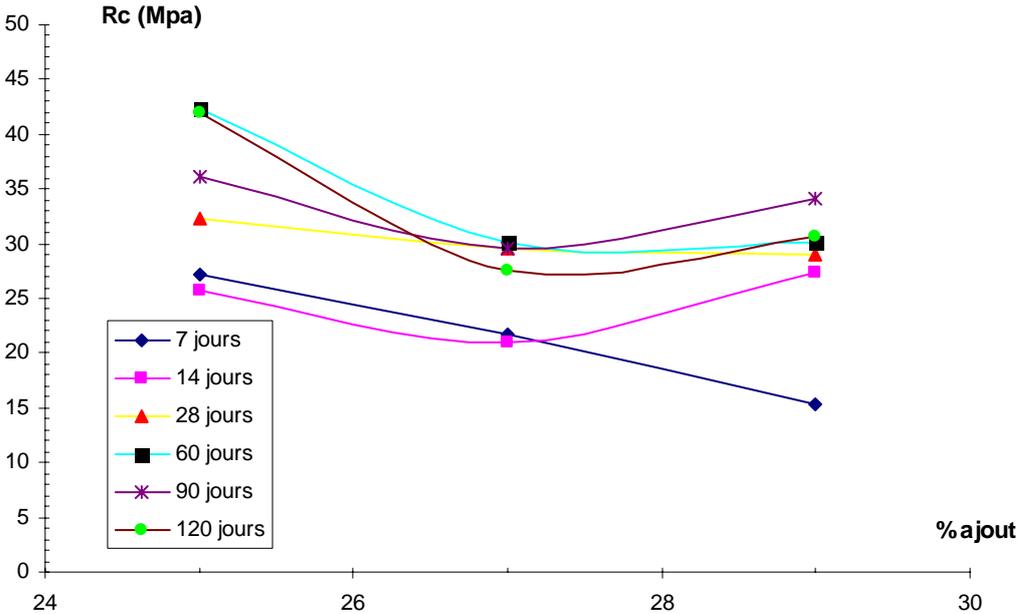


Figure A.3 : $R_c = f(\% \text{ajout})$ des mortiers à base de vase calcinée de Fergoug.

Le mortier à base du ciment composé de vase calcinée de la Macta.

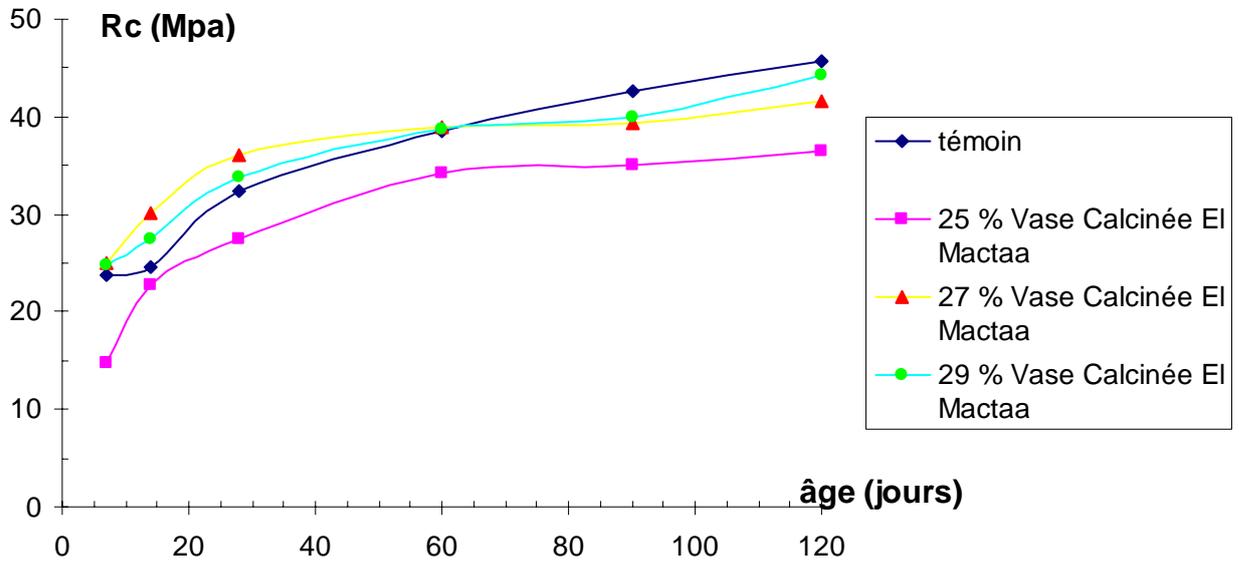


Figure A.4 : $R_c = f(\text{age})$ des mortiers à base de vase calcinée de la Macta.

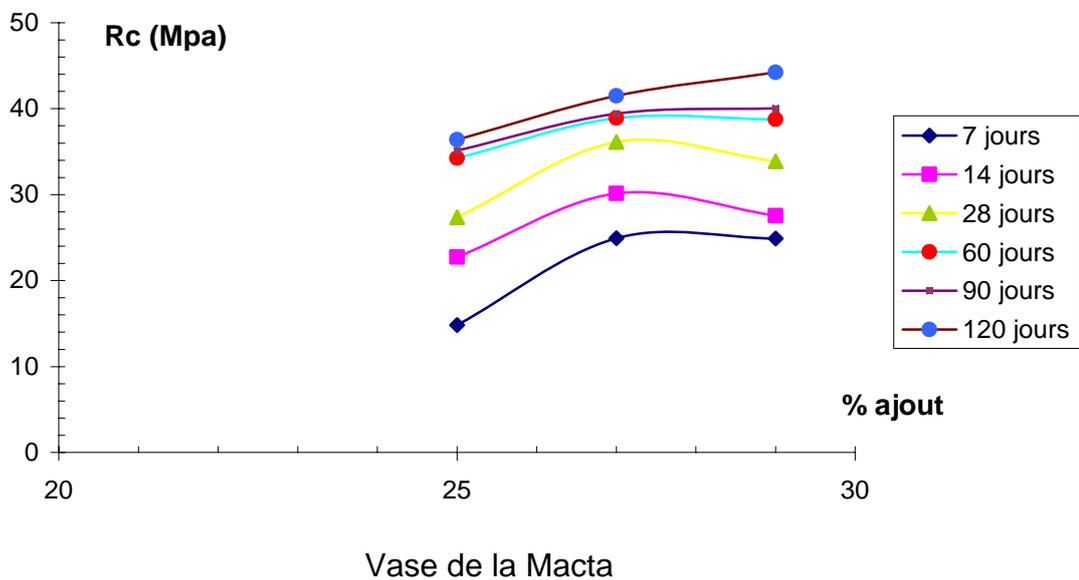


Figure A.4 : $R_c = f(\% \text{ ajout})$ des mortiers à base de vase calcinée de la Macta.

Le mortier à base du ciment composé de pouzzolane de Béni Saf.

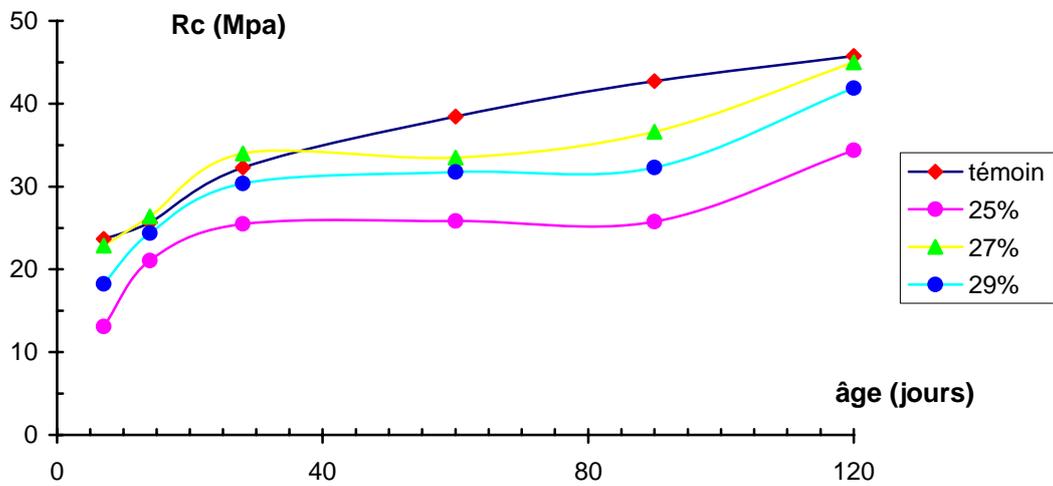


Figure A.5 : $R_c = f(\text{age})$ des mortiers à base de pouzzolane de Béni Saf.

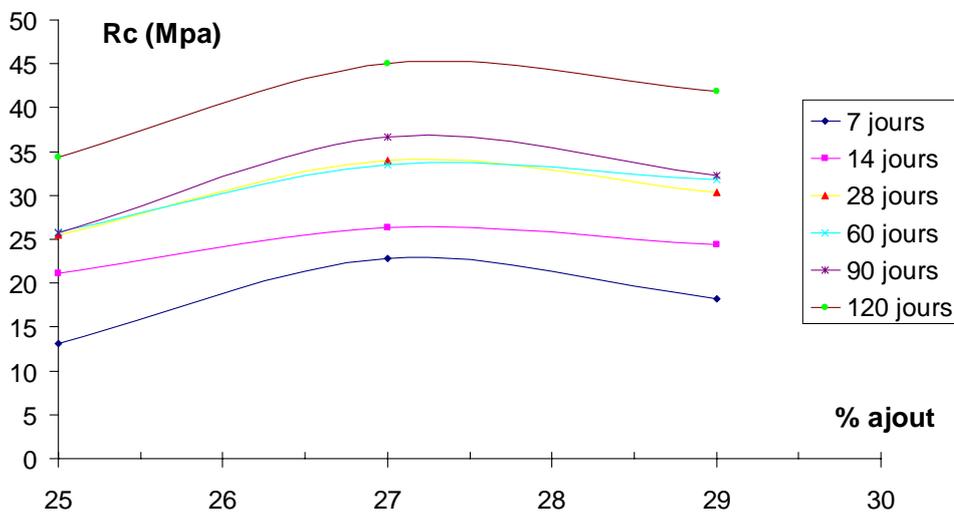


Figure A.6 : $R_c = f(\% \text{ ajout})$ des mortiers à base de pouzzolane de Béni Saf.

ANNEXE N°2

ETAT D'ENVASEMENT DE CERTAINS BARRAGES ALGERIENS

(en 2004 selon l'ANB)

Trois barrages sont menacés d'envasement en 2010

Trois barrages parmi les quatorze infrastructures hydrauliques les plus envasées, dont celui de Ghrib, (Chlef), pièce maîtresse du grand transfert vers Keddara en connexion avec les barrages de Boukerdane (Tipasa) et Bouroumi (Blida) seront envasés à 100 % en 2010 «si rien n'est entrepris d'ici-là pour sauver ces ouvrages précieux pour l'Alimentation en eau potable (Aep) et l'irrigation», a appris l'Anb auprès de l'Agence nationale des barrages (Anb). L'Anb précise que cinq autres barrages seront envahis par la vase à hauteur de plus de 70 % de leur volume tandis que les six ouvrages restants le seront à plus de 50 %, d'ici 2010. Pour faire face à ce phénomène naturel d'envasement, l'Anb a lancé des actions curatives urgentes.

