



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed  
Boudiaf

Faculté de chimie

Département de chimie organique industrielle

# THÈSE

En vue de l'obtention du

Diplôme de Doctorat

---

Présenté et Soutenu par :

***BENASLA Mohammed***

Intitulé

***Caractérisation de la vase de dragage du barrage de  
l'Oued Fodda et leur valorisation en tant que  
matériau de construction***

---

**Domaine** : *Sciences et technologie - ST*

**Spécialité** : *Génie des procédés*

**Intitulé de la Formation** : *Chimie Industrielle Environnementale – CIE*

Le jury est composé de :

**Pr. BETTAHAR Nouredine**

**PRESIDENT**

**USTO-MB**

**Pr. BENAMARA Lakhdar**

**RAPPORTEUR**

**USTO-MB**

**Pr. HADJEL Mohammed**

**CO-RAPPORTEUR**

**USTO-MB**

**Pr. DAAOU Mortada**

**EXAMINATEUR**

**USTO-MB**

**Pr. MOUFFOK Benali**

**EXAMINATEUR**

**Univ.D.LIABES-S.B.A**

**Pr. BENRAHOU Kouider Halim**

**EXAMINATEUR**

**Univ.D.LIABES-S.B.A**

Année Universitaire : 2016 / 2017

# Remerciements

*Tous mes remerciements et ma gratitude à mes encadreurs Mr L.Benamara et Mr M.Hadjel pour leurs orientation et leurs conseils si judicieux.*

*Mes vifs remerciement aux membres de jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.*

*Aux Mr Ouhba Kamel et Mr Hammadi.*

*Mes remerciements les plus distingués pour le personnel du complexe CERAL , de la cimenterie de Zahana et précisément Mr Torqi, Mr Kamel et M<sup>me</sup> Nadia*

*En fin j'adresse mes remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*À ma très Chère Mère, qui avec son amour et sa patience m'a donné le meilleur d'elle même. À mon Père, qui avec sa sagesse a su m'épauler et m'orienter vers l'aboutissement de mes études. À mes frères Ahmed, Houari, Khaled, à ma sœur Sorya, Houaria, Fatima et Houria.*

*À mon très cher ami Hamza et à toute sa famille,*

*À Mr Farhat et sa famille,*

*À mes, fidèle amis : Djilali, Amine, Yacine, Mohamed et Benali*

*Une spéciale dédicace à Mr Dandani Mahfoud.*

# Résumé

La retenue du barrage de l'Oued Fodda est soumise à une forte Sédimentation en raison des volumes considérables d'apports solides transportés chaque année par les rivières surtout lors des fortes crues. C'est ainsi, qu'un volume de  $103.10^6$  m<sup>3</sup> de vase s'est déposé réduisant ainsi sa capacité à moins de 45 % [1]. Afin de prolonger la «durée de vie» de cet ouvrage, le dragage de la retenue est devenu une solution indispensable malgré les énormes quantités de vases extraites par les vannes de fond du barrage et qui ne trouvent aucune application et leur stockage pose actuellement un problème qui menace l'environnement. Dans cette these, nous allons faire une étude basée sur des analyses physiques, géotechniques, rhéologiques, chimiques et minéralogiques de la vase prélevée dans la retenue du barrage de l'Oued Fodda. Les résultats des analyses obtenus vérifient bien les normes d'une argile utilisée pour la fabrication de céramique et comme un ajout dans le ciment après calcination.

**Mots clés :** barrage, sédimentation, vase, dragage, valorisation, calcination.

# Abstract

The dam of Oued Fodda is subject to high sedimentation due to the large volumes of sediment load transported by rivers each year especially during heavy floods. Thus, a volume of  $103.10^6 \text{ m}^3$  of mud is deposited and reducing its capacity to less than 45% [1]. To prolong the "life" of this dam, the dredging of the reservoir has become an indispensable solution despite the huge amounts of vessels extracted by the bottom gates of the dam and finds no application and storage poses a problem now threatening the environment. In this thesis, we will make a study based on physical, geotechnical, rheological, chemical and mineralogical analysis of mud taken from the dam of Oued Fodda. The analysis results obtained satisfy the standards of good clay used for the manufacture of ceramics and as an addition in the cement after calcination.

**Keywords:** dam, sedimentation, mud, dredging, valorization, calcination.

## الملخص:

يتعرض سد واد الفضة الى ترسب عالي نظرا للكميات الكبيرة للرواسب المنقولة و المحمولة من الأنهار سنويا و خاصة خلال الفيضانات الغزيرة حيث بلغ حجم الطمي الراسب في السد الى 103 مليون متر مكعب مما خفض في نسبة قدرة تخزين السد الى أقل من 45 % لتمديد المدة الزمنية لاستغلاله أصبح جرفه حلا لا غنى عنه على الرغم من الكميات الهائلة من الرواسب المستخرجة من الأبواب السفلية للسد و التي تسبب حاليا مشكلة تهدد البيئة و ذلك لعدم استغلالها و تئمينها .

في هذه الأطروحة ركزنا على دراسة الخصائص الفيزيائية، الجيوتقنية، الريولوجية، الكيميائية و المعدنية للتمي المستخرج من سد واد الفضة و كانت نتائج التحاليل التي تم الحصول عليها جيدة و مطابقة لمعايير الطين المستخدم في صناعة السيراميك و إضافة في الأسمنت بعد التكليل.

## كلمات البحث:

السد-الترسب-التمي- الجرف- التئمين-التكليل

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I :

**Figure (I.1):** Classification des Sédiments par Taille selon l'échelle de Wentworth

**Figure (I.2):** Processus sédimentaires (P. Deslauriers et J. Couveignes 2001)

**Figure (I.3):** Cycle altération –transport – sédimentation (Philippe Joey 2005)

**Figure (I.4):** Impact des sédiments pollués sur l'environnement

**Figure (I.5):** Traversée de la vallée de la Charente par l'autoroute A10 (d'après Scetauroute, 1986)

**Figure (I.6):** Schéma de la composition simplifiée des sédiments portuaires

**Figure (I.7):** Les différentes phases du tassement (d'après Migniot 1989 in A.2)

**Figure (I.8):** Classification de transport solide

**Figure (I.9):** Mode d'envasement

**Figure (I.10):** Diagramme érosion-transport-sédimentation *D'après HJULSTROM*

## CHAPITRE II :

**Figure (II.1) :** Dépôt de vase (Remini, 2003)

**Figure (II.2):** Evolution de l'envasement dans les premières années d'exploitation.

**Figure (II.3):** Taux de comblement avancé.

**Figure (II.4) :** Cas d'une retenue dont l'état d'envasement est très avancé

**Figure (II.5) :** Schématisation de la bathymétrie par nivellement

**Figure (II.6) :** Schématisation de la bathymétrie par échosondeur

**Figure (II.7) :** Les principaux barrages en Algérie

**Figure (II.8) :** Schéma d'une drague à godet et d'un chaland accouplé

## CHAPITRE III :

**Figure (III.1) :** Courbes granulométriques de sables fins utilisés en verrerie

**Figure (III.2) :** Coupe type d'un ouvrage routier (d'après CETE, 2000)

## CHAPITRE IV :

**Figure (IV.1) :** Les étapes de fabrication de ciment

**Figure (IV.2) :** Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscope Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés

**Figure (IV.3) :** Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de pentlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage  $G = \times 1010$

**Figure (IV.4) :** Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage.

## **CHAPITRE V :**

**Figure (V.1):** Station pluviométriques et hydrométrique situées dans le bassin versant.

## **CHAPITRE VI :**

**Figure (VI.1) :** Localisation d'échantillon prélevé

**Figure (VI.2) :** La courbe granulométrique finale de la vase de l'Oued Fodda

**Figure (VI.3) :** Couple ( $\omega_L$ ,  $I_p$ ) de la vase du barrage de l'Oued Fodda placé dans le diagramme de plasticité de Casagrande

**Figure (VI.4) :** Abaque de l'indice de plasticité

**Figure (VI.5) :** La viscosité de la vase de l'Oued Fodda à l'état liquide en fonction de la concentration volumique

**Figure (VI.6) :** Courbes d'écoulement de la vase de l'Oued Fodda pour différents concentrations

**Figure (VI.7) :** Représentation schématique de DRX

**Figure (VI.8) :** Analyse minéralogique qualitatif par diffraction des rayons X de la vase brute de l'Oued Fodda

**Figure (VI.9) :** Spectroscopie IR de la vase brute de l'Oued Fodda

**Figure (VI.10) :** MEB de la vase brute de l'Oued Fodda

**Figure (VI.11) :** Analyse thermogravimétrique de la vase naturelle du barrage de l'Oued Fodda

## **CHAPITRE VII :**

**Figure (VII.1) :** Contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse

**Figure (VII.2) :** Viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement

**Figure (VII.3) :** Variation de l'écart de longueur en fonction de la température

**Figure (VII.4) :** Variation de l'écart de largeur en fonction de la température

**Figure (VII.5) :** Variation de la résistance à la flexion en fonction de la température

**Figure (VII.6) :** MEB du matériau de l'Oued Fodda fritté à 1000°C

**Figure (VII.7) :** MEB de la poudre du carreau éprouvette de CERAL cuit à 1000°C

**Figure (VII.8) :** Variation de la perte au feu en fonction de la température

**Figure (VII.9) :** Variation de la porosité des carreaux éprouvette de CERAL et du mélange proposé en fonction de la température de cuisson

## **CHAPITRE VIII :**

**Figure (VIII.1) :** DRX de la vase de l'Oued Fodda calcinée à des différentes températures

**Figure (VIII.2) :** MEB de la vase de l'Oued Fodda : A : brute, B : calcinée

**Figure (VIII.3) :** Courbe granulométrique du sable normalisé

**Figure (VIII.4) :** DRX de ciment CPA-CEMI 42,5R de la cimenterie de Zahana

**Figure (VIII.5) :** Appareil de Blaine

**Figure (VIII.6) :** Appareil de Vicat

**Figure (VIII.7) :** Les résultats de la consistance des pâtes préparées en fonction de la teneur d'ajout

**Figure (VIII.8) :** Les temps de début de prise et de fin de prise des différentes pâtes préparées

**Figure (VIII.9) :** Dispositif de flexion par trois points

**Figure (VIII.10) :** Résistance mécanique à la flexion des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation

**Figure (VIII.11) :** Dispositif de compression

**Figure (VIII.12) :** Résistance mécanique à la compression des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I :

**Tableau (I.1):** Principaux minéraux composants les sédiments d'eau douce [Hakanson et Jansson, 1983 ; Ramade, 1998]

**Tableau (I.2):** Les plus simples définitions des faciès d'après Allen

## CHAPITRE II :

**Tableau (II.1) :** Le taux d'envasement des barrages en Algérie « **BADRAOUI A., HAJJI A.** (2001) : Envasement des retenues de barrages. Revue la Houille Blanche, n°6/7, pp.

**Tableau (II.2) :** Capacités de certains barrages Algériens en l'an 2009 « **REMINE B., LEDUC C., HALLOUCHE W.** (2009) : Evolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens, Revue Sécheresse, 2009, Vol.1, N°20, 1-8.

**Tableau (II.3) :** Résultats des travaux de la drague « Lucien DUMAY (1958 -1969)»

## CHAPITRE III :

**Tableau(III.1):** Caractéristiques physiques des briques pleines fabriquées [Benkadja, 2013]

**Tableau (III.2) :** Les limites des composants chimiques d'une argile utilisable dans la fabrication de verre selon Olivier. E : Technologie des matériaux de construction, Tome 2,335 p.1978

## CHAPITRE IV :

**Tableau (IV.1) :** Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie

**Tableau (IV.2) :** Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301

**Tableau (IV.3) :** Classe de résistance de ciment

**Tableau (IV.4) :** Les différents domaines d'utilisation de ciment

## CHAPITRE V :

**Tableau (V.1) :** Evolution de la lame d'eau

**Tableau (V.2) :** Apports total annuel du barrage de l'Oued Fodda

**Tableau (V.3) :** Evolution du débit Q pendant le temps

**Tableau (V.4) :** Diminution du débit régularisé Q durant le temps

**Tableau (V.5) :** Analyse chimique des eaux-teneurs en mg/litre (Laboratoire d'Algérienne des eaux (A.D.E) de la wilaya de chlef, 2007)

## **CHAPITRE VI :**

**Tableau (VI.1) :** Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage de la vase de l'Oued Fodda

**Tableau (VI.2) :** Les valeurs de Hr en fonction de la densité du mélange

**Tableau (VI.3) :** Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie

**Tableau (VI.4) :** Transformation des pourcentages

**Tableau (VI.5) :** Paramètres granulométriques de la vase de l'Oued Fodda

**Tableau (VI.6) :** Classification des sols selon la valeur de VBS

**Tableau (VI.7) :** Classification du sol en fonction de l'indice de plasticité

**Tableau (VI.8) :** Les groupes d'activités théoriques proposés par Skepton.

**Tableau (VI.9) :** Les modèles rhéologiques

**Tableau (VI.10) :** Caractérisation rhéologique de la vase de l'Oued Fodda

**Tableau (VI.11) :** La composition chimique de la vase du barrage de l'Oued Fodda

## **CHAPITRE VII :**

**Tableau (VII.1) :** Composition chimique de la matière première utilisée par CERAL

**Tableau (VII.2) :** Composition chimique de la matière première proposée

**Tableau (VII.3) :** Analyse granulométrique des 2 types de poudres atomisées

**Tableau (VII.4) :** Résistance à la flexion des carreaux crus en N/mm<sup>2</sup>

**Tableau (VII.5) :** Résistance à la flexion des carreaux séchés en N/mm<sup>2</sup>

**Tableau (VII.6) :** Résultats de la porosité des carreaux éprouvette du mélange proposé et de CERAL cuits à des différentes températures

### **CHAPITRE VIII :**

**Tableau (VIII.1) :** Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage du sable normalisé

**Tableau (VIII.2) :** Caractéristiques physiques du sable normalisé

**Tableau (VIII.3) :** Composition chimique de ciment CPA-CEMI 42.5R de la cimenterie de Zahana

**Tableau (VIII.4) :** Composition minéralogique selon Bogue

**Tableau (VIII.5) :** La composition des différents mélanges de ciment préparés

**Tableau (VIII.6) :** Les compositions chimiques des différents mélanges de ciment préparés

**Tableau (VIII.7) :** Les résultats de la finesse pour les différents mélanges de ciment préparés

**Tableau (VIII.8) :** Les résultats de la finesse pour les différents mélanges de pâtes

**Tableau (VIII.9) :** Démarche du malaxage

**Tableau (VIII.10) :** Les résultats de la consistance normale pour les différentes pâtes préparées

**Tableau (VIII.11) :** Les résultats de l'expansion pour les différentes pâtes préparées

**Tableau (VIII.12) :** les résultats de la résistance à la flexion des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation

**Tableau (VIII.13) :** les résultats de la résistance à la compression des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation

## LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES

- $\gamma_w$ : Poids volumique de l'eau ( $Kg/cm^3$ )
- $\gamma_s$ : Poids volumique des grains solides ( $Kg/cm^3$ )
- $w_s$ : Poids volumique sec ( $Kg/cm^3$ )
- $\omega$ : Teneur en eau (%)
- $w_h$ : Poids humide de l'échantillon en (g)
- $V_s$ : volume absolu des grains solides
- $R_w$ : Densité de l'eau (lecture de référence) /  $R_w=1.005$
- $P$ : Pourcentage des particules
- $D_{50}$ : Diamètre moyen des grains
- $S_0$ : Indice de classement des sédiments
- $S_K$ : Indice d'asymétrie
- $V_B$ : Valeur au bleu de méthylène
- $W_L$ : Limite de liquidité (%)
- $W_P$ : Limite de plasticité (%)
- $I_P$ : Indice de liquidité
- $I_C$ : Indice de consistance
- $C_U$ : Coefficient d'uniformité
- $C_C$ : Coefficient de courbure
- $C_V$ : Coefficient de consolidation
- $\tau$ : Contrainte de cisaillement (Pa)
- $\dot{\epsilon}$ : Gradient de vitesse ( $s^{-1}$ )
- $\eta$ : Viscosité dynamique (Pa·s)
- $\tau_0$ : Seuil de contrainte (Pa)

$K$  : Consistance (Pa.s<sup>n</sup>)

$n$  : Indice d'écoulement

$\tau_B$  : Contrainte de Bingham (Pa)

$\eta_B$  : Viscosité de Bingham (Pa.s)

$H$  : Humidité

$D$  : Densité

$R$  : Résidu

$R_f$  : Résistance à la flexion

$E$  : Absorption

$r$  : Retrait largeur ou longueur

PAF : Perte au feu

$F_f$  : Charge de rupture en newton (N)

$b$  : Coté de l'éprouvette en mm

$S$  : Section de l'éprouvette en mm<sup>2</sup>

PA : Pouzzolane artificielle

$S_m$  : finesse (cm<sup>2</sup>/g)

$\rho$  : masse volumique absolue de la poudre (g/cm<sup>3</sup>)

$\mathcal{E}$  : porosité du lit de poudre

$t$  : temps d'écoulement du liquide (dibutyl phthalate) entre les deux repères  $n_2$  et  $n_3$  (s)

$h$  : viscosité dynamique de l'air à la température de l'essai (Pa.s)

$m$  : masse de poudre tassée dans la cellule de mesure (g)

$A$  : section du lit de poudre (cm<sup>2</sup>)

# TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	1
<b><u>Première partie: Etude Bibliographique</u></b>	
<b><u>CHAPITRE I: Généralité sur les sédiments</u></b>	
I-1 Introduction .....	3
I-2 Principaux types des sédiments .....	3
I-3 Les Processus de Transport et de sédimentation .....	5
I-4 Composition minéralogique des sédiments .....	6
I-5 Contamination des sédiments .....	6
I-6 Définition de la vase .....	8
I-7 Composition des vases .....	9
I-8 Processus de décantation et de tassement des vases.....	11
I-9 Conclusion .....	18
<b><u>CHAPITRE II: L'envasement des barrages en Algérie</u></b>	
II-1 Introduction.....	19
II-2 Définition de l'envasement .....	20
II-3 Causes et Origine de L'envasement .....	20
II-4 Evolution de l'envasement dans la retenue d'un barrage .....	22
II-5 Les modèles d'estimation de l'envasement .....	23
II-6 Importance du phénomène d'érosion en Algérie.....	26
II-7 Capacité et localisation .....	26
II-8 Réduction de la capacité de la retenue .....	27
II-9 Obturation des organes de vidange .....	29
II-10 Sécurité de l'ouvrage .....	30
II-11 Moyens de lutte contre l'envasement utilisé en Algérie.....	30
II-12 Conclusion .....	43
<b><u>CHAPITRE III: Valorisation de sédiments</u></b>	
III-1 Introduction .....	44
III-2 Utilisation de la vase dans le domaine des matériaux de construction.....	44
III-3 Utilisation de la vase dans le domaine de fabrication du verre .....	48
III-4 Utilisation de la vase dans le domaine des techniques routières .....	49
III-5 Utilisation de la vase dans le domaine d'agriculture .....	52
III-6 Conclusion.....	55
<b><u>CHAPITRE IV: Procédés de fabrication des carreaux de sol en céramique et du ciment</u></b>	
IV-1 Technologie de fabrication des carreaux de sol en céramique .....	56
IV-1-1 Introduction .....	56
IV-1-2 Matières premières utilisées dans la fabrication de céramique .....	57
IV-1-3 Processus de fabrication des carreaux de sol en céramique .....	57
IV-1-3-1 Préparation de la barbotine .....	57
IV-1-3-2 Pressage du carrelage .....	58
IV-1-3-3 Nettoyage .....	59
IV-1-3-4 Séchage .....	59
IV-1-3-5 Emaillage .....	60
IV-1-3-6 Transport .....	62
IV-1-3-7 Cuisson .....	62
IV-1-3-8 Contrôle de qualité .....	63

IV-1-3-9	Contrôle de nuance .....	64
IV-1-3-10	Mise en carton et en palette .....	64
IV-1-4	Conclusion.....	64
IV-2	Technologie de fabrication du ciment .....	65
IV-2-1	Introduction .....	65
IV-2-2	Définition du ciment.....	65
IV-2-3	Processus de fabrication de ciment .....	66
IV-2-4	Les Constituants principaux de ciment .....	72
IV-2-5	Classification de ciment .....	78
IV-2-6	Domaines d'utilisation des différents ciments .....	79
IV-2-7	Hydratation du ciment Portland .....	80
IV-2-8	Conclusion.....	85

### Deuxième partie: Etude Expérimentale

#### CHAPITRE V: Présentation du barrage de l'Oued Fodda

V-1	Situation et objectif .....	86
V-2	Périmètre de l'Oued Fodda .....	86
V-2-1	Ouvrages constitutifs .....	86
V-2-2	Historique du barrage de l'Oued Fodda.....	87
V-2-3	Equipements et fonctionnement.....	87
V-2-4	Utilisation.....	88
V-3	Hydrologie.....	88
V-3-1	Caractéristiques physiques du bassin versant .....	88
V-3-2	Données climatologiques .....	89
V-3-3	Pluviométrie.....	89
V-3-4	Etude des apports .....	90
V-3-5	Etude de régularisation .....	91
V-3-6	Evaporation.....	91
V-3-7	Qualité chimique des eaux .....	91
V-3-8	Apports solides .....	92
V-4	Géologie .....	92
V-5	Conclusion.....	94

#### CHAPITRE VI: Caractérisation de sédiments du barrage de l'Oued Fodda

VI-1	Introduction .....	95
VI-2	Localisation de l'échantillon étudié.....	95
VI-3	Caractérisation physique et géotechnique de la vase de l'Oued Fodda.....	96
VI-3-1	Propriétés physiques.....	96
VI-3-1-1	Phase liquide .....	96
VI-3-1-2	Phase solide.....	96
VI-3-1-2-1	La teneur en eau.....	96
VI-3-1-2-2	Masse spécifique des grains solides .....	97
VI-3-1-2-3	Analyse granulométrique.....	99
VI-3-1-2-4	Diamètre moyen des grains $d_{50}$ .....	108
VI-3-1-2-5	L'indice de classement $S_0$ .....	108
VI-3-1-2-6	L'indice d'asymétrie $S_K$ .....	108
VI-3-1-3	Valeur au bleu de méthylène.....	109
VI-3-2	Propriétés géotechniques .....	112
VI-3-2-1	La limite de liquidité (WL) .....	113
VI-3-2-2	La limite de plasticité ( $\omega_p$ ) .....	115
VI-3-2-3	L'indice de plasticité ( $I_p$ ).....	116
VI-3-2-4	L'indice de liquidité ( $I_L$ ) .....	117

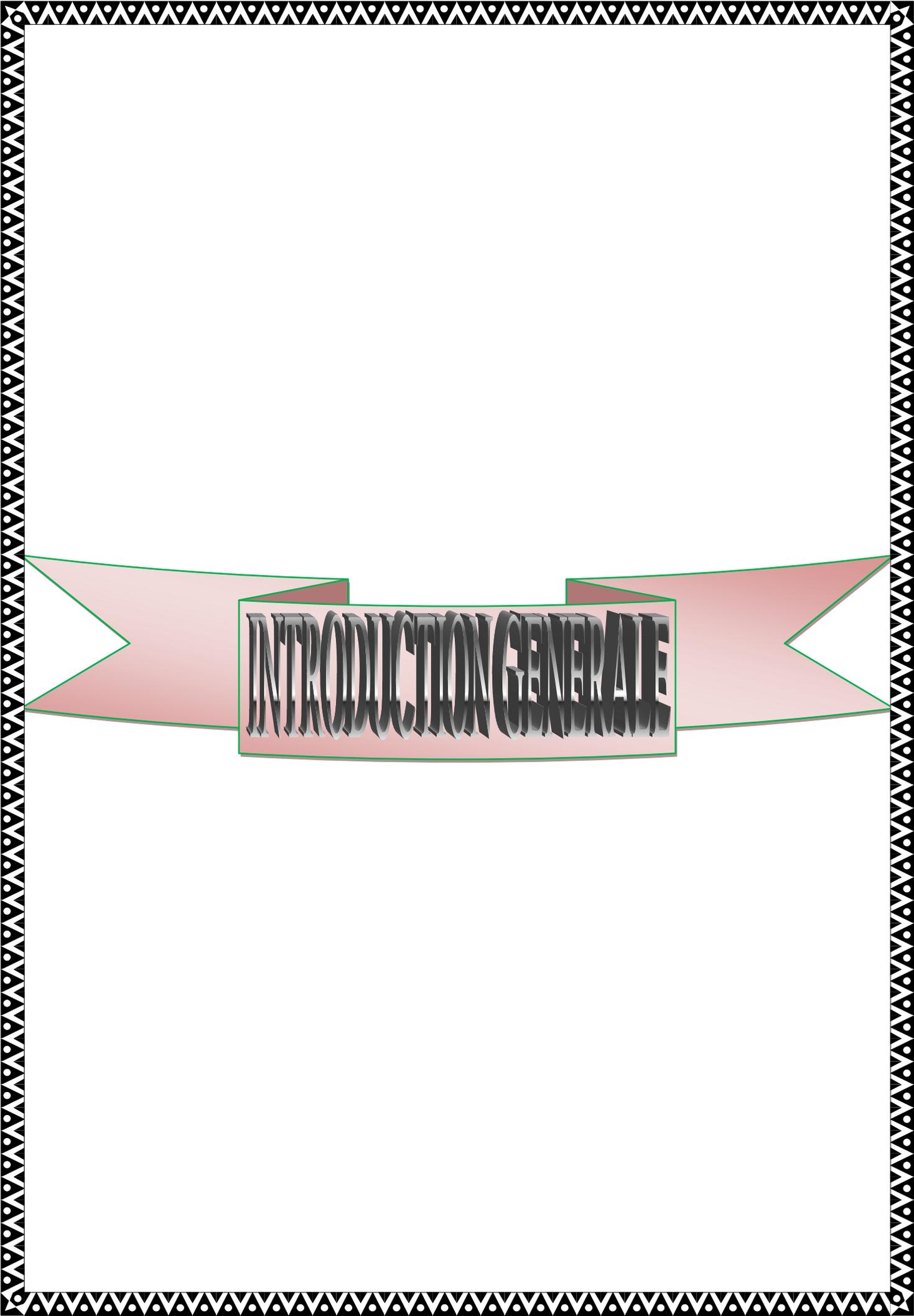
VI-3-2-5 L'indice de consistance ( $I_c$ ).....	117
VI-3-2-6 Diagramme d'activité .....	118
VI-4 Caractérisation rhéologique de la vase de l'Oued Fodda .....	119
VI-4-1 Généralités sur la Rhéologie.....	119
VI-4-2 Modèles Rhéologiques.....	120
VI-4-3 Détermination de la concentration limite de la vase à l'état liquide.....	120
VI-4-4 Détermination des modèles rhéologiques de la vase de l'Oued Fodda.....	123
VI-5 Caractérisation chimique et minéralogique de la vase de l'Oued Fodda....	128
VI-5-1 Caractérisation chimique .....	128
VI-5-2 Caractérisation minéralogique.....	130
VI-6 Conclusion .....	134

## **CHAPITRE VII: Valorisation de sédiments du barrage de l'Oued Fodda en céramique**

VII-1 Introduction .....	135
VII-2 Présentation de la société CERAL .....	135
VII-3 Essais et tests effectués en laboratoire .....	136
VII-3-1 Préparation du mélange en matière première .....	136
VII-3-1-1 Calcul du taux de la vase à utilisé dans la formulation .....	136
VII-3-2 Préparation de la barbotine .....	138
VII-3-3 Préparation de la poudre atomisée .....	139
VII-3-4 Préparation des carreaux éprouvette .....	139
VII-3-5 Analyses et résultats des échantillons préparés .....	140
VII-3-5-1 Analyse de la barbotine .....	140
VII-3-5-2 Analyse de la poudre atomisée .....	145
VII-3-5-3 Analyse des carreaux éprouvette crus .....	148
VII-3-5-4 Analyse des carreaux éprouvette séchés.....	149
VII-3-5-5 Analyse des carreaux éprouvette cuits .....	151
VII-4 Conclusion .....	158

## **CHAPITRE VIII: Valorisation de sédiments du barrage de l'Oued Fodda dans l'industrie cimentière**

VIII-1 Introduction .....	159
VIII-2 Essais et tests effectués en laboratoire.....	159
VIII-2-1 Caractéristiques des matériaux utilisés .....	159
VIII-2-1-1 Pouzzolane artificielle.....	159
VIII-2-1-2 Sable normalisé.....	163
VIII-2-1-3 Ciment CPA .....	165
VIII-2-1-4 L'eau de gâchage .....	165
VIII-2-2 Préparation des mélanges, pâtes et des mortiers de ciment .....	166
VIII-2-2-1 Préparation des mélanges .....	166
VIII-2-2-2 Préparation des pâtes de ciment.....	171
VIII-2-2-3 Préparation des mortiers de ciment.....	172
VIII-2-3 Résultats des essais physiques sur les différentes pâtes préparées ....	175
VIII-2-4 Résultats des essais mécaniques sur les différents mortiers préparés	180
VIII-3 Conclusion .....	187
Conclusion générale .....	188
Références bibliographiques .....	189



**INTRODUCTION GENERALE**

## *Introduction Générale*

Ces dernières années, l'envasement des barrages en Algérie devient de plus en plus inquiétant et fréquent [2]. Plus de  $32.10^6$  m<sup>3</sup> de vase se déposent chaque année au fond des retenues. Le barrage de l'Oued Fodda n'a pas échappé à ce problème, puisqu'il est envasé actuellement à plus de 45% de sa capacité initiale (ANBT, 2003) [3]. C'est pourquoi il est d'une extrême urgence de procéder aux travaux de dragage afin de sauver cet ouvrage. Le dragage lui-même pose deux problèmes : économique dont le cout de l'opération est très élevé. L'autre problème c'est bien l'impact des sédiments évacués par la drague sur la faune et la flore d'un coté et sur la géométrie du cours d'eau en aval d'un autre coté. Mais devant la grande quantité de vase rejetée en aval du barrage de sérieux problèmes d'environnement sont apparus [4]. Il serait alors plus judicieux de mener une réflexion pour une utilisation rationnelle de la vase qui peut être valorisée dans le domaine des matériaux de construction en particulier la céramique [5] ou comme un ajout dans le ciment CPA après calcination. Dans cette étude, nous avons mené une série d'analyses physiques, géotechniques, rhéologiques, chimiques et minéralogiques sur un échantillon de vase prélevé dans la retenue du barrage de l'Oued Fodda pour la valoriser.

Ce travail permet d'étudier le comportement mécanique de sédiments de dragage du barrage de l'Oued Fodda situé à 180 km au nord Ouest d'Algerie de superficie de 228 Hm<sup>3</sup> et de leur valorisation. Le bassin hydrographique Chélif Zehrez là où se trouve le barrage est classé parmi les zones les plus menacé par l'envasement dans le monde. Selon l'étude bathymétrique effectué en 2003 par l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (ANBT); l'ouvrage perd annuellement un volume de 1.44 Hm<sup>3</sup>.

Après 71 ans de sa mise en eau, le barrage de l'Oued Fodda a perdu environ de 103Hm<sup>3</sup>, soit un taux de 45%. Si on suppose que l'envasement a continué de 2003 à ce jour avec la même fréquence, le volume de la vase actuel est environ de 120 Hm<sup>3</sup>. Le dragage du barrage de l'Oued Fodda donc devient une opération prioritaire pour récupérer le volume perdu. Mais devant la grande quantité de vase rejetée en aval du barrage dragué, de sérieux problèmes d'environnement sont apparus. L'étude des sédiments récupérés contribue dans la résolution de ces problèmes, d'un coté minimiser le cout élevé de l'opération de dragage et de l'autre coté régler les problèmes liés à l'environnement.

L'objectif de cette étude est le traitement des sédiments de dragage en vue de les utiliser comme matériau de construction.

Cette étude se divise en huit chapitres.

Le premier chapitre présente un rappel sur les sédiments des barrages

Le deuxième chapitre est une présentation de l'état d'envasement des barrages en Algérie et la difficulté posée par les sédiments rejetés lors des opérations de dragage.

Le troisième chapitre présente les domaines de valorisation de la vase de dragage des barrages.

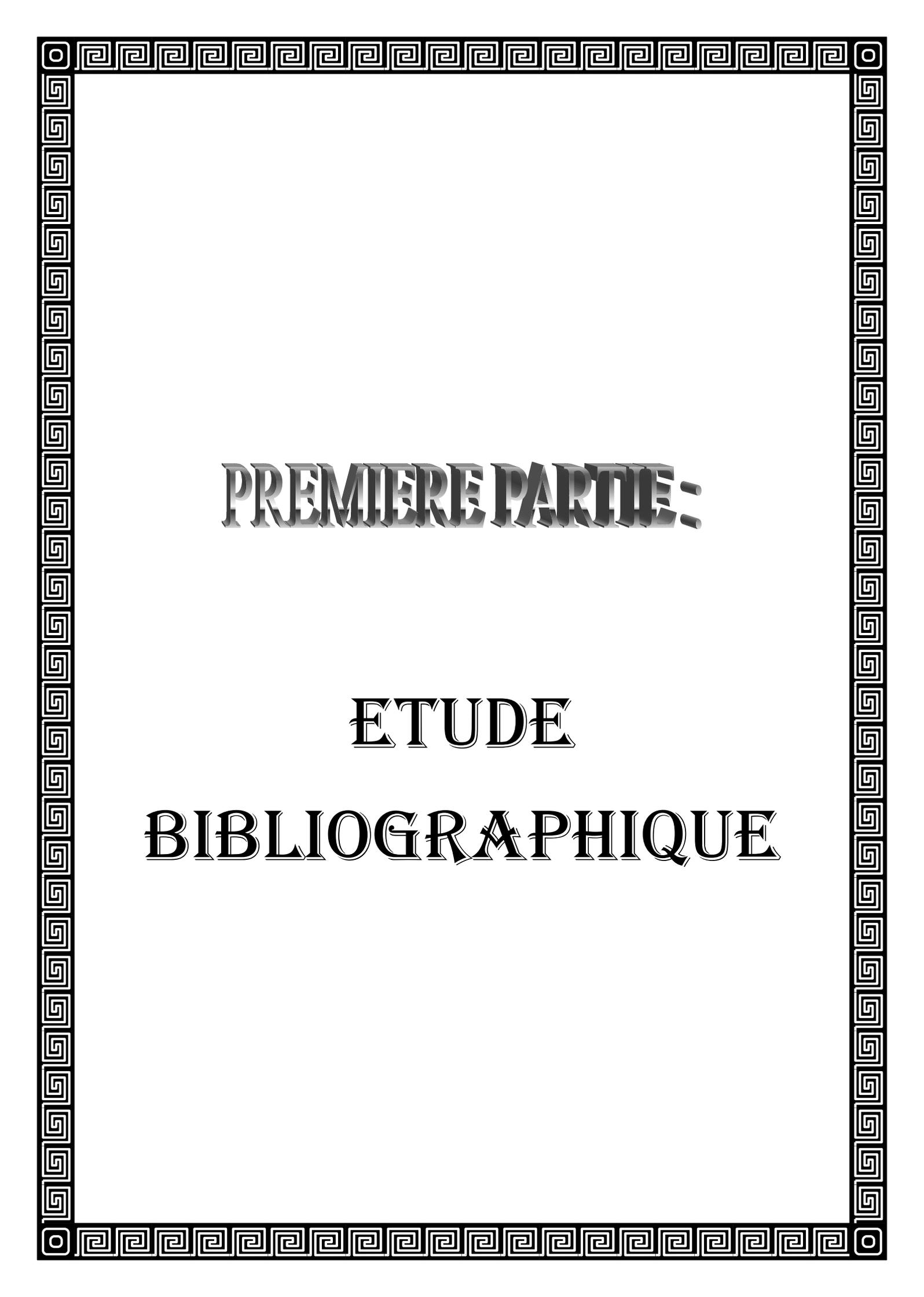
Le quatrième chapitre présente les procédés de fabrication de céramique et du ciment.

Le cinquième chapitre s'intéresse à la zone d'étude, on y trouve les caractéristiques hydrologiques, climatologiques et géologiques du bassin versant du barrage de l'Oued Fodda.

Le sixième chapitre est consacré d'une part à l'étude des caractéristiques physiques, géotechniques, rhéologiques, chimiques et minéralogiques de ces sédiments et d'autre part à la discussion des résultats qui nous permet de confirmer notre choix du domaine de valorisation de la vase.

Le septième et le huitième chapitre présentent une description de la méthodologie d'utilisation des sédiments comme matériau de construction. La démarche de valorisation envisagée, s'appuie sur des choix de préparation et de formulations simples.

Et finalement notre travail sera terminé par une conclusion générale contenant l'essentiel des résultats trouvés ainsi que les perspectives pour les futures recherches.



**PREMIERE PARTIE :**

**ETUDE**

**BIBLIOGRAPHIQUE**



# CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉ SUR LES SÉDIMENTS

## I- Généralité sur les sédiments

### I-1 Introduction [6]

Les sédiments est un ensemble d'éléments déposés par l'eau, le vent, la glace qui proviennent de l'usure des continents, c'est à dire de la destruction de roches ou d'être vivants. La destruction se fait par des mécanismes physiques produisant la fragmentation des matériaux et des réactions chimiques donnant des solutions de lessivage (altération chimique). Les éléments solides sont déplacés sous l'effet de la gravité, souvent par l'intermédiaire d'un fluide transporteur (eau, glace), et sous l'effet des variations de pression atmosphérique qui produisent les vents. Les éléments en solution sont transportés par l'eau.

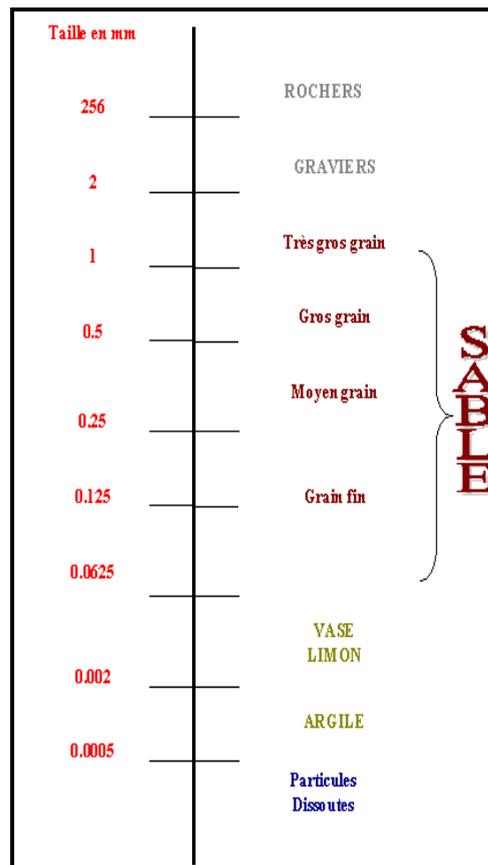
- une partie des produits de destruction peut s'accumuler momentanément sur place, sans être transportée, et constitue alors une couche d'altération ou éluvion.
- les débris, dans leur majeure partie, sont déplacés puis déposés, généralement dans l'eau, pour former un sédiment détritique (alluvions au sens large). Les éléments en solution qui précipitent, sous avec intervention des êtres vivants, forment un sédiment d'origine chimique ou biochimique.

### I-2 principaux types des sédiments [7]

Il est important dans le cadre de notre étude de classer les sédiments selon leur taille, c'est-à-dire leur diamètre apparent (diamètre minimal de la sphère entourant le sédiment) par exemple, selon l'échelle de Wentworth (voir figure (I.1)). On peut distinguer 3 grands types de sédiments:

- Les galets et les gravillons qui proviennent de l'embouchure des fleuves torrentiels ou de l'érosion des falaises.
- Le sable dont la taille du grain varie de quelques dizaines de micromètres à 2 millimètres, produit ultime de l'érosion des roches cristallines par les fleuves et les glaciers disparus.
- Les limons et les vases dont la taille du grain est inférieure 60 micromètres.

Cette distinction provient de la particularité des vitesses de chute de ces sédiments. En effet, les sables correspondent à la zone intermédiaire entre les vases pour lesquelles la résistance hydrodynamique varie proportionnellement à la vitesse de chute, c'est-à-dire tombent en régime laminaire et les galets qui tombent en régime turbulent.



**Figure (I.1):** Classification des Sédiments par Taille selon l'échelle de Wentworth

D'autre part, il faut distinguer 2 configurations de sédiments :

- **a) Les Sédiments Cohésifs**

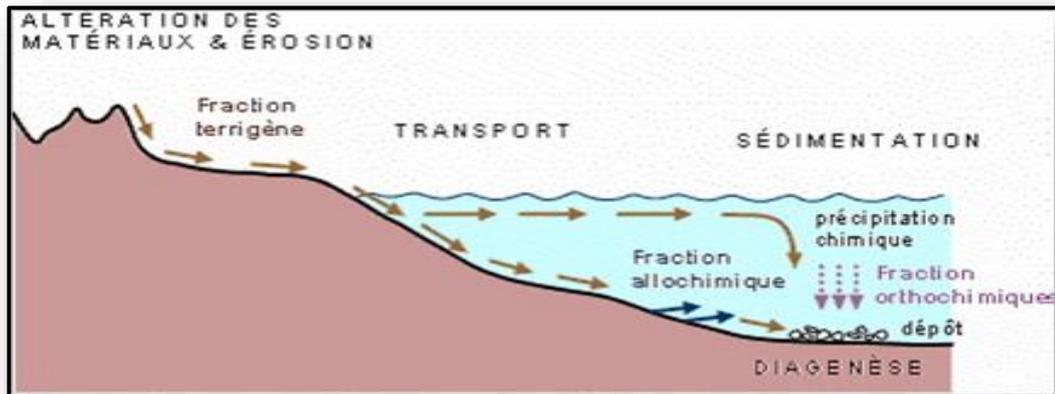
La cohésion des sédiments a un effet significatif sur l'érosion des sédiments et résulte de la présence d'argile (même en faible proportion: 5 à 10 % du total des sédiments déposés). Les particules ont tendance à former des conglomérats dans lesquels les flocons sont liés entre eux par de fortes forces électrostatiques

- **b) Les Sédiments Non Cohésifs**

Les sédiments non cohésifs contiennent des sédiments de grosse taille, non soumis à des forces d'interactions leur permettant de bouger indépendamment les uns des autres. Ils incluent le sable et les limons.