Ainsi, pour le barrage de **Fergoug** érigé en 1970 sur l'Oued El-Hammam dans la wilaya de Mascara, qui emmagasine actuellement 14,07 millions/m³ de vase, soit le taux effarant de 78 % de sa capacité totale, un avis d'appel d'offres international a été lancé pour son dévasement et l'ouverture publique des plis est prévue pour mars prochain. Pour le barrage de Béni-Amrane construit en 1988 dans la wilaya de Boumerdès, une surélévation de la digue a été construite et réceptionnée courant été 2003 faisant gagner ainsi une capacité de stockage de 7 millions/m³. Pour Foug El-Gueiss (Khenchela) qui date de 1939, un appel d'offres a été lancé et l'ouverture des plis reçus aura lieu en mars 2004. Cette correction de la digue en hauteur permettra un gain de capacité de stockage d'un million/m³ environ.

Les actions préventives menées par l'Anb ont trait au lancement d'études de confortement des bassins versants pour six barrages. Il s'agit de celui de Meurad (Tipasa), l'un des plus vieux ouvrages d'Algérie puisque construit en 1860, pour lequel une étude a été lancée avec un bureau d'études sud-africain pour le réhabiliter définitivement. Les autres barrages concernés par le lancement des études de confortement sont ceux de Boughzoul (Médéa) construit en 1934, qui nécessite un dévasement mécanique et dont l'opération a été différée pour 2005, vu que le barrage de Ghrib, qui se trouve en aval, a été pris en charge en 2004 seulement. L'opération de dévasement du barrage d'Oued-Fodda (Chlef) sur l'oued du même nom, est «techniquement impossible», soulignent les spécialistes de l'Anb, indiquant que «les zones de rejet sont inexistantes» et que «la surélévation de la digue est impossible».

Un barrage, Koudiet-Rosfa (Tissemsilt), est en construction en amont et sera réceptionné au cours du premier trimestre 2004 et devra atténuer l'envasement du barrage d'Oued-Fodda. Toujours dans le cadre de cette opération de confortement, les barrages concernés sont ceux de Bouhanifia-1948, sur l'oued El-Hammam dans la wilaya de Mascara et celui du Hamiz-1934 (Boumerdès) dont les études ont été lancées en 2003 pour déterminer avec précision les mesures à prendre. Sont également concernés par ces études, les barrages de Ouizert (Mascara) et Béni-Bahdel (Tlemcen) sur l'Oued-Tafna.

Les barrages de **Fergoug**, Ghrib, Oued-Fodda, Boughzoul et Bouanifia ont par ailleurs, fait l'objet d'études de protection des bassins versants pour réduire l'érosion, lancées en 2003 alors que des études similaires vont être lancées en 2004 pour les autres barrages. Pour ce qui est du barrage de Merdjat Sidi- Abed, l'aménagement des zones de rejet a été achevé et son dévasement sera entamé en février 2004 par à Hydro-Dragados qui a déjà extrait cinq millions/m³ de vase en 2000.

ANNEXE N°3

Photographies du barrage de Fergoug envasé (Photos de A.Semcha)



Le Barrage de Fergoug: La digue en enrochement & l'évacuateur de crues



Le Barrage de Fergoug: La digue en enrochement (envasée)



Le Barrage de Fergoug: La digue & la cuvette envasée



Le Barrage de Fergoug: La cuvette envasée



Le Barrage de Fergoug: Le déversoir & cours d'eau d'aval



Le Barrage de Fergoug: Cours d'eau d'aval entraînant les vases



Écoulement vaseux d'une vidange de fond



Coulée et entraînement de vase



Embouchure de l'Oued à la Macta



Etendue de la plaine (la Macta) aval envasée



Etendue de la plaine aval (La Macta) envasée

ANNEXE N°4

sur site le 12/12/2001

PERREGAUX LE PAYS DES ORANGES-

source : «PNHA 22 janvier 1992»

Blason : pnha, n°86, janvier 1998

33 Ko / 11 s

[précédent](#)

[retour](#)

[suivant](#)



Située à 76 km d'Oran, au pied des derniers contreforts du massif montagneux des Beni Chougranes et à l'entrée de l'immense plaine de l'Habra, la ville de Perrégaux doit son nom à un Général blessé au siège de Constantine : Alexandre Charles de Perrégaux, né à Neuchâtel (suisse), le 21 Octobre 1791 et naturalisé français le 18 Décembre 1815. Il a mérité de donner son nom à cette jeune ville d'Algérie, par sa manière de servir, sa valeur morale et le sacrifice suprême de sa vie, puisqu'il mourût des suites de ses blessures à bord du bateau qui le ramenait en France le 7 Novembre 1837.

La création de Perrégaux remonte au 29 Juillet 1858 et son érection en commune de plein exercice eut lieu le 30 Septembre 1870. Entre ces deux dates, le nouveau village traînait une existence assez précaire et quiconque lui aurait prédit une destinée brillante eût passé pour un bâtisseur de châteaux en Espagne. L'unique monument était d'abord le caravansérail, lieu de refuge des voyageurs allant de Mostaganem à Mascara, situé près de la rivière Habra, plus tard transformé en abattoir communal. Vers 1867-68 la culture du coton dont les débouchés étaient faciles et qui se vendait à des prix très élevés, donna au pays des ressources inattendues; ce fut un pas décisif vers le progrès : l'élan était donné. Il s'accrut davantage avec la construction des voies ferrées du PLM et de la

L'atmosphère était parfumée par les orangers qui bordaient la plupart des rues, la vie s'écoulait calme et heureuse, rythmée par la sirène du dépôt des Chemins de Fer annonçant le début et la fin des horaires de travail. Le soir, avant la nuit, la jeunesse se retrouvait pour "faire le boulevard" pendant que les plus vieux devaient attablés aux terrasses des cafés. Le dimanche, nombreux étaient les Perrégaux qui se rendaient en voiture ou en train à la plage voisine de Port aux Poules pour y passer une agréable journée avec parents ou amis à "tchatcher" et manger selon la saison : un "gaspacho" une "paella" ou la "mouna".

Malheureusement, le vent de l'histoire est venu mettre un terme à cette douceur de vivre, séparant des communautés réunies depuis près de 130 ans, en en rejetant une partie sur le sol de France et d'ailleurs. Il nous a paru important, pour resserrer les liens entre les perrégaux, de créer une amicale qui perpétuera le souvenir de notre ville auprès de la génération nouvelle, afin que nul n'oublie.

Le Bureau de l'Amicale des Perrégaux
C/O Antoine GARRIGOS
Cité Le Vallon Bât D
34200 SETE

En dehors de l'évocation de ce fameux et célèbre général français d'origine suisse, Perrégaux, cette ville m'avait laissé une image inconsciente mais enregistrée dans sa mémoire. Lors d'un voyage dans l'Oranais, en 1958, j'avais remarqué sans plus, les armoiries de la ville, gravées dans la pierre sur un joli bâtiment, à l'entrée de la cité, à côté d'une station service "Shell" où nous avions fait le ravitaillement en carburant.

Et lors de mes recherches, car ces armes me trottaient dans la tête, impossible de retrouver une représentation d'époque.

Un président de l'Association de Perrégaux est même allé jusqu'à m'écrire, certainement de bonne foi, qu'il n'y avait jamais eu d'armoiries à Perrégaux. Qu'ils n'avaient rien trouvé aux Archives d'Aix...!

Mais le Dieu des chercheurs, qui fait bien les choses, par l'intermédiaire de monsieur J.P Pérez de

Compagnie Franco- Algérienne qui donnent à Perrégaux une situation privilégiée sur la ligne parallèle au littoral d'Oran à Alger au point de croisement de la voie qui relie les hauts plateaux à la côte.

En 1872, la construction du barrage réservoir de l'Oued Fergoug va changer la face de la région en apportant la fertilité dans une plaine brûlée par le soleil. A dater de 1875, le pays prospère rapidement. Il traverse une très heureuse période d'années favorables lorsqu'une terrible catastrophe vient tout compromettre et menace de détruire toutes les espérances. Le 15 décembre 1881, la rupture du barrage produit une formidable inondation : on dénombre 250 victimes. De nombreuses maisons sont détruites, les voies ferrées coupées et les ponts enlevés. Un profond découragement s'empare des colons qui voient détruit le fruit de longues années de travail. Grâce à Mrs LAURENT, Maire de la ville et DUFORST, conseiller général, les secours accordés permettront la reconstruction du barrage qui fut achevée en 1883. Ce grand barrage de l'Habra, le plus important de l'Algérie à l'époque, est situé à 10 km de Perrégaux à gauche de la route de Mascara ; il peut contenir 36 millions de m³ d'eau. La longueur totale d'une rive à l'autre est de 500 mètres : c'est dire l'importance de ce moyen d'irrigation pour la plaine.

Depuis cette époque, Perrégaux progresse sans cesse, la ville s'embellit, les monuments publics et les édifices privés dénotent un confort qui n'exclut pas un brin de coquetterie. Le jardin public est tracé avec un véritable goût artistique : ses allées plantées de caoutchoutiers, de ficus et d'autres essences convergent vers le centre où s'élèvent un bassin pourvu d'un jet d'eau et un kiosque à musique autour duquel des générations danseront. Les trottoirs des boulevards et des rues sont bordées d'arbres magnifiques qui transforment les chaussées en allées ombragées sous d'épais feuillages. On sent qu'il fait bon vivre dans cette charmante cité si hospitalière aux étrangers.

Tout semble la favoriser : jusqu'à la Compagnie CFA qui y transfère d'ARZEW ses ateliers autour desquels gravite une petite armée d'ouvriers et d'employés, pressentant que ce nœud ferroviaire deviendrait le plus important d'Algérie. La population globale de la commune atteint 8.560 habitants dont 1.558 français, 3.136 étrangers et 3.866 indigènes. Le maire est secondé par deux adjoints, vingt et un conseillers municipaux et trois, au titre d'indigènes. Le budget très important dépasse en recettes 160.000 francs. Comme dans toutes les communes algériennes le poste le plus dépensier est celui des frais d'hospitalisation : 15.000 francs par an. Perrégaux est doté de tous les édifices communaux : mairie, groupe scolaire, justice de Paix, abattoirs, ajoutons l'usine électrique et la station de monte. La ville est alimentée en eau potable par une prise sur le grand canal issu du

Toulon, me fit adresser une photocopie couleur des armoiries de la ville. C'est la couverture de la "Revue municipale (de Perrégaux)", 3^e année, n°9/10 juin 1957. (Avec le tampon "Archives nationales - Aix-en-Provence"). Alors trêve de polémique, voyons les armes de cette adorable petite ville.

Qui a élaboré ces armes, à quelle époque (après 1928 puisque le barrage a cédé en novembre 1927, mais avant 1957 puisque la revue date de juin 1957) ? Alors amis perrégaulois ou érudits de notre petite histoire à vos souvenirs et écrivez à l'auteur de ces lignes, sous quelle municipalité ont-elles été adoptées et y a-t-il eu des cérémonies à ce sujet ? Ces armes ont-elles été déposées pour devenir officielles ?