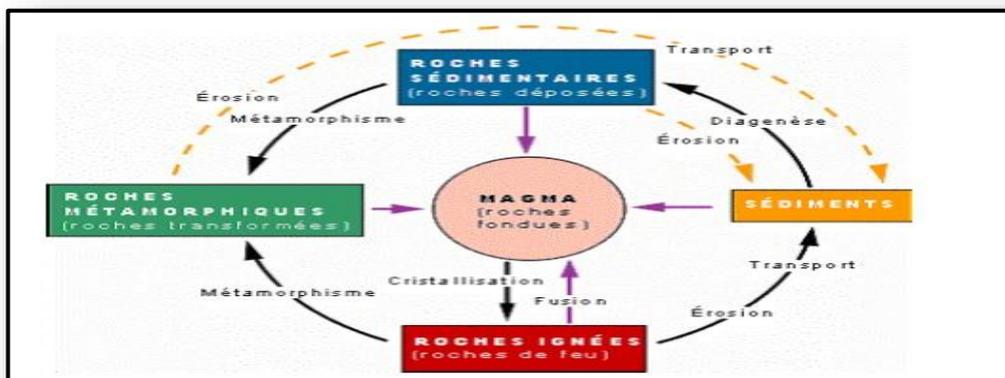
**I-3 Les Processus de Transport et de sédimentation [8]**

La désagrégation et l'altération des matériaux rocheux fournissent une matière meuble désorganisée et peu résistante, qui peut être entraînée par la gravité et les agents d'érosion. Les principaux agents d'érosion sont : l'eau, la glace et le vent. En particulier, les eaux courantes vont transporter la matière meuble jusqu'à une nouvelle situation d'équilibre où une sédimentation va s'effectuer : voir figure (I.2).



**Figure (I.2):** Processus sédimentaires (P. Deslauriers et J. Couveignes2001)

Les sédiments ainsi formés seront d'abord des alluvions, c'est-à-dire le dépôt est parfois situé très loin de la partie d'origine de ses éléments. Les alluvions sont susceptibles de se transformer ensuite, par cimentation naturelle, en roches sédimentaires détritiques indurées. L'histoire de la terre étant longue et complexe, ce processus de cycle (altération-transport-sédimentation) peut se reproduire plusieurs fois au cours des temps géologiques : voir figure (I.3).



**Figure (I.3):** Cycle altération –transport – sédimentation (Philippe Joey 2005)

Le faciès des sédiments sera lié à ses conditions de dépôt, en milieu marin, en milieu lagunaire, en milieu lacustre. Les principaux processus de formation et d'évolution des matériaux sédimentaires.

#### I-4 Composition minéralogique des sédiments [9]

Le sédiment est une matrice relativement hétérogène constituée d'eau, de matériaux inorganiques et organiques [Power et al. 1992]. Les composés inorganiques sont les argiles, les carbonates et les silicates dont la taille varie de 0.1  $\mu\text{m}$  jusqu'à plusieurs mm [Sigg et al. 1992]. L'activité humaine peut influencer cette composition naturelle. Le tableau (I.1) présente les principaux minéraux constituant les sédiments d'eau douce.

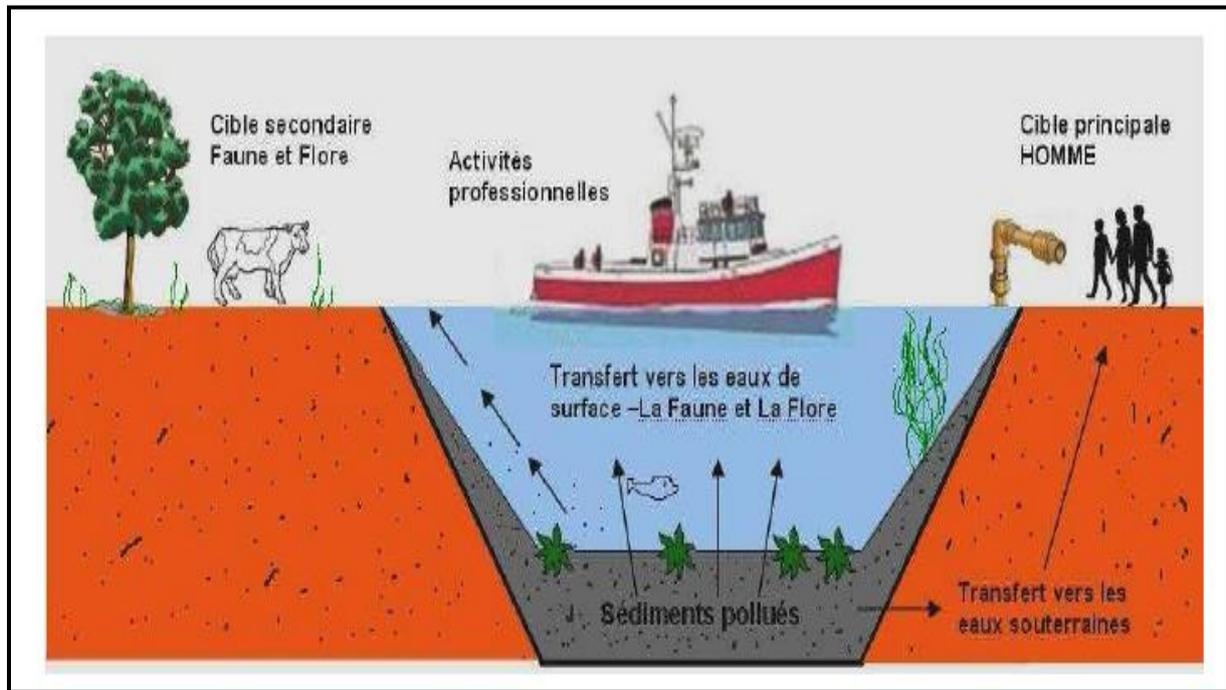
**Tableau (I.1)** Principaux minéraux composants les sédiments d'eau douce [Hakanson et Jansson, 1983 ; Ramade, 1998]

MINERAUX	DENOMINATION	FORMULE CHIMIQUE
SILICATES	Quartz (Silice)	$\text{SiO}_2$
	Mica	$\text{K}(\text{Mg,Fe,Al})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})$
	Feldspath	$(\text{Na,Ca,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$
	Amphibole	$(\text{Ca,Mg,Fe,Al})_3\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})$
	Pyroxène	$(\text{Ca,Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$
ARGILES	Illite	$\text{KMgAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Smectite (Montmorillonite)	$\text{XmgAlSiO}_{10}(\text{OH})_2$
	Chlorite	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
	Kaolinite	$\text{Al}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
CARBONATES	Calcite	$\text{CaCO}_3$
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Sidérite	$\text{FeCO}_3$
HYDROXYDES de FER	Goethite	$\text{FeOOH}$
	Magnétite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
PHOSPHATES	Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH,F})$
	Vivianite	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
SULFURES	Pyrite	$\text{FeS}_2$

#### I-5 Contamination des sédiments [9]

Les sédiments constituent un réservoir naturel des contaminants (figure (I.4)). Leur matrice complexe possède de multiples possibilités d'association avec les contaminants présents dans l'environnement [Förstner, 1989 ; Calmano et al. 1996 ; Chapman et al. 1998].

Ces contaminants sont d'origine naturelle ou anthropique (métaux issus des industries minières et métallurgiques, produits organiques issus des industries agro-alimentaires et des rejets industriels domestiques ou urbains). Ils sont généralement classés en deux grands groupes.



**Figure (I.4):** Impact des sédiments pollués sur l'environnement

### I-5-1 Les métaux lourds

Les métaux, naturellement présents dans l'écorce terrestre, proviennent généralement de l'altération et de l'érosion des roches. Cependant des activités anthropogéniques particulières (métallurgie, galvanoplastie, production de teinture, industrie du textile) sont la source principale de la contamination des sédiments dans les cours d'eau par les métaux lourds. Les principaux métaux lourds sont le cadmium, le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le plomb (Pb), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le sélénium (Se), l'arsenic (As) et le cadmium (Cd). Ils peuvent se fixer sur les sédiments par adsorption physique (liaison électrostatique), ou par adsorption chimique (liaison par force de valence). Ils peuvent également précipiter sous forme d'oxydes, d'hydroxydes de carbonates, de phosphates solubles ou de sulfures insolubles ou former des complexes organiques ou inorganiques. Ils existent sous différentes formes chimiques dans les sédiments :

- **Forme bio-disponible** : métaux dissous, métaux échangeables. Ils sont relativement disponibles pour les organismes vivants.
- **Formes potentiellement bio-disponibles** : carbonates métalliques, oxydes et hydroxydes métalliques, métaux adsorbés sur ou emprisonnés dans les oxydes de fer.
- **Formes non bio-disponibles** : métaux emprisonnés dans la structure cristalline des argiles. Les métaux lourds dans les sédiments sont en général en équilibre avec l'eau interstitielle, mais la moindre perturbation des conditions environnementales peut entraîner des mécanismes de remobilisation des métaux. Ce relargage est d'autant plus problématique que les métaux lourds sont considérés comme dangereux pour les organismes vivants, par toxicité à court, moyen ou long terme.

### I-5-2 Les polluants organiques

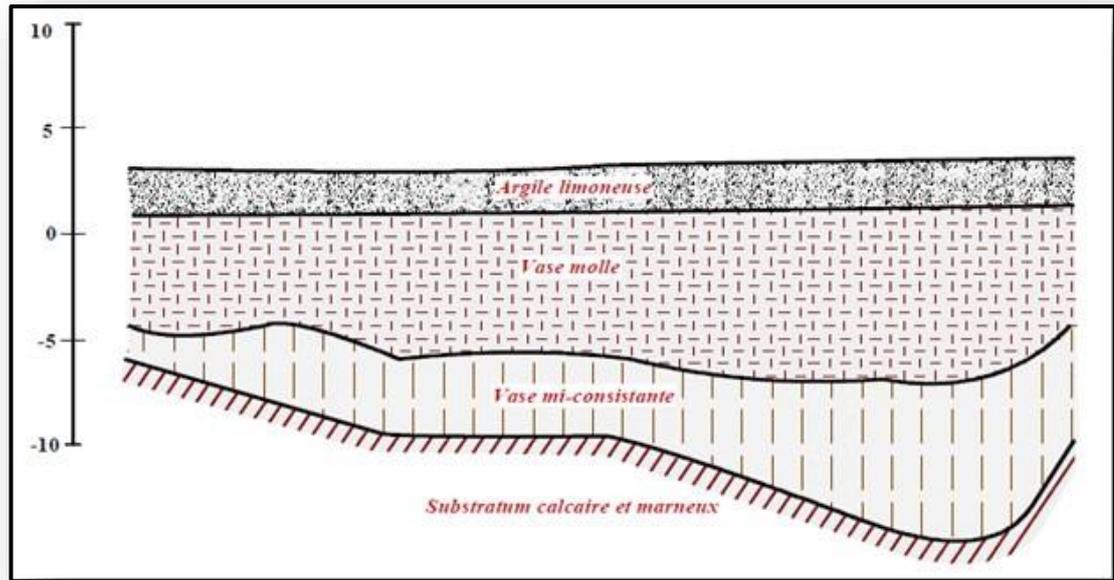
Les principaux composés organiques sont les hydrocarbures aliphatiques, les hydrocarbures monocycliques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs : présents à de fortes concentrations dans les sédiments proches des zones industrielles et des plateformes pétrolières) et les pesticides organochlorés (PCBs). Ils sont souvent très toxiques, solubles ou adsorbés sur les matières en suspension et peuvent présenter des risques lors de l'extraction des matériaux de curage.

## I-6 Définition de la vase

### I-6-1 Qu'est-ce qu'une vase ?

Le nom de vase (mot emprunte au Néerlandais) est la désignation d'une large famille de sédiments fins, argileux, plus ou moins organiques, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Elles contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux argiles et aux colloïdes, une phase organique et une phase liquide. La vase peut se présenter aussi bien à l'état de suspension (crème de vase) que de sol cohérent (sédiment cohésif) présentant alors un caractère plastique, compressible et thixotropique. Elle contient souvent l'habitat d'une faune riche et diversifiée (vers, mollusques, bactéries). [10]

Les vases sont des sols contenant plus de 90% de particules inférieures à 0,2mm, dont la matière organique M.O est comprise entre 2 et 10%. Elles sont composées de sable, limon, argile et de colloïdes organiques. Elles sont en particulier très abondantes dans les estuaires. Elles sont fréquemment thixotropes. La figure (I.5) donne un exemple de passage de remblai de l'autoroute A10 sur une épaisseur importante de la vase. [11]



**Figure (I.5):** Traversée de la vallée de la Charente par l'autoroute A10 (d'après Scetauroute, 1986)

### I-6-2 La définition proposée par Migniot [10]

«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» : voir tableau (I.2). Les différentes classes de sédiments interviennent rarement seules.

On définit alors différents faciès lithologiques qui varient encore avec les auteurs et les pays.

**Tableau (I.2):** Les plus simples définitions des faciès d'après Allen

Dénomination	Caractéristique
Sable	Plus de 80 % d'éléments supérieurs à 50 $\mu\text{m}$
Sable vaseux	De 20 à 80 % d'éléments supérieurs à 50 $\mu\text{m}$
Vase	Plus de 80 % d'éléments inférieurs à 50 $\mu\text{m}$

## I-7 Composition des vases

### I-7-1 Structure physico-chimique des vases [11]

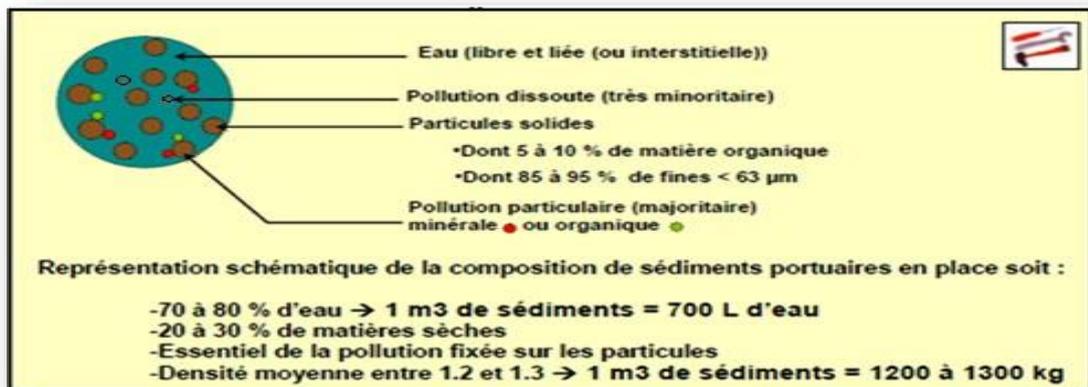
Les sédiments se composent d'une fraction solide et d'une fraction liquide (eau) qui est intimement liées les unes aux autres. Les proportions respectives de chacune de ces fractions sont variables d'un milieu à un autre mais demeurent dans une fourchette, qui par expérience, peut être estimée si l'on considère des matériaux de type vases.

IL y a quatre éléments principaux constitues Les vases :

1. La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates).
2. La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite).
3. la fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acide fulvique et humiques).
4. Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

La distribution granulométrique d'un sédiment constitue son empreinte physique, elle caractérise la taille des particules, constituant la phase solide du matériau. Pour l'obtenir, il est procédé à un tamisage mécanique. En dessous d'une taille de 20  $\mu\text{m}$ , il est nécessaire de recourir à des mesures au laser, qui utilisent le principe de la diffraction de la lumière cohérente sur un écoulement d'une suspension très diluée de fines. Il est communément considéré que les «Vases» correspondent à la fraction inférieure à 63  $\mu\text{m}$ .

Le schéma ci-dessous retrace les grands ensembles de la composition des sédiments portuaires vis-à-vis notamment de leur siccité ou de leur granulométrie : voir figure (I.6). [12]



**Figure (I.6):** Schéma de la composition simplifiée des sédiments portuaires

### I-7-2 Rhéologie des vases [13]

L'étude rhéologique des vases permet de déterminer des paramètres importants pour préciser leur comportement sédimentaire sous une action hydrodynamique. L'un des paramètres définissant le mieux de caractère liquide, plastique ou solide, d'une vase, est la rigidité initiale.

Les vases à l'état liquide se comportent en écoulement laminaire comme des fluides dont les paramètres sont indépendants du temps de cisaillement. On peut utiliser les modèles rhéologiques à un, à deux ou à trois paramètres.

La loi d'écoulement s'écrit  $\tau = F(G)$

$\tau$  : est la contrainte de cisaillement

G: la vitesse de déformation.

Les vases et d'autres mixtures homogènes sol/eau (argile-eau, silts-eau) sont des composés d'eau et de grains de sol dont les dimensions moyennes sont comprises entre environ 1 et 80  $\mu\text{m}$ . Elles se comportent comme un ensemble si la concentration est élevée, et ayant dans ce cas des propriétés des corps viscoplastiques. Elles peuvent être transportées en régime laminaire, transitoire et turbulent. Par contre les mixtures hétérogènes contenant des particules grosses dont les dimensions moyennes sont supérieures à environ 80  $\mu\text{m}$ . sable/eau, galet/eau, se comportent comme des systèmes biphasique et ne peuvent en général être transportées qu'en régime turbulent. Le cisaillement rhéologique ne dépendant pas du temps, leur comportement est influencé surtout par la concentration moyenne ( $C_v$ ).

$C_v$ : la concentration moyenne

## **I-8 Processus de décantation et de tassement des vases**

### **I-8-1 Pourquoi une retenue s'envase-t-elle ? [14]**

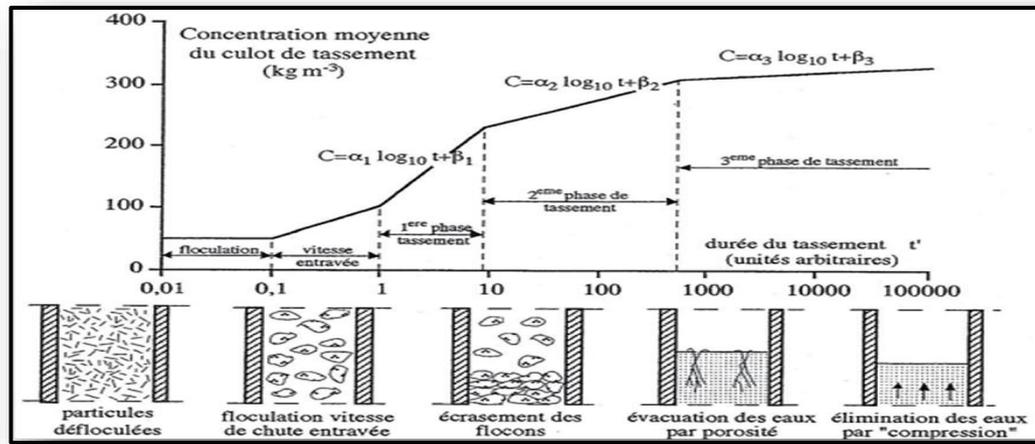
Les sédiments fins issus du lessivage des sols continentaux sont transportés en suspension par les rivières et les fleuves et ne se déposent qu'aux endroits où les eaux sont calmes. Les sites où ces sédiments s'accumulent sont : les barrages, les lacs, les zones latérales des fleuves, les estuaires et les zones océaniques protégées de l'action de la houle.

Une retenue de barrage est une zone d'eau calme où les courants sont atténués c'est-à-dire la présence de la retenue entraîne des hauteurs d'eau temporaires pour les rivières qui s'y jettent et qui deviennent propices au dépôt de sédiments dans des zones d'eau relativement calme.

De plus, une retenue joue le rôle d'entonnoir vis-à-vis des masses d'eaux provenant des bassins versants, auquel s'ajoute un effet de stagnation des eaux dans un espace semi clos. Elle est donc un territoire privilégié pour le dépôt des particules fines, et joue à l'évidence le rôle de piéger la vase. Les processus physico-chimiques de floculation, agrégation et de décantation participent aussi à l'accumulation des sédiments sur le fond. La caractérisation physico-chimique des sédiments est donc primordiale pour la compréhension des phénomènes de sédimentation et de transport des sédiments c'est-à-dire les propriétés physico-chimiques du cours d'eau ont également une influence sur la sédimentation.

D'après les théories de sédimentation de [KYNCH 1952] et de consolidation de [GIBSON 1967], le tassement des vases peut se subdiviser en deux phases : la première phase, c'est la sédimentation en l'absence des contraintes effectives  $\sigma'$  et la deuxième c'est la consolidation qui commence quand ces contraintes  $\sigma'$  apparaissent.

D'après [MIGNIOT 1989 in A.2] qui a étudié en laboratoire simultanément les processus de sédimentation et de tassement de plus de 30 vases d'origines diverses. Le suivi de l'évolution de la concentration moyenne d'un culot de tassement en fonction du temps lui permet de distinguer d'une façon générale plusieurs phases : voir figure (I.7)



**Figure (I.7):** Les différentes phases du tassement (d'après Migniot 1989 in A.2)

La courbe donnant la concentration moyenne du culot de tassement en fonction du logarithme du temps permet de distinguer plusieurs phases successives :

1. Le temps de floculation, de quelques minutes en moyenne: c'est-à-dire au début du processus, les particules élémentaires constituant la vase vont s'agglomérer pour former des agrégats dont la vitesse de chute est nettement plus importante que celle des particules à l'état individuel, c'est la floculation qui dure quelques minutes en moyenne.
2. La chute des flocons à vitesse entravée : Ensuite, on observe successivement la chute des flocons à vitesse entravée.
3. Phase01 : La première phase de tassement avec l'élimination d'une partie d'eau interstitielle libre (écrasements des flocons).
4. Phase02 : La deuxième phase de tassement, plus lente, correspond à l'évacuation de l'eau par les porosités.
5. Phase03 : la troisième phase de tassement très lente, se traduit par un arrangement de la structure du dépôt et une perte d'eau des couches adsorbées.

Si ces différentes phases du phénomène de tassement sont toujours observées, on doit aussi signaler que chaque matériau a sa propre courbe de tassement qui dépend également des conditions initiales.

En état de consolidation, 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 :

1. Les dimensions des particules : d'après Mignot, dans la formule du tassement en fonction du temps :  $C = \alpha \log t + \beta$

$C$ : Concentration de la suspension ( $\text{kg/m}^3$ )

$\alpha$  : Le coefficient dépend du diamètre des grains: c'est une fonction décroissante avec le diamètre « $d$ » des particules pour toutes les phases du tassement.

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

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

$\beta$  : Le coefficient qui dépend de l'état du milieu aqueux (salinité)

3. Les conditions initiales de sédimentation : pour apprécier l'influence des conditions initiales, les deux paramètres surveillés sont :

- La vitesse de tassement : Des mesures des vitesses de chute en eau calme en fonction de la concentration [MIGNOT, THORN, SANCHEZ] ont montré que pour des concentrations faibles la vitesse de chute augmente régulièrement avec la concentration, mais à partir d'une certaine concentration (de l'ordre de 5 à 10  $\text{kg m}^{-3}$ , selon les sédiments qui ont été étudiées), la vitesse de chute commence à diminuer quand la concentration augmente.
- 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.

$$C = C_0 h_0 / \rho_s h t$$

$C_0$ : Concentration initial ( $\text{kg/m}^3$ ),

$h_0$  : hauteur initiale,

$\rho_s$  : Masse volumiques des sédiments.

$h t$  : hauteur du culot à l' instant t.

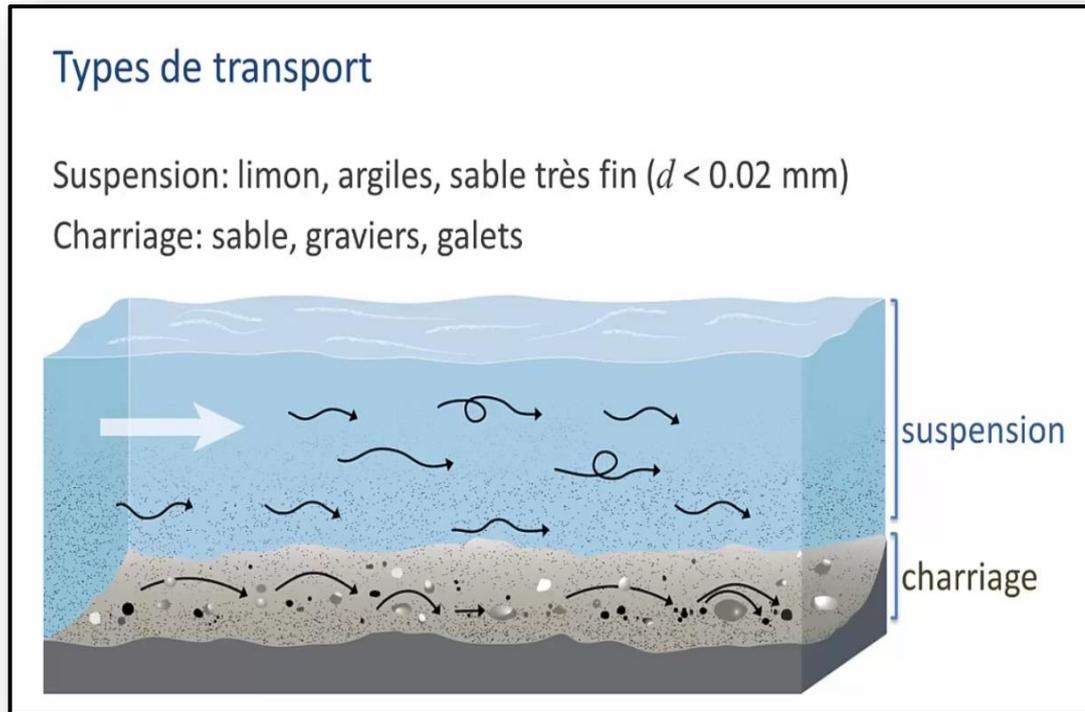
4. La présence de sable : elle favorise de façon générale le tassement. Le drainage de l'eau se fait plus facilement lorsque des grains sont dispersés dans les sédiments. (C'est à dire les possibilités d'évacuation de l'eau interstitielle contenue entre les particules solides). La perméabilité est augmentée par leur présence.

#### **I-8-2 Distribution des sédiments dans la retenue du barrage [15]**

La distribution des sédiments sur un bassin versant et de transport spécifique dans les fleuves regroupent deux processus différents. Ces deux notions permettent de distinguer d'une part les processus de détachement et de transport de matériaux du sol avant leur entrée dans le système "rivière" et d'autre part leur transport dans la rivière elle même. Les taux de particules transportées vont à leur tour être régis par de nombreux facteurs dont la vitesse de l'eau, les caractéristiques du lit, la granulométrie des particules.

Ces deux propriétés du cours d'eau ne sont pas directement liées. Ainsi dans un fleuve, la compétence décroît vers l'aval, ce qui n'est pas le cas de la capacité. Le transport des sédiments par les cours d'eau est donc déterminé par les caractéristiques des particules (taille, forme, concentration, vitesse de chutes et densité des particules). Ce qui permet de distinguer :

- la charge en suspension (suspended load), constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. Le transport en suspension est en général constitué de matériaux fins, argiles et colloïdes et quelquefois de silts. C'est souvent la seule fraction du débit solide qui puisse être aisément mesurée : par rapport à la capacité de mesures, on peut d'ailleurs distinguer la charge échantillonnée de la charge non échantillonnée (figure (I.8)). Dans la très grande partie des cas, la charge en suspension représente quantitativement un pourcentage très important du transport global.
- la charge de fond (bed load), formée de matériaux trop gros pour être mis en suspension compte tenu de leur densité et de la vitesse du courant. Ces particules roulent sur le fond ou se déplacent par saltation. Le transport par saltation correspond à un déplacement par bonds successifs.

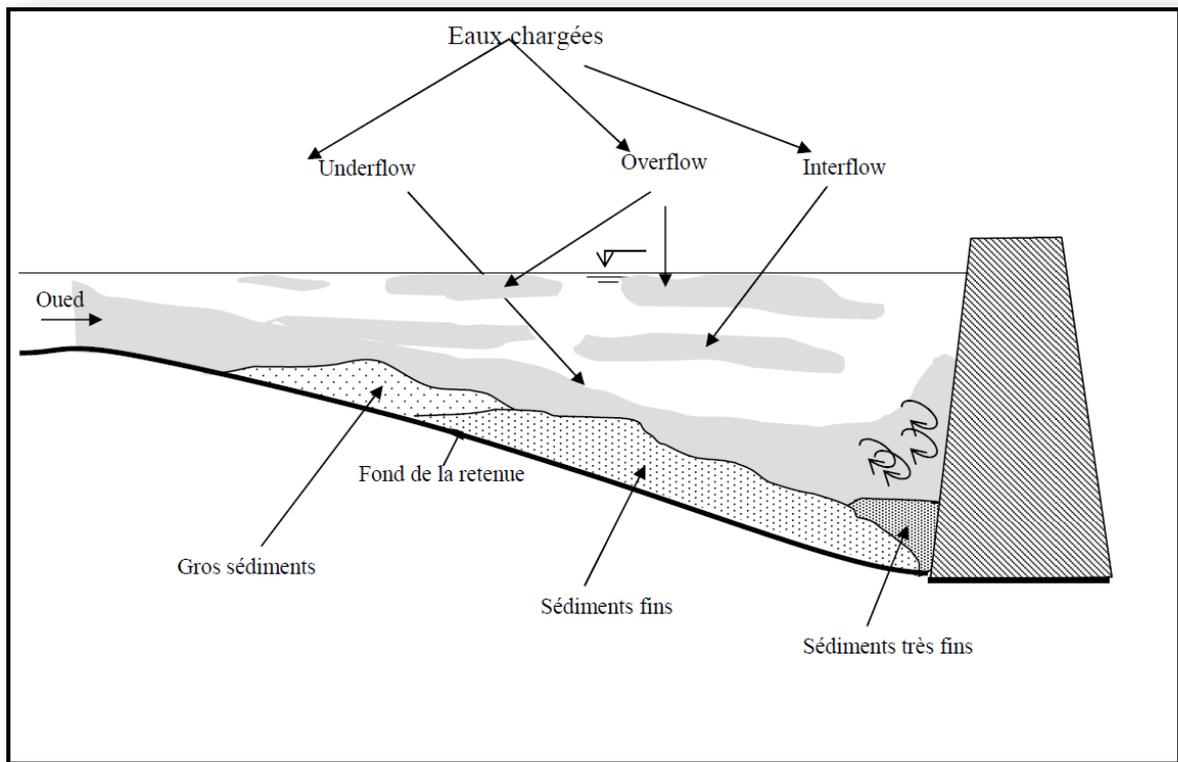


**Figure (I.8):** Classification de transport solide

Les observations ont montrés que des l'entrée d'un cours d'eau à débit solide important  $Q_s$  dans le remous d'un barrage, dont la cote de retenue est maintenue constante s'amorce une sorte de plateau sous lacustre faiblement incliné dans le sens du courant, le front aval de ce plateau ,qui présente un talus assez raide (analogue à celui d'un remblai exécute par décharge à l'avancement) progresse peu à peu dans la retenue et en l'absence de toute manœuvre de chasse atteint le barrage au bout d'un temps plus au moins long . Le delta qui comporte peu d'élément fins est formé en majeure partie par le matériau charrie sur le fond de la rivière (galets, graviers, sables grossiers).

Les vases et limons en suspension dans l'eau se déposent généralement en aval du delta. Suivant leur granulométrie et la topographie des lieux, la répartition des dépôts (figure (I.9)) correspondants est alors plus au moins uniforme dans l'ensemble de la retenue. Exceptionnellement les limons peuvent créer des courants de densité ou (underflow) constitués par un écoulement d'eau turbide au sein des eaux relativement claires de la retenue, ces eaux troubles peuvent cheminer sur le fond du réservoir et venir s'accumuler dans sa partie aval en formant un petit lac de boue surmonté par l'eau claire de tranche supérieur, qui se consolide peu a peu, ainsi pourraient s'expliquer les nappes de vase à surface presque horizontale atteignant des dizaines de mètres d'épaisseur au droit du barrage. Dans d'autres cas le courant de densité semble cheminer entre deux eaux et peut au voisinage du barrage, se

relever pour atteindre les ouvrages de prise d'eau ou d'évacuation des crues.



**Figure (I.9):** Mode d'envasement

Le transport solide est par définition la quantité de sédiment (ou débit solide) transportée par un cours d'eau. Ce phénomène est limité par la quantité de matériaux susceptible d'être transportée (c'est à dire la *fourniture sédimentaire*). Il est principalement réglé par deux propriétés du cours d'eau :

- **Sa compétence** - Elle est mesurée par le diamètre maximum des débris rocheux que peut transporter le cours d'eau. Cette caractéristique est essentiellement fonction de la vitesse de l'eau. Les variations de la compétence en fonction de la vitesse et la granulométrie du substrat ont été étudiées par Hjulstrom (figure (I.10)).
- **Sa capacité** - C'est la quantité maximale de matériaux solides que peut transporter en un point et à un instant donné le cours d'eau. La capacité est fonction de la vitesse de l'eau, du débit et des caractéristiques de la section (forme, rugosité, etc.).

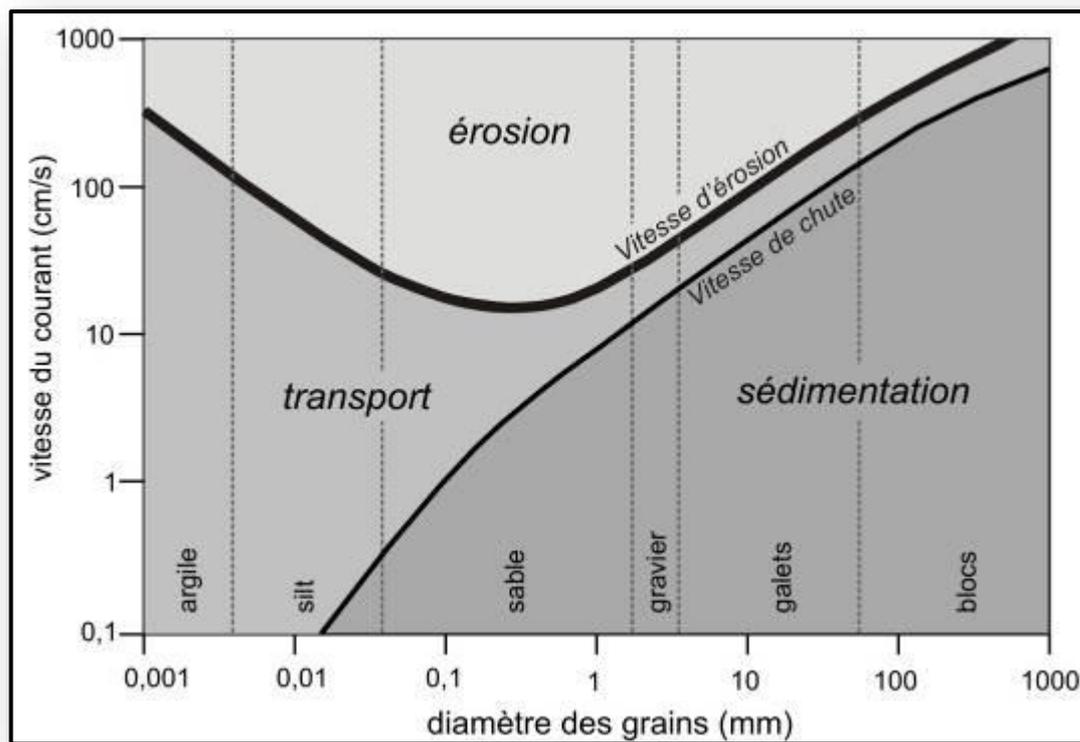


Figure (I.10): Diagramme érosion-transport-sédimentation D'après HJULSTROM

**I-9 Conclusion**

A la fin de ce premier chapitre, l'envasement est un phénomène naturel très complexe qu'il faut étudier de l'amont à l'aval du barrage, il est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydraulique, tant au niveau de la réduction rapide de la capacité utile du barrage qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même. En Algérie la durée de vie d'un barrage est calculée en fonction du taux d'envasement. La plupart des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année à cause de phénomène de l'envasement, Ils sont dans une situation critique, leur exploitation reste en dessous de leur capacité réelle .Le dragage de la retenue est devenu une solution indispensable pour prolonger la durée de vie de cet ouvrage, L'envasement de la retenue augmente d'une année à l'autre .Le volume de la vase dragué dans le barrage de l'oued fouda représente près de  $82.10^6 \text{ m}^3$ . En raison de ces quantités considérables, la valorisation de ces vases du dragage demeure un véritable enjeu.



# CHAPITRE II

L'ENVASEMENT DES BARRAGES EN ALGÉRIE

## II- L'envasement des barrages en Algérie

### II-1 Introduction [16]

L'Algérie enregistre une pluviométrie moyenne annuelle évaluée à 100 milliards de m<sup>3</sup> sur lesquels les eaux de ruissellement ou écoulements superficiels représentent environ 12,5 milliards de m<sup>3</sup>, le reste des précipitations se partage entre évaporation et infiltration dans le sol. Aujourd'hui, l'Algérie dispose de plus de 64 barrages en exploitation totalisant une capacité de 4,5 milliards de m<sup>3</sup> et permettant de régulariser un volume annuel de 2 milliards de m<sup>3</sup> utilisées pour l'A.E.P., l'industrie et l'irrigation. Or du fait de l'érosion assez sensible (pluie de courte durée, de forte intensité, absence du couvert végétal et relief assez jeune ...), l'Algérie perd annuellement une capacité estimée à 20 millions de m<sup>3</sup> par le dépôt des sédiments dans les retenues. La majorité des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'années. Il est rare cependant, que l'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, l'abandon d'un aménagement hydraulique particulièrement lorsqu'il s'agit de réservoirs destinés à l'adduction en eau potable ou l'irrigation dont les intérêts socio-économiques justifient une garantie de service illimitée. Il importe donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible, de manière à prendre les dispositions économiques et sociales qui s'imposent mais aussi et surtout de sauvegarder au maximum l'existence de la retenue en luttant contre ce phénomène.

Nous avons abordé dans cette étude, l'importance de l'envasement dans les retenues de barrages en Algérie, et la mise en évidence du rôle joué par la dégradation du bassin versant amont dans ce comblement, les problèmes posés par ce phénomène sont abordés à partir d'exemples Algériens. La réduction de la capacité de la retenue et l'obturation des organes de vidange sont des menaces qui pèsent lourdement sur la rentabilité des infrastructures hydrotechniques quand ce n'est pas sur la sécurité même de l'ouvrage.

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie du projet.

## II-2 Définition de l'envasement [10]

L'envasement (figure (II.1)) est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues et barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage. La construction d'un barrage change les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement et la capacité de transport des sédiments (Chow,1964), transportée par l'écoulement, la matière solide tend à se déposer à l'approche des plans d'eau, car en réduisant sa vitesse, l'écoulement perd petit à petit sa capacité de transport quand le cour d'eau s'approche et se jette dans le lac du réservoir, les particules grossières se déposent en premier ensuite les plus fines jusqu'à atteindre la digue, n' ayant pas où s'échapper le dépôt se tasse et se consolide en réduisant ainsi la capacité de stockage du réservoir, sachant qu'en moyenne 90% des sédiments transportés par le cour d'eau sont piégés (Chow, 1964).

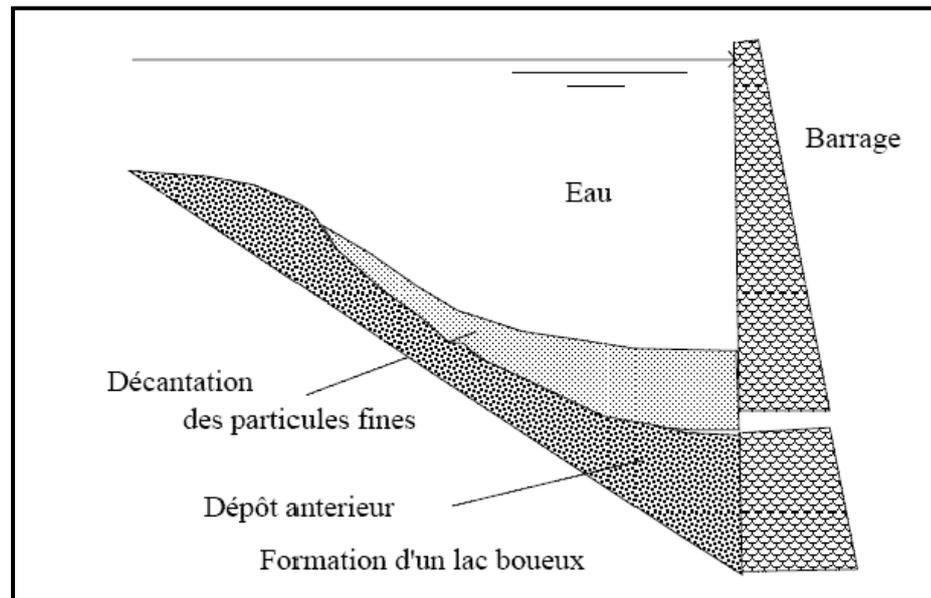


Figure (II.1): Dépôt de vase (Remini, 2003)

## II-3 Causes et Origine de L'envasement [10]

Depuis quelques siècles, les activités humaines ont largement contribué à accélérer les processus d'érosion et d'envasement, créant ainsi un déséquilibre se traduisant par la perte de terres agricoles, une diminution de la capacité de rétention de l'eau dans les forêts, une fréquence plus élevée des inondations, un remplissage plus rapide des réservoirs et l'accumulation de sédiments fins dans les cours d'eau (Heede et Rinne 1990, Murphy et al. 1981, Waters 1995). Les processus de sédimentation des cours d'eau peuvent parfois être si rapides que les effets sur la communauté ichthyenne sont observables à court terme. Par exemple, Waters (1995) mentionne qu'au cours d'une étude portant sur la productivité des

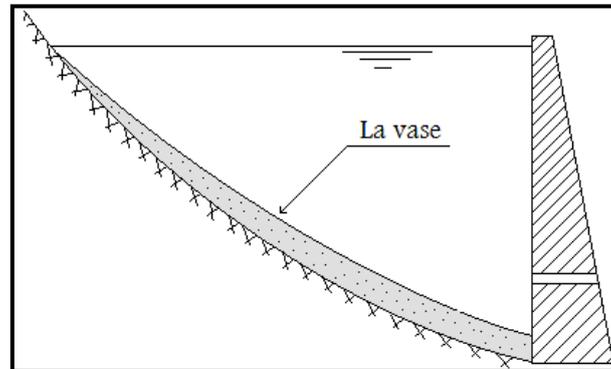
truites à Valley Creek au Minnesota, la population fut presque entièrement décimée suite au recouvrement complet du lit du ruisseau par du sable après à un violent orage survenu en 1965. Quelques années plus tard, au même endroit, des accumulations d'argile survenues suite à un projet de construction résidentielle ont éliminé les populations de truite et d'invertébrés pour une période de deux ans.

Plusieurs activités humaines accélèrent l'envasement et augmentent la turbidité des cours d'eau. Parmi elles, l'agriculture est de loin la plus importante. Certaines pratiques agricoles sont davantage reliées à cette problématique. Par exemple, le broutage et le piétinement par le bétail de la végétation de la zone riparienne détruisent sa capacité à jouer son rôle tampon et accélèrent l'érosion des berges. La culture intensive du bassin versant et des plaines inondables produit également les mêmes effets (Waters 1995). Il est bien connu que la végétation de la zone riparienne ralentit le processus de sédimentation dans les cours d'eau puisqu'elle contribue à la rétention des particules et que ses racines stabilisent les berges (Heede et Rinne 1990, Tabacchi et al. 1998, Wichert et Rapport 1998). L'industrie forestière, sous toutes ses formes, génère également des sédiments en quantités excessives dans les cours d'eau. Il faut considérer non seulement la coupe à blanc mais aussi la préparation du site pour le reboisement, la construction et l'entretien des routes d'accès souvent à proximité des cours d'eau et l'utilisation de machineries lourdes. L'industrie minière et toutes autres activités qui altèrent la surface du sol de même que tout ce qui est relié à l'urbanisation, c'est-à-dire le développement résidentiel et industriel, la construction de routes et autres infrastructures (ponts, réseau de transmission électrique etc.), en sont d'autres. L'apport de sédiments dans les écosystèmes aquatiques peut être jusqu'à cinquante fois plus élevé dans les zones urbaines que dans les régions rurales (Waters 1995).

Le processus d'érosion peut être déclenché et même exacerbé par des facteurs d'origine anthropique auxquels s'ajoutent diverses formes d'activités récréatives se déroulant sur les cours d'eau ou à proximité (circulation d'embarcations, baignade, sentiers pédestres, pistes cyclable etc.) (Waters 1995). Les effets néfastes du dragage des cours d'eau sur les invertébrés aquatiques et les poissons ont aussi été démontrés par Wilber et Clarke (2001). En outre, certains phénomènes naturels, qui ne peuvent être contrôlés par l'humain, tel les orages violents ou les éruptions volcaniques entraînent également des mouvements importants de sédiments vers les cours d'eau et peuvent, dans certains cas, affecter gravement l'intégrité des écosystèmes aquatiques (Waters 1995).

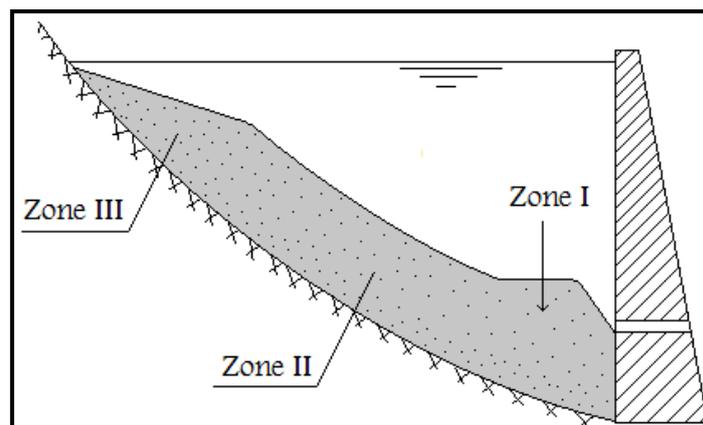
#### II.4 Evolution de l'envasement dans la retenue d'un barrage : [10]

Durant les premières années de l'exploitation d'un barrage dont la retenue est exposée à l'envasement par courants de densité (figure (II.2)), la distribution des sédiments se fait d'une manière uniforme. Le toit de la vase évolue parallèlement au fond de la retenue.



**Figure (II.2):** Evolution de l'envasement dans les premières années d'exploitation.

Dès que le toit de la vase dépasse le seuil des vannes, trois zones se délimitent dans la retenue: zone I, II et III. Voir figure (II.3)

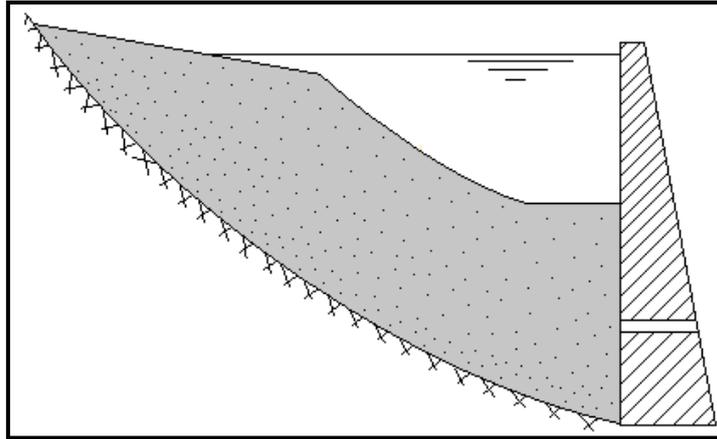


**Figure (II.3):** Taux de comblement avancé.

Dans la zone I, le toit de la vase converge vers la vidange de fond à cause des lâchés d'eaux qui fait évacuer les sédiments au voisinage. Dans la zone II, le toit de la vase évolue dans le temps parallèlement au fond de la retenue (le soutirage des sédiments à travers la vidange n'a aucune influence).

Dans le cas d'une mauvaise métrise de techniques du lâché d'eau, l'évolution du toit de la vase dans la zone sera rapide et la vidange sera au dessous. Voir figure (II.4)

La vidange du fond du barrage de Oued El Fodda a été obturée en 1948 dont la mise en eau du barrage a été en 1932.



**Figure (II.4):** Cas d'une retenue dont l'état d'envasement est très avancé.

## II-5 Les modèles d'estimation de l'envasement

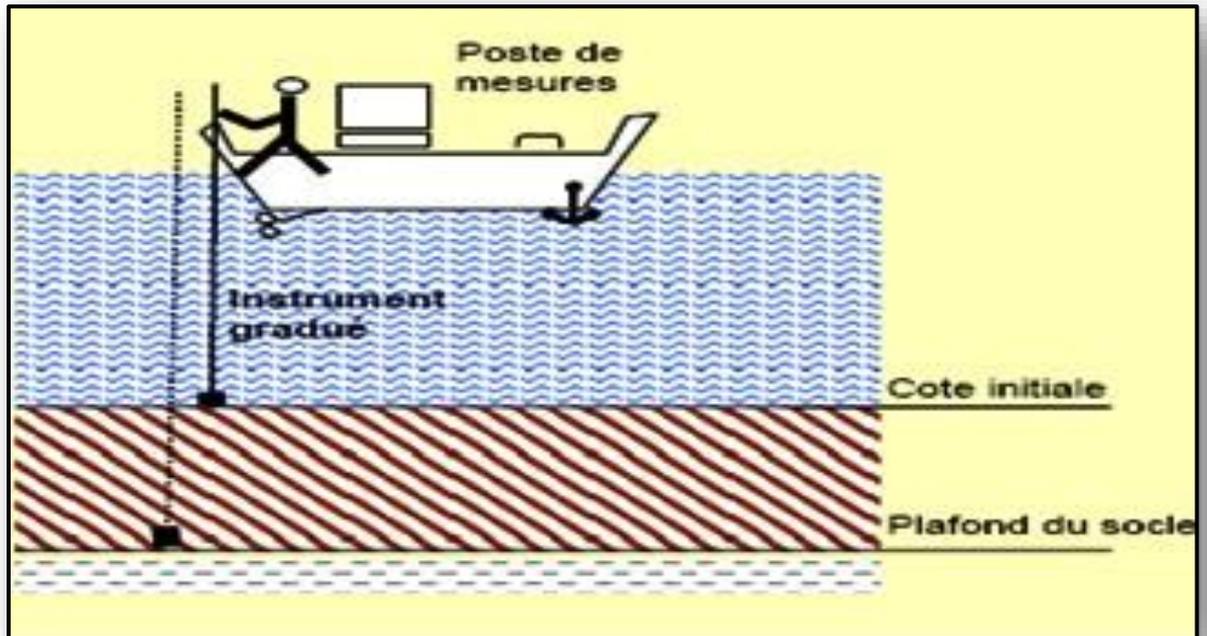
### I-5-1 Comment évaluer le volume de l'envasement? [17]

L'accumulation des sédiments véhiculés par les eaux pluviales et venantes se déposent dans la cuvette des barrages, constitue une préoccupation essentielle pour les méthodes d'évaluation du volume des vases. On distingue deux méthodes de mesure :

### I-5-2 Bathymétrie par nivellement [18]

Cette méthode présente l'avantage de tenir compte de toute la hauteur de sédiments et est intéressante à mettre en œuvre dans les projets où le toit du substrat n'est pas connu. Il y a plusieurs méthodes utilisées pour le levé bathymétrique par nivellement, on prend quelques exemples :

- a. La première méthode de bathymétrie par nivellement est réalisée à l'aide d'un instrument de mesure gradué, à partir du bord et préférentiellement à partir d'une embarcation si les conditions le permettent. Elle permet soit de mesurer simplement la hauteur totale de vases par enfoncement, soit de mesurer la hauteur d'eau avant et après les travaux, une résistance plus soutenue permet d'apprécier le haut du substrat. Les mesures sont composées de profils en travers qui pour être représentatifs, doivent être judicieusement localisés et dénombrés. La définition du volume extrait ou à retirer est établie par extrapolation entre deux profils à partir du produit entre la section envasée et la distance : voir figure (II.5).



**Figure (II.5):** Schématisation de la bathymétrie par nivellement

**b.** la seconde méthode de nivellement est à l'aide d'une mire sur une embarcation et d'une lunette de visée ou d'un tachéomètre (lunette de visée laser), la hauteur d'eau, le niveau supérieur de la couche de vase et le fond dur sont obtenus : voir photo (II.1). Le relèvement s'effectue point par point selon un profil transversal au cours d'eau. Le nombre de points sera forcément fonction de la largeur du cours d'eau. La carte globale se fait alors par extrapolation des profils transversaux. Il est nécessaire de prendre en compte la cote de l'eau, d'avoir un positionnement précis des profils pour tenir compte des particularités du terrain. Le nivellement n'est généralement pas précis et admet une erreur de 20 %. Le volume de sédiment se fait ensuite par extrapolation entre deux profils.

$$V = S \times L$$

V : volume de sédiments en mètres cubes.

S : section envasée en mètres carrés.

L : distance entre deux points de mesure en mètre.



**Photo (II.1):** Estimation de l'envasement par la méthode de nivellement (Tachéomètre)

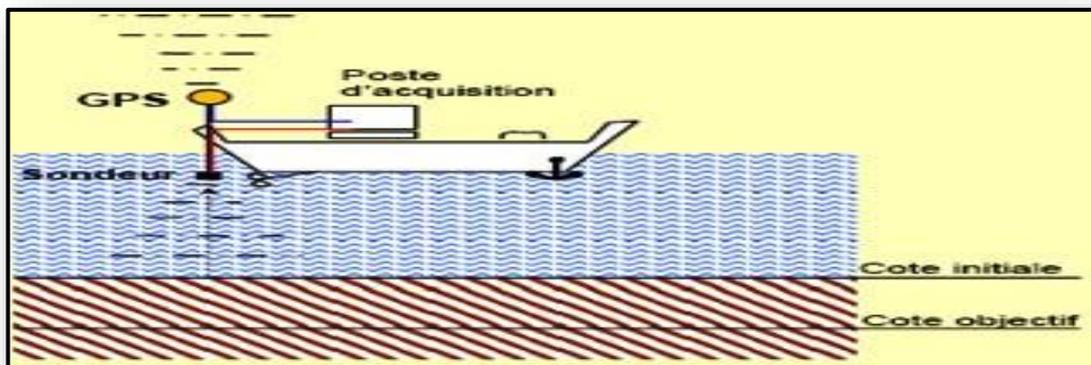
### I-5-3 Bathymétries par sondeurs [18]

Le dernier appareil à mesurer la profondeur par échosondeur, une véritable révolution dans la mesure de l'eau profonde. Cette sonde de l'écho, le type moderne a été inventé pour la première fois dans les années de la Première Guerre mondiale sur les sites physicien français Angeevin. Les mesures bathymétriques permettent de suivre l'évolution du volume des sédiments accumulés.

Bathymétrie par sondeurs : voir figure (II.6) : Le volume des sédiments est calculé par informatique avec, comme hypothèse de départ, la cote du projet à atteindre. (Un point de sonde = couple (distance, angle) Pratiquement mesure  $(t, \theta)$  et exploitation  $(y, z)$ ).

Deux approches pour estimer  $(t, \theta)$ : Mesure de l'instant d'arrivée à angle fixe, mesure de l'angle en fonction du temps d'arrivée.

A l'aide des nouvelles technologies de sondeurs, cette technique peut-être utilisable dans une hauteur d'eau restreinte. Cette technique s'applique à partir de sondeurs mono ou multi-faisceau.



**Figure (II.6):** Schématisation de la bathymétrie par échosondeur

Les moyens d'utiliser pour les lèves Bathymétriques par échosondeurs:

- Une embarcation pneumatique semi rigide.
- Une station de référence.
- Un sonar avec une fréquence de 200khz.
- Un GPS portable avec un récepteur GPS RTK 6502.
- Un PC portable avec le logiciel DTM 2000.
- Une barre d'étalonnage.

Au début du travail, l'hydrographe étalonne l'échosondeur par la barre d'étalonnage à différentes profondeurs. Il valide ainsi la profondeur du transducteur et la vitesse de propagation des signaux ultrasonores dans l'eau du barrage. La distance entre profils est choisie en fonction du terrain par le logiciel de guidage DTM 2000. Le long d'un profil, les données sont émises en continu mais l'enregistrement se fait toutes les deux (2) secondes. La direction des profils, généralement perpendiculaire aux rives, est choisie par l'hydrographe qui calcule le cap et navigue à cap constant. Durant le levé, il arrive de constater des formes de fond particulières sur les profils (des hauts fonds ou des fosses). Dans ce cas on procède à un balayage plus serré. Après le traitement des données par des logiciels, l'hydrographe peut établir les plans bathymétriques.

## II-6 Importance du phénomène d'érosion en Algérie [19]

A l'instar des pays de la méditerranée, et en particulier ceux du sud, l'Algérie n'est pas épargnée par l'érosion dont l'intensité varie d'une région à une autre. Elle est plus ressentie à l'ouest du pays avec un taux de 47% suivie de la région centre avec 27% et l'Est avec 26%.

Le phénomène de l'érosion prend son origine de la sécheresse, des feux de forêts et du défrichement avec un degré moindre le surpâturage et les cultures inappropriées.

## II-7 Capacité et localisation [19]

L'Algérie dispose d'un parc de 64 barrages : voir figure (II.7) en exploitation dont le plus ancien est le barrage « **Meurad** » mis en eau en 1852. La capacité globale (initiale) est de 7745 hm<sup>3</sup> pour un volume régularisé de 3552 hm<sup>3</sup>. Le levé bathymétrique des barrages en 2004 a montré que la capacité de stockage a été réduite à 6736 hm<sup>3</sup> du fait de l'envasement. Exemple : Barrage de l'Oued Fodda (photo (II.2)).



Photo (II.2) : Barrage de l'Oued Fodda

L'ensemble des barrages sont localisés essentiellement dans le nord du pays à l'exception de cinq (K'sob, Fontaine de gazelles, Fom El gherza) dans le Sud- Est et Djorf-Torba et Brézina dans le Sud-Ouest.

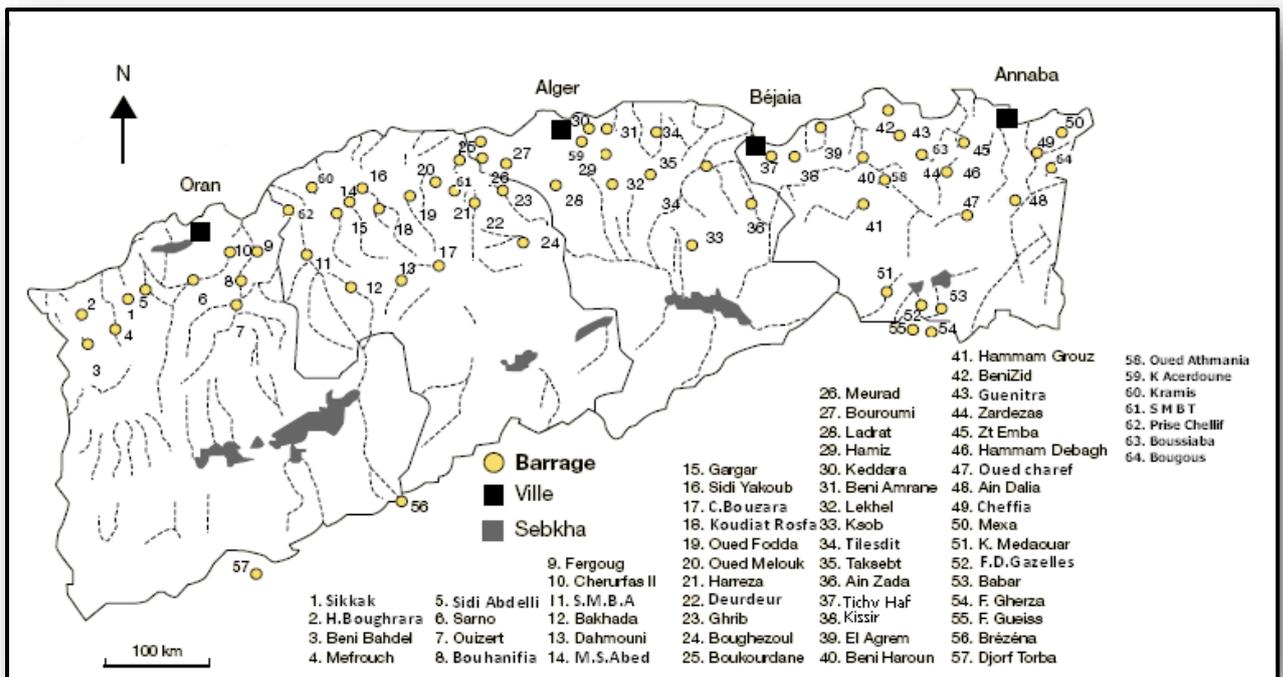


Figure (II.7) : Les principaux barrages en Algérie

### II-8 Réduction de la capacité de la retenue [16]

Cette réduction de la capacité de stockage de l'eau est sans aucun doute la conséquence la plus dramatique de l'envasement: chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.

La quantité de sédiments déposés dans les barrages Algériens : voir tableau (II.1) était évaluée à  $560.10^6 \text{ m}^3$  en 1995 soit un taux de comblement de 12,5 %; elle sera de  $650.10^6 \text{ m}^3$  en l'an 2000, soit un taux de comblement de 14,5 %. A titre d'exemple, la capacité initiale du barrage de Ghrib (Médéa) était de  $280.10^6 \text{ m}^3$  en 1939 et n'était plus que de  $109.10^6 \text{ m}^3$  en 1977. Une projection a été faite pour l'an 2006, d'où il ressort que certains barrages comme par exemple ceux du Fergoug et de Zardézas finiront par périr si ces dispositions radicales ne sont pas prises.

**Tableau (II.1) :** Le taux d'envasement des barrages en Algérie « **BADRAOUI A., HAJJI A:** Envasement des retenues de barrages. Revue la Houille Blanche, n°6/7, pp. 72-75.2001 »

Région	Nombre de Barrages	Capacité initiale (Hm <sup>3</sup> )	Date Dernier levé Bathymétrique	Capacité dernier levé (Hm <sup>3</sup> )	Envasement moyen annuel (Hm <sup>3</sup> )	Envasement dernier levé (Hm <sup>3</sup> )	Taux d'envasement (%)
Ouest	13	1204,88	2004	1015,16	9,14	189,72	15,75
Cheliff	16	2209,40	2005	1639,39	23,77	573,01	25,94
Centre	12	1576,50	2005	1549,03	3,57	27,49	1,74
Est	23	2754,00	2004	2 586,40	11,38	167,60	5,31
<b>Total</b>	64	7744.78		6786,98	47,86	957,82	12,37/14,11

Les barrages de l'Oued Fodda, Ghrib, Bouhanifia, K'sob et Foum el Gherza ne pourront plus garantir les quantités d'eau potable et d'irrigation nécessaires : voir tableau (II.2).

**Tableau (II.2) :** Capacités de certains barrages Algériens en l'an 2006 « **REMINI B., LEDUC C., HALLOUCHE W:** Evolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens, Revue Sécheresse, 2009, Vol.1, N°20, 1-8.

Barrages	Capacité initiale (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Quantité de vase en 2006 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Fergoug	18	18
Zardezas	27	14,58
Oued el Fodda	228	130
Ghrib	280	168
K'sob	30	18
Foum El Gherza	47	32,9

Nous avons étudié l'évolution de la capacité utile de l'eau en fonction de la hauteur dans les retenues des barrages de Bouhanifia, Foum el Gherza, Oued Fodda, Fergoug.

#### **a) Barrage de Fergoug**

L'envasement de la retenue du barrage de Fergoug I (ancien barrage: 1885-1926) a réduit la capacité utile de  $27.10^6 \text{ m}^3$  à  $14.10^6 \text{ m}^3$  durant les 31 ans d'exploitation, soit un volume de vase égal à  $13.10^6 \text{ m}^3$ .

Concernant la retenue du barrage de Fergoug actuel, la capacité utile se trouve ainsi réduite de  $17.10^6 \text{ m}^3$  en 1970  $12.10^6 \text{ m}^3$  en 1973 et à  $4.10^6 \text{ m}^3$  en 1985, ce qui représente respectivement un volume de vase de 5 et  $13.10^6 \text{ m}^3$  équivalent en définitif à un taux de comblement de 80 % ce qui a amené les services concernés à dévaser le barrage à partir de l'année 1986, par le procédé de dragage.

#### **b) Barrage de Foum el gharza**

La sédimentation accélérée de la retenue a été évidente dès le début de la réalisation du barrage, le batardeau amont ayant été complètement comblé en deux ans (1948-1950); par la suite, elle a provoqué une montée rapide du toit de vase, soit plus de 35 mètres en 40 années d'exploitation qui représente un volume de vase égal à  $18,5.10^6 \text{ m}^3$ . Nous estimons la capacité de la retenue en 1995 à  $24.10^6 \text{ m}^3$ , soit un comblement de plus de 50 %.

#### **c) Barrage de l'Oued Fodda**

Du fait de l'envasement intensif qui affecte la retenue de l'Oued Fodda, la capacité initiale évaluée à  $228.10^6 \text{ m}^3$  en 1932 s'est retrouvée à  $130.10^6 \text{ m}^3$  en 1986 et  $112.10^6 \text{ m}^3$  en 1994. Le toit de la vase près des vannettes est à environ 36 mètres du fond, soit un taux de comblement évalué à 50 % en 1994.

#### **d) Barrage de Bouhanifia**

C'est dans le but de réduire la vitesse de comblement et ainsi prolonger la durée de vie du barrage de Fergoug que le barrage de Bouhanifia a été réalisé à l'amont.

Malheureusement ce barrage s'est retrouvé face à une sédimentation accélérée qui a réduit sa capacité de 73 à  $47.10^6 \text{ m}^3$  durant la période 1940-1986, soit une vitesse moyenne de sédimentation égale à  $0,56.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ . Nous estimons le dépôt des sédiments à  $31.10^6 \text{ m}^3$  en 1995, soit un volume d'eau restant de  $42.10^6 \text{ m}^3$  et un taux d'envasement de 42 %.

### **II-9 Obturation des organes de vidange [16]**

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond. Le cas du barrage de l'Oued Fodda (Chlef) peut servir

d'exemple: en effet, la vanne de fond a été bloquée depuis 1948 et elle se trouve maintenant sous plus de 40 mètres de vase; toute opération de vidange de la retenue est de ce fait impossible.

Un autre cas à signaler pourrait être celui du barrage de Foum el gherza(Biskra) où la vanne de fond a été bloquée de 1982 à 1989.

### **II-10 Sécurité de l'ouvrage [16]**

Indépendamment du problème de la diminution de la capacité du réservoir, l'envasement pose celui de la stabilité de l'ouvrage: on sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée progresse au carré de la hauteur. La densité de la vase peut atteindre 1,6. A titre d'exemple, pour le barrage des Zardézas, les services concernés ont diminué le volume de l'eau claire de  $9.10^6 \text{ m}^3$  en 1990 uniquement pour assurer la sécurité de l'ouvrage: bien évidemment, cela s'est fait au détriment de l'approvisionnement de la population de la ville de Skikda et du périmètre du Safi-saf, Le volume régularisé qui était de  $20.10^6 \text{ m}^3$  s'est trouvé réduit à environ  $10.10^6 \text{ m}^3$ .

Un autre exemple à signaler est celui du barrage de Fergoug I. La commission chargée de déterminer les causes de la rupture survenue en 1927 a noté dans son rapport:

{{Avant la rupture, le débit évacué par le déversoir a été si élevé qu'il a du régner près du barrage un courant qui a contrarié la décantation de la vase, de telle sorte que pendant cette période, la partie supérieure de la digue située au dessus des dépôts, était soumise non pas à la poussée de l'eau, mais à celle plus forte, d'un liquide plus lourd dont on n'a pas pu déterminer la teneur en vase.

### **II-11 Moyens de lutte contre l'envasement utilisé en Algérie**

La majorité des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année. Il est rare cependant, que l'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, l'abondons d'un aménagement hydraulique particulièrement lorsqu'il s'agit de réservoirs destinés à l'adduction en eau potable ou l'irrigation dont les intérêts socio-économiques justifient une garantie de service illimitée. Il importe donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible, de manière à prendre les dispositions économiques et sociales qui s'imposent mais aussi et surtout de sauvegarder au maximum l'existence de la retenue en luttant contre ce phénomène utilisés en Algérie. Nous pouvons citer:

**A) le reboisement, la restauration des sols la formation des banquettes. La plantation de végétation à longues tiges dans les oueds.** Il est à noter que les tamaris qui ont poussé à

l'amont des barrages de Bouhanifia, du Fergoug, de Cheurfas constituent de véritables pièges à sédiments.

Dans le cadre de la protection des bassins, un programme spécial a été lancé par les services des forêts. Il s'agirait de traiter une superficie de 1,5 millions d'hectares d'ici l'an 2010. Soit un rythme de réalisation de 67000 ha/an. Les coûts sont évalués à environ 16 milliards de DA. [16]

### **B) Réalisation de barrage de décantation [16]**

Il existe un cas en Algérie, c'est le cas du barrage de Bougezoul qui est exploité partiellement comme bassin de décantation du barrage de Ghrib (photo (II.3)). Ce barrage a permis de retenir depuis sa création environ  $35. 10^6 \text{ m}^3$  de vase. Il réduit l'envasement de Ghrib de près de 24 %.



**Photo (II.3) : Bassin de décantation du barrage de Ghrib**

### **C) Surélévation des barrages : Photo (II.4) [19]**

Cette technique a été réalisée sur cinq barrages: Fergoug, Mefiouch, Bakhada, K'sob, Zardézas. La surélévation des barrages permet d'augmenter la capacité de la retenue et donc de compenser la valeur envasée.



**Photo (II.4) : Méthode de surélévation des barrages**

➤ **Barrage du Hamiz** (wilaya de Boumerdes)

Barrage construit en 1879 en vue de l'irrigation du périmètre de Mitidja est. L'envasement accéléré de la retenue a permis à l'administration en 1883 de surélever de 7 m pour porter sa capacité à  $23.10^6 \text{ m}^3$ .

➤ **Barrage des Zardézas**

Il a été mis en eau en 1945, sa hauteur de 37 m lui permet d'assurer un volume de  $14,9. 10^6 \text{ m}^3$ . Du fait de l'envasement accéléré, la capacité du barrage est passée de  $7,5.10^6 \text{ m}^3$  en 1974. En 1977, la hauteur du barrage a été portée à 45 m (12, 5 m de plus). Le volume ainsi obtenu est de  $27.10^6 \text{ m}^3$ .

➤ **Barrage de K'sob**

Barrage de capacité de  $11,5.10^6 \text{ m}^3$  pour une hauteur de 32 m construit en 1939 pour l'irrigation du périmètre de K'sob. Du fait de la progression de l'envasement de la retenue, la capacité a été réduite à moins de  $4.10^6 \text{ m}^3$ . En 1975, la hauteur du barrage a été portée à 43 m (15 m de plus) pour porter sa capacité à  $30.10^6 \text{ m}^3$ .

**D) Chasses dites à l'Espagnole [16]**

Consiste à éliminer une partie des sédiments au fur et à mesure de leurs arrivés on cite :

-Les chasses dites à « l'espagnol » : utilisés pendant les premières crues automnales (plus chargées en matières solides) valable surtout pour les barrages de moindre importance et à régularisation annuelle (barrage de Hamiz, Beni Amrane), mais l'inconvénient réside dans les

lâchés de grande quantités d'eau, cette déperdition volontaire est difficilement acceptable en Algérie.

-Les chasses de dévasement par les vidanges de fond à barrage plein et au moment de l'entrée d'un excédent d'eau dans la retenue. Cette méthode est utilisée sur la plupart des barrages Algériens.

Leurs efficacités, néanmoins se limite à la création d'un cutot d'entonnement nécessaire autour de la vidange de fond pour éviter le blocage des vannes.

### **E) Soutirage des courants de densité [16]**

Le soutirage des courants de densité a donné des résultats spectaculaires en Algérie. Cette méthode est utilisée aux barrages d'Ighil Emda et Oued El Fodda.

#### **➤ Barrage d'Ighil Emda**

Le barrage d'Ighil Emda est de capacité  $156.10^6 \text{ m}^3$  à la cote 532 m au-dessus du niveau de la mer. Il a été mis en eau en 1953.

Notons que près de 50 % de vases ont été soutirés grâce au système de soutirage à savoir sur  $88.773.564 \text{ m}^3$  d'apports solides jusqu'à l'année 84. Seulement  $45.657.458 \text{ m}^3$  ont réussi à se décanter et se consolider alors que  $43.116.106 \text{ m}^3$  ont été soutirés.

#### **➤ Barrage de l'Oued Fodda**

Il a été mis en service en 1932 avec une capacité initiale de 228 M de  $\text{m}^3$ . Devant la progression de l'envasement de la retenue et ce qui a entraîné le blocage de la vanne de fond, le barrage a été percé de 04 vannettes de dévasement (opérationnelles en 1961). Ce système a permis d'évacuer de 1961 jusqu'à 1993 environ 12 M de  $\text{m}^3$  de vase.

#### **➤ Barrage de Foum El Gherza**

Grâce à la vanne de fond  $600\ 000 \text{ m}^3$  de vase ont été évacuées de 1989 jusqu'à 1993. Notons que de 1982 jusqu'à 1989, la vanne a été bloquée par la vase.

### **F) Dragage des barrages [19], [20]**

Si l'on exclut les techniques hydrodynamiques de dragage, l'analyse des solutions possibles se décline selon des techniques mécaniques ou hydrauliques.

#### **A. Dragage mécanique**

Globalement il existe 2 méthodologies distinctes concernant les opérations de dragage mécaniques :

-Dragage en eau ;

-Dragage à l'issue d'une mise à sec.

Dans le cadre de cette étude la seconde méthodologie qui consiste à assécher la zone avant de faire intervenir des engins de terrassement classique pour l'extraction des matériaux n'est pas étudiée et seules les méthodes utilisant des moyens mécaniques flottants sont détaillées.

### 1. Dragues retrocaveuses

#### ✓ Description

Ces unités sont constituées d'un ponton (photo (II.5)) de forme rectangulaire sur lequel est montée l'unité excavatrice qui peut :

- Soit faire partie intégrante de l'infrastructure ;
- Soit être constitué par une pelle hydraulique mobile équipée pour des travaux maritimes



**Photo (II.5) : Pelle sur pontons et dipper dredger**

Les pontons qui disposent d'une unité excavatrice intégrée sont, du fait de leur forte robustesse, généralement privilégiés pour l'excavation de matériaux très durs. Concernant les unités mobiles montées sur ponton, pour limiter les risques liés à l'activité de dragage la pelle est amarrée sur le ponton à l'aide de chaînes par exemple.

Les produits sont excavés en utilisant un godet de taille compatible avec la puissance de l'unité excavatrice ainsi que la résistance in situ des matériaux dragués. La taille du godet peut ainsi varier de 0,5 à 13 m<sup>3</sup>. Les engins les plus puissants peuvent exercer une force d'arrachement approchant 90 tonnes. En raison des très fortes charges horizontales exercées par la pelle lors du dragage, le ponton est en appui sur des pieux qui maintiennent la structure en position et la stabilise.

Le ponton est, à de rares exceptions près, incapable de se déplacer de manière autonome. Il est donc déplacé à l'aide d'un remorqueur annexe. Cette embarcation supplémentaire assure en général le déplacement des barges remplies par l'unité excavatrice de leur zone de remplissage vers leur zone de reprise (gestion à terre).

Certaines barges, en général de forte capacité (500 m<sup>3</sup> et plus), sont automotrices et peuvent donc réaliser les différents déplacements de façon autonomes.

Le nombre de pieux peut varier en fonction du type de ponton, la plupart des configurations sont basées sur 2 ou 3 pieux. Le mouvement des pieux est assuré soit par des câbles et treuils, soit par des systèmes hydrauliques.

## 2. Pelles à câbles

### ✓ Description

Il s'agit, comme les pelles rétrocaveuses, de dragues stationnaires amarrées à l'aide d'ancre ou de pieux stabilisateurs.

Des structures non mobiles et automotrices sont disponibles également, la principale différence avec la technique précédente est liée à la nature de l'unité excavatrice. Dans ce cas, il s'agit benne preneuse (photo (II.6)) constituée de deux éléments mobiles actionnées par des câbles ou hydrauliquement. Cette benne est généralement montée sur une grue, mais il existe aussi des dispositifs permettant de les utiliser sur des pelles rétrocaveuses.



**Photo (II.6) :** Modes de préhension des sédiments à l'aide de bennes preneuses

La capacité moyenne de la benne-preneuse peut varier de 0,5 à 20 m<sup>3</sup>. Les unités automotrices disposent d'une manière générale d'une trémie de réception ce qui leur permet de se charger du transfert des sédiments à l'issue de leur dragage. La taille de cette trémie peut varier de 100 à 2 500 m<sup>3</sup> pour les plus grosses unités. Certaines unités peuvent être équipées de plusieurs grues.

### 3. Dragues à godets : figure (II.8)

#### ✓ Description

Il s'agit de dragues qui se déplacent généralement sur la zone de dragage à l'aide de treuils. La drague à godet correspond à la plus ancienne forme d'outil de dragage de type mécanique.

Ces dragues sont composées d'un ponton rectangulaire avec un puits central sur lequel un cadre métallique lourd est fixé. Ce cadre prend en charge une chaîne de taille imposante sur laquelle sont montés des godets disposant d'une arrête de coupe. La chaîne repose sur un bras inclinable équipé de galets ce qui permet de lui imposer un circuit rectiligne sans fin.

La drague avance progressivement sur la zone à extraire en activant la rotation de la chaîne. Le train de godets est ainsi entraîné, ces derniers raclent le fond et remontent les matériaux. À l'extrémité supérieure du bras inclinable, le godet se retourne ce qui provoque la chute des sédiments soit dans des goulottes de réception soit sur des tapis de transfert. Les sédiments sont ensuite orientés vers un chaland amarré à la drague.

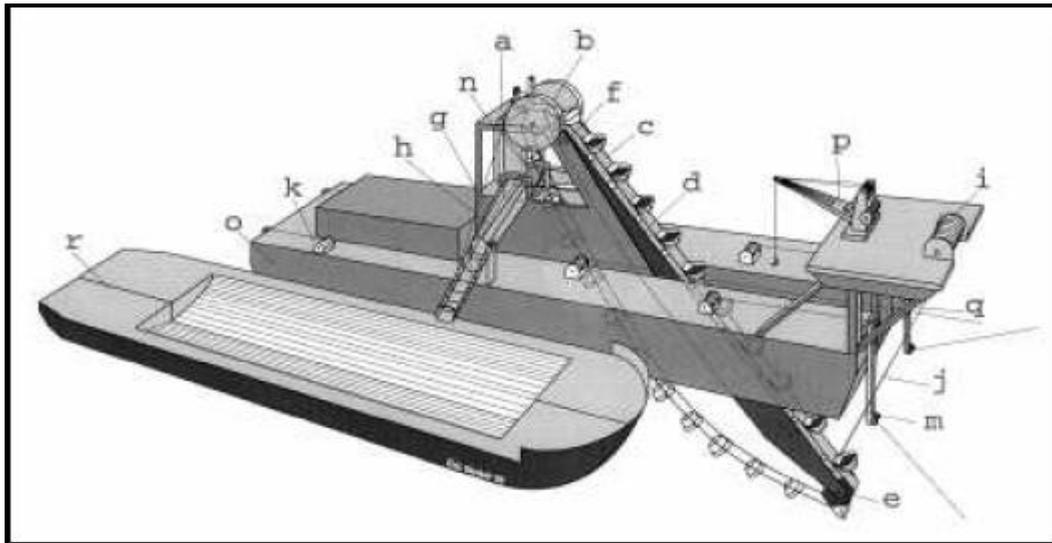
Ces engins sont rarement auto-propulsés et sont ainsi généralement secondés par une embarcation de service.

Pour les unités autonomes, les mécanismes permettant la propulsion et la rotation de la chaîne sont toutefois distincts.

La taille des godets évolue en fonction du gabarit de la drague, la plage de capacité variant ainsi de 100 à 1 000 litres.

En dehors de travaux de déroctages, les dragues à godets peuvent intervenir sur tout type de matériaux. En équipant les godets de dents de ripage ce type d'engin peut également être utilisé pour l'extraction de roches friables.

Les dragues de ce type ne sont jamais pourvues de trémie de réception des matériaux dragués et doivent donc être en permanence couplées à un ou plusieurs chalands qui se chargent de la réception, du transport et de l'élimination ou de la reprise des sédiments excavés.



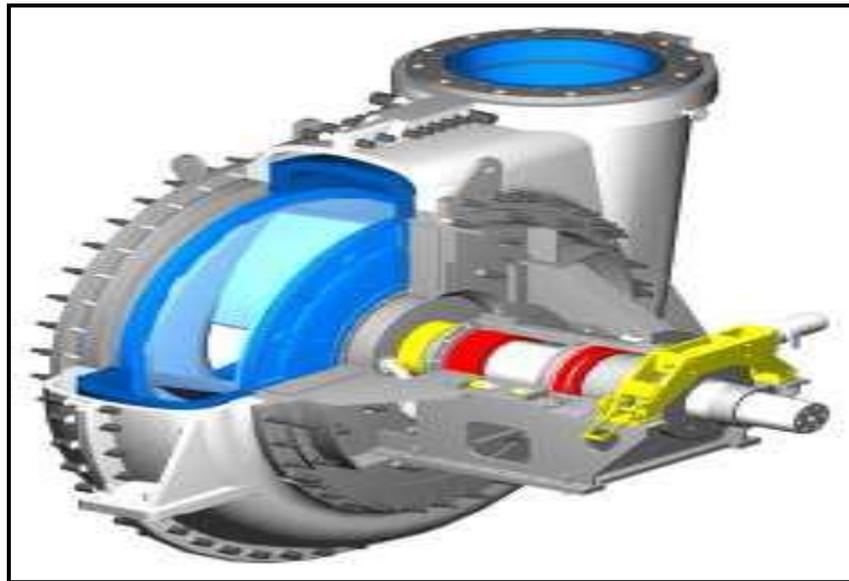
**Figure (II.8) :** Schéma d'une drague à godet et d'un chaland accouplé

### B.Dragage hydraulique

Le principe de ces techniques de dragage repose sur la dilution des matériaux pour permettre leur aspiration à travers un système de conduites reliées à une pompe centrifuge (photo (II.7)). Différents moyens peuvent être utilisés pour mettre en suspension les sédiments. Si les matériaux sont suffisamment meubles, l'aspiration seule peut suffire, lorsque les matériaux sont plus durs une déstructuration mécanique ou par injection d'eau peut être mise en place.

Les dragues hydrauliques sont basées sur le principe de la pompe à eau centrifuge et opèrent l'extraction par création d'un vide à l'entrée de la pompe. La pression atmosphérique dans l'eau oblige la mixture à suivre la seule trajectoire disponible, c'est-à-dire la conduite d'aspiration.

Le dragage hydraulique est plus efficace lorsque l'on travaille avec des matériaux fins, puisqu'ils peuvent facilement être dilués et maintenus en suspension. Le dragage de matériaux plus grossiers allant jusqu'aux graviers ou de roches déstructurées peut-être réalisé mais nécessite l'utilisation de pompe plus puissantes et aboutit à une plus rapide usure des structures.



**Photo (II.7) :** Prise de vue du corps de la pompe

### 1. Dragues Aspiratrices en Marche (DAM) : Photo (II.8)

#### ✓ Description

Les Dragues Aspiratrices en Marche disposent d'une coque identique à celle d'un navire classique, ce qui leur procure une excellente navigabilité et leur permet de fonctionner sans utiliser de dispositif d'amarrage. Ce type de matériel est fréquemment utilisé eau libre : Rivières, canaux, estuaires, mer et chenaux pour lesquels, du fait de son principe de fonctionnement, elle apparaît très adaptée.

L'aspiration des sédiments est réalisée à l'aide d'un tuyau d'aspiration désolidarisé de la coque et relié à une tête de dragage qui traîne sur le fond de la zone à entretenir. La drague peut être équipée d'un tuyau d'aspiration simple ou de deux tuyaux, un de chaque côté.

L'embarcation réalise ainsi de lents allers-retours sur la zone à draguer en formant des sillons jusqu'à ce que les côtes objectifs soient atteintes. La tête de dragage peut être munie de différents types de dispositifs visant à déstructurer le sédiment et faciliter son pompage :

- Dents ;
- Lames ;
- Dispositif d'injection d'eau sous pression.