Maintenant comment lire ces armoiries ?

Avec beaucoup de modestie voilà ma lecture puisque je n'ai pas trouvé la lecture officielle. - "Ecu français moderne, à la filière d'or; tiercé en barre au 1, de gueules à la locomotive à vapeur d'argent, fumante posée sur un élément de voie ferrée de sable ;

- au 2, d'argent liseré d'or (malgré la règle d'enquerre) à l'artichaut de sinople ; une orange sanguine au naturel, tigée et feuillée de sinople posée en chef ; en coeur un tourteau d'azur bordé d'or, chargé d'un croissant d'or accompagné d'une main de fatma de même ;

- au 3, d'azur au barrage hydraulique de pierre, maçonné de sable, éventré et laissant s'échapper le flot furieux de la retenue".

Ecu timbré d'une couronne murale d'or, crénelée, maçonnée de sable, à une tour centrale à 5 créneaux et portant en bandeau inférieur l'inscription, de sable, "Castra Nova". Sous l'écu, une banderole simple, de gueules, porte en devise le nom moderne de la cité. Symbolique : de haut en bas La couronne murale rappelle qu'ici, à peu de distance s'élevait un fort romain du Limes, appelé Castra Nova, puis une redoute française qui précéda la création de la ville de colonisation en 1858.

Ensuite au 1 de gueules qui est couleur héraldique de l'Afrique, et une machine à vapeur pour rappeler l'importance du nœud ferroviaire au croisement de la rocade Arzew-Oran-Alger et de la voie étroite Arzew-Colomb Bechar, cité en grande partie de cheminots, deux gares et ateliers CFA.

Au 2, l'artichaut et l'orange sanguine de Perrégaux, tous deux célèbres dans une grande partie de l'Algérie (La Thompson a acquis une renommée internationale). Le croissant et la main de fatma rappellent que nous vivions et travaillions en parfaite harmonie avec nos concitoyens musulmans, avant que ne souffle le vent de l'histoire...! Tolérance des Français, jusque dans leurs armoiries.

Au 3, d'azur, ciel d'Algérie et barrage de l'Habra avec représentation de la catastrophe du 26.XI.1927, deuxième rupture du barrage puisque déjà en 1881...

De plus, le tiercé est tricolore : bleu, blanc, rouge pour rappeler notre emblème national auquel était fort attaché notre peuple d'Algérie. Voilà ce que je peux dire à propos de ces armes, très belles dans leur

barrage de l'Oued Fergoug.

La superficie du territoire de la commune atteint près de 22.000 ha, dont 14.000 irrigables. L' étendue du vignoble est de 600 ha produisant des vins de qualité moyenne, titrant 10 degrés. Les autres cultures comprennent : le blé, l'orge, l'avoine, le maïs, les fèves, les cultures d'été et les fourrages. Les plantations d'agrumes fournissent des oranges et des mandarines de qualité supérieure, très précoces qui constituent avec les primeurs une importante source de revenus. Les plantations d'oliviers se multiplient. La région est le pays de l'élevage par excellence, les pâturages de la plaine, notamment ceux de Debrousseville, permettent d'élever de nombreux troupeaux de bœufs et de moutons. Aussi le marché du Mercredi est- il l'objet de grosses transactions sur les bestiaux. Tout ceci, sous la surveillance et les conseils éclairés de la station agronomique de la Ferme Blanche.

Le barrage se rompt une deuxième fois en 1927. En 1929, les orangeries couvrent une superficie de 800 ha pour une production de 35 à 40 millions de fruits. Plus tard, en 1940, à la prise en charge du périmètre irrigable par le service de l'irrigation, elles s'étendent sur 3.000 ha et atteindront 4.900 ha en 1954. Elles sont constituées d'orangers, clémentiniers, mandariniers, citronniers et pomélos. La production est exportée vers la Métropole, l'Allemagne, les Pays-bas et l'Angleterre par les ports d'Oran et surtout de Mostaganem. La récolte est traitée dans 25 stations de conditionnement et d'emballage entièrement équipées. Par contre, le vignoble a disparu sous les attaques du phylloxéra.

La ville n'a cessé de se développer puisque sa population est passée en 1954 de 27.367 habitants (8.318 européens et 19.016 français- musulmans) à 30.000 habitants(10.000 et 20.000 respectivement), à la veille de l'indépendance de l'Algérie. Cet essor de la population entraîne naturellement celui de l'enseignement, car aux deux classes de garçons et filles situées à l'origine à la Mairie, s'ajouteront, au fil des années et grâce aux municipalités successives : l'école maternelle, qui deviendra le siège de la Sous-préfecture, l'école des filles Jules Ferry, l'école des garçons Charles Delavigne, puis les groupes scolaires Pasteur, Berthelot, Anatole France, Victor Hugo et Marie Curie ; le stade omnisports Léo Lagrange. La ville possède des équipements sportifs : piscine, tennis, stade de foot-ball où évoluait la PGS (Perregauloise Gallia Sport), dernière équipe vainqueur de la coupe d'Algérie Française en 1961.

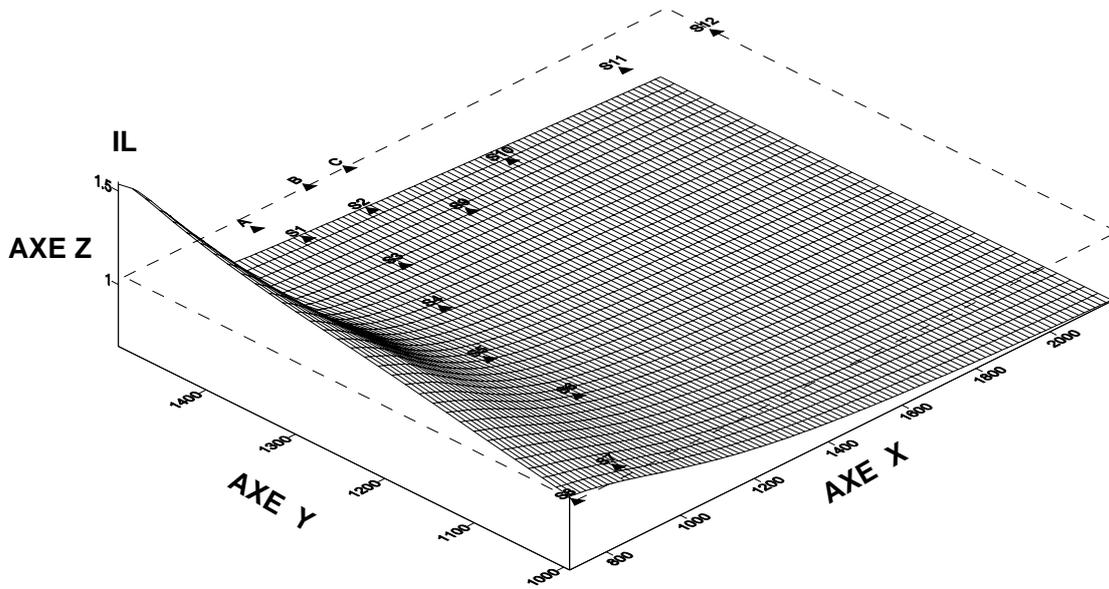
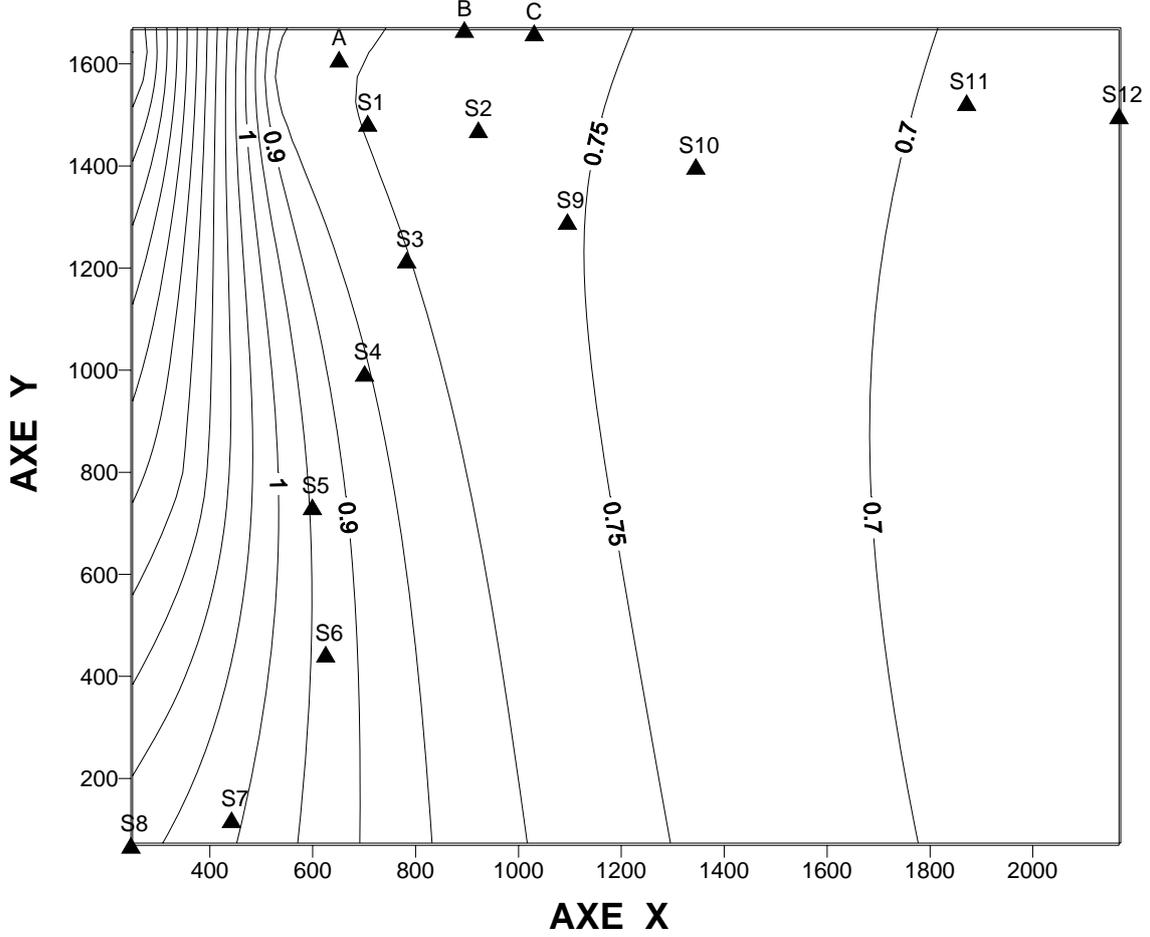
graphisme naïf, mais tellement expressif.

Fasse le Dieu des Chercheurs que j'obtienne les renseignements que j'espère.

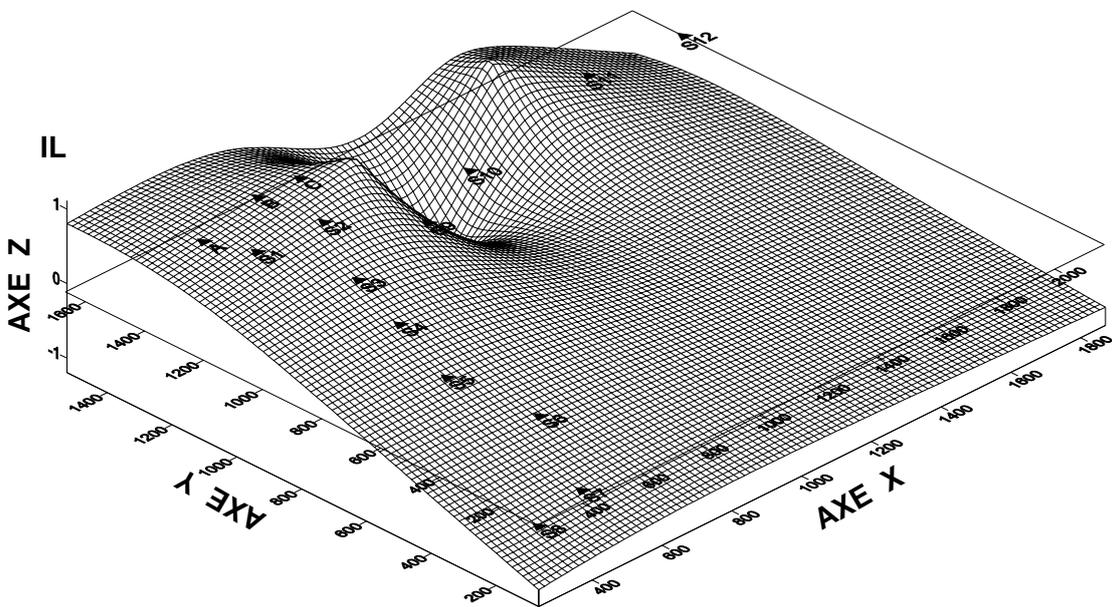
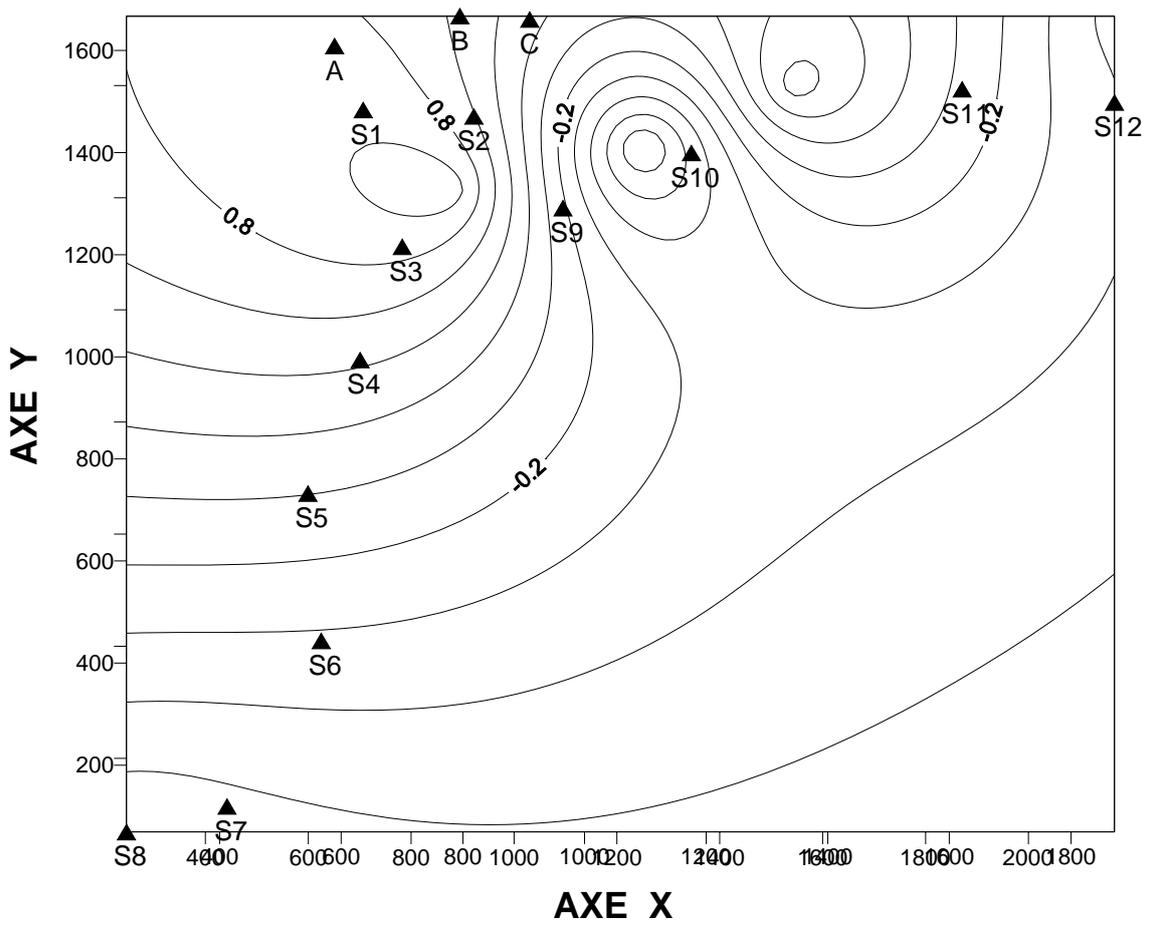
Théo BRUAND d'UZELLE
Cercle Algérieniste
Franche-Comté/Bourgogne

ANNEXE N°5

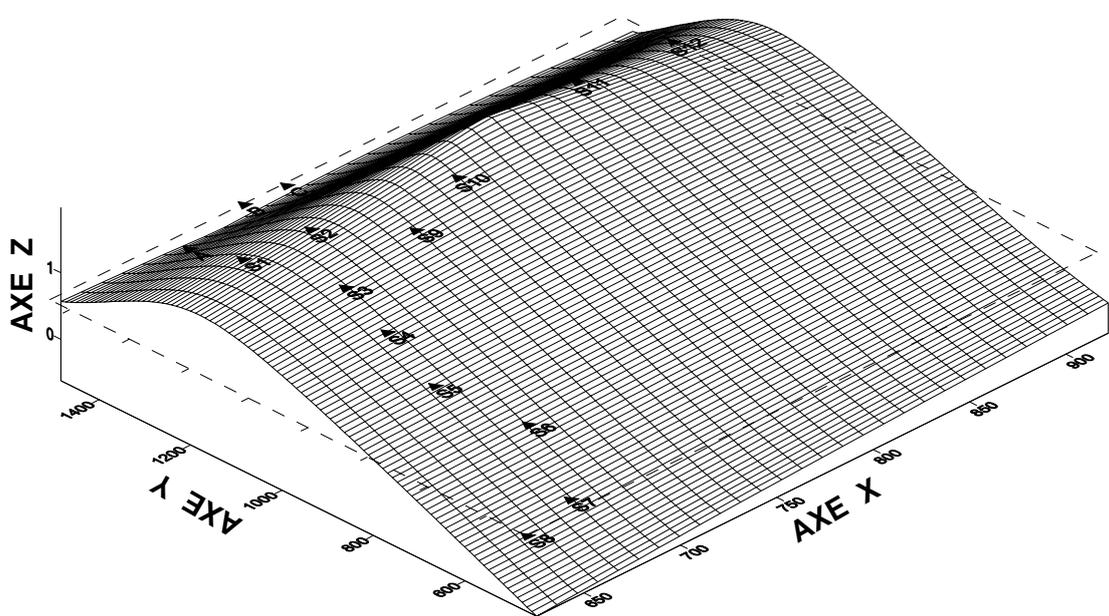
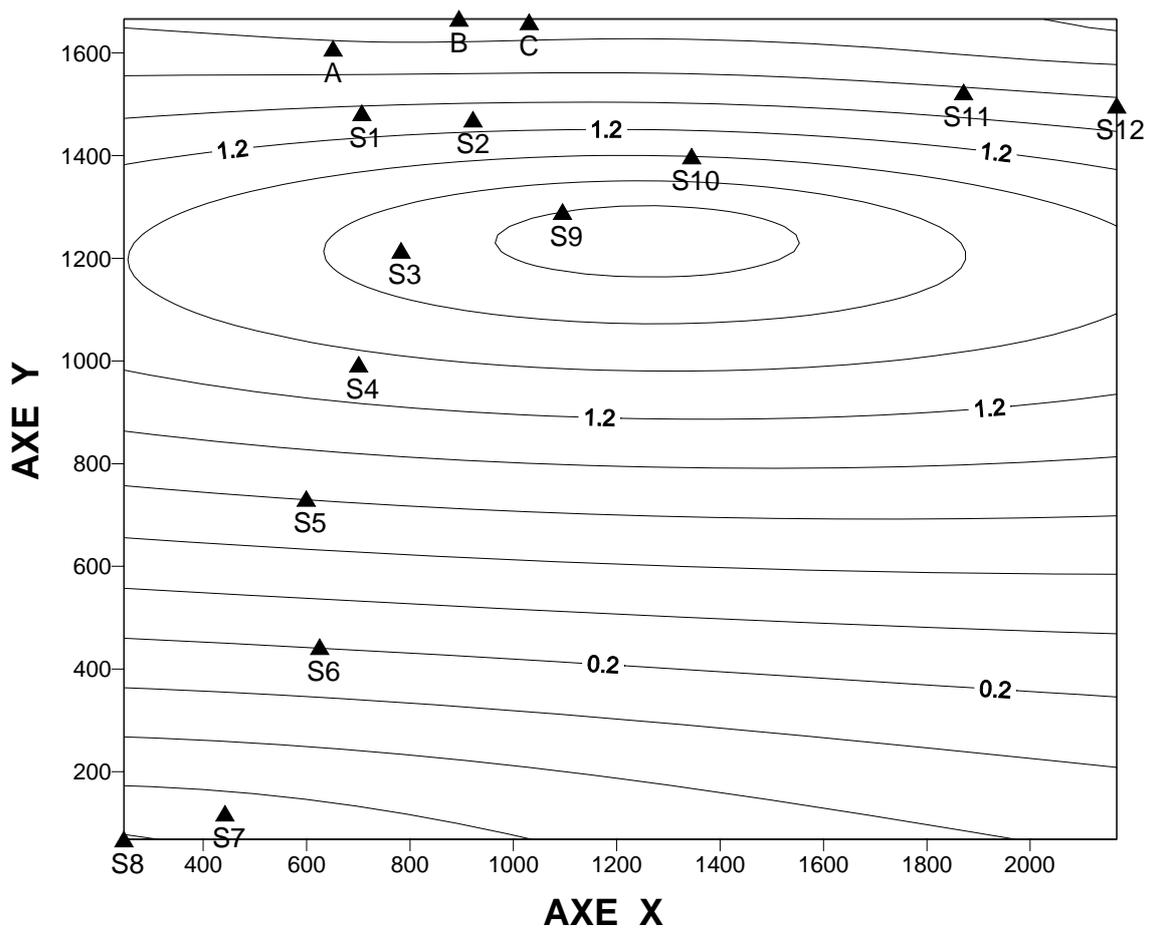
Répartitions spatiales (Indice de Liquidité)