**Photo (II.8) :** Puits et conduites de refoulement d'une DAM

## 2. Dragues aspiratrices stationnaires (DAS)

### ✓ Description

Il existe 2 types de DAS :

- **Drague aspiratrice suceuse :** Il s'agit de la drague hydraulique la plus simple. Ce type d'engin est principalement utilisé pour l'extraction de matériaux de carrière ou pour des opérations de dragage en eau profonde. La tête d'aspiration est généralement nue, certains modèles disposent parfois de dispositifs d'injection d'eau sous pression (photo (II.9)) pour faciliter la désagrégation des matériaux et leur pompage ;



**Photo (II.9) :** Tête de succion et dispositif de déstructuration par injection d'eau

- **Drague aspiratrice à disque désagrégateur** (photo (II.10)) : Ce modèle dispose d'un cutter au niveau de sa tête d'aspiration. Ce dispositif, par rotation permet de désagréger les matériaux, ce qui permet simultanément leur pompage. La force du cutter, renforcée par l'ancrage sur le pieu, permet de désagréger des roches de résistance considérable. À titre d'exemple, les modèles les plus importants peuvent facilement venir à bout de roches présentant une résistance équivalente à celle d'un très bon béton.



**Photo (II.10) :** Modèle de disque désagrégateur

A travers l'expérience algérienne, le dragage s'est avéré une solution sûre mise à part les difficultés de mise en dépôt et le coût. Jusqu'à maintenant, l'Algérie a procédé un dragage sur quatre barrages: Cheurfas I et II, Fergoug, Hamiz (tableau (II.3) et Foug-El-Gherza: voir Photo (II.11).

**Tableau (II.3) : Résultats des travaux de la drague « Lucien DUMAY (1958 -1969)»**

Résultats	Barrages			
	Cheurfas II	Cheurfas I	Fergoug	Hamiz
<b>Durée de dragage (en mois)</b>	4	47	10	26
<b>Volume de vase draguée (densité=1,6) (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)</b>	1,96	10,2	3,1	3,77
<b>Rapport : Eau claire/vase (en volume)</b>	3,5	4,8	4,6	6,8
<b>Densité moyenne de la mixture</b>	1,133	1,104	1,108	1,076



**Photo (II.11) :** Dragage activant dans la retenue du barrage Foug-El-Gherza (Biskra)

La première opération de dévasement en Algérie, a commencé en 1958 et elle a concerné le barrage de Cheurfas (W.Mascara) avec un volume à extraire de  $10 \text{ Hm}^3$ . A ce jour 10 barrages ont été concernés par le dévasement.

L'Algérie a acquis en 1989 un matériel complexe de dragage à savoir une drague suceuse refouleuse baptisée ((Rezoug Youcef)). Cette drague, d'un poids total de 300 t est conçue pour refouler à une hauteur de 28 m dans une conduite de 700 mm avec un débit maximum de mixture (vase + eau) de 1600 l/s et pour draguer à une profondeur de 3 à 16 m.

Il est à constater que seulement 19 millions de  $\text{m}^3$  de vase ont été dragués pendant une durée de 97 mois avec une perte d'eau claire de 96 millions de  $\text{m}^3$ . Le barrage de Fergoug III (actuel) d'une capacité initiale (1970) de 18 millions de  $\text{m}^3$  envasé à 14,1 millions de  $\text{m}^3$  en 1989 avant le dévasement a été dragué pendant la période 1989 - 1992 par la drague « Rezoug Youcef ». Un volume de vase de 6,5 millions de  $\text{m}^3$  a été enlevé avec une quantité d'eau claire égale à 7 millions de  $\text{m}^3$ . L'état d'envasement très avancé du barrage de Zardezas a obligé les services hydraulique de dévaser le barrage, puisque non pas seulement la capacité de stockage qui a été menacée par l'envasement mais la stabilité de l'ouvrage a été menacée par la forte poussée des sédiments. La drague est programmée pour extraire un volume de 10 millions de  $\text{m}^3$  de vase. Durant dix années (1993-2002) de dragage, une quantité de vase de 8,6 millions de  $\text{m}^3$  a été évacuée. Mais, il faut ajouter que

durant cette période de dix années, un volume de vase de 2,5 millions de m<sup>3</sup> s'est déposé dans la retenue avec un taux d'envasement de 0,25 millions de m<sup>3</sup> par an. Avec le programme en cours et celui lancé en 2010, le dévasement aura permis un gain de capacité de 108 hm<sup>3</sup>. [21]

### G) Reprise de barrage [19] (Photo (II.12))

La reprise de barrages déclassés n'est pas considérée comme une lutte contre l'envasement mais nous citerons quand même deux cas en Algérie ayant permis un important gain de capacité de stockage:

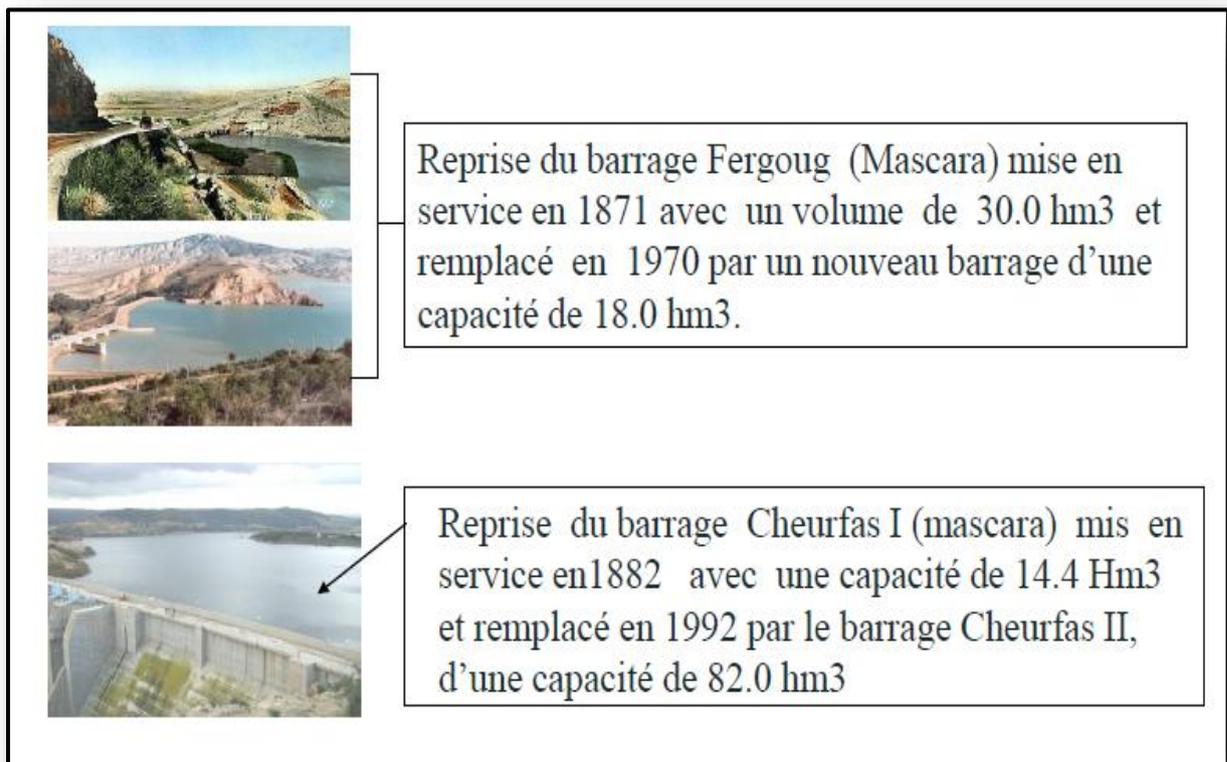


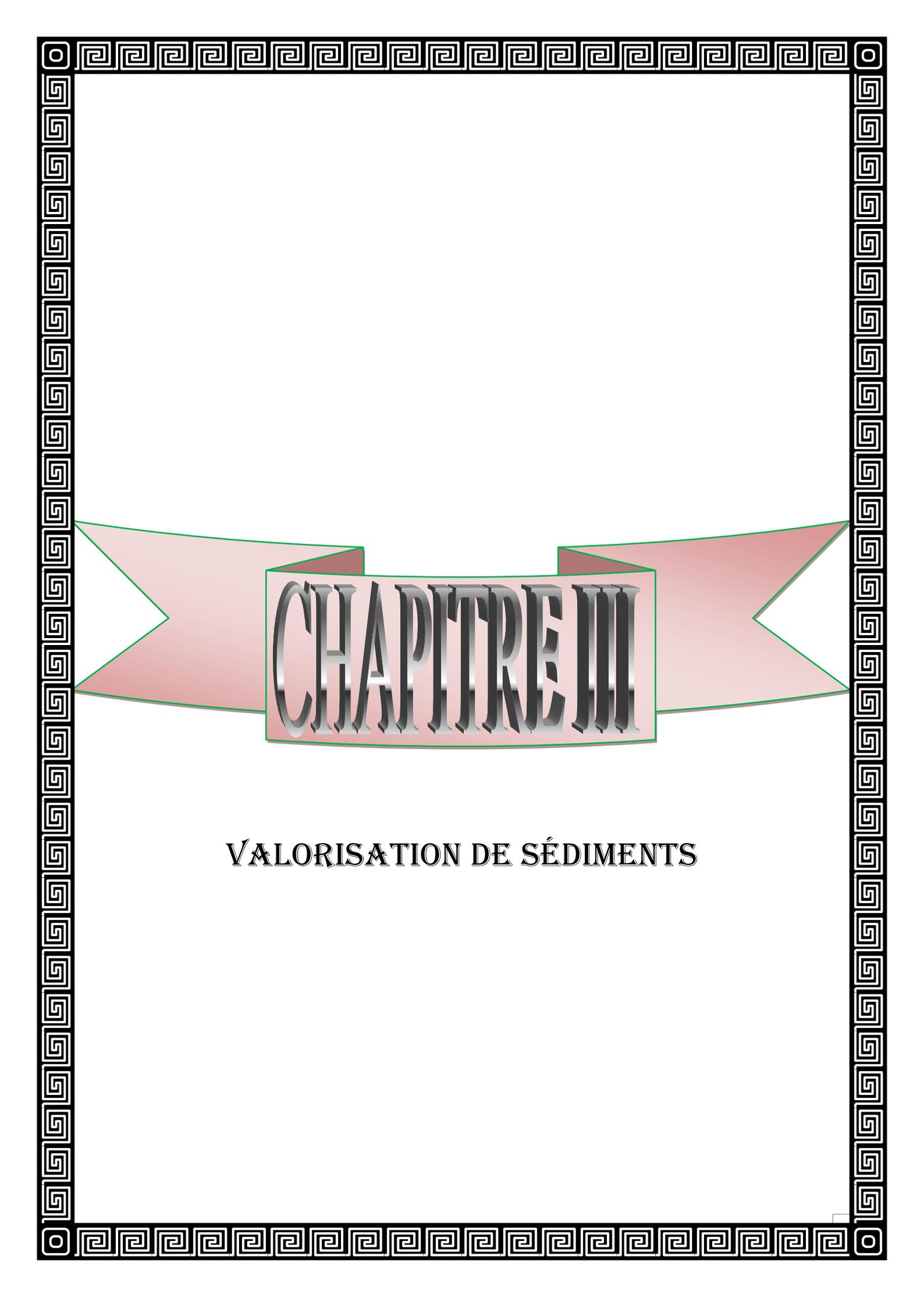
Photo (II.12) : Reprise des barrages

**II-12 Conclusion**

L'importance du transport solide en Algérie se traduit par un comblement rapide des retenues diminuant considérablement leur durée de vie.

Il importe donc, non seulement de prévoir le rythme de comblement de la retenue de façon aussi précise que possible de manière à prendre les dispositions économiques et sociales qui s'imposent mais aussi et surtout de développer certaines techniques d'études pour améliorer les méthodes de lutte contre l'alluvionnement.

Notre intention était, dans cette présentation rapide de donner une idée sur l'ampleur de ce phénomène particulièrement spectaculaire en Afrique du Nord. Il est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydrotechnique, tant au niveau de la réduction rapide de la capacité utile du barrage qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même. Ce phénomène doit être une partie prenante dans la préparation d'un projet de faisabilité d'un barrage en Algérie.



# CHAPITRE III

## VALORISATION DE SÉDIMENTS

**III- valorisation de sédiments****III-1 Introduction [22]**

Des travaux de dévasement gigantesques ont été entrepris dans plusieurs barrages algériens en l'occurrence le barrage de Fergoug (ouest algérien) mais se sont avérés destructeurs de l'environnement puisque des quantités considérables de vase sont déversées dans la nature portant un préjudice écologique incontournable. C'est pour cette raison qu'il faut tirer la sonnette d'alarme et sensibiliser les chercheurs à étudier tous les aspects chimiques, physiques, minéralogiques et mécaniques de la vase draguée des barrages afin d'en tirer profit dans le domaine des matériaux de construction par souci d'économie et contribuer ainsi à la préservation de l'environnement. Compte tenu des énormes volumes dragués des barrages algériens, plusieurs chercheurs se sont penchés sur la gestion et le devenir des boues de dragage. Cette gestion qui commence toujours par une phase de caractérisation a pour objet de déterminer les propriétés qui permettent de préciser les vocations ultérieures du produit. Dans un esprit de développement durable et pour une bonne gestion de l'environnement, plusieurs domaines pour l'utilisation de la vase en tant que matière première et non plus comme déchet ont été ciblés notamment le génie civil et l'agriculture.

**III-2 Utilisation de la vase dans le domaine des matériaux de construction**

Il existe plusieurs exemples d'utilisation de la vase dans le domaine de génie civil. La vase peut être utilisée comme une argile crue naturel dans la réalisation du noyau d'argile des retenues collinaires, comme un ajout dans le ciment (CEMI) pour fabriquer un ciment CPJ. La vase peut être utilisée aussi à la place d'une argile utilisée dans la fabrication de brique et de céramique.

**III-2 -1 Utilisation de la vase comme un noyau d'argile d'un barrage en terre [23] : Photo (III.1)**

L'étanchéité de la digue d'un barrage en terre ou une retenue collinaire est assurée par un noyau central en argile. La mise en place de l'argile pendant la réalisation se fait sous forme des couches de 30 cm compacté par un engin à pieds de mouton. L'argile compactée devient étanche par une certaine teneur en eau. C'est la teneur en eau optimale pour un poids volumique sec maximale donné par l'essai Proctor.

Parmi les exemples de lutte contre l'envasement est la construction des digues de décantation en amont de la retenue du barrage envasé pour freiner l'arrivée des sédiments et amortir la vitesse d'écoulement du cours d'eau. Le matériau principal pour la construction de ces digues est l'argile, dont on peut utiliser la vase du barrage.



**Photo (III.1):** Noyau centrale d'argile, cas du barrage de Kerrada

### III-2 -2 Utilisation de la vase comme un ajout dans le ciment

Dans le contexte actuel, l'Algérie est confrontée à une double problématique environnementale. D'abord, celle de la fabrication des ciments CEMI, en raison de leur teneur en clinker élevée (95% en masse) engendre un effet néfaste sur l'environnement. En effet, la production d'une tonne de clinker génère le rejet d'une tonne de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Pour palier à cette problématique environnementale, une des solutions pouvant être envisagée est l'emploi d'addition minérale en substitution partielle du ciment (GARTNER, 2004 ; CASSAGNABERE, 2007). [24]

Des études ponctuelles ont été menées en Algérie dans le cadre de la valorisation des sédiments de dragage dans les matériaux de construction tels que la pouzzolane artificielle comme ajout au ciment pour la fabrication du ciment composé (L.Benamara et al : « Élaboration d'une pouzzolane de synthèse à partir des sédiments de barrage », il a révélé que le mélange à 30 % de vase calcinée à 750 °C constitue le ciment pouzzolanique honorable

puisque'il conduit à des résistances en compression égales à 85% de celles obtenues avec le ciment seul.

Des recherches ont été effectuées par N.E. Bouhamou, N. Belas et M. Bibi : « Etude du comportement d'un béton autoplaçant à base de vase de dragage vis-à-vis du retrait », « Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons » et « Etude des propriétés mécaniques et physico-chimiques de l'argile vaseuse et de l'argile gréseuse provenant de la région de M'sila (Algérie) » ont permis de confirmer la possibilité de la valorisation de la vase issue du barrage de Fergoug et du barrage d'El Ksob en tant que matériau substituable en partie au ciment. Les principales conclusions auxquelles ils sont parvenus sont :

1- les résultats de l'étude du comportement du BAP à l'état frais en fonction du dosage de la vase calcinée ; indiquent que les BAP à base de vase calcinée sont plus visqueux par rapport au béton témoin, car au-delà d'un dosage critique, la viscosité du béton augmente avec la substitution. Seul le BAPV20 qui a présenté une ségrégation dite trop importante à l'essai de tamis. Outre l'essai de ressuage, les valeurs obtenues aux essais d'étalements, la boîte en L et la stabilité au tamis, diminuent lorsque le dosage en vase calcinée augmente. Aussi la densification de la microstructure a joué un effet favorable en diminuant le ressuage ce qui peut nous donner une idée sur l'amélioration de l'interface pâte- granulats.

2- L'évolution des résistances est influencée par le rapport V/C, les résultats indiquent que les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du pourcentage de vase calcinée, ces valeurs sont très tolérables pour des bétons réservés à des constructions de type bâtiments. Les meilleures valeurs pour les BAPV sont obtenues avec le BAPV10 %, mais il reste toujours que le BAPT présente les valeurs les plus élevées. En effet l'emploi d'addition minérale à caractère pouzzolanique entraîne la formation de nouveaux hydrates tels que C-S-H et C-A-H qui contribuent à l'amélioration des résistances mécaniques.

3- L'analyse des déformations différées libres en conditions endogène et dessiccation en présence de vase calcinée indique que cette vase contribue à diminuer les amplitudes du retrait par rapport au béton témoin, nous avons conclu que leurs cinétiques sont associées aux mécanismes physicochimiques. La compacité de la microstructure et l'affinement des pores mènent à une baisse de la perméabilité et empêchent la diffusivité de l'eau et par conséquent diminuent le retrait de dessiccation et la perte de masse. Le retrait total suit le même principe, étant influencé par le retrait endogène plus que celui de dessiccation, il diminue aussi en

fonction du rapport V/C et va dans le sens où le retrait total est un phénomène intrinsèque du béton.

Une autre étude a été effectuée par F.Mekkaoui et al « Elaboration et activation d'un éco-ciment à base de vase calcinée en utilisant un accélérateur de prise » ils ont confirmé que l'ajout d'un accélérateur de durcissement améliore (de 10% à 20% environ) les résistances mécaniques en compression et en traction-flexion des ciments composés contenant 30% de vase de barrage, qu'elle soit brute ou calcinée.

En conclusion ils peuvent déduire qu'une substitution de 15 % du ciment par la vase est le taux le plus intéressant qui s'avère optimal, puisque c'est le taux moyen qui a satisfait les deux critères d'amélioration de résistance et réduction du retrait.

### **III-2 -3 Utilisation de la vase dans l'industrie des matériaux rouges [25] :**

Les sédiments de la retenue de Shi-men (Taiwan) ont fait l'objet de deux études [Huang et al., 2001 ; Chiang et al., 2008] pour une utilisation comme matière première dans la fabrication de briques. Des mélanges utilisant une majorité de sédiments sont réalisés. Ainsi, Huang et al. [2001] ont mélangé les sédiments de la retenue avec des boues issues d'installations de traitement des eaux. La part de sédiment dans le mélange varie de 80 à 100 % et la part de boue de 0 à 20 %. Pour Chiang et al. [2008], les sédiments sont mélangés avec une argile. Dans ce second cas, la teneur en sédiment dans le mélange varie aussi entre 80 et 100 % et la part d'argile dans la composition varie entre 0 et 20 %. Les mélanges sont soumis à plusieurs températures de cuisson. Les effets des différentes températures de cuisson sont évalués en déterminant le retrait à la cuisson, la porosité, l'absorption d'eau, la masse volume apparente et la résistance à la compression des produits cuits. Des essais de lixiviation ont également été menés. Dans les deux cas, les auteurs de ces études concluent à la faisabilité et la pertinence de cette filière de valorisation pour ces sédiments. En Algérie, les apports solides générés par l'érosion des bassins versants comblent les barrages et réduisent de manière significative et inquiétante le volume des ressources en eau mobilisées par les barrages. Pour répondre au problème d'envasement posé, des études ont été lancées en vue de fabriquer des briques en utilisant les sédiments fins des retenues comme matière première. Remini [2006] caractérise les sédiments de 11 barrages et étudie plusieurs mélanges avec une argile « jaune ». Les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des sédiments bruts sont déterminées. Après avoir préparé les mélanges (broyage, mélange, homogénéisation, façonnage et séchage), ceux-ci sont soumis à une cuisson à 900°C pendant

32 heures et 30 minutes. Les effets de la proportion de sédiment sur les caractéristiques des matériaux cuits sont déterminés à l'aide d'analyses dimensionnelles (retrait au séchage et à la cuisson), physiques (porosité apparente, masse volumique absolue, capacité et coefficient d'absorption d'eau) et d'essais mécaniques. L'auteur conclut que les sédiments fins des retenues peuvent être utilisés par les briqueteries.

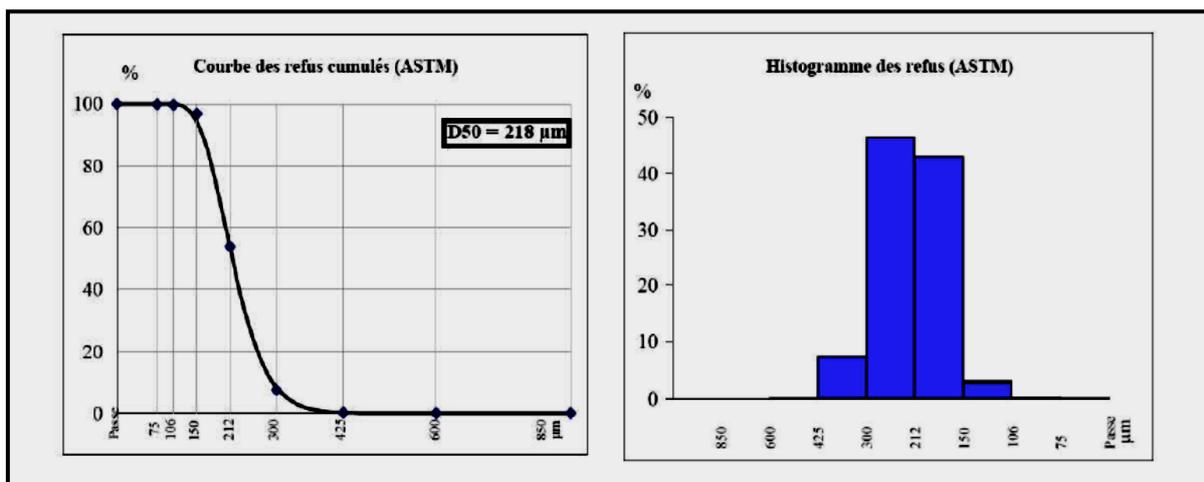
Benkadja et al. [2013] conduisent une étude portant sur l'utilisation des sédiments argileux de la retenue algérienne de K'sob pour la fabrication de briques. Des briques de dimensions 6x11x22 cm ont été confectionnées à partir d'un mélange comportant 65 % de sédiments du barrage, 25 % de sable de dunes et 10 % d'eau. La cuisson a été fixée à 800 °C durant 6 heures. Les caractéristiques physiques des briques pleines fabriquées sont données dans le tableau (III.1).

**Tableau(III.1):** Caractéristiques physiques des briques pleines fabriquées [Benkadja, 2013]

	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance mécanique (MPa)	Absorption d'eau (%)
<b>Valeurs moyennes</b>	1,4	10,47	55,17

**III-3 Utilisation de la vase dans le domaine de fabrication du verre [26]**

L'utilisation d'un sédiment en verrerie dépend de sa composition chimique (tableau (III.2)) et de sa granulométrie. La granulométrie des sédiments utilisés se situe entre 0,15 et 0,3 mm. (figure (III.1))



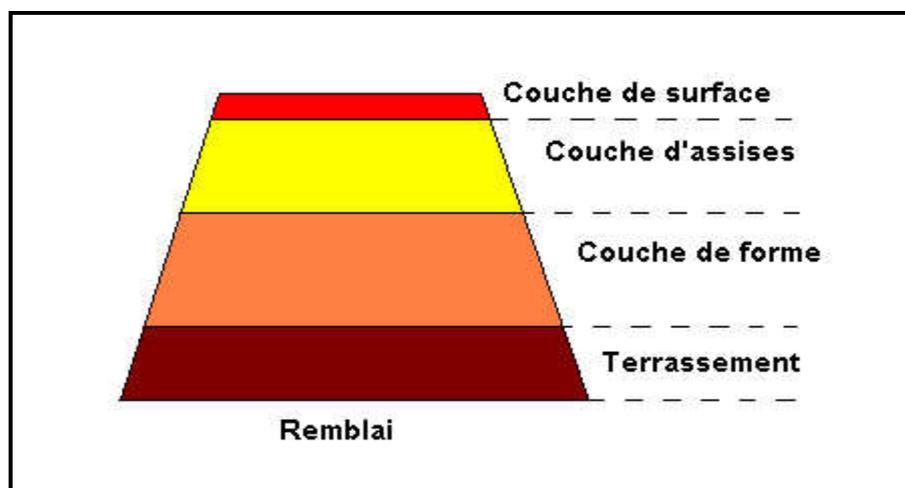
**Figure (III.1) :** Courbes granulométriques de sables fins utilisés en verrerie (www.sifrac.com)

**Tableau (III.2) :** Les limites des composants chimiques d'une argile utilisable dans la fabrication de verre selon Olivier. E : Technologie des matériaux de construction, Tome 2,335 p.1978

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>35 à 85 %</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>9 à 25 %</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>3 à 9 %</b>
<b>CaO</b>	<b>0 à 25 %</b>
<b>MgO</b>	<b>0 à 5 %</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>1 à 5 %</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>1 à 5 %</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>0.3 à 2 %</b>

#### III-4 Utilisation de la vase dans le domaine des techniques routières (Photo (III.2)):

Une route repose sur un remblai, qui est soit la terre d'origine (limons de plateaux...), soit un matériau apporté. Des sédiments de dragage peuvent être utilisés comme remblais, mais les caractéristiques techniques sont précises. En effet, la valeur de l'IPI « Indice de Portance Immédiate » est un facteur indispensable à considérer pour cette utilisation. Un IPI d'au minimum 10 est exigé pour le remblai, un IPI de 15 pour la partie supérieure du remblai, dite partie supérieure des terrassements (PST), qui doit posséder les qualités suffisantes pour permettre la mise en place de la couche de forme au dessus du remblai (figure (III.2)).



**Figure (III.2):** Coupe type d'un ouvrage routier (d'après CETE, 2000)

En théorie, Les sédiments subissant un fort remaniement lors du dragage devraient présenter une faible traficabilité (DDE-CETE, 2000). La traficabilité peut se définir comme l'aptitude d'un matériau à supporter le trafic des engins de chantier. [27]

Les sédiments de dragage des barrages appartenant à la classe B1 possèdent un IPI de 22, ce qui autorise l'utilisation des sédiments de dragage en remblais routier et en PST sans traitement particulier (liant) et contredit l'hypothèse précédente. Les sédiments devront simplement être compactés. De la chaux (2 à 3 %) sera cependant ajoutée afin de neutraliser les argiles et la matière organique présentes dans les sédiments. En effet, un traitement à la chaux vive va modifier l'état hydrique du remblai en abaissant la teneur en eau, et aussi neutraliser les argiles et la matière organique présentes dans le sédiment. [28]

Les sédiments de dragage déposés dans la chambre de dépôt, ont un IPI de 7,9. Ainsi, un arrosage abondant et un compactage de ces sédiments seraient indispensables pour obtenir un Indice de Portance Immédiate d'au minimum de 10 pour un remblai. Ces opérations devront sûrement être complétées par un traitement (chaux) pour obtenir un IPI satisfaisant (d'au moins 10) et limiter la sensibilité des sédiments à l'érosion. Ce faible IPI pourrait s'expliquer par l'absence d'éléments fins dans les sédiments (3 %).

Au niveau de l'engainement, les sédiments de dragage sont plus fins et devront être compactés, subir un traitement à la chaux ou n'être utilisés que pour des remblais de faible épaisseur. Des études supplémentaires seraient à réaliser sur ces sédiments plus fins et plus vaseux que ceux de la brèche. [28]

Une étude a été effectuée par Khattaoui et *al* en 2015 « Etude du comportement mécanique de la vase du barrage de Ain Zaouia (Algérie) pour une valorisation dans la construction routière », Cette étude est réalisée dans le cadre d'un travail de recherche sur le comportement mécanique des matériaux en mélanges (granulats routiers + vase, traités à la chaux) sous sollicitations routières. Les résultats obtenus ont montré que le mélange constitué de (granulats routiers +20% de vase + 3% de chaux) présente un comportement très intéressant sous les différents types de sollicitations subits et peut être proposé comme matériau routier, comme première expérience, du moins dans le cas des chaussées de faible à moyen trafic. Enfin, pour élargir l'utilisation de ces matériaux aux chaussées de moyen à fort trafic, d'autres essais complémentaires sont nécessaires, notamment pour évaluer leur comportement à long terme et sous l'effet d'autres paramètres, à savoir la température, le gel-dégèle, et les sollicitations cycliques. [29]

Une autre étude a été effectuée par Bourabah et *al* en 2011 « Traitement de sédiments de dragage de l'ouest algérien pour une valorisation en construction routière », La démarche

de valorisation envisagée dans cette étude, s'appuie sur des choix de préparation et de formulation simples, facilitant l'utilisation du sédiment de dragage de Cheurfas en technique routière. Ce sédiment à granulométrie serrée fine a mis en évidence une teneur en eau naturelle importante et une présence de matières organiques remarquables. Cette teneur en M.O influence les comportements physique et mécanique de ce matériau.

L'analyse des résultats des essais physico-chimique et mécaniques obtenu sur les formulations de mélanges étudiés est encourageante quand à la gestion de ce sédiment de dragage où une correction granulométrique a été bien observée suivi d'une amélioration de la densité sèche maximale obtenue en substituant ce sédiment à un matériau granulaire pulvérulent. Les teneurs en eau optimales obtenues se trouvent relativement réduites et la teneur en matières organiques n'influe pas sur la compacité du matériau, par contre elle agit défavorablement sur la portance de celui-ci. L'ajout de la chaux vive comme type de liants hydrauliques dans ces mélanges de sédiments nous a permis de remarquer que leur influence agit sur la plasticité du matériau qui diminue nettement et en grande partie sur ces paramètres de résistance qui se trouve nettement améliorée ou le critère de résistance minimale à la compression fixé par le GTS (LCPC- SETRA, 2000) pour autoriser la circulation sur la couche traitée est atteint avant 7 jours de durée de cure, l'angle de frottement interne s'est amélioré de 20% avec une réduction de plus de 50% de la cohésion, ce qui indiquera une bonne prise hydraulique. [30]



**Photo (III.2):** Construction de la route « Test » [Depelsenaire, 2007]

### III-5 Utilisation de la vase dans le domaine d'agriculture [31]

#### III-5-1 Introduction

Sous réserve des principes d'innocuité et d'efficacité agronomique, certains déchets agricoles, urbains ou industriels sont valorisés en agriculture. Ils peuvent en effet améliorer la qualité des sols appauvris par l'exploitation agricole. Ils peuvent également présenter un intérêt en reconstruction de sols : aménagement routier, aménagement paysager urbain, réhabilitation de friche industrielle.

Deux principes fondamentaux régissent la valorisation agronomique et plus généralement l'utilisation des matières fertilisantes et des supports de culture :

- les matières valorisées doivent présenter un intérêt agronomique,
- les matières valorisées doivent être inoffensives pour l'homme, les végétaux, les animaux et l'environnement, dans les conditions d'emploi prescrites et normales.

A ces deux principes s'ajoute aussi la capacité du sol à recevoir cet apport de matières fertilisantes : l'apport doit répondre à un besoin du sol et respecter des limites d'assimilation permettant d'éviter ou limiter les impacts, sur les eaux souterraines en particulier.

#### III-5-2 Travaux de recherche et applications

Dans cette section, des exemples d'études, de réalisations ou de projets de valorisation agronomique de sédiments sont exposés. Même si traditionnellement les sédiments ont à de nombreuses reprises, été utilisés comme amendement agricole, les retours d'expériences des travaux de recherche dans cette voie de valorisation sont relativement récents.

##### ➤ Valorisation agronomique des sédiments de dragage de canaux

Suite à des pratiques informelles d'épandage agricole de sédiments de dragage observées dans différentes régions françaises et à des difficultés foncières pour les gestionnaires de cours d'eau pour stocker leurs sédiments d'une part, et à la volonté de trouver une solution durable d'autre part, le CETMEF et le CETE de Lyon ont mené une première étude en 2009 sur « La valorisation agricole des sédiments de dragage des voies navigables » [Bernes Cabanne, 2009]. Cette étude surtout bibliographique, a permis de mettre en évidence que « les sédiments de dragage peuvent avoir des propriétés voisines des sols, voire dans certains cas, de sols agricoles fertiles ».

Devant ce constat, le CETMEF et le CETE de Lyon ont alors proposé et mis en place, en 2010, une expérimentation agricole sur site pour confirmer ou non le potentiel agronomique des sédiments de canaux.

➤ **Utilisation de sédiments pour la production de substitut de terre végétale**

Sturgis et Lee (1999) décrivent un processus de création d'un sol artificiel en utilisant des sédiments de dragage comme composant majeur de matériaux mélangés. Des tests de criblage sont décrits pour déterminer les ratios les plus productifs de mélange de matériaux de dragage et d'autres matériaux, comme des déchets verts, des composts, de la sciure, des biosolides (boues de STEP, lisiers) et les sous-produits industriels avec de la cellulose. Ces tests nécessitent moins de 5 gallons (18,93 litres) de chaque matériau d'essai et peuvent être menés dans la plupart des serres et chambres de croissance avec des espèces végétales recommandées ou spécifiques au site. La sélection d'un mélange approprié est basée sur une réponse acceptable des végétaux pour un rapport économiquement faisable de sédiments de dragage et d'autres matériaux. La démarche décrite pour la fabrication d'un sol productif à base de sédiments de dragage s'articule en deux étapes. L'étape 1 inclut la caractérisation physico-chimique des différents matériaux et des mélanges et des tests de germination et de croissance à l'échelle du laboratoire. Si les résultats des tests montrent que les sédiments de dragage peuvent potentiellement être utilisés pour fabriquer un sol fertile, l'étape 2 de la démarche implique la création d'un projet démonstrateur ou la commercialisation du process.

Sturgis *et al.* [2001a, 2001b, 2002] mettent en oeuvre l'étape 1 de cette démarche afin de discuter du potentiel de réutilisation des sédiments des ports de Mobile (Alabama, USA), Toledo (Ohio) et New York/New Jersey (New York, USA) pour la fabrication de sols fertiles.

Sheehan *et al.* [2010a] ont fait une analyse technique pour mettre au point un substitut de terre végétale à partir de sédiments marins du port de Waterford (Irlande). Les spécifications utilisées en Irlande pour la terre végétale proviennent de la norme BS 3882 [2007], « Specification for topsoil and requirements for use ». Ce sont quatorze mélanges qui ont été confectionnés à partir de compost et de sédiments. Ils intègrent des sédiments désalinisés ou non provenant de deux points de prélèvement du port : « Passage East » et « Cheek Point ». Ils ont été choisis de manière à avoir, pour le premier un sédiment fin (15 % de sable) et un second sédiment plus grossier (91,2 % de sable). Du sulfate d'aluminium est ajouté pour ajuster le pH et améliorer la disponibilité des nutriments. Des analyses sur la qualité environnementale des sédiments ont été menées en quantifiant les éléments traces métalliques et organiques.

### **III-6 Conclusion**

Au lieu de rejeter la vase issue du dragage dans le milieu naturel comme un déchet, on la donne une valeur par la réutiliser comme matériau de construction dans le domaine de réalisation de:

- Barrages en terre, digues de protection et retenues collinaire.
- Bassins pour les stations d'épuration par lagunage.
- Centre d'enfouissement techniques (CET).

La vase peut être utilisée aussi comme une matière première dans l'industrie des matériaux rouges. Plusieurs études sont élaborées dans ce domaine sur des échantillons de vase des barrages envasés dans le nord du pays notamment celle du barrage de Bouhanifia élaborée par Boualem R. en 2004.

La réutilisation de la vase vise deux objectifs: éviter les problèmes d'ordres écologiques posés par le rejet des sédiments dans la nature d'un coté et de faire l'économie par la vente de cette vase aux entreprises de réalisation des projets qui nécessite l'argile comme un matériau de construction et aux usines de fabrication de la brique et la céramique qui nécessite l'argile comme une matière première dans l'industrie des ces matériaux.

L'objectif de notre étude est d'analyser la vase du barrage de l'Oued Fodda, déterminer les caractéristiques physiques, géotechniques, rhéologiques, chimiques et minéralogiques de cette vase. Sur la base des résultats trouvés, on déterminera le domaine de valorisation de la vase étudiée.



# CHAPITRE IV

PROCEDE DE FABRICATION DES CARREAUX  
DE SOL EN CERAMIQUE ET DU CIMENT

## **IV-1 Technologie de fabrication des carreaux de sol en céramique [32]**

### **IV-1-1 Introduction**

La céramique relève d'une technologie très pointue, qui transforme une pâte molle crue en un objet dur et presque éternel. L'argile constitue l'unique matériau d'origine et pourtant les céramiques offrent une grande diversité d'aspect, de couleur et de texture (du rouge au blanc, du poreux à l'étanche, du mat au brillant).

Un produit céramique se construit à travers différentes étapes : la fabrication, la décoration, le séchage, la cuisson, la sélection de mélanges adaptés associés au choix d'outils et de machines spécifiques.

Avec la cuisson la céramique va subir une transformation et acquérir de nouvelles propriétés : la solidité, la résistance à l'usure et à la chaleur. Selon les composants et additifs ainsi que les modes de cuisson, on obtient des matériaux différents.

Une première catégorie, la terre cuite, recouvre l'ensemble des objets, fabriqués à partir de terre argileuse, qui ont subi une transformation physico-chimique irréversible au cours d'une cuisson à température élevée. Elle reste actuellement le matériau le plus répandu dans les arts de la table ou de la construction. (Porcelaine, grès, terre cuite, faïence, céramique).

Une seconde catégorie de matériaux céramiques a vu le jour au cours du XXe siècle. Ce sont les céramiques techniques dotées de nouvelles propriétés (tenue à très haute température, conductivité, etc.). Elles se rencontrent dans les applications médicales, sanitaires ou industrielles.

**IV-1-2 Matières premières utilisées dans la fabrication des carreaux de sol en céramique**

Les principales matières premières utilisées dans la fabrication du carrelage en céramique sont :

- **Argile ou terre** : mélange plastique et apte à prendre la forme désirée
- **Grés** : Ce sont des produits à masse réfractaire, additionnée, éventuellement de chamotte et dont l'ossature présente des grains plus ou moins gros. Les produits de grés présentent des performances exceptionnelles (résistance mécanique à l'érosion et aux agents chimiques).
- **Schiste** : Roche de constitution très variable, caractérisé par une texture feuilletée résultant d'une forte compression, de contraintes tectoniques ou du métamorphisme.

**IV-1-3 Processus de fabrication des carreaux de sol en céramique****IV-1-3-1 Préparation de la barbotine**

Le mélange de matière première passe dans un broyeur qui réduira en pâte humide (barbotine) de grains plus ou moins fins en fonction du type de produit le mélange de terre et de matière première.

La barbotine est introduite dans des buses placées à l'intérieur de la chambre de séchage, au moyen d'une pompe à piston à haute pression ajustable. A l'extrémité des buses, la barbotine est nébulisée en fines particules et tombe dans un contre courant d'air chaud qui vient du générateur. De cette manière le séchage est presque immédiat et la poudre formée tombe au fond où elle est évacuée par une vanne tournante. L'air humide est aspiré par un ventilateur à travers un groupe de cyclones, où les petites quantités de poudre fine qu'il contient encore sont collectées, puis l'air est rejeté dans l'atmosphère au travers de filtres. La poudre peut être obtenue à la granulométrie et humidité résiduelle requises, en réglant la pression de la pompe, le diamètre des buses, la température et le débit de l'air.



#### **IV-1-3-2 Pressage du carrelage**



La poudre obtenue lors de l'atomisation et injectée dans un moule qui lui donnera le format désiré. A l'intérieur du moule la presse agit avec une charge qui peut aller jusqu'à 5000 tonnes.

La plaque ainsi obtenue a déjà une résistance qui peut lui permettre d'être transportée et de passer aux différentes étapes de la fabrication.

### **IV-1-3-3 Nettoyage**



Le ramasseur de presse a la fonction de réceptionner les carreaux qui sortent du moule de la presse, de les parachever, basculer, brosser puis de les envoyer à la phase successive de séchage. Il est constitué d'un tapis roulant mobile et emboîtable avec commande mécanique pour laisser libre l'accès au moule de la presse, un basculeur universel qui bascule les batteries de carreaux à 180° et de deux groupes de brosse pour le lissage des carreaux. Un jeu de racleurs de parachèvement est disponible en option.

### **IV-1-3-4 Séchage**



Les carreaux sont chargés sur des balancelles à rouleaux, qui après avoir été soumises au premier stade de séchage, sont enveloppées dans un fort courant d'air chaud humide, mélangé à de l'air chaud

sec. Dosant convenablement les deux airs, nous avons abouti à un bon séchage. Par des fentes placées à l'horizontale dans la tour du séchoir, l'air est équitablement distribué sur tout le plan de chargement de la balancelle. Le deuxième stade, auquel les carreaux seront soumis, consiste en un fort courant d'air sec autorisant une humidité en sortie du produit qui change de  $0 \div 0,5$  %. Le troisième et dernier stade est celui qui donne la température aux carreaux requise pour l'émaillage. Les températures sont contrôlées et affichées par des appareillages thermorégulateurs appropriés. Le fonctionnement complet de la machine est géré au moyen de l'automate programmable.