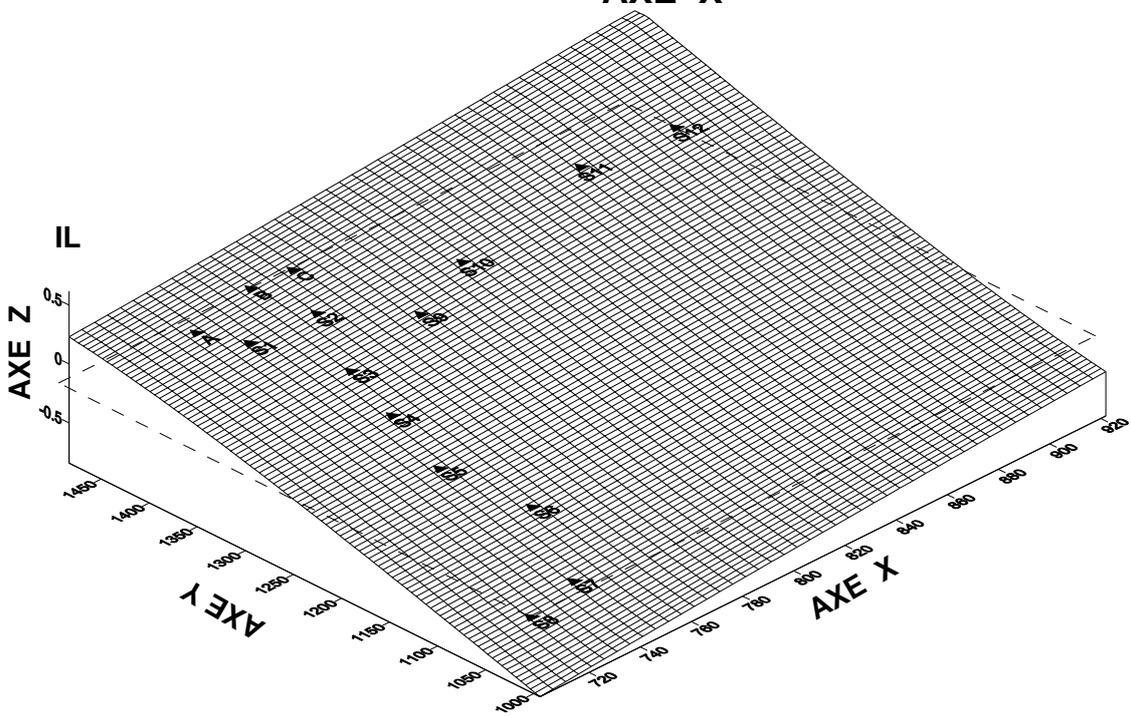
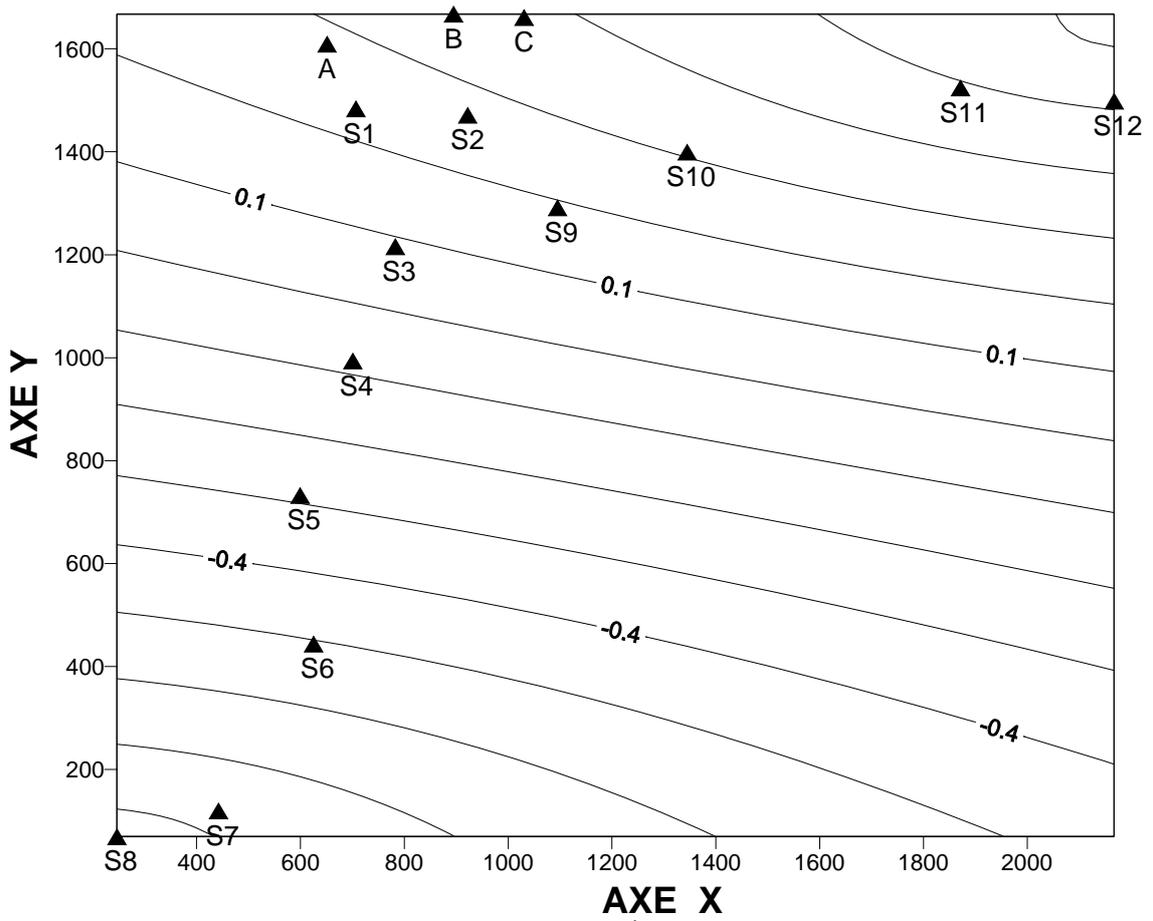
Indice de Liquidité
Tranche 0-6 m



**Indice de Liquidité
Tranche 6-12 m**

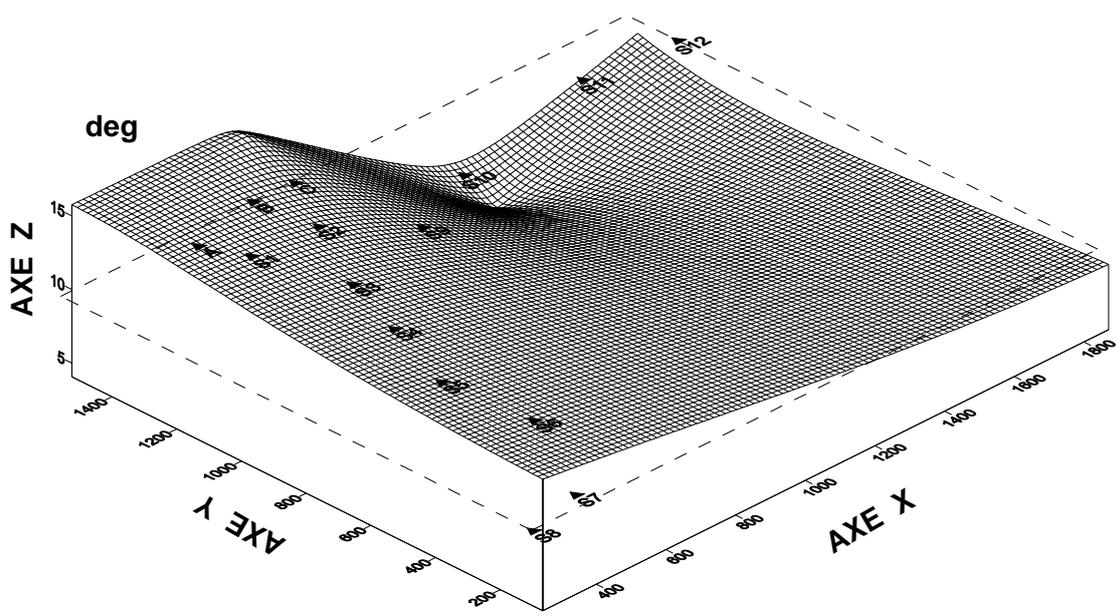
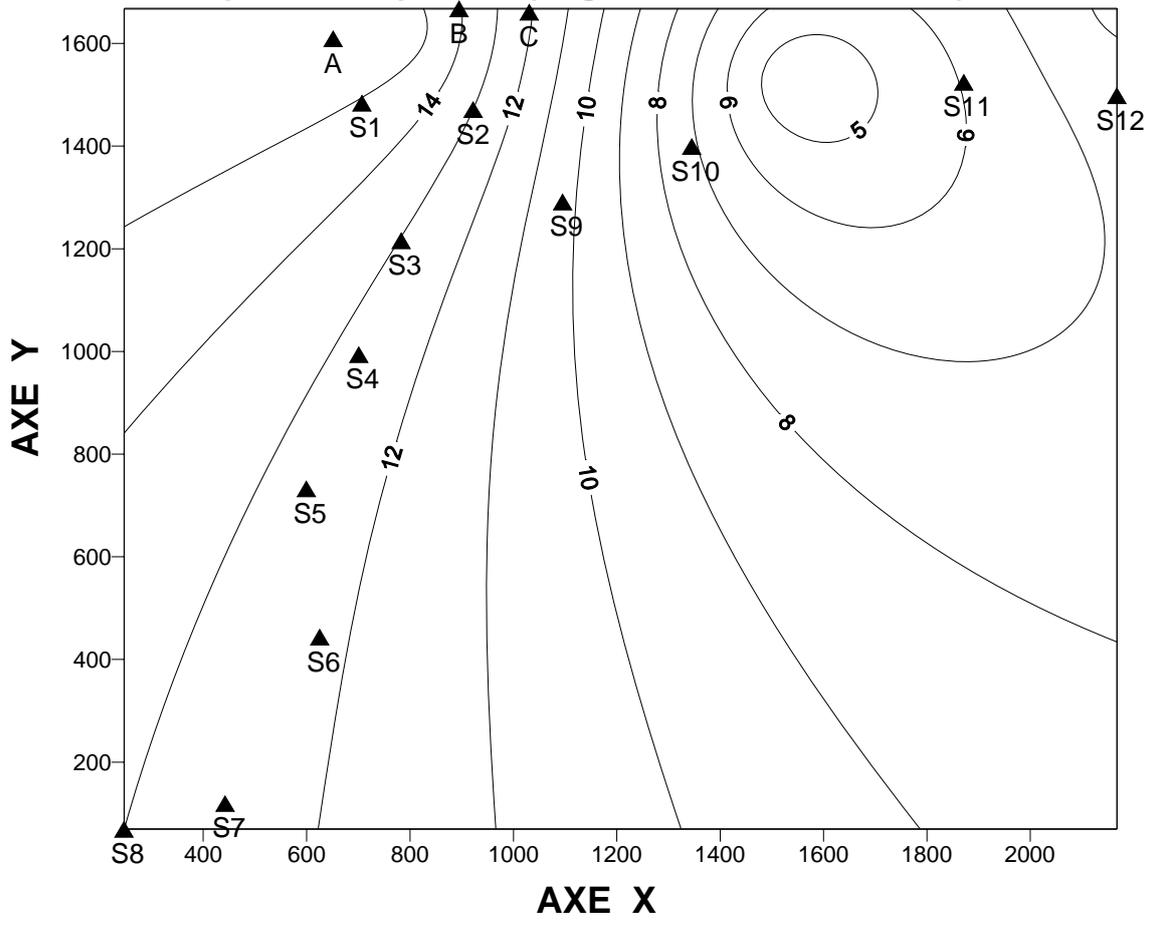


**Indice de Liquidité
Tranche 12-18 m**

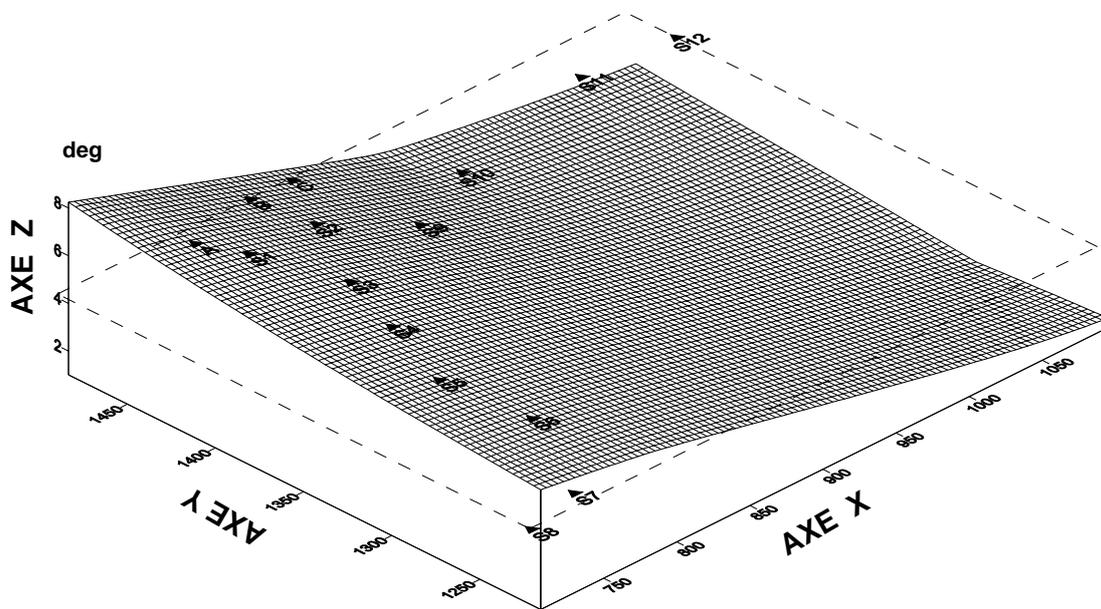
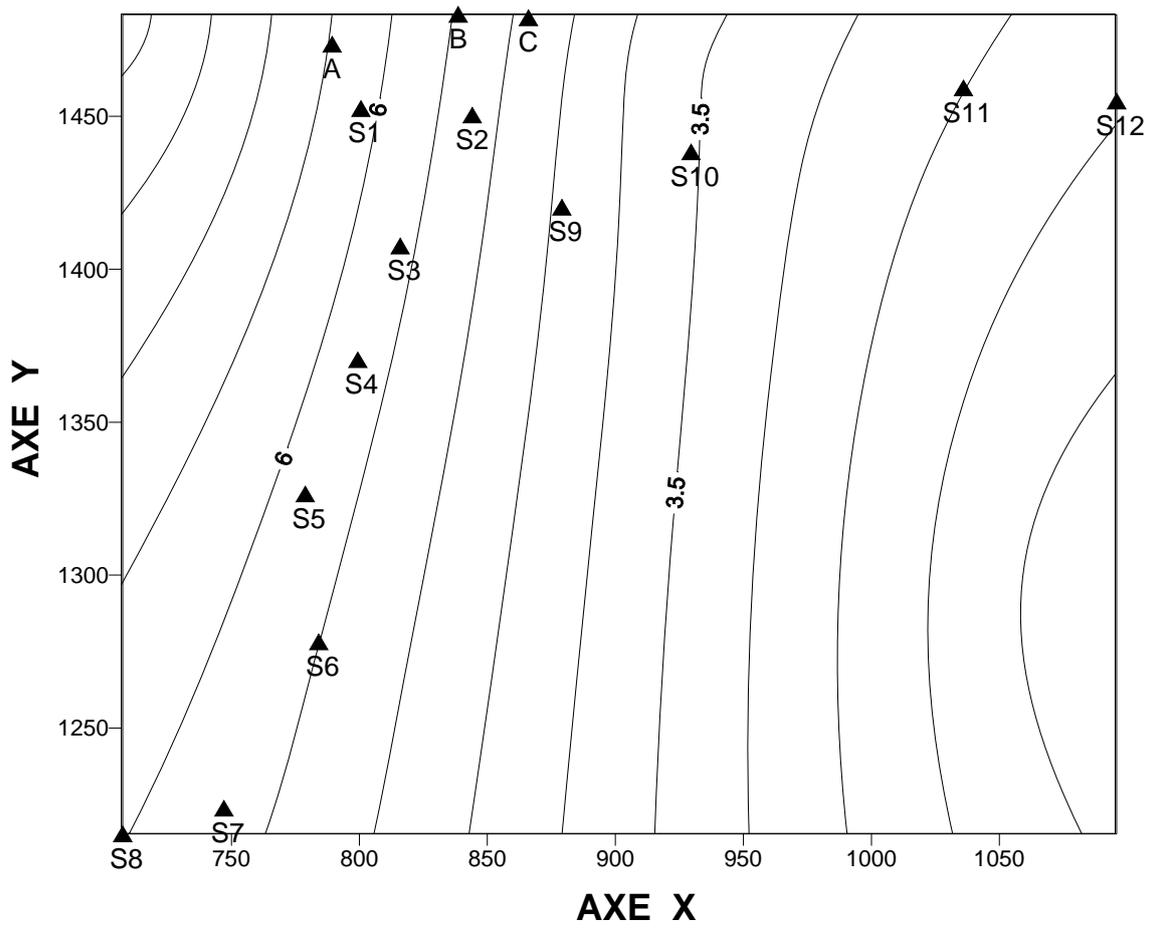


**Indice de Liquidité
Tranche 18 m – Fond**

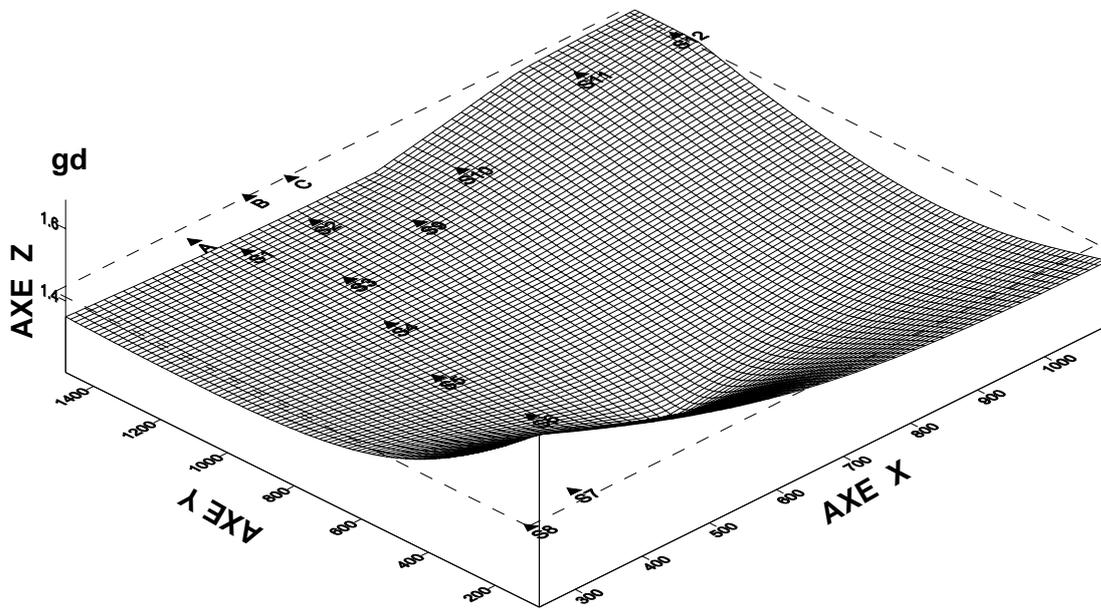
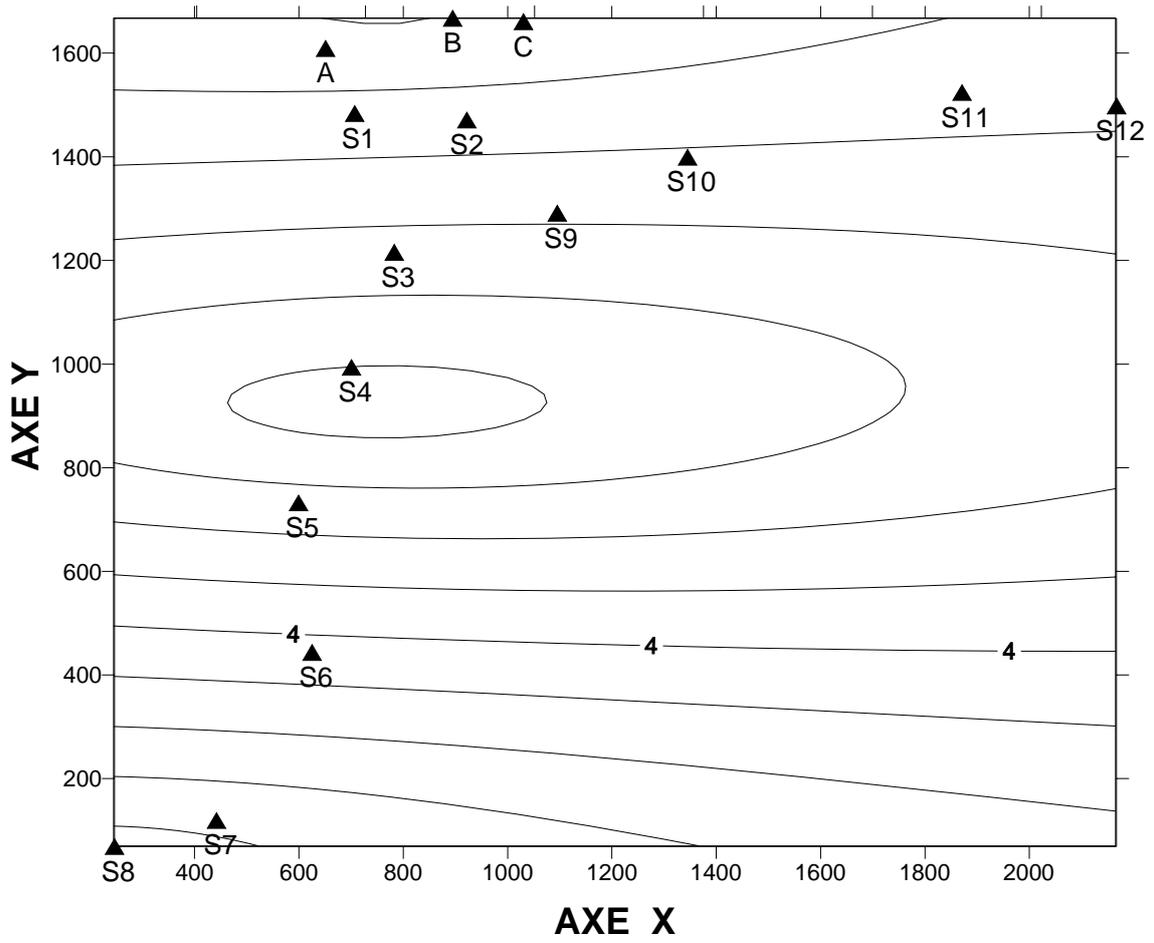
ANNEXE N°6
Répartitions spatiales (Angle de frottement interne)