### **IV-1-3-5 Emaillage**

Plusieurs techniques d'émaillage sont appliquées en fonction du type de produit que l'on veut obtenir :

#### **1. Émaillage à sec**

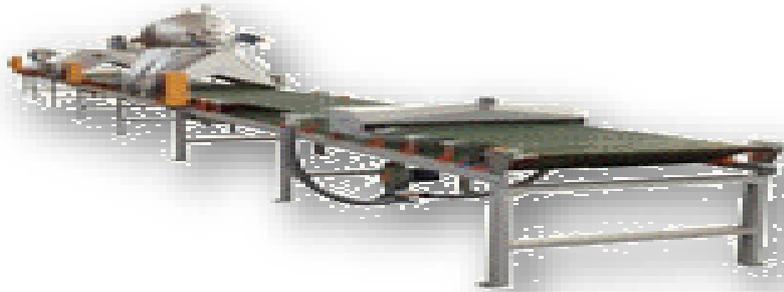
La particularité de cette technique est celle d'appliquer l'émail à n'importe quel endroit du carreau dans une quantité et des couleurs définies électroniquement selon un programme graphique sélectionné qui s'affiche sur un écran en dotation. Avec les systèmes de gestion électronique, on peut donc décorer les carreaux de façon CENTRÉE, c'est à dire tous égaux, en mode RANDOM à savoir avec des décors différents mais contrôlés sur des carreaux qui transitent rapidement sur la ligne.



L'image graphique exécutée peut être modifiée. On peut modifier : le graphisme, les couleurs, la quantité d'émail déposée pour chaque couleur en variant ainsi la tonalité. Le format du carreau est aussi enregistré, par conséquent le changement de format ne requiert pas le remplacement ou le réglage d'organes mécaniques. Le programme contenant toutes les données concernant la graphique, le format, la quantité et les couleurs est enregistré sur un support magnétique commun qui permet, à tout moment, de modifier le programme en cours en quelques secondes en reproduisant parfaitement le

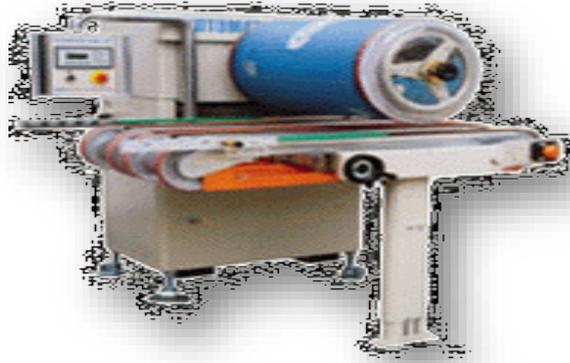
décor déjà exécuté précédemment. La décoration s'obtient à travers l'utilisation d'une série de buses pilotées numériquement par l'ordinateur qui lit la graphique et les autres paramètres de production. La machine est disponible avec des sorties de 1 à 4 couleurs. L'application des couleurs à l'intérieur d'une seule machine permet de les fixer en une seule fois à la sortie.

## **2.Émaillage humide**



Avec cette technique, le carreau passe sous des buses qui propulsent de l'émail liquide. Il peut y avoir plusieurs buses successives ou en parallèle pour enrober la céramique d'émail afin d'obtenir les différents effets souhaités.

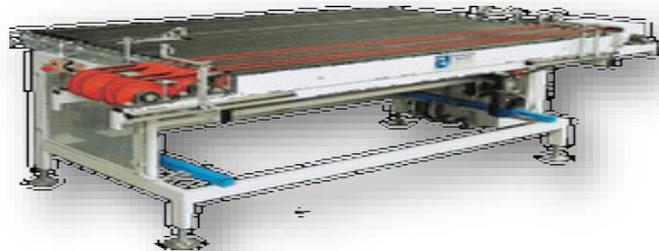


**3. Sérigraphie**

La sérigraphie est utilisée plus particulièrement dans la fabrication de décor. Le principe est d'appliquer plusieurs émaux en fonction des couleurs. Le carreau passé sous un film qui ne laisse passer qu'aux endroits souhaités l'émail. Avec ce principe, le carrelage peut passer dans plusieurs machines successivement.

**IV-1-3-6 Transport**

Sur l'ensemble du processus de fabrication, le transport des carreaux se fait par des systèmes de tapis roulants.

**IV-1-3-7 Cuisson**

Se fait par des fours rotatifs ; Ces fours ont été conçus sur la base des exigences spécifiques du produit et de l'installation et sont dotés de toutes les solutions technologiques en mesure de garantir d'excellents niveaux de qualité productive et de fiabilité. Les caractéristiques principales sont :



- possibilité de cuire des carreaux émaillés et non émaillés, mono cuisson et bi-cuisson, grès cérame et applications en troisième cuisson, température de cuisson jusqu'à 1.300°C
- faibles consommations d'énergie,
- installation de combustion dotée de brûleurs testés selon des paramètres particulièrement sévères et qui peuvent travailler aussi bien en atmosphère réductrice qu'oxydante en garantissant toujours un produit cuit uniformément,
- les rouleaux sont actionnés avec des engrenages coniques à dents droites garantissant la plus grande fiabilité et des coûts d'entretien réduits,
- il ne nécessite aucun type de fondation,
- il est adapté à tous les types de format à partir de 100 x 100 mm jusqu'à 1000 x 1000 mm.

#### **IV-1-3-8 Contrôle de qualité**

Les carreaux sont testés un à un pour leurs résistances, et leur format. Si un carreau ne correspond pas à la norme pour les différents tests de résistance mécanique, il est automatiquement détruit. Par contre si le format dépasse les normes, il sera déclassé dans une catégorie de choix inférieure.



**IV-1-3-9 Contrôle de nuance**

Le contrôle de la nuance est la seule opération qui demande de la main d'œuvre bien qu'il existe des systèmes de contrôle par caméra. En effet, ce contrôle délicat est difficilement réalisable automatiquement car il demande une grande finesse. Les nuances sont dues à la cuisson. Une variation de quelques degrés de même que le degré d'humidité de l'air ambiante peuvent modifier la couleur de la céramique

**IV-1-3-10 Mise en carton et en palette**

A la fin de la chaîne se trouvent des robots pour la mise en palette. Ces robots sont reliés au système informatique qui transmet les informations pour chaque paquet d'environ 1 m<sup>2</sup> de carrelage. En fonction des choix (qualité des produits) et des nuances le robot mettra le paquet sur l'une ou l'autre des palettes qui se trouvent dans la zone de travail.

La dernière opération, lorsque la palette est pleine, un gerbeur la prendra pour la hausser et la mettre automatiquement en place dans le stock.

**IV-1-4 Conclusion**

L'optimisation du procédé céramique passe nécessairement par la maîtrise des différents phases de fabrication. Donc dans ce travail nous avons focalisé sur toutes les étapes des procès et ce qui a attiré notre attention ; c'est l'étape de préparation de barbotine d'où cette étape est très déterminante dans le procédé de fabrication du carreau de sol.

Le suivi rigoureux ; la préparation correcte est énormément importante. Cette qualité est reflétée dans le produit fini.

Il faut cependant insister sur le fait que même si cette étape est néfaste, il est nécessaire de respecter les autres caractéristiques influençant sur l'état du produit fini tel que l'atomisation, le pressage, l'émaillage et sa compatibilité avec le biscuit et enfin la cuisson et le triage.

## **IV-2 Technologie de fabrication du ciment**

### **IV-2- 1 Introduction [33]**

L'écossais « Joseph Aspdin » prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenté par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée.

Ainsi, le XXe siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux. L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux c'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon.

### **IV-2- 2 Définition du ciment [34]**

Le ciment [ photo (IV.1)] est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.

Elle est défini selon la norme NFP15301, comme une fine mouture inorganique qui gâchée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit. Le ciment portland est constitué d'un mélange de clinker, de gypse et d'ajouts minéraux, le ciment est majoritairement composé de quatre phases anhydres.



**Photo (IV.1) :** Poudre de ciment courant

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau car cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de « pâte de ciment durcissant » sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

Le ciment ordinaire anhydre [tableau (IV.1)] est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles..., etc.

**Tableau (IV.1) :** Composition chimique en oxydes d'un ciment ordinaire et notation cimenterie

Oxydes	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
<b>Composition</b>							
en (%)	50-70%	5-10%	15-30%	5-10%	0-5%	0-2%	0-5%
<b>Notation</b>							
cimenterie	C	A	S	F	CS	H	S

### IV-2- 3 Processus de fabrication de ciment [35]

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker. Les différentes étapes de la fabrication sont les suivantes figure (IV.1) :

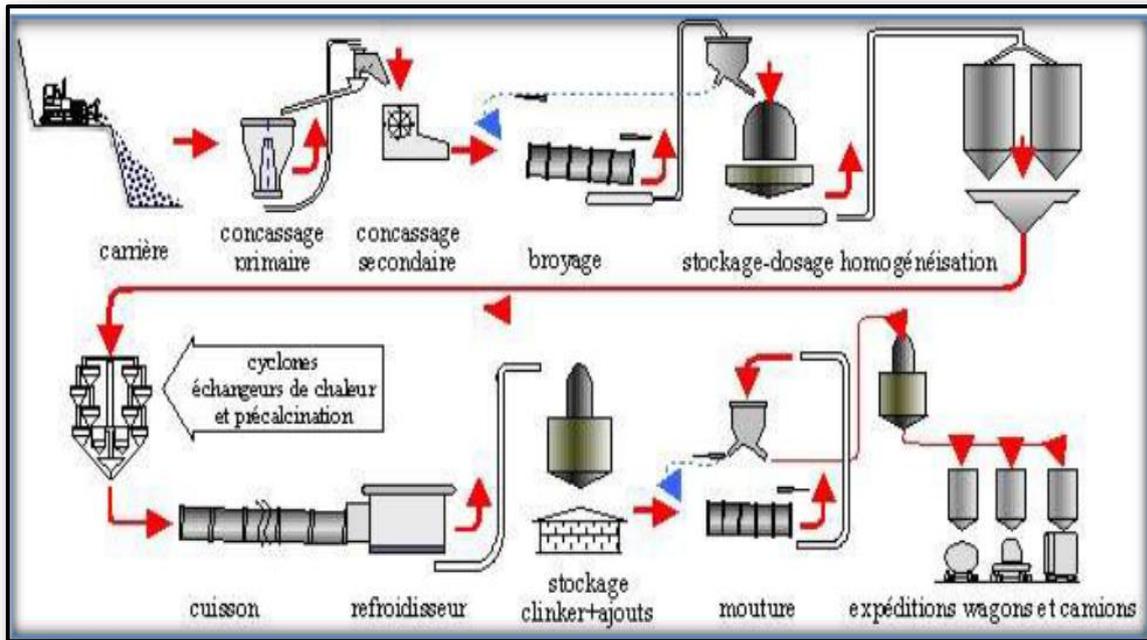


Figure (IV.1) : Les étapes de fabrication de ciment

a. **Extraction et concassage** : Photo (IV.2) et Photo (IV.3)

Le calcaire est extrait par explosif dans des carrières généralement près de la cimenterie. L'argile, plus meuble, est extraite par des engins mécaniques et transportée en cimenterie. Le concassage, fait sur les lieux de l'extraction, réduit la granulométrie des matériaux à environ 50 mm.



Photo (IV.2) : Extraction



Photo (IV.3) : Concassage

**b. Préparation de cru :**

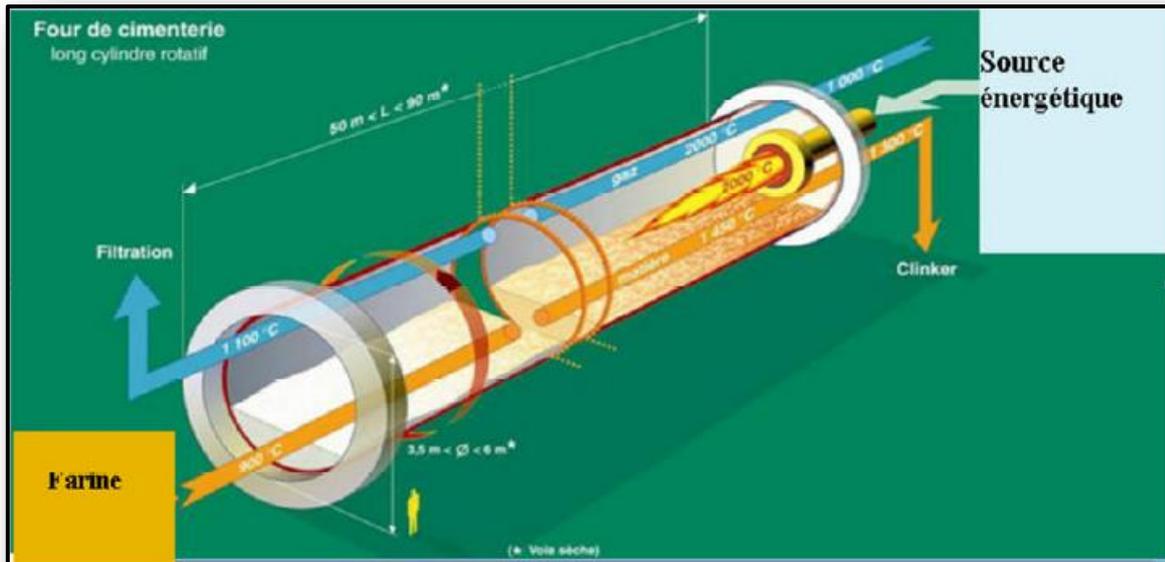
Un mélange homogène d'argile et de calcaire est réalisé. Les proportions sont déterminées selon leurs compositions chimiques et sont toujours proche de 80 % de calcaire et 20% d'argile. Le mélange est broyé en une poudre de granulométrie inférieure à 200 microns. La poudre obtenue est homogénéisée par un mélangeur pneumatique ou mécanique (photo (IV.4)). Le produit obtenu est appelé « le CRU ».



**Photo (IV.4) :** La pré-homogénéisation

**c. Cuisson :**

Réalisée dans des fours rotatifs (photo (IV.5)) à une température maximale d'environ 1450°C, la cuisson permet la transformation du cru en clinker (forme de grains de 0,5 à 4 cm de diamètre). A la sortie du four, le clinker est refroidi rapidement (à une température de 50 à 250°C) pour éviter une forte cristallisation.

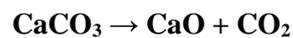


**Photo (IV.5) :** Le principe du four rotatif

Les principales formations et réactions de la matière au cours de cuisson sont présentées par ces étapes suivantes:

➤ **Étape 1: Décarbonatation**

Le calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) est décomposé en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) + gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ).  
Ce dernier est évacué par la cheminée.



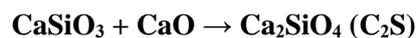
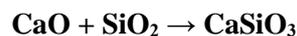
C'est une réaction fortement endothermique, à température environ 900 à 1000 °C.

Pour 1 tonne (1000 kg) de  $\text{CaCO}_3$ , on évacue par la cheminée 440 kg de  $\text{CO}_2$ .

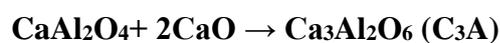
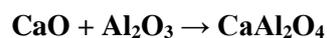
➤ **Étape 2 : Phase de transition**

Il y a la combinaison de  $\text{CaO}$  avec :

- ✓ Le silicium (Si) pour former du  $\text{C}_2\text{S}$  (silicate bi calcique), cette réaction est légèrement exothermique.



- ✓ L'aluminium (Al) pour former une solution solide d'aluminates de calcium.



➤ **Étape 3 : Phase de cuisson**

La température de la matière monte jusqu'à 1450 °C. Une partie de la matière fond pour donner naissance à la phase liquide (constituée de phase aluminates et ferrite), cette étape demande beaucoup d'énergie.

En parallèle, il y a formation de C<sub>3</sub>S (silicate tricalcique) : à partir de 1300 °C, le C<sub>2</sub>S se transforme en C<sub>3</sub>S en réagissant avec une partie du CaO non combiné. La réaction est exothermique.



La cristallinité et la composition de ces phases influent sur leurs propriétés (couleur par exemple) et leur réactivité en présence d'eau.

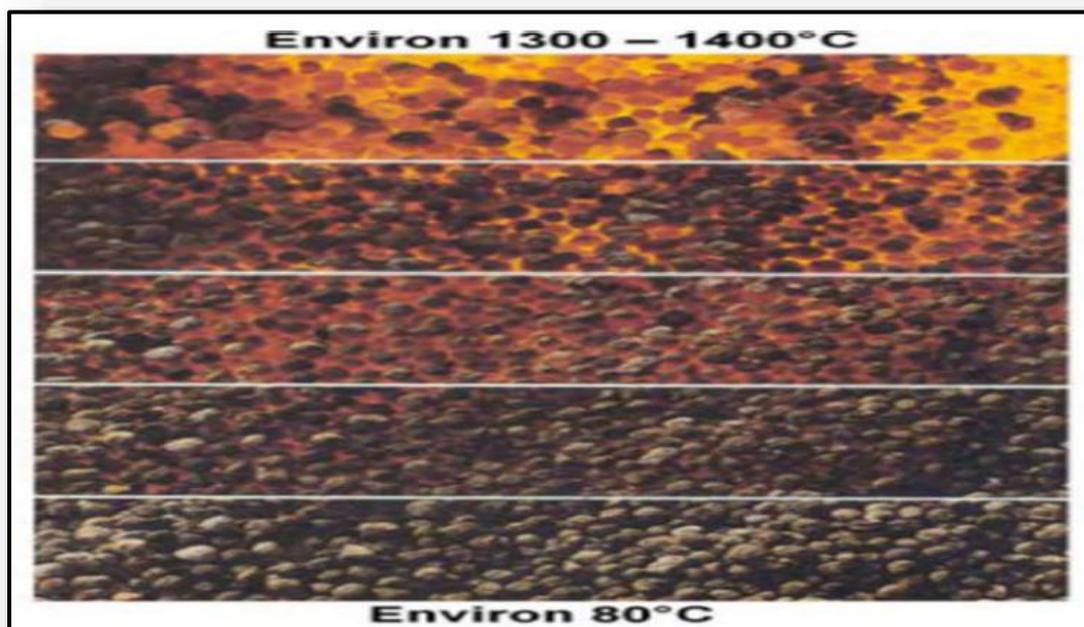
**d. Refroidisseur :**

À la sortie du four, le clinker est refroidi brutalement : c'est la trempe (Photo (IV.6)).

Il existe plusieurs procédés pour effectuer cette opération :

- ✓ Le refroidissement par ballonnets, est relativement simple mais d'efficacité limitée.
- ✓ Le refroidissement à grille.

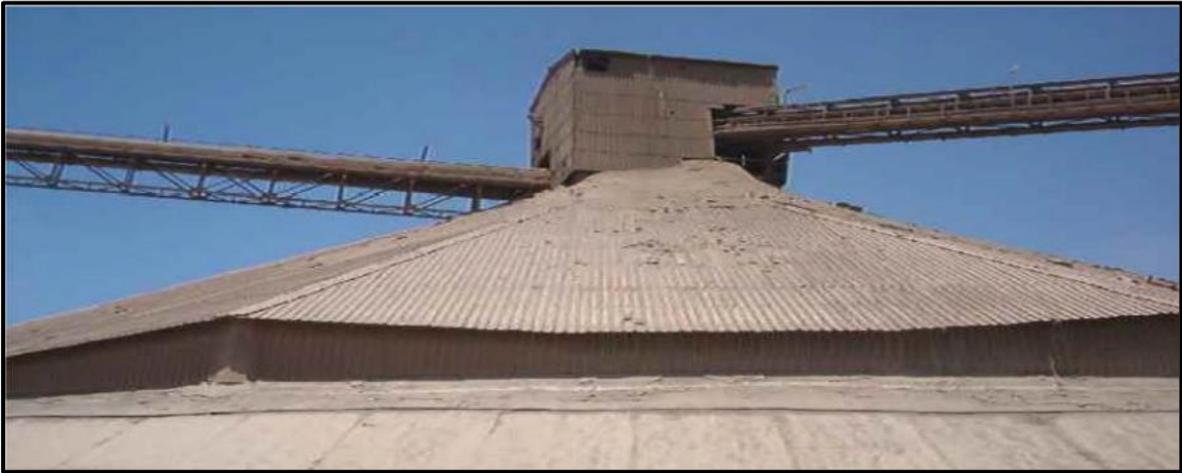
La vitesse de refroidissement, particulièrement aux hautes températures, affecte le mode et la texture de cristallisation des composés du clinker. Le choc thermique au cours du refroidissement provoque aussi un réseau de microfissures, qui sera utile par la suite, car il favorise le broyage du clinker.



**Photo (IV.6) :** Etape de trempe : sortie du four et passage dans le refroidisseur

**e. Stockage du clinker**

Le clinker se présente sous la forme de granules de la grosseur d'une noisette. Il est évacué par tapis vers le hall / silo à clinker (Photo (IV.7)) où il sera stocké en attendant d'être broyé pour faire de ciment. La capacité de stockage peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de tonnes (30 000 tonnes dans chacune des bulles).

**f. Broyage :**

**Photo (IV.7) :** Les bulles de stockage du clinker

Le Clinker Portland est additionné de gypse et éventuellement d'ajouts cimentaires (Laitier, pouzzolane, calcaire,...) et est broyé en poudre fine d'une granulométrie inférieure à 80  $\mu\text{m}$  dans le broyeur de ciment (Photo (IV.8)), c'est le ciment Portland.



**Photo (IV.8) :** Le broyeur de ciment

**g. Stockage:**

Après le broyage du clinker et d'ajout additifs, le ciment est prêt à être vendu. Il est stocké dans d'immenses silos (Photo (IV.9)).



**Photo (IV.9) :** Les silos de stockage de ciment

**IV-2- 4 Les Constituants principaux de ciment [36]****A. Le clinker**

Le clinker (Photo (IV.10)) est constitué de silicate tricalcique  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ , silicate dicalcique  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , d'aluminate tricalcique  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  et d'aluminoferrite de calcium  $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ . Les cimentiers ont adopté pour plus de simplicité une notation fondée sur la composition en oxydes dans laquelle : C = CaO, S =  $\text{SiO}_2$ , A =  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , F =  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Ainsi les constituants du clinker sont :

- Silicate tricalcique,  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5 = 3\text{CaO}, \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$ ,
- Silicate dicalcique,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 = 2\text{CaO}, \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$ ,
- Aluminate tricalcique,  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 = 3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$ ,
- Aluminoferrite tétracalcique,  $2(\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5) = 4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$ .

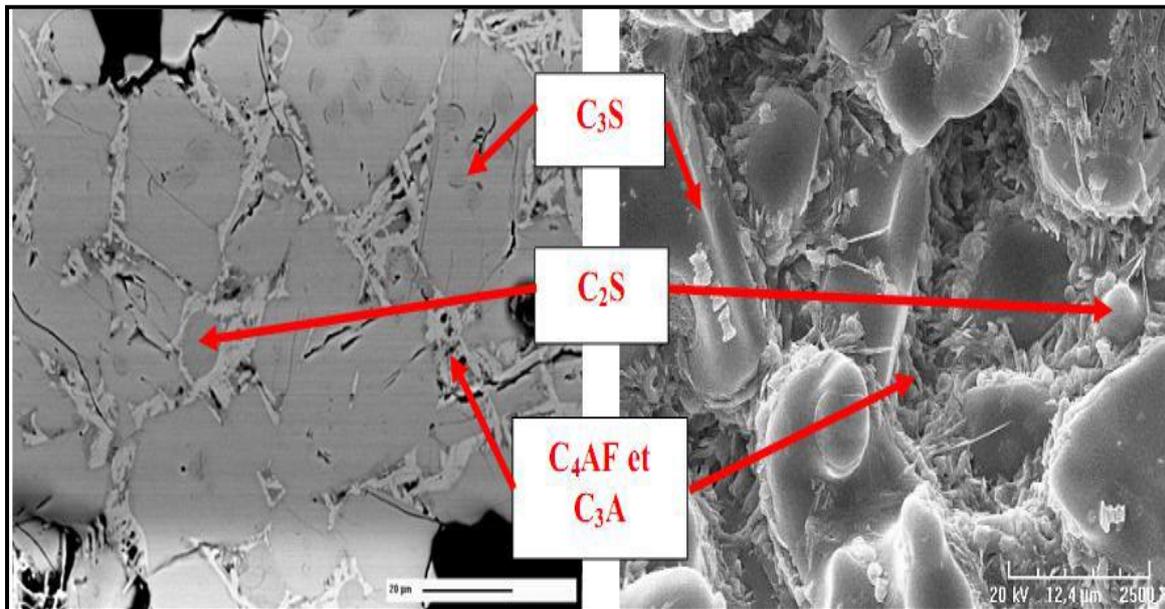
Les deux silicates forment environ 80 % du mélange (en masse), soit 50 à 60 % de  $\text{C}_3\text{S}$ , 30 à 20 % de  $\text{C}_2\text{S}$ . Les aluminates qui constituaient la phase liquide à la température de

clinkérisation et qui ont cristallisé entre les silicates au refroidissement se partagent les autres 20 %, avec en moyenne 8 à 10 % de  $C_3A$ .

A l'aide du microscope [figure (IV.2)] on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases auxquelles les chercheurs donnent les noms suivants :



**Photo (IV.10) : Clinker**



**Figure (IV.2) :** Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscope Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés

✓ **L'alite :**

Il est le constituant majoritaire du clinker de ciment Portland (50 à 70 %). Il s'agit d'une forme impure (phase cristallisée) du silicate tricalcique de formule  $C_3S$  réagissant très rapidement avec l'eau (Photo (IV.11)). L'alite est la phase minérale permettant d'obtenir les principaux hydrates à l'origine des propriétés mécaniques du ciment.

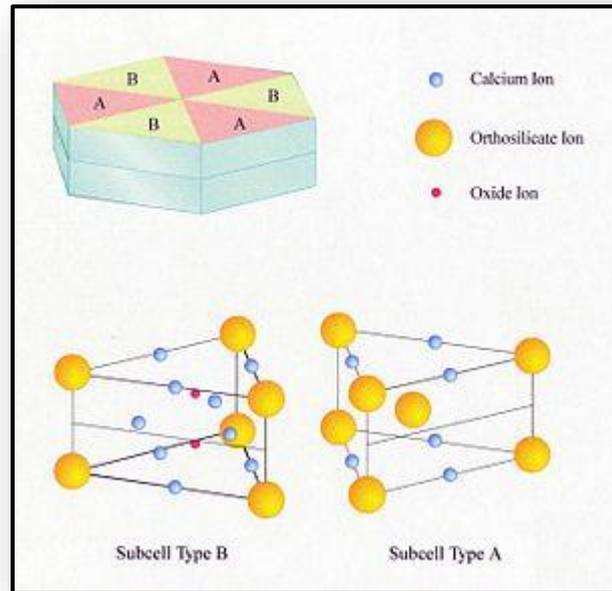


Photo (IV.11) : L'alite

✓ **La bélite** : (phase vitreuse) (Photo (IV.12))

Elle constitue 15 à 30% du clinker se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).

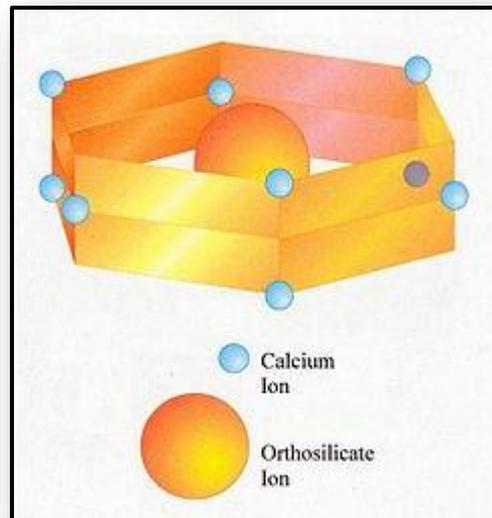


Photo (IV.12) : La bélite

- ✓ **Les aluminates tricalciques** (Célite : (Photo (IV.13)) phase vitreuse légèrement foncée et claire :

Elle constitue 5 à 10% du clinker de ciment CEM I se trouve dans le clinker sous forme impure, il accélère la prise. En quantité importante, il génère une forte chaleur d'hydratation et permet l'obtention de ciment à résistance mécanique initiale élevée. L'hydratation rapide du  $C_3A$  est ralentie par l'ajout de sulfates (gypse) qui jouent le rôle de régulateur de prise.



**Photo (IV.13) : La célite**

- ✓ **Les alumino-ferrites calciques** sont des solutions solides de  $C_2A$  et  $C_4F$  proches du  $C_4AF$ , mais sans composition chimique définie :

Ils constituent environ 5 à 10% du clinker du ciment CEM I et jouent un rôle peu important dans ses réactions de durcissement. Les oxydes de fer confèrent la couleur grise caractéristique de certains ciments.

## **B. Ajouts cimentaires**

C'est des poudres fines actives ou inertes ajoutées au ciment pour réduire le coup de production, diminuer les émissions de  $CO_2$  et améliorer les propriétés du béton. En peut citer :

- ✓ **Le Laitier de haut fourneau** (Photo (IV.14)) : Matériaux issu de l'industrie de la fonte dans les hauts fourneaux. Il est composé principalement de chaux (45-50%), de silice (30-35%), d'alumine (10-15%) et de magnésie (7-10%).



**Photo (IV.14) :** Le Laitier de haut fourneau

- ✓ **La pouzzolane :** est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle est généralement rouge ou noire (Photo (IV.15)), avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise. La pouzzolane est constituée principalement par la silice, de l'alumine et d'oxyde de fer.



**Photo (IV.15) :** Grains de pouzzolane

La pouzzolane est deux types :

➤ **1. Pouzzolane naturelle**

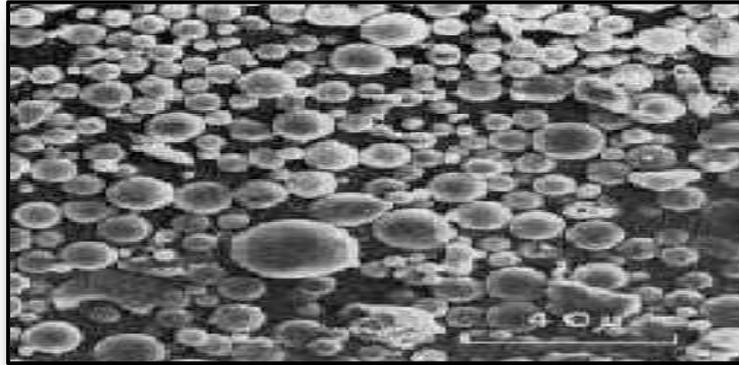
Produit d'origine volcanique essentiellement composé de silices, d'alumine et d'oxyde de fer et ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques :

En présence d'eau et d'hydroxyde de calcium dissous ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), les pouzzolanes forment des silicates et des aluminates de calcium qui permettent le développement de résistances mécaniques.

➤ **2. Pouzzolane artificielle**

Les pouzzolanes artificielles peuvent être obtenues à partir des argiles ayant subi un traitement thermique approprié pour lui assurer les propriétés pouzzolaniques.

- ✓ **Fumée de silice** : Particules sphériques très fines (Photo (IV.16)) ayant une très haute teneur en silice ( $\geq 85\%$ ), issue de l'industrie de fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.



**Photo (IV.16) :** Les fumées de silice

- ✓ **Calcaire** : Lorsqu'ils sont utilisés dans une proportion excédant 5 %, en masse (constituant principal), les calcaires doivent satisfaire aux spécifications suivantes :
- teneur en calcaire  $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$  en masse ;
  - teneur en argile (adsorption de bleu de méthylène)  $\leq 1,20$  g/100 g ;
  - teneur en matières organiques  $\leq 0,50\%$  en masse.
- ✓ **Le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) :**

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la célite ( $\text{C}_3\text{A}$ ) qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent.

Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydroaluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydroaluminat tricalcique et produit un sel insoluble l'hydrosulfoaluminat de calcium ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ). La quantité à introduire doit correspondre à la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  dans le liant. Lorsque cette teneur en gypse est respectée, l'action des hydroaluminates de calcium se trouve paralysée au moment initial.

**IV-2- 5 Classification de ciment [37]**

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments [tableau (IV.2)] afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

✓ **Mise en œuvre particulière :**

**Tableau (IV.2) :** Liste des différents types de ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301

<i>Désignation</i>	<i>Types de ciment</i>	<i>Clinker %</i>	<i>Ajouts et Teneurs en %</i>	<i>Matière secondaire</i>
<b>CEM I</b>	Ciment portland	95 à 100%		0 à 5%
<b>CEM II/A</b> <b>CEM II/B</b>	Ciment portland composé	80 à 94% 65 à 79%	L'un des ajouts -6 à 20% - 21 à 35%	
<b>CEM III/A</b> <b>CEM III/B</b> <b>CEM III/C</b>	Ciment de haut fourneau	35 à 64% 20 à 34% 5 à 19%	-35 à 65% Laitier -66 à 80% -81 à 95%	
<b>CEM IV/A</b> <b>CEM IV/B</b>	Ciment pouzzolanique	65 à 90% 45 à 64%	Pouzzolane -10 à 35% Cendre ou fumée silice-36 à 55%	
<b>CEM V/A</b> <b>CEM V/B</b>	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64% 20 à 39%	-18 à 30% Laitier et cendre - 31 à 50%	

✓ **Résistances mécaniques :** [tableau (IV.3)] Les ciments sont répartis en trois classes de résistances ; 32,5 – 42,5 – 52,5, définis par la valeur minimale de la résistance caractéristique

du ciment à 7 et à 28 jours. La résistance du ciment est déterminé sur des éprouvette de mortier de ciment (Mortier normalisé ; 3sable/1ciment/0,5 Eau).

**Tableau (IV.3) : Classe de résistance de ciment**

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)	
	2 Jours Limite Inf	28 Jours Limite Inf
32,5N (Normale) 32,5R (Rapide)	- $\geq 13,5$	$\geq 32,5$ $\geq 32,5$
42,5 42,5R	$\geq 12,5$ $\geq 20$	$\geq 42,5$ $\geq 42,5$
52,5 52,5R	$\geq 20$ $\geq 30$	$\geq 52,5$ $\geq 52,5$

✓ **Résistance à une attaque physique ou chimique**

**IV-2- 6 Domaines d'utilisation des différents ciments [38]**

Le domaine essentiel d'utilisation du ciment [tableau (IV.4)] est constitué, nous l'avons dit, par le béton et ses applications et, dans une bien moindre mesure, par les mortiers. Nous considérerons donc ici seulement le béton.

À partir des différentes catégories de ciment et de leur dosage, il est possible d'obtenir une infinité de bétons aux caractéristiques pouvant varier en fonction de la nature des granulats, de leur mélange, des colorants, des adjuvants, de la mise en œuvre, des traitements ultérieurs, etc. Ainsi, le béton s'adapte aux exigences de chaque réalisation par ses performances comme par son aspect : on peut lui demander une résistance mécanique aux chocs, à l'usure, aux agents agressifs, ainsi que des caractéristiques de légèreté, lourdeur, isolation thermique et/ou phonique, étanchéité, durabilité.

**Tableau (IV.4) :** Les différents domaines d'utilisation de ciment

<b>Ciment</b>	<b>Désignation</b>	<b>Utilisation</b>
Ciment Portland Ciment Composé	<b>CEM I</b> <b>CEM II</b>	<b>Tous travaux de béton armé</b>  -Bonne résistance  -Décoffrage rapide (Préfabrication)  -Bétonnage par temps froids
Ciment au laitier Et pouzzolanique Ou au laitier et cendre.	<b>CEM III</b> <b>CEM IV</b> <b>CEM V</b>	-Béton de masse (barrage)  -Béton de fondation (Sol agressif)  -Bétonnage en temps chaud  -Eau usée  -Travaux souterrains  -Réservoirs d'eau

**IV-2- 7 Hydratation du ciment Portland [39]**

La mise en contact de l'eau et du ciment est appelée le gâchage. Durant cette étape, le ciment s'hydrate selon des réactions complexes. L'étude des mécanismes d'hydratation de chaque phase pure permet une première approche de la compréhension de l'hydratation du ciment Portland.

## A- Évolution chimique

Le terme "hydratation" dans le domaine du ciment désigne l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre les constituants du ciment et l'eau. On distingue en réalité dans la pâte de ciment en cours d'hydratation deux types d'évolutions: une évolution chimique et une évolution mécanique.

## B-Principaux produits de l'hydratation

### ✓ Hydratation des silicates de calcium C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S

L'hydratation des silicates de calcium se fait selon trois réactions chimiques principales s'amorçant successivement puis devenant simultanées.

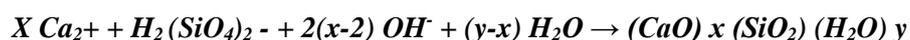
#### ➤ Dissolution du silicate tricalcique (C<sub>3</sub>S)

La dissolution intervient dès le gâchage du ciment ce qui rend le milieu très fortement basique. Les espèces majoritaires sont alors les ions calcium, les hydroxyles et les ions silicates ( $H_2SiO_4^{2-}$ ) formés selon la réaction exothermique suivante :



#### ➤ Croissance rapide du gel de C-S-H

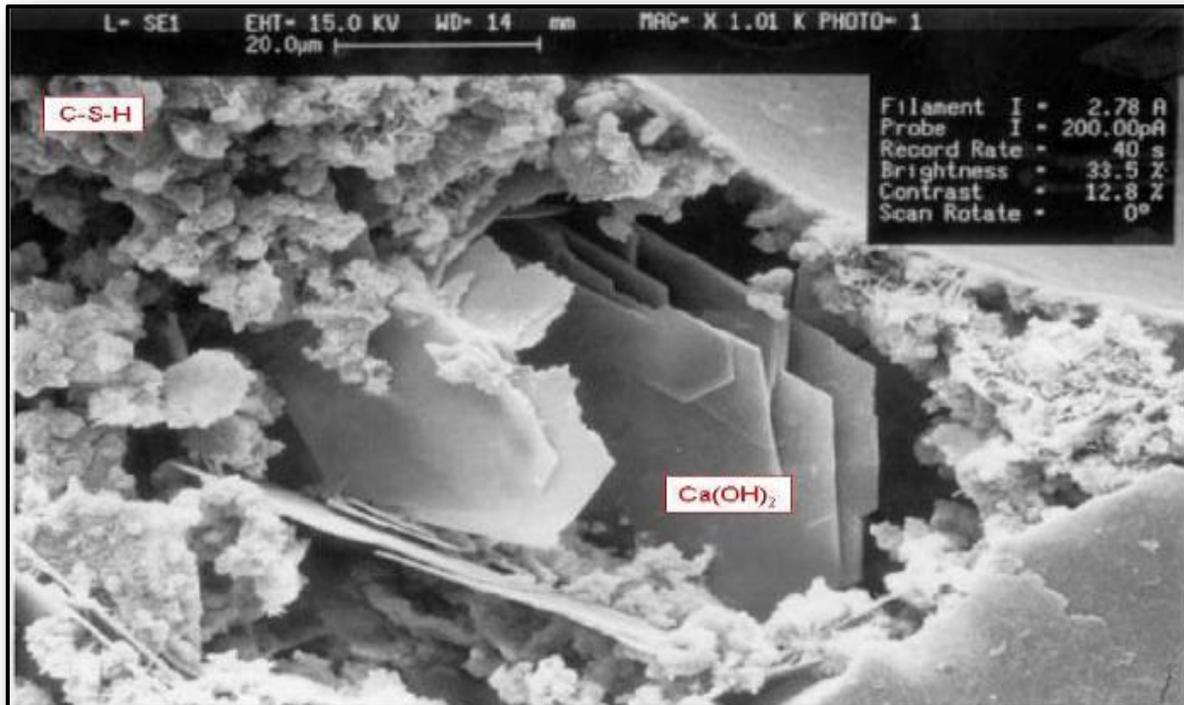
Après quelques minutes d'hydratation et pendant quelques heures, les silicates, les ions calcium et hydroxyles vont donner lieu à la nucléation d'une phase de silicates de calcium hydratés appelée C-S-H, dont le rapport molaire CaO/SiO<sub>2</sub> est inférieur à 3. Cette précipitation complexe peut être résumée par l'équation :



Le produit de cette réaction a fait l'objet de nombreuses études et notamment par diffraction des rayons X. Il a été démontré qu'il s'agit d'un gel, pas tout à fait amorphe, comportant une structure cristalline imparfaite. L'ordre à courtes distances (< 100 Å) existant au sein des phases C-S-H leur confère la propriété de nanostructures. C'est ce gel complexe qui est à l'origine des propriétés de cohésion du ciment.

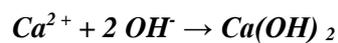
#### ➤ Précipitation de la Portlandite [figure (IV.3)]

Quelques heures après le début de l'hydratation, la concentration des ions calcium en solution et le pH deviennent très élevées (entre 12,4 et 13,5).



**Figure (IV.3) :** Image de la précipitation des C-S-H et des cristaux de pentlandite (lamelles hexagonales) obtenue en microscopie à balayage  $G = \times 1010$

Dans ces conditions l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$  ou « portlandite ») précipite selon la réaction :



#### ✓ Hydratation des aluminates

Les phases  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  conduisent aux mêmes produits d'hydratation. Cependant, la phase  $\text{C}_4\text{AF}$  présente une cinétique d'hydratation plus lente que le  $\text{C}_3\text{A}$ .

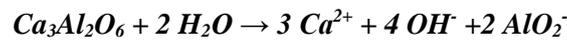
En présence d'eau, l'aluminate tricalcique réagit selon une réaction auto catalytique rapide conduisant à la formation des aluminates hydratés :  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_2\text{AH}_8$  qui se recombinent en  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , forme la plus stable à température ambiante. La cinétique de ces réactions est telle qu'au bout de quelques minutes un raidissement rapide de la pâte est observable. Ce phénomène, qui est appelé « prise rapide », augmente la consistance de la pâte sans développer aucune propriété de résistance mécanique et conduit donc à un matériau cimentaire de mauvaise qualité. Par conséquent,

l'hydratation de l'aluminate tricalcique est régulée grâce à l'ajout de 5% de gypse ( $\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$ ), permettant d'obtenir des cinétiques d'hydratation comparables à celles des silicates de calcium. Il est alors possible de distinguer quatre étapes dans le processus d'hydratation de l'aluminate tricalcique en présence du régulateur de prise.

➤ **La phase initiale**

Le  $\text{C}_3\text{A}$  et le gypse se dissolvent selon une réaction exothermique aboutissant à une solution sursaturée par rapport aux hydrates. Les ions se recombinaient alors quasi instantanément en cristaux de trisulfoaluminate de calcium hydraté appelés « ettringite ».