Angle de frottement interne
Tranche 6-12 m

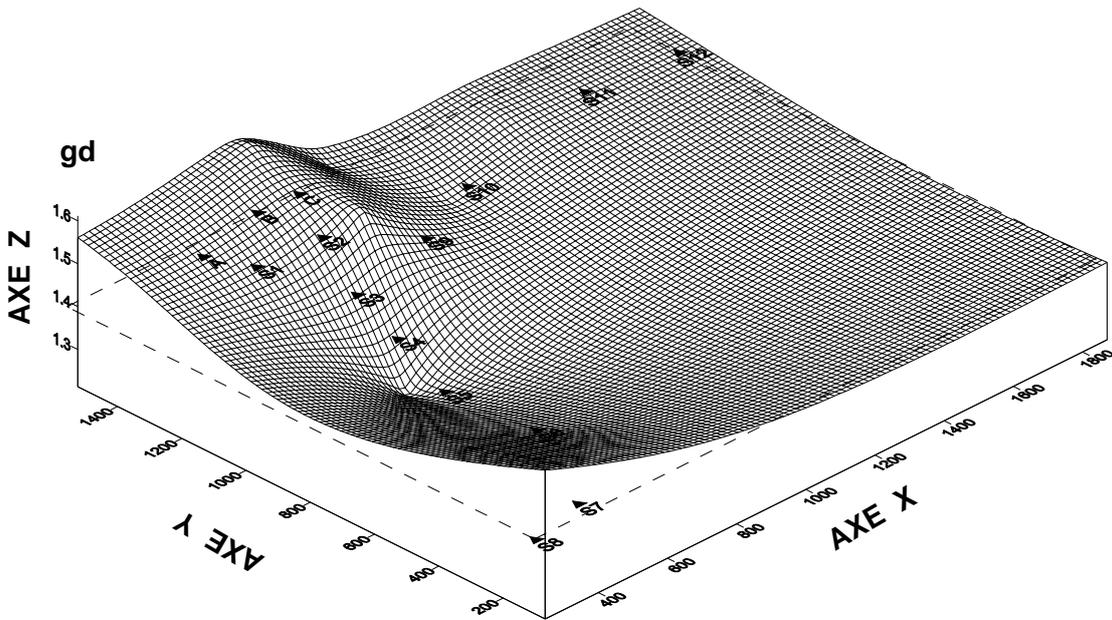
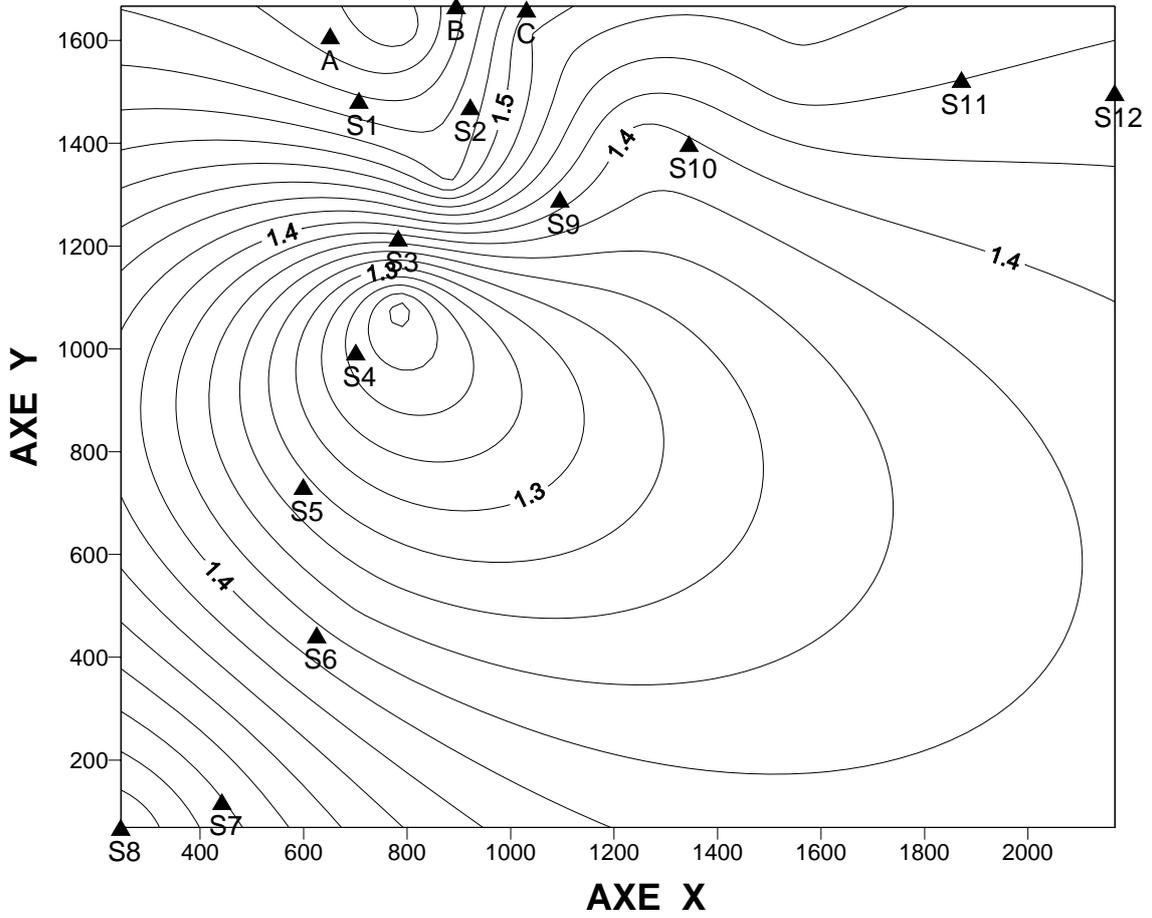


**Angle de frottement interne
Tranche 12-18 m**

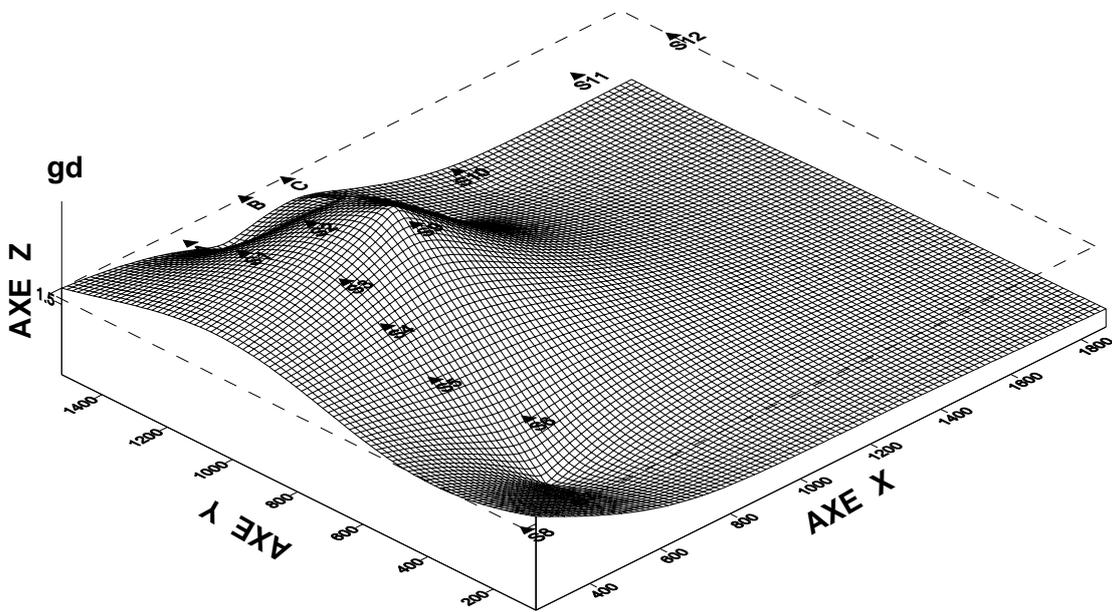
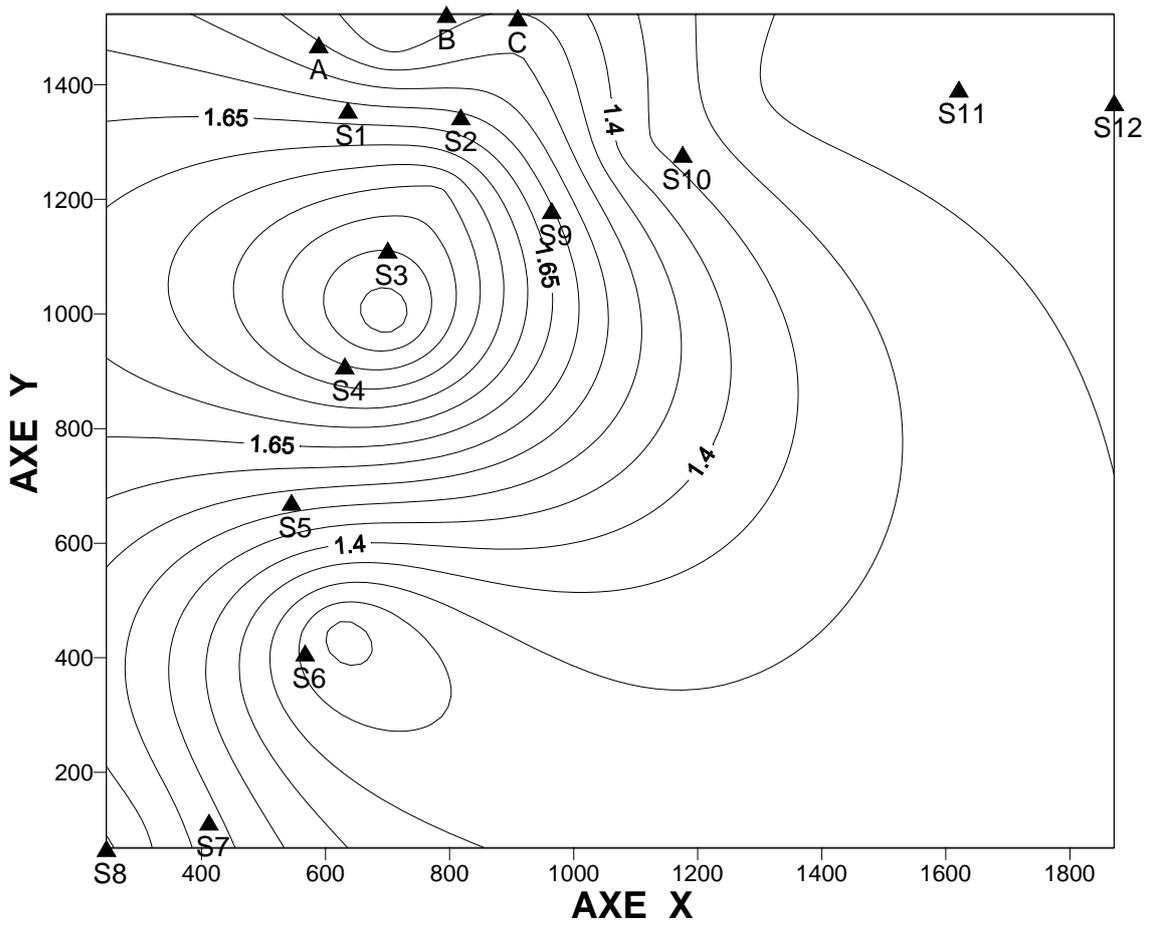