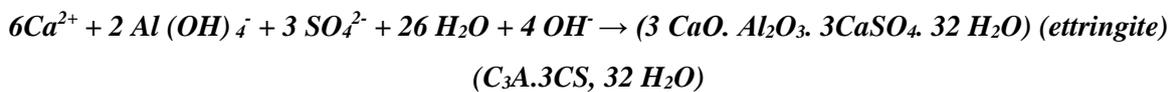
❖ **Dissolution du  $\text{C}_3\text{A}$  et du gypse**



Et

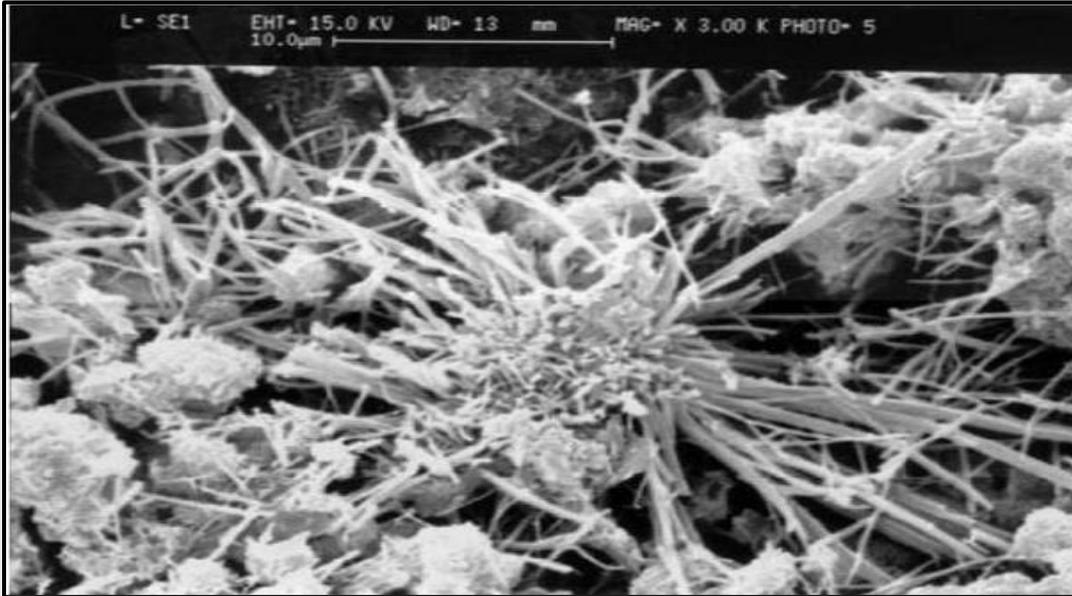


❖ **Précipitation de l'ettringite**



L'ettringite, ainsi formée, précipite à la surface des grains de  $\text{C}_3\text{A}$  évitant l'hydratation rapide de ces derniers en  $\text{C}_x\text{AH}_y$  à l'origine du phénomène de prise rapide. Dans les pâtes de ciment, l'ettringite se présente généralement sous forme de fines aiguilles enchevêtrées (**Figure (IV.4)**).

L'ettringite, ainsi formée, précipite à la surface des grains de  $\text{C}_3\text{A}$  évitant l'hydratation rapide de ces derniers en  $\text{C}_x\text{AH}_y$  à l'origine du phénomène de prise rapide. Dans les pâtes de ciment, l'ettringite se présente généralement sous forme de fines aiguilles enchevêtrées.



**Figure (IV.4) :** Image des cristaux d'ettringite obtenue en microscopie à balayage.

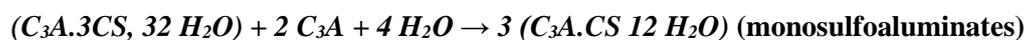
➤ **La période dormante**

Pendant cette période, l'ettringite continue à se former.

➤ **L'épuisement du gypse**

10 à 24h après le gâchage, le gypse a été totalement consommé. Ainsi, l'excès de  $C_3A$  va réagir avec l'ettringite formée précédemment ce qui constitue l'unique source de sulfates.

En présence d'eau, ces constituants vont donner lieu à la formation des monosulfoaluminates de calcium hydratés selon une réaction provoquant la dissolution rapide de l'aluminate en excès :



➤ **Réactions à long terme**

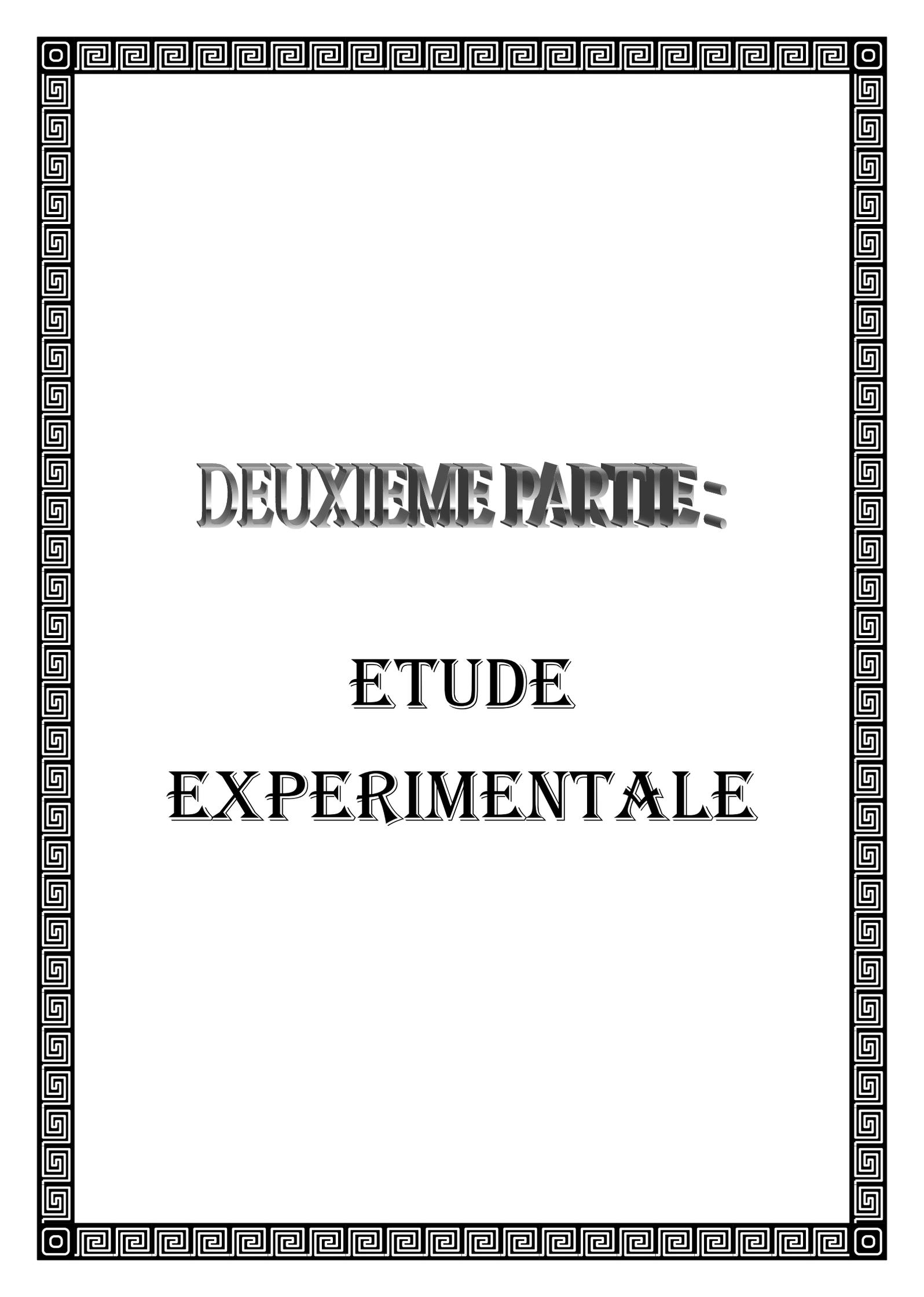
La formation d'hydrates de moins en moins riches en sulfates induit un ralentissement dans la cinétique des réactions. De plus, au-delà d'un mois, le monosulfoaluminate, l'aluminate et l'aluminoferrite de calcium anhydre ( $C_4AF$ ) réagissent lentement pour former des aluminoferrites de calcium hydraté complexes, incluant des ions aluminates, ferrates, sulfates, calcium et hydroxydes.

#### **IV-2- 8 Conclusion**

Les recherches qui sont présentées lors de cette étude bibliographique, notamment sur le plan expérimental, nous montrent que le procédé de fabrication du ciment portland nécessite une énergie importante et dégagent du CO<sub>2</sub> et de la poussière causant la pollution de l'environnement, d'où le recours à l'utilisation des ajouts cimentaires comme remède à ces problèmes.

- diminuer la quantité de clinker utilisé d'où un gain d'énergie.
- préserver l'environnement.
- améliorer les propriétés du ciment.

L'objectif principal de ces ajouts consiste à qualifier la résistance mécanique de mortiers parce que les additions pouzzolanique n'ont pas d'activité chimique au contact de l'eau seule mais elles réagissent en présence de la chaux.



**DEUXIEME PARTIE:**

**ETUDE**

**EXPERIMENTALE**



# CHAPITRE V

PRÉSENTATION DU BARRAGE DE L'OUED

FODDA

## V- Présentation du barrage de l'Oued Fodda

### V-1 Situation et objectif [40]

La mobilisation des ressources hydrauliques des surfaces qui assurent les besoins des périmètre du Chéllif ainsi que le périmètre de Mina en eau d'irrigation et en eau potable pour les agglomérations de Berrouaghia , Tiaret et Relizane sont constituées d'une infrastructure de plusieurs grands barrages réservoirs tel que le barrage de Ghrib, de l'Oued Fodda, de Sidi Yaccoub, Bakhada, Sidi M'Hamed Ben Aouda, Gar-Gar, Hraza et celui d'Ouled Melouk.

La vallée du Chéllif, orientée d'Est en Ouest, est constituée d'une série de cuvettes ; d'amont en aval, on trouve 3 périmètres successifs :

- le périmètre du haut-Chéllif (barrage du Ghrib) ;
- le périmètre du moyen Chéllif (barrage de l'Oued Fodda) ;
- le périmètre du bas Chéllif.

### V-2 Périmètre de l'Oued Fodda [40]

#### V-2-1 Ouvrages constitutifs

Les ouvrages essentiels du périmètre sont :

- Le barrage de prise de Pontéba sur le Chéllif a été construit en 1868. Il se trouve à l'aval du confluent de l'Oued Fodda. Il permet de dériver dans la zone Ouest du périmètre une partie des eaux des barrages du Ghrib et de l'Oued Fodda.
- Le barrage réservoir de l'Oued Fodda (appelé aussi barrage steeg) (Photo (V.1)) : il assure la régularisation inter annuelle des eaux.
- Le barrage de prise des portes de fer, construit en béton précontraint en 1938 à l'aval du barrage, son rôle est d'assurer la continuité des débits d'irrigation pendant les arrêts journaliers de l'usine hydroélectrique placée à l'amont.



Photo (V.1) : Barrage de l'Oued Fodda

**V-2-2 Historique du barrage de l'Oued Fodda**

Le barrage de l'Oued Fodda a été construit sur l'Oued de même nom. Il a été mis en service en 1932, après plusieurs études établies et obstacles rencontrés, dont on peut citer :

-La stratigraphie du site, E.Ficheur (1911), fut le premier à indiquer l'emplacement du barrage en trois possibilités, l'un au confluent des oueds : Fodda et Bou-rourou, les deux autres légèrement en amont du barrage réalisé ;

-Le premier emplacement fut jugé par M. Lugeon (1920), comme s'appuyant sur les massifs calcaires beaucoup trop perméables pour que le barrage puisse se remplir ;

-Le problème des risques d'origine sismique et des risques d'envasement fut posé en 1924 au géologue A. Brives ;

-Le marché d'exécution fut approuvé le 18 février 1926, le projet a été accepté par l'entreprise Dufour ;

-En 1928 la construction a été commencée ;

-Un incendie détruisit les installations de chantier en 1929 ;

-En 1931, les travaux sont repris par l'entreprise Campegnon-Bernard.

En résumé, les entreprises ayant participé aux travaux sont :

-L'entreprise Dufour pour les études et le début de la construction ;

-L'entreprise Campegnon-Bernard pour la fin de la construction et tous les aménagements sauf pour la vanne de prise d'eau ;

-La société Escher Wyss met en place la vanne de prise d'eau ;

-La société « les travaux souterrains » pour l'étanchéité des fondations.

**V-2-3 Equipements et fonctionnement**

Le barrage de l'Oued Fodda est équipé de :

-121Km de conduites forcées construit en béton précontraint dont 45Km conduites principales et 76Km conduites secondaires ;

-124Km canaux principaux et secondaires ;

-185Km d'anciens canaux principaux et secondaires.

De ce barrage, il part un canal principal, se départageant à l'aval du village El-Karimia, ces canaux assurent l'alimentation de la zone Est du périmètre et une conduite forcée se départageant à l'amont du village de l'Oued Fodda, ces canaux assurent l'alimentation de la zone Ouest du périmètre.

**V-2-4 Utilisation**

Ayant une capacité de 228 millions de m<sup>3</sup>, le barrage de l'Oued Fodda assurait un débit régularisé garant de 70 millions m<sup>3</sup> en 1966.

Les superficies irriguées sont :

- 6000 ha pour la zone Est ;
- 13000 ha pour la zone Ouest.

Les cultures sont essentiellement des agrumes, des cultures maraichères, des fruits, du fourrage artificiel et du coton.

L'équipement est complété par une usine au pied du barrage de l'Oued Fodda pour l'exploitation de l'énergie hydraulique (elle fut arrêtée en 1965 pour cause d'envasement).

De cette dernière, il part en deux lignes de 60Kv :

- Une vers Relizane ;
- Une vers El-Khemis ;
- Et une ligne de 30Kv pour les services auxiliaires et l'alimentation du barrage.

Sur deux années de fonctionnement, la production moyenne est de 13.6 millions de KWh.

**V-3 Hydrologie [40]****V-3-1 Caractéristiques physiques du bassin versant**

La surface du bassin versant est de 800Km<sup>2</sup>, sa longueur est de 48Km, son altitude varie entre 280 et 1985 m, l'altitude moyenne est de 838 m. Le relief est vigoureux, son coefficient de ruissellement moyen est de 22 %. Selon Chaumont (1920), trois zones sont distinguées pour ce bassin :

Le massif jurassique de l'Ouarsenis, qui alimente surtout Oued Sly ;

La zone des formations détritiques du Flysch et des marnes, qui couvre presque la totalité du bassin occidental et septentrional avec une érosion et une tendance au glissement important ;

Le haut bassin entaillé dans le marno-calcaire qui a pour conséquences des ruissellements intenses.

Au total, on a 55% de terrains crétacés et 45% de terrains essentiellement marneux. Le pourcentage de reboisement d'environ 30%, est faible pour une région au relief abrupt. La forêt se trouve d'ailleurs localisée dans les terrains crétacés qui sont les plus résistants à l'érosion.

V-3-2 Données climatiques

Le climat de type méditerranéen, s'échelonne du semi-aride pour les parties basses au sub-humide pour les sommets dépassant 1100 m. La température moyenne annuelle est d'environ 15 °C, avec température minimale = -10 °C et maximale= +44 °C.

V-3-3 Pluviométrie

Les annuaires hydrologiques d'Algérie donnent pour le bassin versant une pluviométrie moyenne annuelle de 554,6 mm : voir tableau (V.1) et figure (V.1), calculée par la méthode de Thiessen à partir des observations des stations pluviométriques voisines, sur une période de 20 ans.

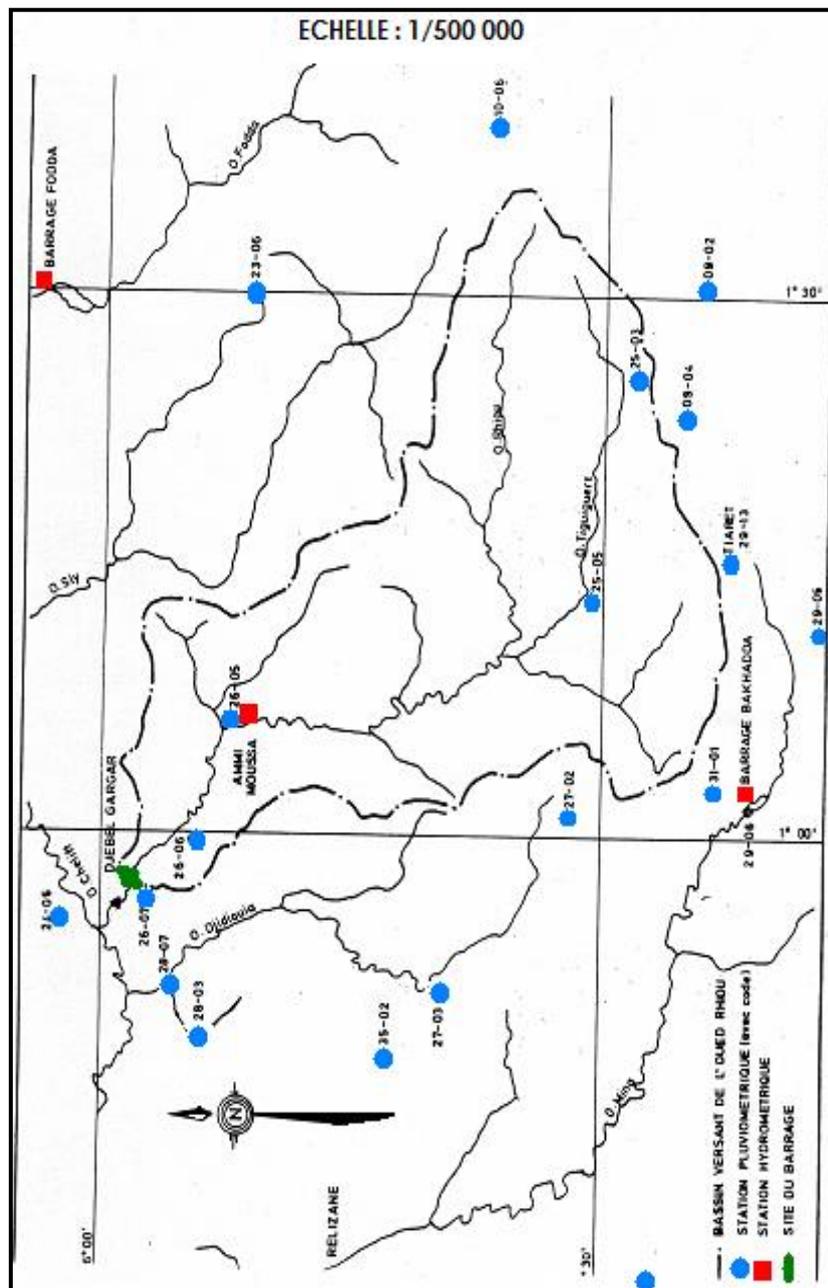


Figure (V.1): Station pluviométriques et hydrométrique situées dans le bassin versant.

Tableau (V.1) : Evolution de la lame d'eau

	Altitude (m)	Pluviométrie annuelle (mm/an)
El Attaf	165	708
Oued Fodda	500	468
Kherba	229	460
Oued Sly	115	363
Tissemsilt	889	417
Teniet El Haad	1100	611
Borj Bounaama	900	697

### V-3-4 Etude des apports [41]

L'apport moyen annuel de l'Oued Fodda est de  $82,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Depuis 1942, l'apport annuel maximum enregistré a été de  $8,24 \times 10^7 \text{ m}^3$  (1997-1998), l'apport minimum a été de  $1,17 \times 10^7 \text{ m}^3$  (1996-1997), la plus forte crue connue a été estimée à  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  : voir tableau (V.2).

En appliquant la formule de Glindotti, on obtient les résultats suivants :

- Tous les 10 ans : une averse de 87 mm/24h, débit de crue de  $308 \text{ m}^3/\text{s}$  ; ( $26,6 \text{ hm}^3/24\text{h}$ )
- Tous les 100 ans : une averse de 139 mm/24h, débit de crue de  $711 \text{ m}^3/\text{s}$  ; ( $61,4 \text{ hm}^3/24\text{h}$ )
- Tous les 1000 ans : une averse de 180mm/24h, débit de crue de  $1204 \text{ m}^3/\text{s}$  ; ( $104 \text{ hm}^3/24\text{h}$ ).

Tableau (V.2) : Apports total annuel du barrage de l'Oued Fodda

Année	Apports total annuel ( $10^6 \text{ m}^3$ )
1990-1991	149
1991-1992	159
1992-1993	30
1993-1994	114
1994-1995	112
1995-1996	59
1996-1997	11,7
1997-1998	82,4
1998-1999	51,9
1999-2000	142
2000-2001	142
2001-2002	48,6
2002-2003	48,6
2003-2004	48,6
2004-2005	122
2005-2006	35,3
2006-2007	70,2
2007-2008	70,2
Moyenne	82

### V-3-5 Etude de régularisation [41]

L'étude des apports et leur distribution établie d'après le graphique de la loi de Gibrat-Galton permet de déterminer les probabilités de respecter le débit garanti Q à l'utilisateur, et les probabilités de manque d'eau. En tenant compte de l'envasement de la cuvette (1,44 millions de m<sup>3</sup> par an) et pour une capacité de retenue de  $2,28 \times 10^2$  millions de m<sup>3</sup>, le débit régularisé garanti Q diminue annuellement : voir tableau (V.3).

**Tableau (V.3) :** Evolution du débit Q pendant le temps

Année	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010
Q	70	68	64	60	54.5	49	35

### V-3-6 Evaporation [41]

A partir des observations de 3 années (2004-2007), l'évaporation moyenne annuelle a été estimée de  $6,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, les mesures directes par bac Colorado donnent les résultats mentionnés dans le tableau (V.4).

**Tableau (V.4) :** Diminution du débit régularisé Q durant le temps

Année	Hauteur totale d'évaporation sur le plan d'eau libre (mm)	Volume totale d'évaporation seule sur la retenue (hm <sup>3</sup> )
2004-2005	1,27 10 <sup>3</sup>	8,09
2005-2006	1,26 10 <sup>3</sup>	7,35
2006-2007	1,119 10 <sup>3</sup>	6,94

### V-3-7 Qualité chimique des eaux [41]

Les eaux de ruissellement sont relativement peu chargées en moyenne de 800mg/litre pour l'eau à la sortie du barrage.

La teneur la plus forte est celle des ions SO<sub>4</sub>= 350mg/litre : voir tableau (V.5).

**Tableau (V.5) :** Analyse chimique des eaux-teneurs en mg/litre (Laboratoire d'Algérienne des eaux (A.D.E) de la wilaya de chlef, 2007)

Date	Ca	Mg	Na	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>	PH	Degré Hydro	Résidu sec mg/l
17/11/2000	97	33	118	108	340	77	7,5	40	845
17/11/2001	94	52	113	127	390	70	7,5	45	866
16/02/2002	100	48	128	128	396	81	7,5	45	860
25/11/2003	95	33	104	112	331	65	7,5	35	780
22/08/2004	65	48	105	102	337	58	7,5	36	745
03/07/2007	102	28	101	102	315	61	7,5	37	757

### V-3-8 Apports solides [41]

La capacité est le principal indicateur de valeur d'un réservoir, notamment en Algérie où les apports solides sont très irréguliers d'une année à l'autre. Le volume régularisé pour un barrage est lié à la capacité et au niveau de défaillance admis. Si la capacité est réduite du fait de l'envasement, cela entraîne une diminution soit du volume fourni annuellement, soit du niveau de garantie de l'approvisionnement avec toutes les conséquences que cela peut avoir. Pour le barrage de l'Oued Fodda, la capacité initiale qui était de 228 millions de m<sup>3</sup>, n'est plus que 143,2 millions de m<sup>3</sup> en 1964, n'est que 130 millions de m<sup>3</sup> en 1986, n'est que 112 millions de m<sup>3</sup> en 1994, n'est que 125,5 millions de m<sup>3</sup> d'après l'étude bathymétrique effectuée en 2003 par ANBT (Agence Nationale des Barrages et Transfert).

On constate donc un envasement moyen annuel de 1.44 millions de m<sup>3</sup>. Ces chiffres ont été fournis par les stations de mesure demeurant avant tout, des ordres de grandeur des appréciations quantitatives des débits liquides et solides, avec cependant une certaine marge de précision. Les mesures de débit solide ne concernent généralement que le matériau fin en suspension, la charge grossière (charriage de fond) la plus délicate à évaluer, demeure soit inconnue, soit estimée empiriquement.

### V-4 Géologie : [40]

#### V-4-1 Introduction

Le taux d'envasement du barrage dépend essentiellement de la nature des roches constituant le bassin versant. Le barrage est construit dans le massif calcaire du Koudiat Larouach, comprenant les Djebèles Akbet Mali (628 m) ; Arfa (623m) et Taksebt (642m).

#### V-4-2 Stratigraphie et Faciès

La série de cet anticlinal (Gourinard, 1946) comprend les termes suivants, mis en évidence dans la coupe ci-jointe en figure (V.2) en annexes :

-Les calcaires « inférieurs », bleus en gros bancs (50 à 70 cm) à cassure un peu spathique, ils sont compacts et durs. On distingue deux horizons a et b, celui du haut (b) étant caractérisé par la présence de rognons siliceuse inter stratifié.

-Les calcaires « intermédiaires », d'une puissance de 100 m, ils se présentent en bancs plus minces de l'ordre de 15 cm, bien réglés. La cassure est bleue, mais à l'affleurement, ils sont recouverts d'une patine rouille.

-Les calcaires « supérieurs », d'une puissance de 150 m, ils sont formés de bancs de 20 cm d'épaisseur, durs, bien stratifiés, parfois séparés par de minces lits de marnes blanchâtres très calcaires.

-La couche rouge : cette couche est d'une puissance de 50 m, elle est constituée de marnes durcies et esquilleuses. La coloration n'est pas uniforme. On trouve des parties vertes, se distinguant des parties rouges par le degré d'oxydation du fer.

-Le jurassique « supérieur et néocomien », d'une puissance de 200 m, il est formé de couches homogènes avec alternance de marnes et de calcaires marneux grisâtres.

-Le post-néocomien : il est constitué essentiellement de marnes schistoïdes noires avec des bancs quartzites et de calcaires intercalés.

Le terme « Flysch » a été improprement attribué à ce dernier faciès, car les bancs gréseux sont en nombre très restreints et discontinus.

### **V-4-3 Tectonique**

L'anticlinal du Koudiat Larouah est constitué par un pli postérieur du dépôt de la couverture créacée. L'axe de cet anticlinal est orienté d'Est en Ouest. Il fait surgir de la couverture post-néocomienne les faciès décrits ci-dessus, fortement érodés par les Oueds et Bou Rourou.

Le soulèvement de ce pli, plus important vers l'Ouest, donna lieu à deux réseaux de failles :

-Un réseau Nord-Sud, constitué par la faille Ouest présente une grande hauteur de sol (180 m environ) et la faille Est, moins profonde mais plus longue.

-Un réseau Est-Ouest, constitué essentiellement par les failles concernant le versant Nord de l'anticlinal, donnant lieu à un relief en gradin caractéristique. Le flanc sud de l'anticlinal a réagi plastiquement.

### **V-4-4 Etude sismique**

La mise en eau donna lieu en 1933 à de fréquents ébranlements du sol, comparables à des secousses sismiques. Une étude de la compagnie générale de géophysique recherche les causes de ces secousses.

-D'une part, par analyse chimique et électrique d'eaux de résurgence, la compagnie voulut vérifier la possibilité qu'auraient les eaux de retenue d'atteindre une éventuelle couche de trias sous-jacente et par dissolution des sels, de créer des vides dont le comblement par éboulement serait à l'origine des secousses.

-D'autre part, par une étude sismique, on détermina la forme des secousses et la position des centres d'ébranlement.

Il résulte de ces études que les secousses présentent la forme d'un choc bref aperiodique et à front raide, incompatible avec une hypothèse d'éboulement dont la forme serait nécessairement moelle.

Il est à noter que le barrage n'a subi aucun désordre fatal lors du séisme du septembre 1954, ni à celui d'octobre 1980.

## V-5 Conclusion

Le barrage de l'Oued Fodda qui est alimenté par un bassin versant de 800Km<sup>2</sup> dispose en principe d'un apport important permettant un remplissage annuel sans difficulté.

A partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, la rivière débitait des volumes quelques fois dépassant les valeurs moyennes mensuelles, il arrivait même que la retenue atteignait la côte des plus hauts niveaux avant le mois d'avril.

Depuis 1981 que le régime de l'Oued a changé brusquement, ce changement ayant pour cause principale le bouleversement brutal des conditions climatologiques. Il fut constaté durant l'hiver précédent que les averses créatrices des crues ne se sont pas manifestées. Les pluies qui s'abattaient sur le bassin versant étaient fines et de courtes durées.

A titre d'exemple, durant l'année 82 / 83, la capacité était de l'ordre de 375,8 mm de pluie sur une moyenne annuelle de 474 mm soit 79%, quant aux apports, ils étaient vraiment faibles  $4,93 \times 10^7 \text{ m}^3$  sur  $8,40 \times 10^7 \text{ m}^3$  équivalent à un apport légèrement supérieur à 1/2 du volume moyen annuel d'après la direction centrale d'exploitation (bilan de critique de l'année hydrologique 82 / 83). Sur ce barrage, les écoulements d'amont sont perturbés par une sécheresse qui dévie depuis deux ans.

Durant l'année hydrologique 1983, il a été possible de réaliser un gain de l'ordre de 10,53 millions de m<sup>3</sup> stocké dans la retenue.

Du fait des soutirages, ce taux a subi un abaissement progressif, car aussi l'évaporation de la retenue avec  $4,72 \times 10^6 \text{ m}^3$  se situe à 10% de l'apport annuel. Par conséquent les besoins en eaux pour l'irrigation n'ont été satisfaits qu'à moins de moitié.

Selon l'étude bathymétrique effectuée par l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (ANBT) en 2003; l'ouvrage perd annuellement un taux de 1.44 Hm<sup>3</sup>/an. Après 71 ans de sa mise en eau en 1932 avec une capacité de 228 Hm<sup>3</sup>, le barrage de l'Oued Fodda a perdu un volume de 103Hm<sup>3</sup>, soit un taux de 45%. Si on suppose que l'envasement a continué de 2003 à 2015 avec la même fréquence, le volume de la vase actuel est environ de 120 Hm<sup>3</sup>.

Le dragage du barrage de l'Oued Fodda donc devient une opération prioritaire pour récupérer le volume perdu soit 120 Hm<sup>3</sup>. Cette quantité d'eau est nécessaire pour l'alimentation en eau potable de la population avoisinante et l'irrigation des terres agricoles du plateau du bas Chélif.



# CHAPITRE VI

CARACTERISATION DE SÉDIMENTS DU  
BARRAGE DE L'OUED FODDA

## VI- Caractérisation de sédiments du barrage de l'Oued Fodda

### VI-1 Introduction

Pour valoriser la vase déposée dans la retenue et aussi pour déterminer les régions instables dans le bassin versant, il nous a semblé intéressant, dans le cadre de ce travail, d'étudier l'aspect physico-chimique, minéralogique et rhéologique afin de déterminer les types d'argiles existant dans la vase ainsi que sa composition chimique.

A la fin grâce aux résultats trouvés de ces analyses on déterminera le domaine de valorisation de la vase étudiée.

### VI-2 Localisation de l'échantillon étudié

L'échantillon de vase qui fait l'objet de notre étude a été recueilli à 3 m en amont de la digue du barrage de l'Oued Fodda : voir figure (VI.1), le prélèvement a été fait par la technique suivante : **Méthode de la benne preneuse** : voir photo (VI.1)



Photo (VI.1) : Benne preneuse



Figure (VI.1) : Localisation d'échantillon prélevé

Une drague à benne preneuse [42] est en fait une grue montée sur un ponton, lui-même stabilisé par des béquilles. Au bout du câble de levage est fixée une benne preneuse formée de deux grappins à mâchoires, ressemblant à la gueule d'un dinosaure. La benne prend les sédiments en s'enfonçant grâce à son poids et à l'action des mâchoires. Elle permet de ramener une quantité suffisante de sédiments (quelques centaines de grammes) pour effectuer des analyses granulométriques en laboratoire. La surface ainsi échantillonnée est d'environ 4 dm<sup>2</sup>.

Au contact du fond, le contrepoids tombe sur le système de déclenchement et entraîne la rotation de la mâchoire et la fermeture de la benne. Le sédiment ainsi piégé est peu perturbé et non lessivé. Il donne lieu à une première interprétation visuelle (Garlan T., 2004).

### VI-3 Caractérisation physique et géotechnique de la vase de l'Oued Fodda

Les particules élémentaires des sédiments fins ont des dimensions et formes très variées de type sable fin, limons et argile qui contribuent fréquemment à réduire la rentabilité d'une installation en imposant des travaux très onéreux d'entretien.

La connaissance des propriétés physiques, chimiques et géotechniques des particules élémentaires très diverses qui constituent ces sédiments fins, ainsi que les caractéristiques du milieu aqueux qui les imprègnent sont nécessaires pour connaître la nature de cette vase déposées dans la retenue.

#### VI-3-1 Propriétés physiques

Une substance est constituée d'un sol et de l'eau dont leurs caractéristiques influent directement sur le comportement du mélange (sol-eau).

Une étude approfondie de cette mixture homogène qui est composée de proportions très variables dont les dimensions des grains ne dépassent pas les 100 $\mu$ m, doit tenir compte des interactions de ces deux phases.

##### VI-3-1-1 Phase liquide (eau)

Elle est caractérisée par :

- Sa masse volumique  $\rho_W = 1000\text{kg/m}^3$
- Sa viscosité :  $\eta=0.001 \text{ Pa.s}$  pour  $t^\circ=20^\circ\text{C}$ .

##### VI-3-1-2 Phase solide

La phase solide se caractérise par sa masse spécifique  $\gamma_S$  ainsi de leur répartition granulométrique.

##### VI-3-1-2-1 La teneur en eau ( $\omega$ )

La teneur en eau naturelle ( $\omega$ ) pour un certain volume de sol est le rapport du poids de l'eau au poids de la matière sèche. Elle se calcule par dessiccation de l'échantillon.

#### ❖ Conduite de l'essai

- Peser une boîte pétri (P1) ;
- Prélever un échantillon ;
- Placer l'échantillon sur la boîte de pétri ;

- Peser l'échantillon avec la boîte de pétri (P2) ;
- Mettre à l'étuve à 105°C jusqu'à dessiccation et poids stable (environ 24 h) ;
- Peser l'échantillon sec avec la boîte de pétri après la sortie de l'étuve (P3).
- En déduire la teneur en eau w% de l'échantillon par la relation :

$$\omega(\%) = \left( \frac{W_w}{W_s} \right) \cdot 100\% \dots\dots\dots (VI-1)$$

$$= [(P2-P3)/ (P3-P1)].100$$

Sachant que :

Ww: Poids de l'eau (g)

Ws : Poids sec de l'échantillon en (g)

**La teneur en eau de la vase étudiée est égale à 40.85%.**

#### **VI-3-1-2-2 Masse spécifique des grains solides $\gamma_s$ (g/cm<sup>3</sup>)**

Le poids spécifique des grains solides  $\gamma_s$  est déterminé par l'essai au pycnomètre : voir photo(VI.2).

##### **❖ Mode opératoire**

- Prendre un pycnomètre vide et s'assurer qu'il est sec ;
- Peser le pycnomètre vide : masse W1 ;
- Remplir le pycnomètre jusqu'à la base du col d'eau distillée, éliminer toutes les bulles d'air et compléter le remplissage du pycnomètre à l'eau distillée jusqu'au repère ;
- Peser de nouveau le pycnomètre (le pycnomètre contient maintenant l'eau distillée) : masse W2 ;
- Vider le pycnomètre, le nettoyer et le sécher ;
- Verser une quantité de vase tamisée à 0,2mm dans le pycnomètre ;
- Peser de nouveau le pycnomètre (le pycnomètre contient maintenant l'échantillon de sol) : masse W3 ;
- Compléter avec de l'eau distillée jusqu'à la graduation 250 cm<sup>3</sup> (On veillera à verser l'eau doucement sur les parois pour ne pas recharger l'eau avec de l'air) ;
- Peser de nouveau le pycnomètre (le pycnomètre contient maintenant le sol et l'eau jusqu'à la graduation 250 cm<sup>3</sup>) : masse W4.

## ❖ Calcul

$\gamma_s$  est le quotient du poids de ses grains solides par leur volume absolu  $V_s$  qui se calcul d'après la formule :

$$V_s = \frac{[(W_2 - W_1) - (W_4 - W_3)]}{\rho_w} \dots\dots\dots (VI-2)$$

Avec :

W1 : poids du pycnomètre vide (g).

W2 : poids du pycnomètre avec l'eau distillée (g).

W3 : poids du pycnomètre + sol (g).

W4 : poids du l'ensemble (pycnomètre, sol et l'eau distillée) (g).

$\rho_w$  : Le poids volumique de l'eau est en fonction de la température (exemple à  $t=20^\circ, \rho_w=0.9982 \text{ g/cm}^3$ ).



**Photo (VI.2) : Pycnomètre vide**

En calculant le poids de l'échantillon ( $w_s$ ) tel que :

$$W_s = W_3 - W_1 \dots\dots\dots (VI-3)$$

On obtient le poids spécifique des grains solides  $\gamma_s$  en ( $g/cm^3$ )

$$\gamma_s = W_s / V_s \dots\dots\dots (VI-4)$$

$\gamma_s$  : poids spécifique des grains solides ( $g/cm^3$ ).

$W_s$  : masse du sol sec.

$V_s$  : volume absolu des grains solides.

**L'échantillon de la vase de l'Oued Fodda a des valeurs du poids spécifique qui varient entre 2.5 et 2.67  $g/cm^3$  la valeur moyenne des essais de notre échantillon est de 2.5  $g/cm^3$ .**

**VI-3-1-2-3 Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique caractérise les granulats en déterminant la répartition des grains constituant le sol suivant leurs tailles. Elle consiste à partir d'un échantillon de sol pesé à déterminer en poids la distribution des grains constituant le sol suivant leurs dimensions au moyen des tamis étagés. Cette détermination se fait par le tamisage sous l'eau pour les éléments inférieurs à 500 $\mu m$  et par la sédimentométrie pour les éléments inférieurs à 80 $\mu m$ .

Une analyse granulométrique est caractérisée par :

-Un coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen :  $C_u = d_{60} / d_{10} \dots\dots\dots (VI-5)$

Avec :  $d_y$  diamètre du tamis laissant passer y% du matériau tamisé.

-Si  $C_u < 2 \longrightarrow$  Le sol présente une granulométrie uniforme (serrée).

-Si  $C_u > 2 \longrightarrow$  Le sol présente une granulométrie étalée.

-Un diamètre nominal  $d_{50}$

-Un coefficient de courbure  $C_c = (d_{30})^2 / d_{60} \cdot d_{10} \dots\dots\dots (VI-6)$

- Si  $1 < C_c < 3 \longrightarrow$  Le sol présente une courbe bien graduée.

- Si une des deux conditions n'est pas satisfaite  $\longrightarrow$  Le sol présente une courbe mal graduée.

**VI-3-1-2-3-A Analyse granulométrique sous l'eau****❖ Prise et préparation de l'échantillon :**

Le poids de l'échantillon  $W$  soumis à l'essai est fonction de la dimension maximale  $D$  des éléments les plus gros, on prend :  $200 D < W < 500 D$  Avec :  $W$  : exprime en grammes et  $D$  : exprime en mm.

Cette limitation du poids à pour but : d'une part de réaliser l'essai sur une fraction suffisamment importante et représentative du sol, d'autre part d'effectuer des tamisages successifs avec une quantité limitée d'éléments dans chacun des tamis employés. Dans notre cas ; nous avons un sol fin et le tamisage se fait sous l'eau.

Le poids de l'échantillon est de 500 g.

**❖ Mode opératoire :**

- Constituer la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de haut vers le bas après avoir peser d'eux vide : voir photo (VI.3).
- Mettre l'échantillon dans le tamis supérieur.
- On mouillée l'échantillon.
- Compléter le tamisage à l'aide d'un pinceau pissette.
- Récupérer les particules se trouvant dans le fond qui ferme la colonne.
- Mettre les tamis dans l'étuve sous une température de  $105^{\circ}\text{C}$  pendant une durée de 24 heures : voir photo (VI.4).
- On pèse les tamis avec les refus.



**Photo (VI.3) :** Les tamis dans l'ordre décroissant **Photo (VI.4) :** Les tamis dans l'étuve

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage de la vase de l'Oued Fodda sont regroupés dans le tableau(VI.1) ci-dessous :

**Tableau (VI.1) : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage de la vase de l'Oued Fodda**

N°	Ouverture des mailles (µm)	Refus (g)	Refus (%)	Tamisât (g)	Tamisât (%)
01	1000	0,50	0,10	499,50	99,90
02	750	0,40	0,08	499,10	99,82
03	630	0,20	0,04	498,90	99,78
04	500	0,00	0,00	498,90	99,78
05	400	0,00	0,00	498,90	99,78
06	315	0,00	0,00	498,90	99,78
07	200	0,20	0,04	498,70	99,74
08	160	0,20	0,04	498,50	99,70
09	125	0,40	0,08	498,10	99,62
10	100	0,00	0,00	498,10	99,62

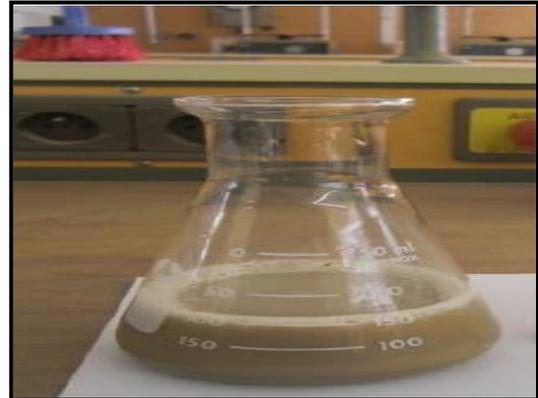
#### ❖ Interprétation des résultats :

Suivant les résultats qu'on a trouvée par l'analyse granulométrique de la boue du barrage de l'Oued Fodda, on peut conclure que c'est un sol fin telle que les dimensions de plus de 99 % de la masse de l'échantillon analysée est inférieure à 100µm. Autrement dit, seulement 1.9 g par 500 g (la masse totale de l'échantillon) a une dimension supérieure à 100 µm. C'est pour cela qu'on peut rien dire sur la classification de ce sol ni tracer la courbe granulométrique sans passer par l'analyse granulométrique par sédimentométrie qui sera l'objet du travail pratique suivant.

**VI-3-1-2-3-B Analyse granulométrique par sédimentométrie****❖ Mode opératoire :**

- Le tamisât de 80 $\mu$ m est recueilli (lors d'un essai de tamisage par voie humide) avec son eau de lavage dans un bac ;
- On laisse décanter, une fois redevenue claire, l'eau est siphonnée sans entraîner d'éléments fins ;
- On porte en suite le bac dans une étuve pour éliminer l'eau par évaporation ;
- Le tamisât séché est désagrégé avec le pilon dans un mortier ;
- Prendre deux éprouvettes à essais de 1 litre de contenance.
  
- Prendre 20g de sol
- Mettre dans un récipient 60 cm<sup>3</sup> de défloculant (hexa-méta-phosphates de sodium à 5 %) et 440 cm<sup>3</sup> d'eau distillée pour obtenir une solution de 500 cm<sup>3</sup>, et laisser à imbiber à température ambiante.
- Diviser la solution obtenue (500 cm<sup>3</sup>) entre les 2 éprouvette à raison de 250 cm<sup>3</sup> chacune.
- Dans un erlenmeyer verser la solution de **l'éprouvette A** et ajouter 20 g d'échantillon : voir photo (VI.5)
- Disperser la suspension au moyen d'un agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant environ 3 minutes : voir photo (VI.6)
- Verser la suspension dans **l'éprouvette A** (veillez à bien rincer le récipient et les ailettes de l'agitateur pour ne pas perdre le matériau).
- le volume est complété par l'addition d'eau distillée jusqu'à 1 litre.
- Prendre la deuxième éprouvette « témoin » et la compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre. Cette éprouvette sera appelée dorénavant **l'éprouvette B**.
  
- Agiter à l'aide de l'agitateur manuel le contenu de **l'éprouvette A** pour l'homogénéiser,
- On note l'heure à laquelle à cesse l'agitation et on introduit dans l'éprouvette un densimètre.
- On déclenche le chronomètre ce qui définit le but de la sédimentation.
- A chaque mesure on note la densité et température aux temps suivants :

30sec, 1min, 2min, 4min, 10min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 24h : voir photo (VI.7)



**Photo (VI.6) :** Agitateur mécanique    **Photo (VI.5) :** Sol+440cm<sup>3</sup> d'eau distillée+60cm<sup>3</sup> de Défloculant



**Photo (VI.7) :** Les mesures de sédimentation à différent temps

❖ **Les calculs :**

**1- La viscosité dynamique en N.s/m ( $\eta$ ) :** il est calculé par la formule suivante :

$$\eta = \frac{1.79}{1+0.03368 T+0.00022 T^2} \dots\dots\dots (VI-7) ; \text{ en (milli pascal.sec)}$$

Avec :

T : la température

**2-Diamètre de la particule en m (D) :** il est calculé par la formule suivante :

$$D = \sqrt{\frac{18\eta H_r}{t \times (\gamma_s - \gamma_w)}} \dots\dots\dots (VI-8)$$

Avec :

$\eta$  : La viscosité dynamique

Hr : la distance entre le plan d'eau et le centre de gravité du densimètre sachant que Pour chaque lecture R, on tire à partir du tableau (VI.2) ci-dessous la valeur Hr.

t : temps de chute

$\gamma_s$ : Poids volumique des grains solides sachant que  $\gamma_s$  de notre échantillon est de 2.5 g/cm<sup>3</sup>

$\gamma_w$ : Poids volumique de l'eau sachant que  $\gamma_w=1.005$  g/cm<sup>3</sup>

**Tableau (VI.2) :** Les valeurs de Hr en fonction de la densité du mélange

R	Hr pour t > 2 mn en cm	Hr pour t < 2 mn en cm
1.000	18.78	19.49
1.001	18.46	19.17
1.002	18.14	18.85
1.003	17.82	18.53
1.004	17.50	18.21
1.005	17.15	17.57
1.006	16.86	17.41
1.007	16.54	17.25
1.008	16.22	16.93
1.009	15.90	16.61
1.010	15.58	16.29
1.011	15.26	15.97
1.012	14.94	15.65
1.013	14.62	15.33
1.014	14.30	15.01
1.015	13.98	14.69
1.016	13.66	14.37
1.017	13.34	14.05
1.018	13.02	13.73
1.019	12.70	13.41
1.020	12.38	13.09

**3-Le pourcentage des particules (P) :** il est calculé par la formule suivante :

$$P = \frac{100 \times V}{W_S} \times \frac{\gamma_S \times \gamma_W}{\gamma_S - \gamma_W} (R - R_W) \dots\dots\dots (VI-9)$$

Avec :

V : Volume du mélange (eau+échantillon) (1 litre) =  $1. 10^{-3} \text{ m}^3$

$W_S$  : Poids de l'échantillon /  $W_S=20\text{g} = 20. 10^{-3} \text{ kg}$

$\gamma_S$ : Poids volumique des grains solides =  $2500 \text{ kg /m}^3$

$\gamma_W$ : Poids volumique de l'eau =  $1000 \text{ kg /m}^3$

R : Densité du mélange (eau + sol) lue sur le densimètre

$R_w$  : Densité de l'eau (lecture de référence) /  $R_w=1$

P : Pourcentage des particules

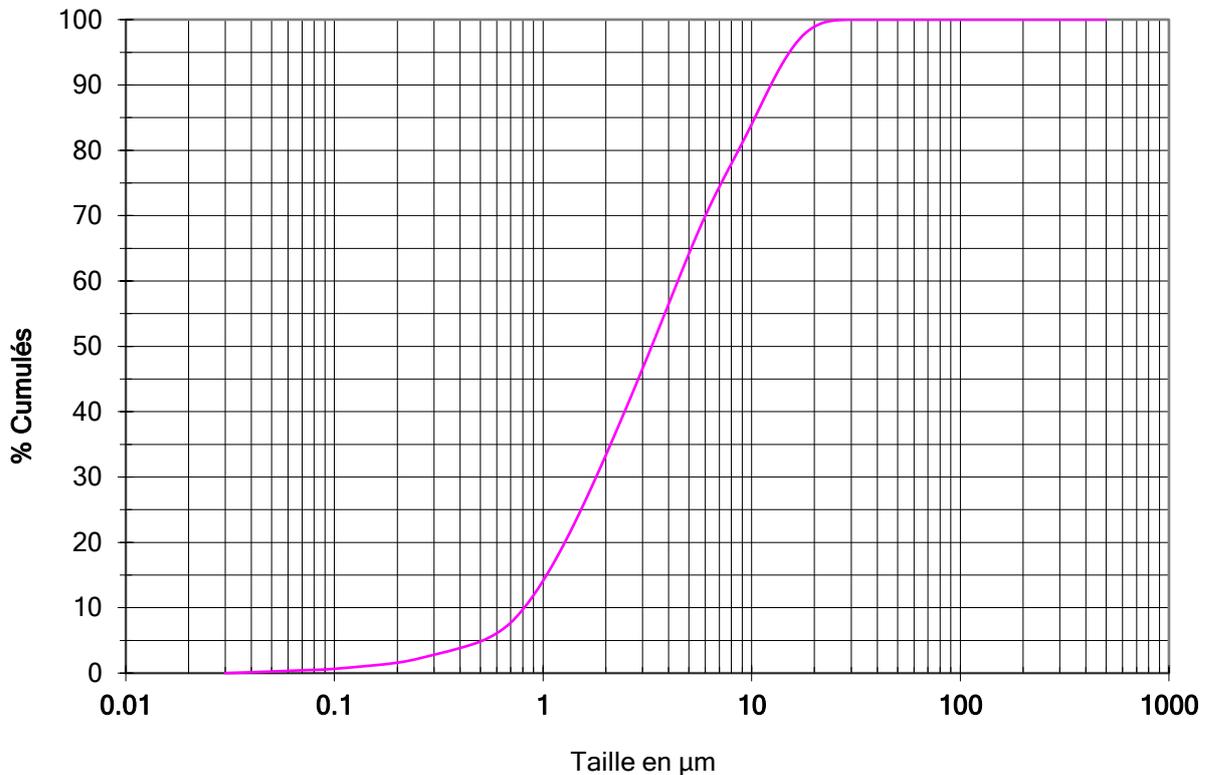
Les résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie de la vase de l'Oued Fodda sont regroupés dans le tableau (VI.3) ci-dessous :

**Tableau (VI.3) :** Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie

Temps (t)	R (densité)	Hr (cm)	T (°C)	$\eta$ (Pascal.sec)	D ( $\mu\text{m}$ )	P (%)
30 sec	1.012	15.65	17	$1.094 \cdot 10^{-3}$	75	99,62
1 min	1.012	15.65	17	$1.094 \cdot 10^{-3}$	55	99,62
2 min	1.012	14.94	17	$1.094 \cdot 10^{-3}$	38	99,62
4 min	1.012	14.94	17	$1.094 \cdot 10^{-3}$	25	99,62
10 min	1.011	15.26	17	$1.094 \cdot 10^{-3}$	17	97,43
15 min	1.009	15.90	17	$1.094 \cdot 10^{-3}$	8	78,27
30 min	1.006	16.86	17.5	$1.080 \cdot 10^{-3}$	4	56,70
1 heure	1.004	17.50	17.5	$1.080 \cdot 10^{-3}$	2	33,48
2 heures	1.001	18.46	17.5	$1.080 \cdot 10^{-3}$	1	14,18
4 heures	1.0005	16.22	17.5	$1.080 \cdot 10^{-3}$	0.5	4,84
24 heures	1	18.78	17.5	$1.080 \cdot 10^{-3}$	0.1	0,66

**❖ La courbe granulométrique finale :**

La courbe granulométrique finale ci-dessous représentée sur la figure (VI.2) présente les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sous l'eau et celle-ci par sédimentométrie dans la même courbe faite à INSA de Rennes par OUHBA KAMEL (département d'hydraulique USTO).



**Figure (VI.2) :** La courbe granulométrique finale de la vase de l'Oued Fodda

Les pourcentages des tamisats trouvés par la sédimentométrie sont proportionnels aux granulats de  $\text{Ø} < 100 \mu\text{m}$  qu'on doit les transformer pour qu'ils soient proportionnels à la masse totale de l'échantillon : voir le tableau (VI.4) suivant :

Tableau (VI.4) : Transformation des pourcentages

D (µm)	P498, 10g (%)	m (g)	P500g (%)
75	99,62	498 ,10	99,24
55	99,62	498 ,10	99,24
38	99,62	498 ,10	99,24
25	99,62	498 ,10	99,24
17	97,43	487,15	94,92
8	78,27	391,35	61,26
4	56,70	283,50	32,14
2	33,48	167,40	11,20
1	14,18	70,90	02,01
0.5	4,84	24,20	00,23
0.1	0,66	3,30	00,00

❖ **Remarque :**

Il n'existe pas une grande différence entre les pourcentages des tamisâts proportionnels aux granulats qui ont une dimension  $< 100 \mu\text{m}$  et les pourcentages proportionnels à la masse totale de l'échantillon.

❖ **Interprétation des résultats :**

L'analyse granulométrique par tamisage sous l'eau montre que les granulats dont le diamètre est supérieur à  $0.1 \text{ mm}$  sont négligeables. Cette analyse définit le pourcentage des granulats qui ont un diamètre entre  $(100 \div 1000) \mu\text{m}$  ; et l'autre type d'analyse granulométrique (la sédimentométrie) suivant les résultats trouvés, il définit les granulats qui ont un diamètre varie entre  $(0.1 \div 80)\mu\text{m}$ .

La variation du pourcentage des tamisâts dans l'intervalle  $(1 \div 100) \mu\text{m}$  est indéfinie. C'est-à-dire qu'on n'a pas une continuité dans la courbe granulométrique finale.

Selon la classification des sols LPC ; pour les sols qui ont plus de 50 % des éléments ont une dimension  $> 80 \mu\text{m}$  , on n'a pas besoin de calculer les deux paramètres

granulométriques Cu : le coefficient d'uniformité et le Cc : le coefficient de courbure pour la classification de ce sol.

❖ **Conclusion :**

Le but de ce travail a été la courbe granulométrique tracée dans la figure (VI.2).

Le pourcentage des tamisats à travers les tamis utilisés dans l'analyse granulométrique sous l'eau est presque égal à 100 % pour tous les tamis parce que les particules dont le diamètre > 100µm sont négligeables dans la boue du barrage. Une variation brusque dans la densité de la solution dans les premiers 30 secondes de l'analyse sédimentaire c'est-à-dire jusqu'à la première lecture du densimètre. C'est la justification de l'intervalle des diamètres qui reste indéfinie entre les deux types d'analyses. Si on cherche à mesurer cette variation de la densité, on doit utiliser d'autres moyens modernes.

Plus de 50 % des éléments de dimension < 80 µm; selon la classification des sols LPC, la boue du barrage de l'Oued Fodda est une argile, un limon ou une argile limoneux. La classification exacte se fait après la détermination des limites d'Atterberg : la limite de liquidité  $\omega_L$  et la limite de plasticité  $\omega_p$ .

**VI-3-1-2-4 Diamètre moyen des grains  $d_{50}$**

C'est un diamètre déterminé à partir de l'analyse granulométrique par sédimentométrie. Il représente le diamètre du tamis (ou de la passoire) à travers laquelle 50 % du poids de l'échantillon passerait.

**VI-3-1-2-5 L'indice de classement  $S_0$**

Selon Rivière (1977) et à partir des paramètres classiques : la médiane ( $d_{50}$ ), les quartiles ( $d_{25}$  et  $d_{75}$ ), les indices caractéristiques d'un sédiment sont :

$$S_0 = (d_{75}/d_{25})^{0.5} \dots\dots\dots (VI-10)$$

On a les variations suivantes :

- Si  $S_0 < 2$ .....Sédiments très bien classés
- Si  $2 < S_0 < 2.6$ .....Sédiments bien à moyennement classés
- Si  $S_0 > 2.6$ .....Sédiments mal à très mal classés

**VI-3-1-2-6 L'indice d'asymétrie  $S_K$**

Il exprime la symétrie par rapport à la médiane

$$S_K = (d_{25}.d_{50})^{0.5}/d_{50} \dots\dots\dots (VI-11)$$

Dans le cas où :

- $S_K > 1$  → Courbe dissymétrique avec décalage et classement maximum du coté fin

$-0.7 < S_K < 1 \rightarrow$  Courbe à tendance symétrique, le mode pouvant coïncider avec le diamètre moyen

$- S_K < 0.7 \rightarrow$  Courbe dissymétrique avec décalage et classement maximum du coté grossier.

Ces paramètres présentés ci-dessus sont regroupés dans le tableau (VI.5) suivant :

**Tableau (VI.5) : Paramètres granulométriques de la vase de l'Oued Fodda**

Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	Etat	Paramètre de la vase ( $\mu\text{m}$ )
<b>Diamètre maximum</b>		<b>500</b>
<b>D<sub>50</sub></b>	<b>Etat naturel</b>	<b>3,4</b>
<b>D<sub>25</sub></b>	<b>Etat naturel</b>	<b>1,8</b>
<b>D<sub>75</sub></b>	<b>Etat naturel</b>	<b>7</b>
<b>D<sub>60</sub></b>	<b>Etat naturel</b>	<b>4,4</b>
<b>D<sub>10</sub></b>	<b>Etat naturel</b>	<b>0,8</b>
<b>D<sub>30</sub></b>	<b>Etat naturel</b>	<b>1,9</b>
<b>S<sub>0</sub></b>	<b>Etat naturel</b>	<b>1,97</b>
<b>S<sub>K</sub></b>	<b>Etat naturel</b>	<b>0,72</b>

### VI-3-1-3 Valeur au bleu de méthylène:

#### ➤ Objectif et principe de l'essai

L'essai au bleu de méthylène, ou « essai au bleu », est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol.

L'essai consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon. Pour cela on utilise du bleu de méthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles.

#### ➤ Mode opératoire

1-Prendre 30 grammes de vase sec passée par le tamis  $80\mu\text{m}$ .

2-Mettre la prise d'essai à tremper dans un bécher avec  $500\text{ cm}^3$  d'eau distillée.

3-A l'aide de l'agitateur (700 tr/min), disperser la suspension pendant 5 min.

4-A l'aide du dispositif de dosage, introduire 5 cm<sup>3</sup> de bleu et agiter (400 tr/min) pendant 1 min : voir photo (VI.8)



**Photo (VI.8) :** Dosage de la suspension

5-Le test de la tache : A l'aide d'une baguette, déposer une goutte de la suspension sur le papier filtre : voir photo (VI.9)

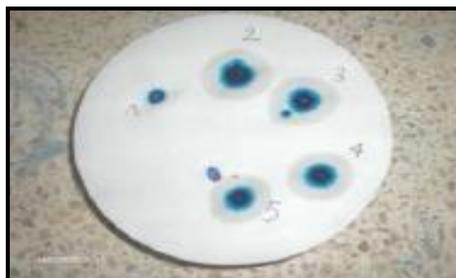


**Photo (VI.9) :** Test de la tache

-**Test négatif** : On dira que le test de la tache est négatif si la tache déposée sur le papier filtre est sans auréole. Dans ce cas, ajouter 5 cm<sup>3</sup> de bleu, laissé agiter pendant 1 minute et refaire l'essai de la tache (C'est l'opération 5 qui est répétée).

Cette opération sera répétée autant de fois qu'il sera nécessaire (Tant que le test de la tache restera négatif).

-**Test positif** (photo (VI.10)) : On dira que le test est positif si la tache déposée sur le papier filtre forme une auréole. Dans ce cas, procéder à **5 tests successifs** de la tache (à raison d'un test par minute) sans ajouter de bleu. Si les 5 tests s'avèrent positifs, l'essai est terminé



**Photo (VI.10) :** Test de la tache positif

➤ **Interprétation**

La VBS est une grandeur qui exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenu dans le matériau étudié.

Le GTR retient 6 seuils: voir tableau (VI.6) ci-dessous

**Tableau (VI.6) : Classification des sols selon la valeur de VBS**

$V_{BS} < 0,1$	sol insensible à l'eau
$0,2 \leq V_{BS} < 1,5$	sol sablo limoneux, sensible à l'eau
$1,5 \leq V_{BS} < 2,5$	sol sablo argileux, peu plastiques
$2,5 \leq V_{BS} < 6$	sol limoneux de plasticité moyenne.
$6 \leq V_{BS} < 8$	sol argileux.
$V_{BS} > 8$	sol très argileux.

La valeur du bleu ( $V_B$ ) est donnée par la relation suivante :

$$V_B = \frac{\text{Nombre de cm}^3 \text{ de solution}}{\text{Poids de la prise}} \times 10 \dots\dots\dots (VI-12)$$

La surface spécifique totale est donnée par :

$$S.S.T = \frac{V_B}{100} \times \frac{N}{373} \times 130 \times 10^{-20} \dots\dots\dots (VI-13)$$

Donc  $S.S.T=21V_B \dots\dots\dots (VI-14)$

Avec :

$V_B/100$  : fraction en % du bleu ( $<2\mu\text{m}$ )

$N$  : nombre d'Avogadro= $6.023 \cdot 10^{+23}$

$373$  : masse moléculaire de bleu de méthylène en gramme

$130 \cdot 10^{-20}$  : surface en  $\text{cm}^2$  d'une molécule d'eau

Pour notre travail :  $V_B = \frac{170}{30} = 5.66 \dots\dots\dots (VI-15)$

Alors :  $S.S.T=21 \cdot 5,66=118.86\text{m}^2/\text{g}$

**D'après la norme française FN P 94-068 notre échantillon est un sol limono-argileux de plasticité moyenne.**

**VI-3-2 Propriétés géotechniques**

Le comportement d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de sa teneur en eau. Il a été constaté qu'en faisant décroître progressivement la teneur en eau d'un sol fin, ce dernier se présente sous trois états de consistance.

**A-Etat liquide**

Le mouvement relatif des différentes particules est aisé. Le sol se comporte comme un fluide pour une valeur élevée de teneur en eau. Sa cohésion faiblit, car il ne résiste pratiquement pas à un effort de cisaillement, il tend à s'écouler et à se niveler suivant une surface horizontale, c'est la boue.

**B-Etat plastique**

La teneur en eau diminue, le sol acquit une cohésion plus importante, il est soumis à de faibles charges, il se déforme largement sans se rompre, sa plasticité est due à l'existence des forces de liaison créées par l'eau absorbée entre les grains.

**C-Etat solide**

Le sol a un comportement d'un solide, l'application d'un effort n'entraîne que de faibles déformations. Cet état peut lui-même être séparé en deux états :

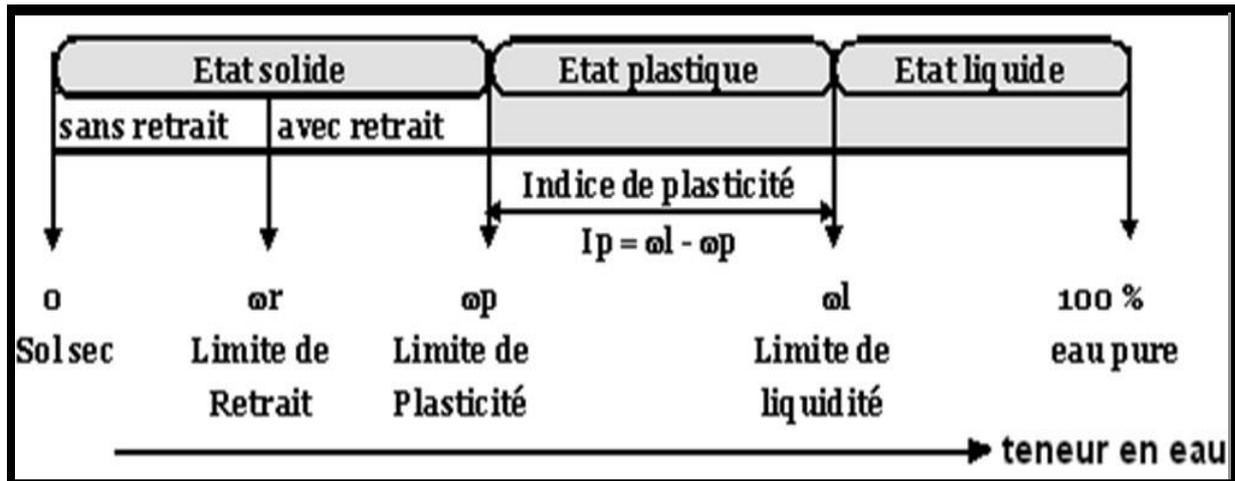
**1-Etat solide avec retrait**

La déformation du corps est beaucoup plus faible, il perd de son eau interstitielle tout en se contractant d'une valeur appréciable.

**2-Etat solide sans retrait**

C'est un état où presque toute l'eau absorbée a disparue. Le volume sec égal au volume humide.

On peut représenter ces différents états comme suit :



**Schéma (VI.1):** la position relative des limites de la consistance

Pour bien préciser ces états, le suédois « **Atterberg** » a proposé à l'aide de son appareil de Casagrande trois limites exprimées par des teneurs en eau en pourcentage :

### VI-3-2-1 La limite de liquidité ( $\omega_l$ )



**Photo (VI.11) :** Appareil de casa-grande

C'est la limite qui sépare l'état liquide de l'état plastique, c'est la teneur en eau pour laquelle les deux lèvres d'une rainure faite sur une pâte placée dans une coupelle, arrivent à se joindre sur une longueur d'un centimètre sous l'influence d'un nombre déterminé de choc (25 coups).

La méthode analytique Nous permettre de calculer la teneur en eau de liquidité, elle se présente sous la formule suivante :

$$\omega_l = \omega \left[ \frac{N}{25} \right]^{0.121} \dots\dots\dots (VI-16)$$

N : nombre de coups.

$\omega_l$ : limite de liquidité [%]

$\omega$  : teneur en eau [%].

### ❖ Mode opératoire

-On prendra un échantillon d'environ 60g (fraction du sol qui passe au tamis 0,5 mm) dans une coupelle lisse, à l'aide de la spatule on répartit au 2/3 la pâte dans la coupelle.

-On trace une rainure (photo (VI.12)) avec l'outil à rainurer en prenant soin de la maintenir perpendiculairement à la surface.

-On soumet la coupelle à des chocs réguliers (à l'aide de la boîte de Casagrande) : voir photo (VI.11) au rythme de 2 coups par second. La hauteur étant réglée à une hauteur de 1.0 cm à l'aide d'une calle.

-On note le nombre de coups nécessaires pour avoir une fermeture de la rainure sur une longueur de 1 cm.

-On prélève un échantillon de chaque côté des lèvres de rainure et au voisinage de lieu où elles se sont fermées : voir photo (VI.13)

-Les échantillons ainsi prélevés sont placés dans des boîtes à pétri et étuvés afin de déterminer la teneur en eau.

**La limite de liquidité de notre échantillon est égale à 47.54%.**



**Photo (VI.12) :** La rainure



**Photo (VI.13) :** Contact entre les deux lèvres de la rainure

### VI-3-2-2 La limite de plasticité ( $\omega_p$ )

Elle correspond au passage de l'état plastique à l'état solide. Elle est définie par la teneur en eau d'un petit rouleau de sil qui se brise en petits tronçons lorsque son diamètre atteint 3 mm. On calcule limite de plasticité  $\omega_p$  avec la relation suivante :

$$\omega_p = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \dots\dots\dots (VI-17)$$

Avec :

$\omega_p$  : limite de plasticité(%).

$W_1$  : poids d'échantillon humide (g).

$W_2$  : poids d'échantillon sec (g).

#### ❖ Mode opératoire

La procédure pour la détermination de la limite de plasticité est la suivante :

1. Prendre un peu de matériau et former une petite boule : Photo (VI.14)
2. Rouler à la main sur la plaque de marbre cette boule de telle sorte à obtenir un bâtonnet : Photo (VI.15)

Trois cas peuvent se présenter :

- Le bâtonnet confectionné commence à se fissurer quand il atteint une longueur de 10 cm et un diamètre de 3 mm. Dans ce cas, le sol est à la limite de plasticité et il faut la mesurer (c'est une teneur en eau).
- Le sol est encore fluide et vous n'arrivez pas à confectionner le bâtonnet. Il faut sécher un peu le matériau.
- Le bâtonnet commence à se fissurer trop tôt, le matériau est sec. Il faut l'humidifier un peu.

Il faut réaliser au moins deux essais pour la limite de plasticité.



**Photo (VI.14) :** La boule



**Photo (VI.15) :** Bâtonnet à la limite de plasticité

La limite de plasticité de notre échantillon est égale à 22.80% : voir figure (VI.3).

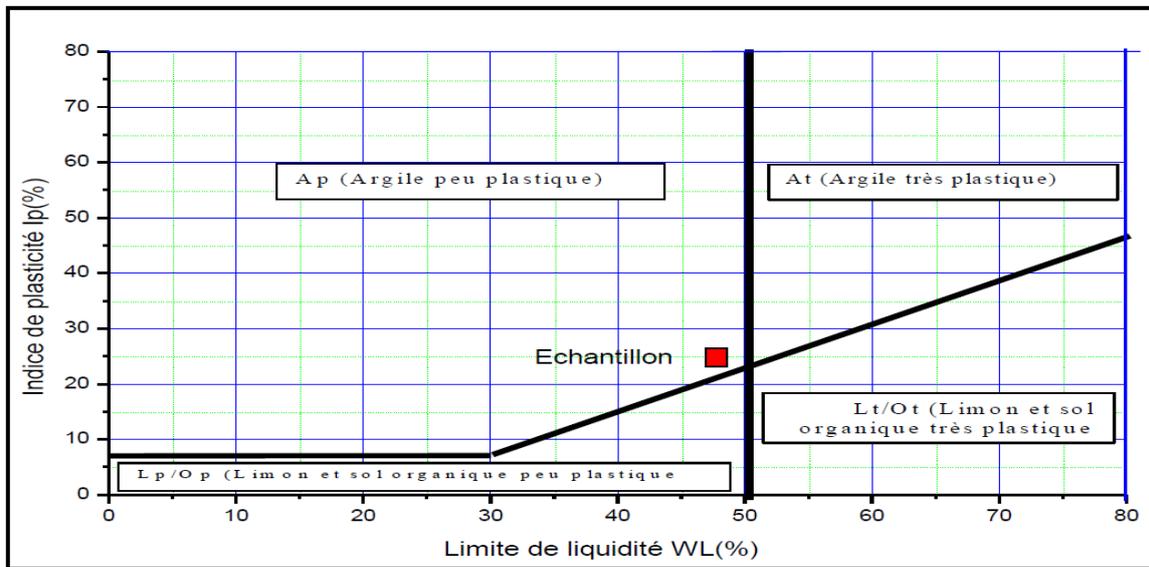


Figure (VI.3) : Couple ( $\omega_L$ ,  $I_p$ ) de la vase du barrage de l'Oued Fodda placé dans le diagramme de plasticité de Casagrande

VI-3-2-3 L'indice de plasticité ( $I_p$ )

L'indice de plasticité est défini par la différence entre les deux limites de plasticité et de liquidité.

$$I_p = \omega_L - \omega_p \dots \dots \dots (VI-18)$$

L'indice  $I_p$  permet de caractériser le sol du point de vue plastique. On peut donner la classification suivante : Tableau (VI.7)

Tableau (VI.7) : Classification du sol en fonction de l'indice de plasticité

L'indice de plasticité $I_p$	Degré de plasticité
$I_p > 20$	Sol très argileux
$20 < I_p < 10$	Sol argileux
$I_p < 4$	Sol maigre
$I_p = 0$	Sol exempt d'argile.

On utilise le graphe de plasticité  $I_p$  en fonction de la teneur en eau  $\omega$  pour retrouver le caractère et le type de sol ; c'est ce que l'on appelle le diagramme de Casagrande : voir figure (VI.4).

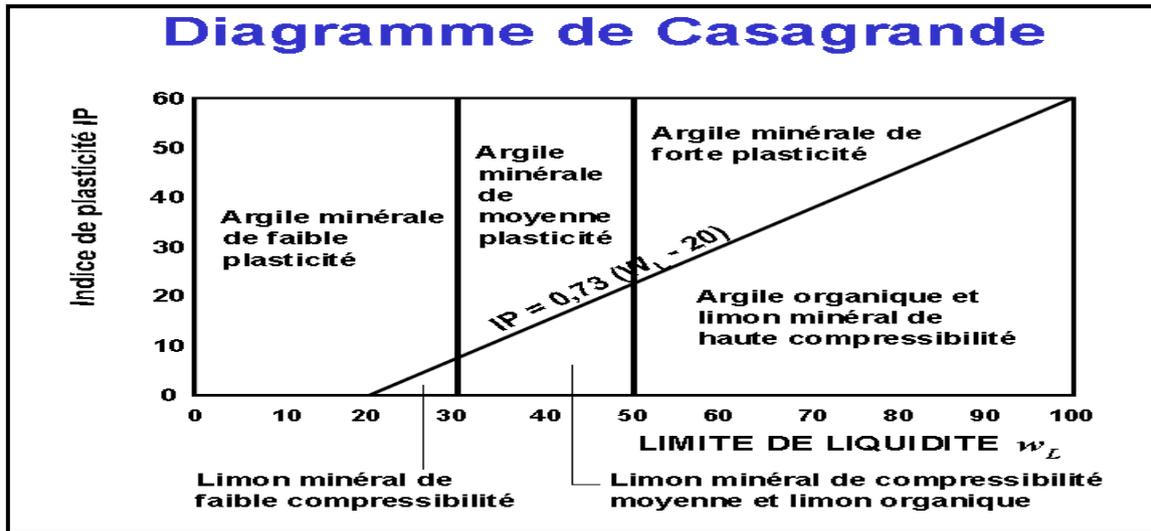


Figure (VI.4) : Abaque de l'indice de plasticité

L'indice de plasticité de notre échantillon est égal à 24.74%.

**VI-3-2-4 L'indice de liquidité ( $I_L$ )**

Cet indice permet de positionner l'état du sol cohérent par rapport aux limites de liquidité et de plasticité. Il se définit par

$$I_L = \omega - \omega_p / \omega_L - \omega_p \dots \dots \dots (VI-19)$$

Où :  $\omega$  : teneur en eau naturelle de l'échantillon

L'indice de liquidité de notre échantillon est égal à 0.73%.

**VI-3-2-5 L'indice de consistance ( $I_c$ )**

$$I_c = 1 - I_L \dots \dots \dots (VI-20)$$

Note : Si  $I_c > 1$  ou  $I_L < 0$   $\longrightarrow$  Le sol est à l'état solide

Si  $0 < I_c < 1$  ou  $0 < I_L < 1$   $\longrightarrow$  Le sol est à l'état plastique

Si  $I_c < 0$  ou  $I_L > 0$   $\longrightarrow$  Le sol est à l'état liquide.

L'indice de consistance de notre échantillon est égal à 0.27%.

### VI-3-2-6 Diagramme d'activité

Selon Skempton 1953 (tableau (VI.8)), l'activité d'un sédiment est définie par l'expression suivante:

$$A_C = \frac{\text{Indice de plasticité}}{\text{Pourcentage en particule inférieur à } 2 \mu\text{m}} \dots\dots\dots (VI-21)$$

**Tableau (VI.8) :** Les groupes d'activités théoriques proposés par Skempton.

Activité	0	0.75	1.25	2.0	–
Groupe	Sol inactif	Sol normal	Sol actif	Sol très actif	

Alors :  $A_C = \frac{24,74}{19,68} = 1,25\%$  donc notre échantillon est un sol actif.

### VI-3-3 Commentaires

Le poids volumique des grains solides  $\gamma_s$  de la vase étudiée varie de 2.5 à 2.67 g/cm<sup>3</sup>. D'après Jaques L. 2006,  $\gamma_s$  est au dessous de 2.6 g/cm<sup>3</sup> pour les sols organiques et il est plus de 2.7 g/cm<sup>3</sup> pour les sols métallifères. On constate alors qu'il existe un certain taux en matière organique dans la vase étudié.

L'analyse granulométrique effectuée a donné la courbe granulométrique représentée dans la figure (VI.2) pour notre échantillon dont le diamètre maximum est 500µm et 99% de la masse est passée par le tamis 100µm. D'où il s'agit d'un sol très fin avec une composition moyenne de 1.1% sable, 65.5% limon et 33.4% argile. Le diamètre médiane équivalent à 50 % de la vase est de 3,4 µm à l'état naturel et l'indice d'asymétrie moyen est supérieur à 0.7 à l'état naturel, ce qui veut dire que la courbe granulométrique est de tendance symétrique, d'un autre côté et d'après Caquot et Kérisel, si  $C_u > 2$  : la granulométrie est dite étalée et si  $1 < C_c < 3$  : le sol présente une courbe bien graduée. Ce qui est justifié par la pente de la partie médiane de la courbe granulométrique pour notre échantillon analysé.

Selon la classification des sols fins de Casagrande : voir figure (VI.4), la vase est classée comme un sol argileux. Les sols argileux sont caractérisés par une plasticité selon la teneur en eau. La limite de liquidité est la teneur en eau équivalente au nombre des coups 25 dans le graphes:  $W_L = 47.54 \%$ . La limite de plasticité moyenne est :  $W_p = 22.80 \%$

Le test du bleu de méthylène a été fait sur l'échantillon étudié, dont la masse du sol est 30 g passée par le tamis  $80\mu\text{m}$  et ajoutée dans 500 ml d'eau distillée. La solution du méthylène est préparée à une concentration de 10 g/l. Le résultat de VBS de notre échantillon est de 5.66 donc selon la norme française FN P 94-068, la vase du barrage de l'Oued Fodda est un sol limono-argileux de plasticité moyenne.

#### **VI-4 Caractérisation rhéologique de la vase de l'Oued Fodda**

##### **VI-4-1 Généralités sur la Rhéologie [43]**

La rhéologie est un terme couramment utilisé aujourd'hui, elle est de naissance relativement récente, elle fût en effet reconnue en 1928 par BINGHAM, pour désigner l'étude de la déformation des corps, y compris leurs écoulements sous l'influence des contraintes qui leurs sont appliquées.

La Rhéologie regroupe diverse branches de l'activité humaine (Mécanique de fluide, résistance des matériaux, Mécanique des sols et la Mécanique des roches). De nombreux matériaux que nous trouvons dans notre vie quotidienne tels que agro-alimentaire, cosmétique, pharmaceutique, polymères changés, gels, boue de forage, pâte à craie, vase de barrage.....etc., ne sont ni des liquides parfaits, ni des fluides réels parfait, c'est donc à eux que s'applique la rhéologie. Les études rhéologiques qui s'appliquent principalement à ces corps ont pour but de déterminer le comportement d'un corps et pouvoir le définir de manière plus précise.

L'objet de la rhéologie est de déterminer l'équation rhéologique d'état d'un fluide par la mesure des paramètres rhéologiques en effectuant des mesures relatives de forces et de déplacement, et en exploitant ces résultats à l'aide des équations de mouvement.

La Rhéologie doit être complétée par d'autres paramètres tels que la connaissance de la composition granulométrique et chimique.

L'équation d'état traduit la relation entre la déformation de cisaillement ( $\epsilon$ ) et la contrainte ( $\tau$ ). On note que la représentation graphique  $\tau = f(\epsilon)$  est appelée le Rhéogramme et on utilise très souvent des modèles simples pour la détermination des paramètres Rhéologiques des mixtures (sol-eau) dont le comportement dépend de la nature des grains, du poids spécifique et particulièrement de la concentration du mélange.

## VI-4-2 Modèles Rhéologiques [44]

D'après les études Rhéologiques, les fluides se divisent en deux catégories :

- Les fluides Newtoniens.
- Les fluides non Newtoniens.

### VI-4-2-1 Fluides Newtoniens :

Ce modèle est caractérisé par une viscosité constante quelque soit le gradient de vitesse. L'équation d'état Rhéologique est traduite par une droite passant par l'origine  $\tau = \eta \cdot \dot{\epsilon}$

$\tau$  : Contrainte de cisaillement (Pa)

$\dot{\epsilon}$  : Gradient de vitesse ( $s^{-1}$ )

$\eta$  : Viscosité dynamique (Pa·s)

### VI-4-2-2 Fluides non Newtoniens :

Par définition, les fluides non Newtoniens sont des fluides aux seins desquels, les contraintes et les vitesses de cisaillement ne sont pas proportionnelles, ces fluides sont généralement complexes.

Les fluides non Newtoniens se classent en deux types :

- Fluides non Newtoniens au comportement indépendant du temps.
- Fluides non Newtoniens au comportement dépendant du temps.

## VI-4-3 Détermination de la concentration limite de la vase à l'état liquide

### VI-4-3-1 Introduction

Le viscosimètre Engler (photo (VI.16)) est permet une détermination direct de la viscosité des liquides. Comme il permet aussi de déterminer la concentration limite qui spécifie les deux tranches principales du comportement rhéologique voire la fin de l'intervalle newtonien et début de celui non newtonien pour une mixture donnée.



**Photo (VI.16) :** Viscosimètre Engler

#### VI-4-3-2 But de l'essai

Détermination de la viscosité cinématique et dynamique d'un liquide chargé et la concentration limite  $C_v \text{ lim}$  qui sépare entre les deux comportements (newtonien et non newtonien).

#### VI-4-3-3 Principe de la méthode

On définit le degré Engler  $E^\circ$  qui est le rapport du temps nécessaire à l'écoulement de  $200 \text{ cm}^3$  du liquide à étudier à travers un orifice calibré, au temps nécessaire à l'écoulement de  $200 \text{ cm}^3$  d'eau à  $20^\circ\text{C}$  à travers le même orifice

#### VI-4-3-4 Calcul de la concentration volumique

On a préparé 4 échantillons de vase dont la concentration de chaque échantillon est comprise entre 2 et 14 %.

$$CV (\%) = (\rho_m - \rho_e / \rho_s - \rho_e) \cdot 100 \quad \dots\dots\dots (VI-22)$$

$\rho_s$  : Masse volumique des grains solides =  $2,5 \text{ g/cm}^3$

$\rho_e$  : Masse volumique de l'eau =  $1 \text{ g/cm}^3$

$\rho_m$  : Masse volumique du fluide à étudier ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_m$	CV (%)
1,03	2
1,06	4
1,09	6
1,12	8
1,15	10
1,18	12

On sait que :

$$V = 0,0731 \cdot E^\circ - \left( \frac{0,0631}{E^\circ} \right) \dots\dots\dots (VI-23)$$

Avec :

$$E^\circ = \frac{\text{Temps d'écoulement de 200 cm}^3 \text{ de la substance étudiée}}{\text{Temps d'écoulement de 200 cm}^3 \text{ d'eau à } 20^\circ\text{C}} \dots\dots\dots (VI-24)$$

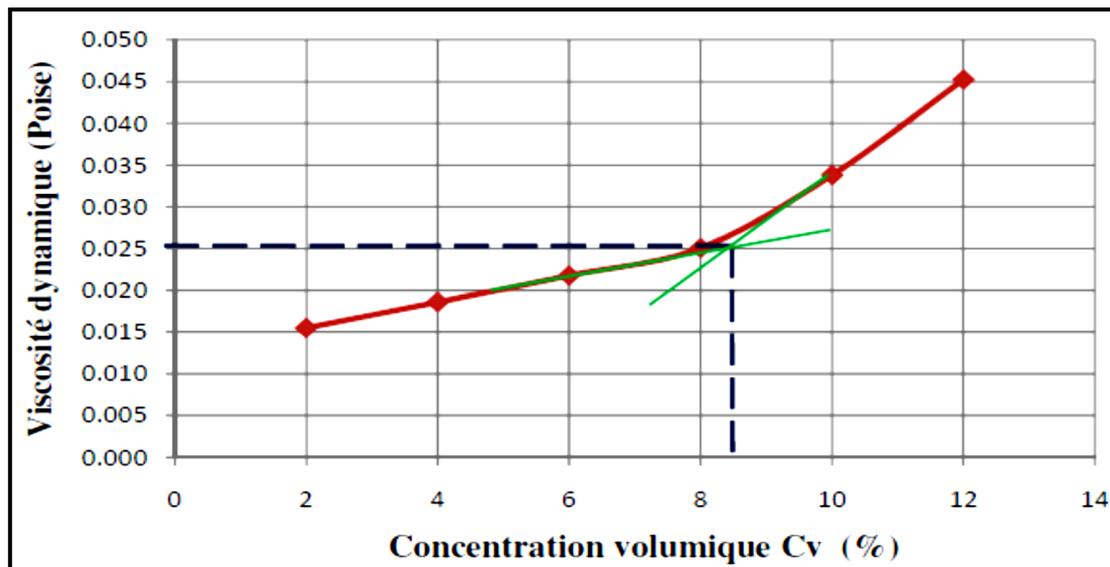
Et on a aussi :  $\mu = \rho_m \cdot V$  avec :

$\mu$  : viscosité dynamique (poise)

$V$  : viscosité cinématique

$\rho_m$  : Masse volumique du fluide à étudier (g/cm<sup>3</sup>)

CV (%)	Temps d'écoulement de substance (S)	Temps d'écoulement d'eau (S)	$E^\circ$	$v$	$\mu$ (Poise)
2	57,01	54,82	1,04	0,015	0,015
4	57,56	54,82	1,05	0,017	0,018
6	59,75	54,82	1,09	0,021	0,022
8	60,85	54,82	1,11	0,023	0,025
10	63,04	54,82	1,15	0,029	0,033
12	67,42	54,82	1,23	0,038	0,045



**Figure (VI.5) :** La viscosité de la vase de l'Oued Fodda à l'état liquide en fonction de la concentration volumique

#### VI-4-3-5 Conclusion

À partir des résultats obtenus après l'essai de viscosimètre Engler nous avons pu calculer la viscosité cinématique et dynamique et tracé la courbe  $\mu=f(CV)$  : voir figure (VI.5)) ci-dessus qui nous a permis de déterminer la concentration limite  $Cv$  limite elle est de l'ordre de 8% au-dessous de cette valeur le fluide a un comportement newtonien, tandis qu'au-delà de cette valeur la substance étudiée a un comportement non newtonien.