Angle de frottement interne
Tranche 18 m – Fond

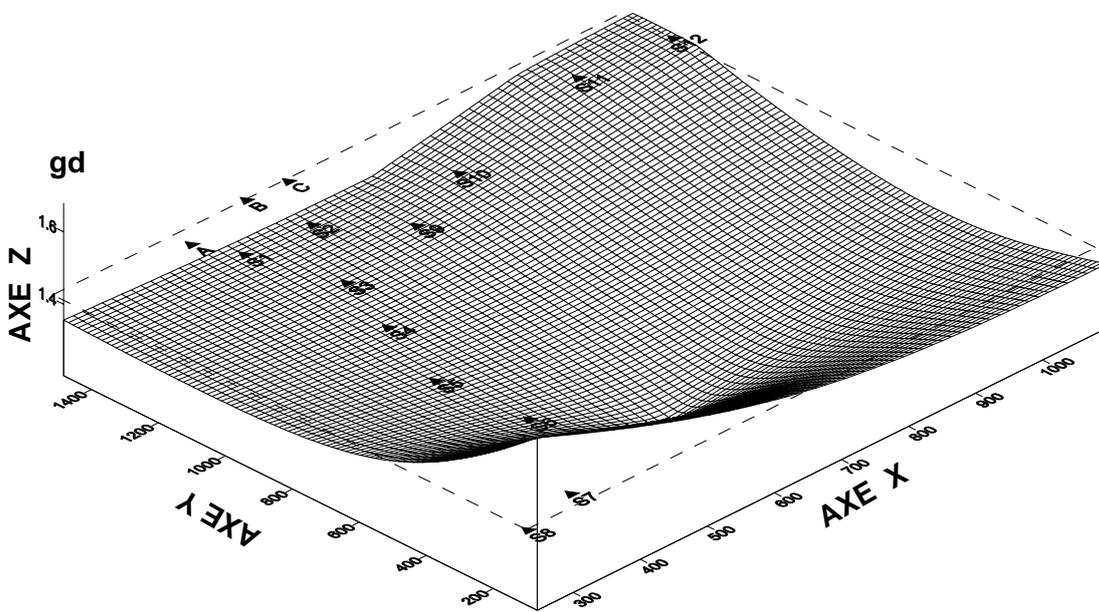
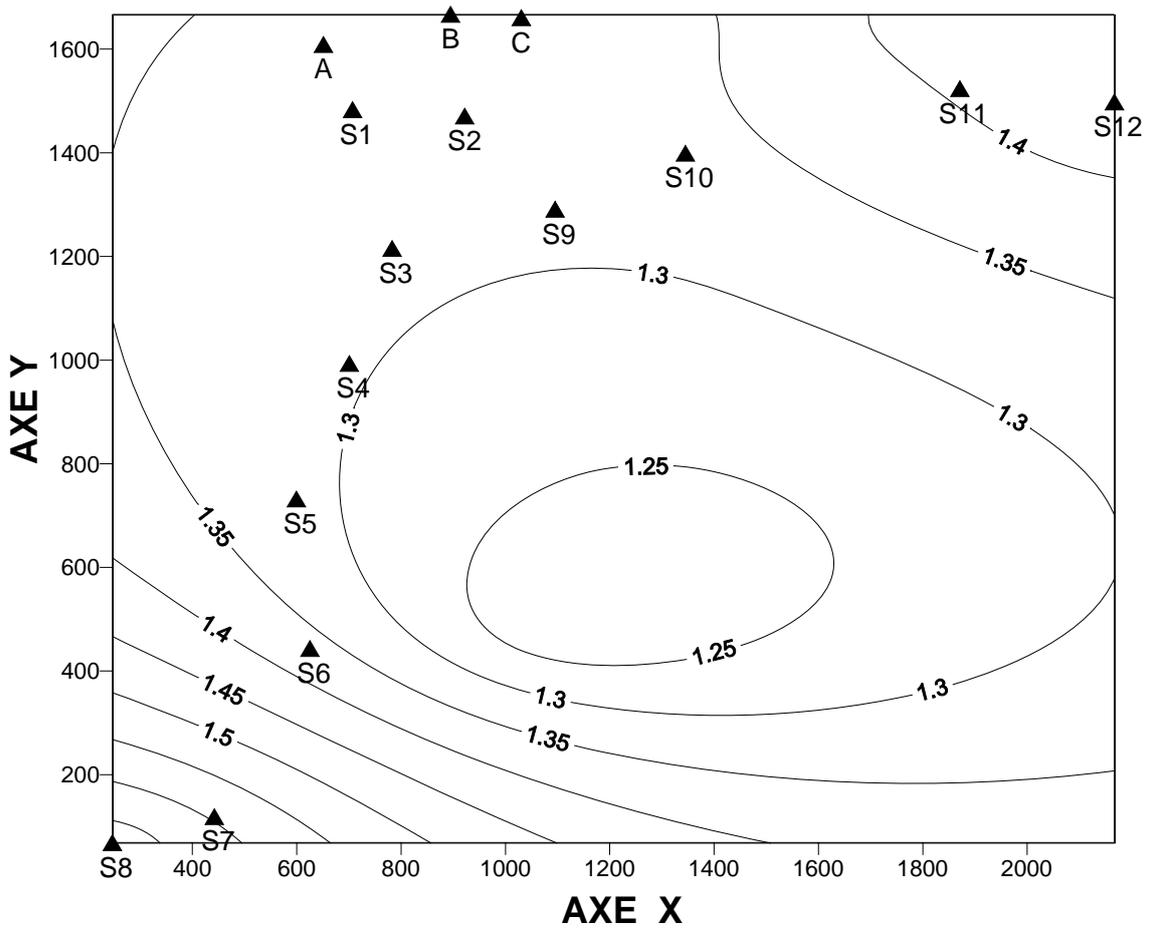
ANNEXE N°7
Répartitions spatiales (Densité sèche)



Densité sèche
Tranche 6-12 m



**Densité sèche
Tranche 12-18 m**



Densité sèche
Tranche 18 m – Fond

ANNEXE N°8

Liste de barrages Algériens répertoriés en 2006

Principaux Barrages en exploitation

	Barrage	Wilaya	Capacité estimée en 2000 (hm ³)	Volume régularisé (hm ³ /an)	Destination
01	GRIB	AIN DEFLA	145,2	105	AEP et IRR
02	DEURDEUR	AIN DEFLA	110,2	40	AEP et IRR
03	HARREZA	AIN DEFLA	69,2	23	IRR
04	DJORF TORBA	BECHAR	296,4	100	AEP et IRR
05	F. EL GHERZA	BISKRA	16,9	13	IRR
06	F.D. GAZELLES	BISKRA	55,5	14	IRR
07	BOUROUMI	BLIDA			AEP et IRR
08	AIN ZADA	BORDJ B.A.	121,7	50	AEP
09	LEKHEL	BOUIRA	29	17	AEP et IRR
10	HAMIZ	BOUMERDES	15,6	17	IRR et TRANSF
11	KEDARA	BOUMERDES	143,8	165	AEP
12	BENI AMRANE	BOUMERDES	6	TRANSF	TRANSF
13	OUED FODDA	CHLEF	125,5	69	IRR
14	SIDI YACOUB	CHLEF	278,9	98	AEP ET IRR
15	BREZINA	EL BAYADH	122 ,5	11,5	IRR
16	CHEFFIA	EL TARF	167,1	95	AEP et IRR
17	H. DEBAGH	GUELMA	216,2	55	AEP et IRR
18	EL AGREM	JIJEL	33,9	21,5	AEP
19	F.EL GUEISS	KHENCHELA	0,48	3,2	AEP et IRR
20	BABAR	KHENCHELA	41	12	IRR
21	BOU HANIFIA	MASCARA	48,4	TRANSF	TRANSF et AEP
22	FERGOUG	MASCARA	3,93	93	AEP et IRR
23	OUIZERT	MASCARA	90,83	TRANSF	TRANSF
24	CHEURFAS II	MASCARA	81	45	IRR
25	BOUGHZOUL	MEDEA	53,6	TRANSF	TRANSF
26	LADRAT	MADEA	9	4,7	IRR
27	H.GROUZ	MILA	44	16	AEP
28	KSOB	M'SILA	15,6	20	IRR

29	S.M.B.A	RELIZANE	159,4	100	AEP
30	MERDJA S A	RELIZANE	48	40	IRR
31	GARGAR	RELIZANE	437,1	120	AEP et IRR
32	AIN DALIA	S AHRAS	76	45	AEP
33	OUED CHERF	S AHRAS	157	30	IRR
34	SARNO	S B ABBES	21,16	10	AEP
35	ZARDEZAS	SKIKDA	25,3	32	AEP et IRR
36	GUENITRA	SKIKDA	124	48	AEP et IRR
37	BENI ZID	SKIKDA	40	20	AEP et IRR
38	ZIT EMBA	SKIKDA	120	43,4	IRR
39	MEXA	TAREF	47	37	AEP
40	BAKHADDA	TIARTET	43,8	37	AEP et IRR
41	DAHMOUNI	TIARET	38,6	9	IRR
42	MEURAD	TIPAZA	0,25	1	IRR
43	BOUKOURDANE	TIPAZA	96	49	AEP et IRR
44	C BOUGARA	TISSEMSILT	11	5,5	IRR
45	TAKSEBT	TIZI OUZOU	175	180	AEP
46	BENI BAHDEL	TLEMCEN	55,5	48	AEP et IRR
47	MEFROUCH	TLEMCEN	14,5	17	AEP
48	SIDI ABELLI	TLEMCEN	106	50	AEP
49	SOUANI	TLEMCEN	17,6		IRR
50	H BOUGHRARA	TLEMCEN	177	59	AEP et IRR

L'ANB publie sur son site Internet www.anb-dz.com en 2006, les études et les projets suivants :

- 14 barrages en cours de réalisation,
- 11 projets de barrages en cours de lancement,
- 29 projets en études de faisabilité,
- 28 projets en études d'avant-projet détaillé,
- 6 études lancées.