#### VI-4-4 Détermination des modèles rhéologiques de la vase de l'Oued Fodda

##### VI-4-4-1 But de l'essai

L'objectif de cette étude est de déterminer le comportement Rhéologique de nos matériaux lors d'un cisaillement simple à partir d'expérience de Rhéomètre. Le matériel utilisé dans cette étude est un HAAK RheoStress 600, un instrument de qualité conçu pour le rhéologie créatif (contrainte et vitesse imposée). Les expériences de rhéologie se sont déroulées au sein du Laboratoire de Rhéologie Transport et Traitement des Fluides Complexes LRTTFC du département d'Hydraulique (USTO).

Thermo Scientific 600 RheoStress HAAKE est un rhéomètre rotatif qui se concentre sur les applications standard dans la recherche & développement et contrôle de la qualité. Ses mesures de force normales et les spécifications ainsi que des solutions d'applications larges, y compris le durcissement, la cellule UV des matériaux de construction et de la cellule de pression soulignent le vaste domaine du rhéomètre d'applications.

Le RheoStress HAAKE 600 est entièrement compatible avec les accessoires existants de modèles RheoStress précédents comme les rhéomètres Thermo Fischer HAAKE RheoStress 300, 150 et 100. Une série d'unités de commande de température est disponible pour gérer de façon fiable et précise des températures allant de  $-30^{\circ}\text{C}$  à  $500^{\circ}\text{C}$ . Peltier électrique ou liquide, unités de contrôle de température pour cylindres coaxiaux, de la plan / plan et le cône / plan sont disponibles ainsi qu'une large gamme de géométries et des cellules de mesure d'application orientées (**Photo (VI.17)**).

#### VI-4-4-2 Instruments de mesure

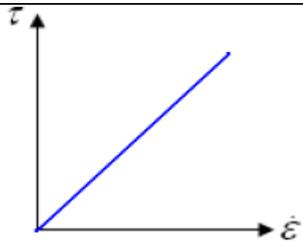
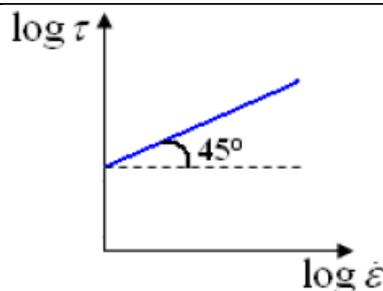
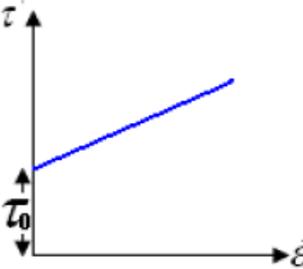
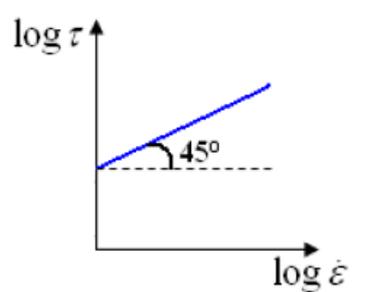
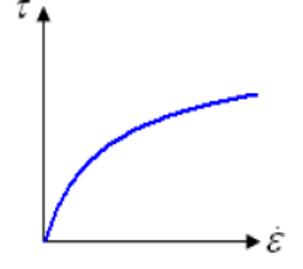
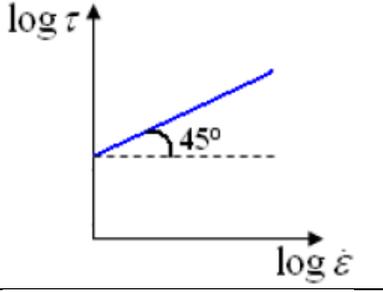
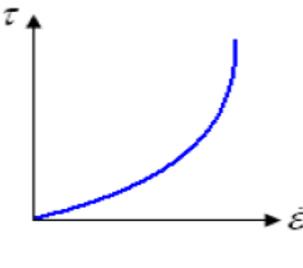
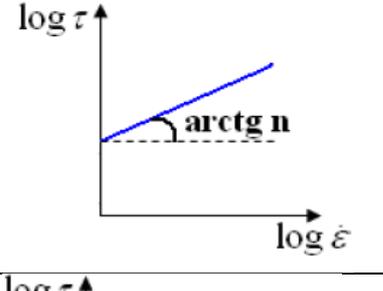
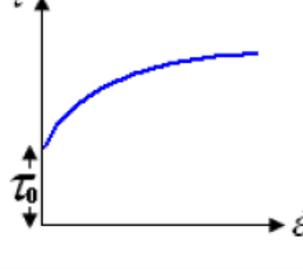
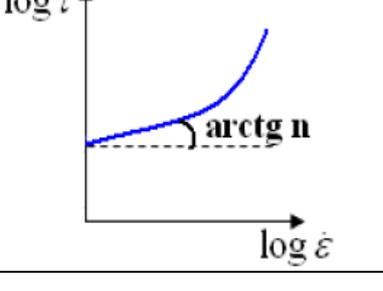
- Rotor avec l'axe.
- Table de mesure.
- Bain thermostaté permet de recevoir la substance d'essai.
- Bec d'embase.
- Circuit de refroidissement.
- Pied réglable



**Photo (VI.17) :** Rhéomètre RS600 (Laboratoire de Rhéologie Transport et Traitement des Fluides Complexes LRTTFC USTOMB)

Le tableau (VI.9) ci-dessous représente quelques modèles Rhéologiques les plus répondu avec leurs équations Rhéologiques ainsi que les Rhéogrammes cartésiens et logarithmiques.

Tableau (VI.9) : Les modèles rhéologiques

Modèles Rhéologiques		Equations rhéologiques	Rhéogrammes en coordonnées cartésiennes	Rhéogrammes en coordonnées logarithmiques
Newton		$\tau = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$		
Bingham		$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\varepsilon}$ si: $\tau > \tau_0$ $\dot{\varepsilon} = 0$ si $\tau < \tau_0$		
Ostwald	pseudo-plastique	$\tau = K \cdot \dot{\varepsilon}^n$ $0 < n < 1$		
	Dilatants	$\tau = K \cdot \dot{\varepsilon}^n$ $n > 1$		
Herschel-Bulkley		$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\varepsilon}^n$		

**VI-4-4-3 Mode opératoire :**

Le mode de préparation des mélanges est d'une importance considérable sur leur comportement rhéologique. La préparation consiste à mélanger la vase à des différentes concentrations dans de l'eau : 5, 10, 20 et 30%. Ces mélanges sont par la suite agités pendant une heure afin d'obtenir l'homogénéisation. La mixture obtenue est laissée au repos, puis agitée de nouveau doucement durant 5 minutes avant de mettre l'échantillon sous la géométrie de mesure. Voir photo (VI.18)



**Photo (VI.18) :** L'homogénéisation des différents mélanges de vase

Les mesures rhéologiques ont été effectuées sur un rhéomètre à contrainte imposée « RS600 ». En géométrie cylindres coaxiaux.

Toutes les mesures ont été effectuées à température ambiante (20°C), la vitesse de la rampe montante a été réglée entre 0.5 et 100s<sup>-1</sup> pendant 300s.

La figure (VI.6) suivante représente l'évolution de la contrainte d'écoulement en fonction de la vitesse de cisaillement pour différentes concentrations volumiques.

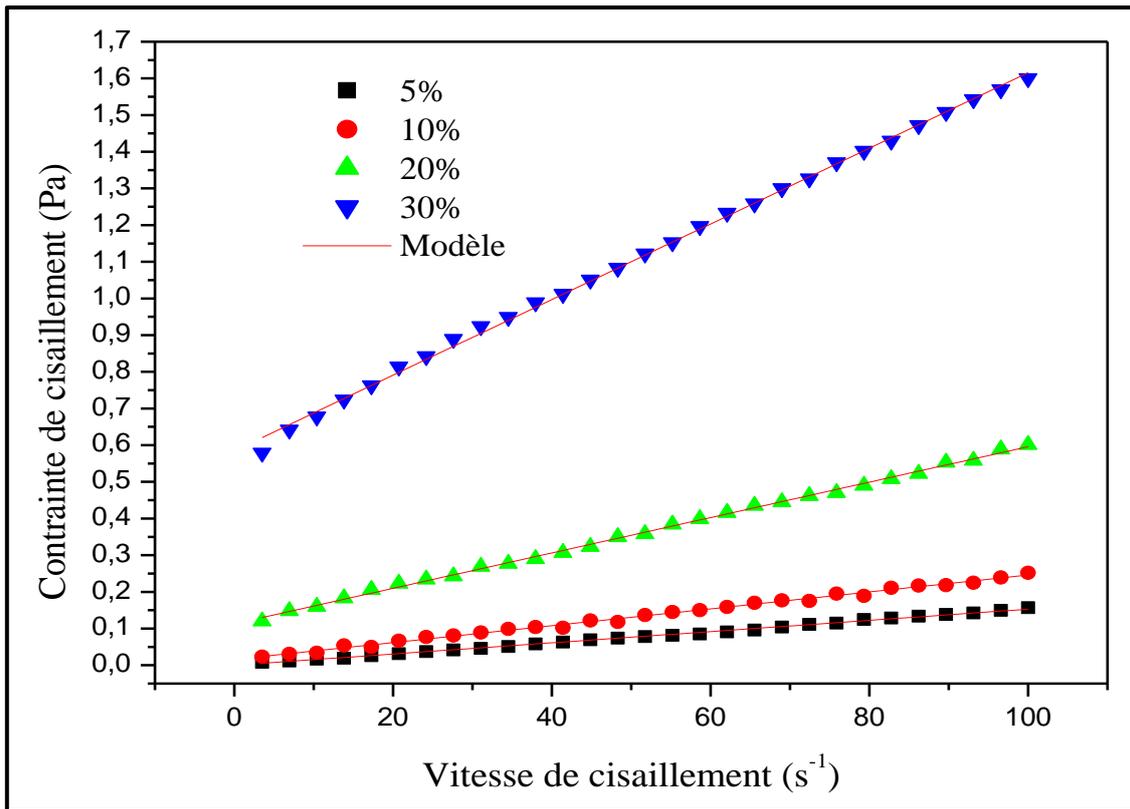


Figure (VI.6) : Courbes d'écoulement de la vase de l'Oued Fodda pour différents concentrations

L'échantillon est un fluide Newtonien et Binghamien. De plus, il présente un seuil de contrainte, il est nécessaire de dépasser ce dernier avant que l'échantillon s'écoule. Cette valeur est appelée seuil d'écoulement ou contrainte critique. A partir de la contrainte et du gradient de vitesse, il est possible de déterminer la viscosité apparente des matériaux selon la formule suivante :

$$\mu_{app} = \tau / \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (VI-25)$$

Afin de vérifier cette constatation, il est possible d'utiliser des modèles rhéologiques. Les modèles les plus couramment utilisés pour des suspensions relativement concentrées sont ceux de Bingham et Herschel-Bulkley.

Pour notre matériau les modèles de Bingham et Herschel-Bulkley ont été utilisés :

➤ **Modèle de Herschel-Bulkley :**

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\epsilon}^n \quad \dots\dots\dots (VI-26)$$

Avec :

$\tau$  : Contrainte de cisaillement(Pa)

$\tau_0$  : Seuil de contrainte(Pa)

$K$  : Consistance(Pa.s<sup>n</sup>)

$\dot{\epsilon}$  : Gradient de vitesse (s<sup>-1</sup>)

$n$  : Indice d'écoulement

➤ **Modèle de Bingham :**

$$\tau = \tau_B + \eta_B \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (VI-27)$$

Avec :

$\tau_B$  : Contrainte de Bingham (Pa)

$\eta_B$  : Viscosité de Bingham (Pa.s)

Le tableau (VI.10) suivant regroupe les résultats du comportement rhéologique de la vase de l'Oued Fodda ainsi que les équations correspondantes pour les différentes concentrations.

**Tableau (VI.10) :** Comportement rhéologique de la vase de l'Oued Fodda

C%	Modèle	$\tau_0$ (Pa)	$\eta_B$ (Pa.s)	$\eta$ (s <sup>-1</sup> )	R
5	Newtonien $\tau = \eta \dot{\epsilon}$	0		0,00153	0,997
10	Binghamien $\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\epsilon}$	0,01578	0,0023		0,995
20		0,11314	0,00483		0,998
30		0,58469	0,01031		0,998

#### VI-4-4-4 Conclusion

D'après les résultats du tableau (VI.10) on remarque que pour la concentration de 5% de la vase de l'Oued Fodda le modèle rhéologique des mixtures est un modèle Newtonien. Pour les concentrations 10, 20, et 30% de la vase le comportement rhéologique est Binghamien avec un seuil d'écoulement et d'une viscosité plastique qui varie suivant la variation de la concentration de la mixture matériau liquide.

### VI-5 Caractérisation chimique et minéralogique de la vase de l'Oued Fodda

#### VI-5 -1 Caractérisation chimique :

La caractérisation chimique de la vase de l'Oued Fodda a été réalisée par Fluorescence X sur une poudre sèche au laboratoire de la cimenterie de Zahana-Mascara en utilisant l'appareillage Spectromètre 1480 – Philips : voir Photo (VI.19), elle admet la détermination de la matière organique, et d'autres éléments principaux issus de l'analyse chimique. Les résultats sont récapitulés dans le tableau (VI.11).



**Photo (VI.19) :** Appareil Spectromètre 1480 – Philips

**Tableau (VI.11) :** La composition chimique de la vase du barrage de l'Oued Fodda

Oxydes	Vase de l'Oued Fodda(%)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>46.37</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>13.73</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>5.76</b>
<b>CaO</b>	<b>11.87</b>
<b>MgO</b>	<b>1.64</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0.37</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>1.48</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>0.67</b>
<b>PAF</b>	<b>17.90</b>

La vase est composée d'un pourcentage important de silice, de l'ordre de 46.37% et de 13.73% d'alumine. Ces deux oxydes confirment l'analyse minéralogique de la vase et l'existence de la kaolinite et l'illite qui sont des minéraux argileux composés principalement des feuilletes de l'alumine et de silice.

Le pourcentage de la perte au feu est remarquable, de l'ordre de 17.90% justifié par la présence de la matière organique et un pourcentage de chaux de 11.87%.

## VI-5 -2 Caractérisation minéralogique

Les caractéristiques minéralogiques de la vase sont déterminées par la diffraction des rayons X et par spectroscopie IR dans le département de chimie de L.T.P.O d'Oran et par microscopie électronique à balayage.

### A- La diffraction des rayons X [45]

#### ➤ Principe de la diffraction des rayons X (figure (VI.7))

Il consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde des rayons X ( $0,1 < L < 10$  nm) sur un échantillon de sol ( $< 0,063$  mm). Le rayonnement pénètre le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phases vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté.

La condition pour que les radiations soit en phase s'exprime par la loi de Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \dots\dots\dots (VI-28)$$

Avec:

- $n$  : Ordre de la diffraction ;
- $\lambda$  : Longueur d'onde ;
- $d$  : Distance de deux plans réticulaire en Å ;
- $\theta$  : Complément de l'angle d'incidence ;

Cette relation montre qu'il suffit de mesurer les angles de Bragg ( $\theta$ ) pour déterminer les dimensions et la forme de la maille élémentaire du cristal. Les amplitudes des ondes réfléchies permettent de déterminer la structure atomique du motif et donc de connaître l'identité et la proportion des composants cristallisés de l'échantillon étudié.

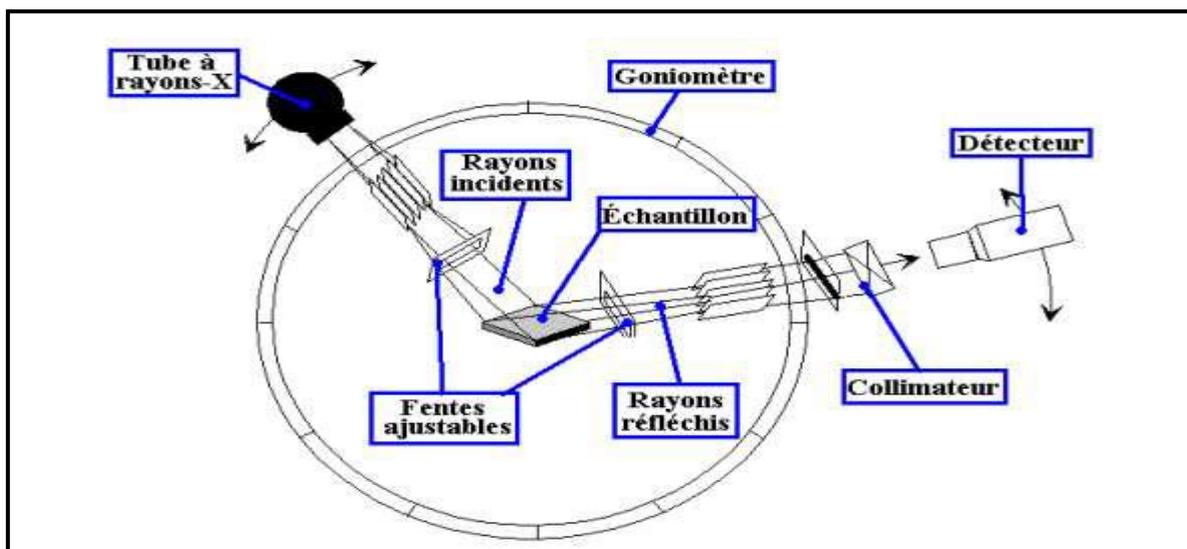
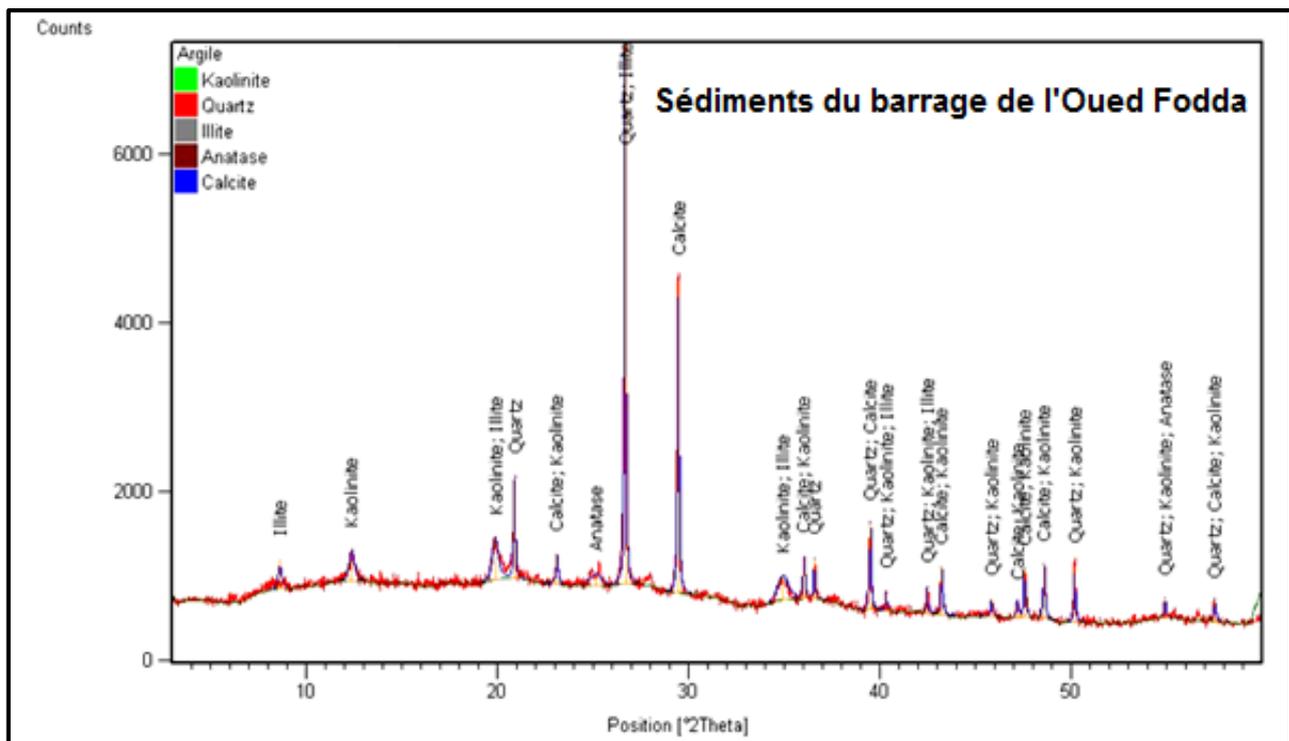


Figure (VI.7) : Représentation schématique de DRX

### ➤ Interprétation des résultats

Le diagramme DRX permet d'identifier les différents minéraux qui constituent la vase (figure (VI.8)). L'examen du diagramme de diffraction de la vase à l'état naturel montre l'existence de raies correspondants aux minéraux tels que le quartz ( $\text{SiO}_2$ ), les carbonates types calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), et les argiles type Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et l'illite.

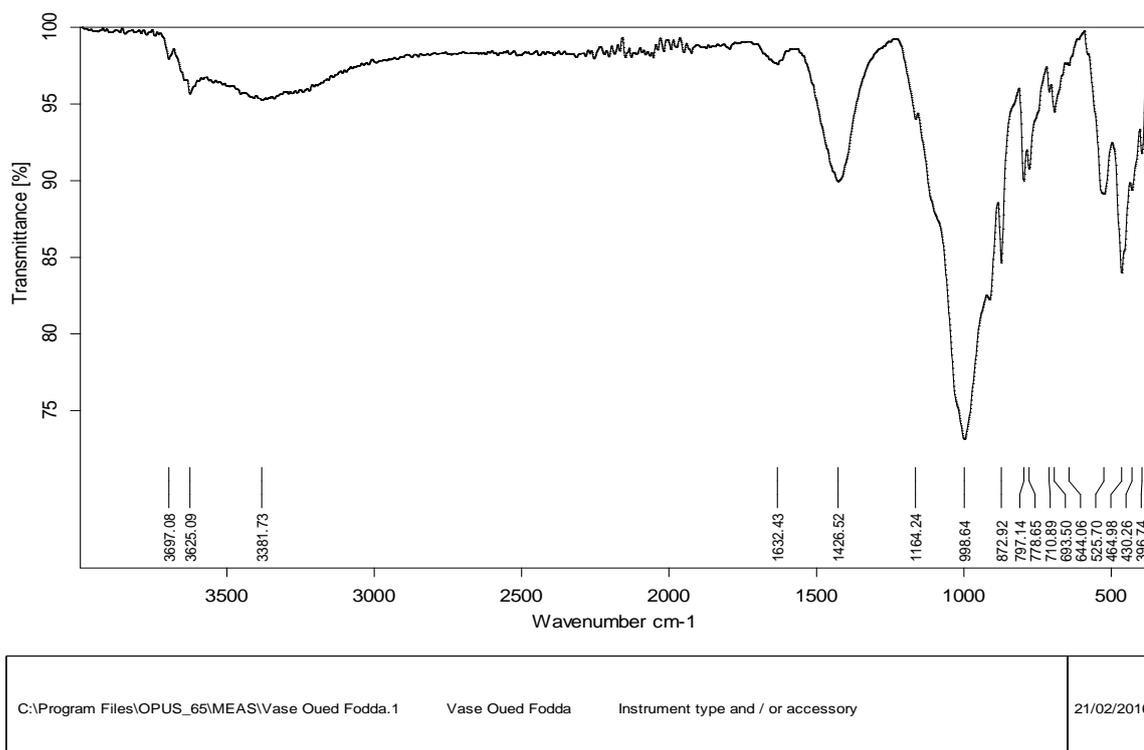


**Figure (VI.8) :** Analyse minéralogique qualitative par diffraction des rayons X de la vase brute de l'Oued Fodda

### B-Analyse infrarouge (spectroscopie IR)

C'est une analyse complémentaire à l'analyse minéralogique par (DRX), elle permet d'identifier les principaux minéraux mal cristallisés dans un matériau argileux. Le spectre infrarouge de la vase naturelle (figure (VI.9)) montre essentiellement :

- Une bande d'adsorption à  $998,64 \text{ cm}^{-1}$  est due à la vibration du groupement Si-O-Si.
- La bande d'adsorption à  $1426,52 \text{ cm}^{-1}$  correspond à la vibration d'élongation du groupement (C=O).
- La bande d'adsorption à  $872,92 \text{ cm}^{-1}$  correspond à la vibration du groupement Al-O-Si.



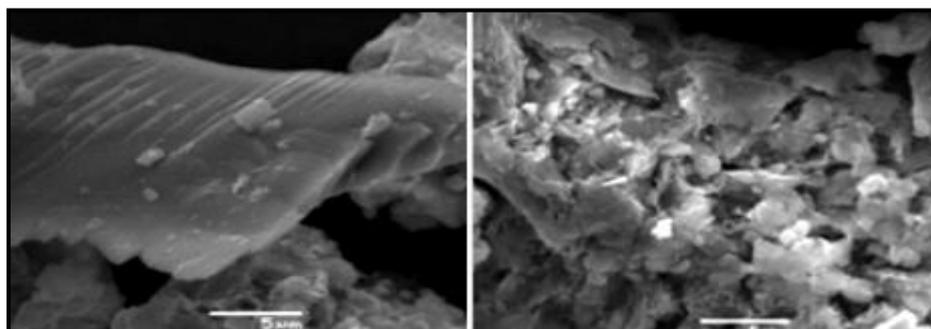
Seite 1 von 1

**Figure (VI.9) :** Spectroscopie IR de la vase brute de l'Oued Fodda

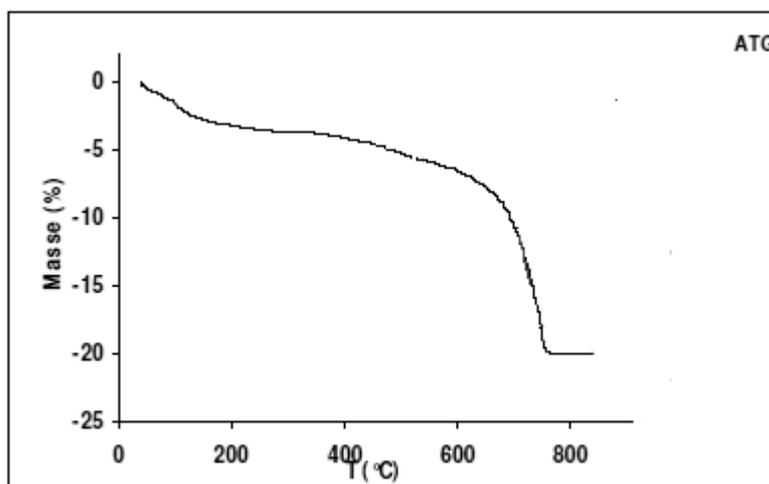
### C-La microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage de la vase de l'Oued Fodda (figure (VI.10)) permet de présenter l'organisation générale des minéraux argileux. Cet échantillon se présente sous forme d'agrégat, c'est-à-dire en petits lots des particules juxtaposées. Les minéraux ont les caractéristiques suivantes :

- Quartz : se présente sous forme de grands cristaux ;
- Kaolinite : se présente sous formes des plaquettes hexagonales qui peuvent avoir parfois certaines déformation telle que des élongations ou parfois altérations ;
- Illite : se présente sous forme de fines particules équidimensionnelles.



**Figure (VI.10) :** MEB de la vase brute de l'Oued Fodda

**D- Analyse thermogravimétrique**

**Figure (VI.11) :** Analyse thermogravimétrique de la vase naturelle du barrage de l'Oued Fodda

Elle permet d'identifier les principaux minéraux par leurs pertes de poids, départ des hydroxydes OH de liaison et du CO<sub>2</sub>. L'analyse a été réalisée au laboratoire d'Application des Electrolytes et Polyelectrolytes Organiques (LAEPO) de l'université ABOU-BAKR BELKAID - TLEMEN sur un appareil thermobalance TGA 2950. Cette analyse a été effectuée avec un gaz inerte « l'azote » et sous une pression de 1 bar. Le programme de température utilisé est : montée de la température ambiante jusqu'à 800°C avec une vitesse de chauffe de 10°C/min. D'après la courbe de l'analyse thermogravimétrique (ATG) effectuée sur la vase naturelle (figure (VI.11)), on note une perte de poids quasi linéaire jusqu'à 100°C correspond au départ de l'eau d'humidité ou d'adsorption retenue par attraction résiduelle à la surface de l'échantillon et de l'eau zéolythique insérée entre les feuillets ou dans les cavités de la structure cristalline, une variation très faible (un amortissement) entre 100°C jusqu'à 340°C, une perte considérable entre 340°C et 620°C correspond à l'élimination de l'eau de constitution de la Kaolinite et une chute quasi linéaire au-delà de 620°C correspond au départ de CO<sub>2</sub> des carbonates.

**VI-6 Conclusion**

Le but de ce chapitre est de l'étude des caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de la vase du barrage de l'Oued Fodda. L'analyse granulométrique effectuée a permis de classer la vase comme un sol fin avec une composition moyenne de 1.1% sable, 65.5% limon et 33.4% argile.

Les limites d'Atterberg de la vase sont:

- Une limite de liquidité de 47.54%.
- Une limite de plasticité de 22.80%.

Selon la classification des sols fins de Casagrande : voir figure (VI.4), la vase est classée comme un sol argileux. Les sols argileux sont caractérisés par une plasticité selon la teneur en eau.

L'analyse minéralogique d'un échantillon de la vase présente la composition de cette dernière en minéraux argileux tel que la kaolinite et l'illite qui justifie la plasticité de la vase et quelques portions de quartz et de calcite. La minéralogie est complétée par une analyse chimique pour identifier la composition en oxydes.

La vase est composée principalement de 46.37% de silice, de 13.73% d'alumine qui vient de la kaolinite et l'illite. Le taux du carbonate est de 11.87% qui justifie le taux de la perte au feu élevé de l'ordre de 17.90%. Ce taux de PAF est dû aussi à la teneur en matière organique.



# CHAPITRE VII

VALORISATION DE SEDIMENTS DU  
BARRAGE DE L'OUED FODDA EN CERAMIQUE

**VII- Valorisation de sédiments du barrage de l'Oued Fodda en céramique****VII-1 Introduction**

Compte tenu des énormes volumes dragués des barrages Algériens, plusieurs chercheurs sont penchés sur la gestion et le devenir des boues de dragage. Cette gestion qui commence toujours par une phase de caractérisation dont l'objet est de déterminer les propriétés qui permettent de préciser les vocations ultérieures du produit.

En fonction des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de la vase de l'Oued Fodda déterminées dans le chapitre précédent, on a déduit que les sédiments du barrage de l'Oued Fodda peuvent être utilisés dans le domaine de fabrication des matériaux de construction. Pour cela et pour confirmer ces résultats on a utilisé la vase comme un composant à la place d'argile dans la fabrication des carreaux de sol en céramique à l'usine CERAL (Céramique Algérienne). Cette utilisation est justifiée par des tests physico-mécaniques pour montrer que les résultats respectent les normes internationales exigées.

**VII-2 Présentation de la société CERAL**

CERAL l'expression du savoir faire créée en 1987 située à une distance de 15 Km à l'Est d'Oran (Algérie) dans la zone industrielle de Hassi Aneur, céramique algérienne CERAL n'a cessé de se développer grâce à un programme d'expansion ambitieux lui permettant aujourd'hui d'atteindre une capacité journalière de production de 8 000 m<sup>2</sup> de carreaux de sol et qui sera portée à 12 000 m<sup>2</sup> avec la mise en fonction d'une nouvelle ligne de production début 2014. Dans le cadre de sa stratégie de développement et afin de consolider sa position sur le marché national, l'entreprise s'est engagée à partir de 2010 dans un vaste programme de modernisation et de restructuration. CERAL dispose d'une large gamme de produits en formats 33cm x 33cm et 45 cm x 45 cm, en différentes typologies notamment (marbrés, rustiques, reliefs,...) tout en poursuivant l'introduction de nouveaux modèles, tous placés sous le signe du confort et d'esthétique.

**VII-3 Essais et tests effectués en laboratoire**

La céramique fait partie du domaine de la chimie cependant un laboratoire a conçu spécialement afin d'effectuer tout les tests physicochimique possible.

SARL CERAL a mis à la disposition des ingénieurs chimistes toutes les commodités afin de garantir la meilleure qualité aux clients.

Les analyses effectuées sont comme suit :

- Analyse de la barbotine
- Analyse de la poudre atomisée
- Analyse du carreau pressé
- Analyse du carreau sec
- Analyse du carreau cuit

**VII-3-1 Préparation du mélange en matière première**

Le choix de la composition du mélange en matière première est confirmé par des tests physico céramiques. Ce mélange est utilisé pour la fabrication des carreaux de sol en céramique doit répond à certains exigences et normes. Il s'agit de passer une quantité de ce mélange par les différents étapes de fabrication et vérifier les paramètres de contrôle de qualité du produit final à savoir le retrait, l'absorption, la perte au feu et la résistance à la flexion.

**VII-3-1-1 Calcul du taux de la vase à utilisé dans la formulation**

La société CERAL Hassi Ben Okba (Oran, Algérie) utilise comme matière première un mélange de : 12% d'argile de Ain Franine, 17% de Grès et 71% de Schiste. La composition chimique de chaque élément est donnée dans le tableau (VII.1). Si on remplace directement l'argile de Ain Franine par la vase du barrage de l'Oued Fodda avec le même pourcentage, on aura un taux de la silice et de l'alumine dans la composition chimique du mélange inférieure à celui de la composition initiale (celle préparée par l'argile de Ain Franine). Par contre que le taux de la chaux et la perte au feu est supérieur. Cette différence peut créer des défauts dans le produit final au niveau de la couleur, le retrait, l'absorption et surtout la résistance.

Pour rattraper cette différence en composition chimique du mélange, on a proposé une autre formulation avec laquelle on s'approche à la formulation initiale. Cette fois ci, on utilise

la vase du barrage de l'Oued Fodda avec un taux de 13%, le grès 16% et un taux de schiste de 71% (Voir le tableau VII.2).

Le mélange de la matière première proposé en utilisant la vase du barrage de l'Oued Fodda permet de diminuer la perte au feu de 17.90% au 6.45% pour un taux de référence de 5.58%. Il reste toujours loin de celui de la formulation initiale mais il est dans les normes.

L'avantage de la formulation proposée est d'utiliser un pourcentage de 13% de la vase. Le choix du pourcentage des matières premières doit être confirmé par des analyses et des tests physico céramique toute en comparant les résultats trouvés aux normes et exigences de l'industrie des carreaux de sol en céramique.

**Tableau (VII.1) :** Composition chimique de la matière première utilisée par CERAL

Oxydes	Argile de Ain Franine (12%)		Grès (17%)		Schiste (71%)		Total de la matière première utilisée par CERAL(%)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	53.03	6.36	61.99	10.53	64.38	45.70	62.59
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14.70	1.76	15.72	2.67	16.97	12.04	16.47
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.80	0.69	3.45	0.58	7.16	5.08	6.35
<b>CaO</b>	4.65	0.55	6.23	1.05	0.26	0.18	1.78
<b>MgO</b>	2.75	0.33	1.57	0.26	1.46	1.03	1.62
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.95	0.11	2.86	0.48	1.19	0.84	1.43
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1.84	0.22	2.46	0.41	2.89	2.05	2.68
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.74	0.08	0.45	0.07	0.90	0.64	0.79
<b>PAF</b>	11.65	1.39	5.12	0.87	4.68	3.32	5.58

Tableau (VII.2) : Composition chimique de la matière première proposée

Oxydes	Vase de l'Oued Fodda (13%)		Grès (16%)		Schiste (71%)		Total de la matière première proposée(%)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	46.37	6.02	61.99	9.91	64.38	45.70	61.63
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	13.73	1.78	15.72	2.51	16.97	12.04	16.33
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.76	0.74	3.45	0.55	7.16	5.08	6.37
<b>CaO</b>	11.87	1.54	6.23	0.99	0.26	0.18	2.71
<b>MgO</b>	1.64	0.21	1.57	0.25	1.46	1.03	1.49
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.37	0.04	2.86	0.45	1.19	0.84	1.33
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1.48	0.19	2.46	0.39	2.89	2.05	2.63
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.67	0.08	0.45	0.07	0.90	0.64	0.79
<b>PAF</b>	17.90	2.32	5.12	0.81	4.68	3.32	6.45

### VII-3-2 Préparation de la barbotine

La vase du barrage est séchée dans l'étuve à une température de 105°C pendant 48 heures afin d'éliminer l'humidité initiale puis concassée et broyée jusqu'à qu'elle passe par le tamis de 2mm pour faciliter le broyage puis. Après on a pris une quantité de 1000g de mélange en matière première pour préparer les 2 types de barbotine comme suit :

A-Le mélange en matière première pour préparer la barbotine de CERAL (1000g): 710g de schiste, 170g de grès et 120g d'argile de Ain Franine.

B- Le mélange en matière première pour préparer la barbotine proposée (1000g): 710g de schiste, 160g de grés et 130g de vase de l'Oued Fodda.

Ensuite on a mis dans un bécher de 2000ml le mélange de la matière première de CERAL et dans un autre bécher le mélange de la matière première qui contient la vase de l'Oued Fodda et on a ajouté un volume de 400ml d'eau de gâchage et 4,2g de défloculant (Tripolyphosphate de sodium) dans les deux béchers après on a mis chaque mélange dans un broyeur à bille (Photo (VII.1)) pendant une durée de 2 heures. Le temps de broyage est limité par la viscosité, la densité de la barbotine produite et le pourcentage du refus d'un tamis de 80 micro mètre. A la fin on a obtenu deux types de liquide homogène appelé barbotine.



**Photo (VII.1) :** Broyeur à bille MGS20S01

### **VII-3-3 Préparation de la poudre atomisée**

La poudre atomisée est obtenue comme suit : La barbotine préparée est séchée à 105°C pendant 8 heures, concassée, broyée et tamisée par un tamis de 1mm.

### **VII-3-4 Préparation des carreaux éprouvette**

La poudre produite (poudre atomisée) est utilisée pour fabriquer les éprouvettes à l'aide d'une presse hydraulique qui exerce une pression verticale de 100 bar (Photo (VII.2)). La poudre doit être avoir une humidité initiale qui varie entre 4.2 à 5.5% comme une condition d'un bon pressage. Nous avons préparé deux types des carreaux éprouvette:

carreaux préparés par la composition de la vase du barrage de l'Oued Fodda et d'autres carreaux préparé par la poudre atomisée prélevée à partir de l'usine et qui est préparée par l'argile de Ain Franine.



**Photo (VII.2) :** Carreaux éprouvette préparés par une presse hydraulique

On a préparé 3 types de carreaux éprouvette de 55mm de largeur et 110mm de longueur:

**1-Crus :** ce sont des carreaux pressés

**2-Séchés :** ce sont des carreaux pressés mis à l'étuve à une température de 105°C pendant 5 heures

**3-Cuits :** ce sont des carreaux séchés mis au four à des différentes températures : 800,900, 1000°C et d'autres carreaux sont passés par le four tunnel dans la ligne de production de l'usine dont la température maximale de la cuisson est de 1100°C.

### **VII-3-5 Analyses et résultats des échantillons préparés**

#### **VII-3-5-1 Analyse de la barbotine**

##### **VII-3-5-1-1 La viscosité**

On a essayé de montrer que la barbotine préparée du mélange de l'Oued Fodda a une viscosité idéale et par comparaison avec la barbotine de CERAL par 2 méthodes :

##### **1-Analyse par viscosimètre**

##### **2-Analyse rhéologique**

###### **1-Analyse par viscosimètre**

**A-But :** On a testé la viscosité afin de déterminer si on a un bon écoulement de la barbotine de CERAL et du mélange de l'Oued Fodda.

### **B- Description de la méthode**

On prend un échantillon des 2 types de barbotine pour l'analyser à l'aide d'un viscosimètre PCE-127 de diamètre de 4mm (Photo (VII.3)) et on mesure le temps d'écoulement.



**Photo (VII.3) :** Viscosimètre PCE-127

La viscosité idéale est entre 25 et 30 secondes.

**On a trouvé une viscosité égale à 26 secondes pour la barbotine de CERAL et 28 secondes pour la barbotine préparée par le mélange proposé ce qui respecte la norme exigée.**

### **2-Analyse rhéologique**

Les mesures rhéologiques ont été effectuées sur un rhéomètre à contrainte imposée [46] appelé HAAKE RheoStress 600 dans le Laboratoire de Rhéologie Transport et Traitement des Fluides Complexes LRTTFC à l'université des sciences et technologies d'Oran. La géométrie du rhéomètre est en cylindre coaxial.

Toutes les mesures ont été effectuées à température ambiante (20°C). Le HAAKE RheoStress 600 est conçu pour le rhéologue créatif qui utilise son rhéomètre dans un environnement de recherche. Grâce à sa modularité, le RheoStress 600 peut être rapidement adapté à de nouvelles exigences, il dispose de plusieurs géométries de mesure d'un Régulateur de température et d'un logiciel appelé RhéoWin pour la mesure et l'exploitation

complet de tous les modes de mesure. Il permet de commander le RheoStress 600 et de traiter les données de mesure sous forme de graphe ou de tableau numérique. [47]

Sur la figures (VII.1), nous avons représenté en abscisse le gradient de vitesse de cisaillement et en ordonnée la contrainte de cisaillement. Les différentes mesures sont traitées à l'aide d'un logiciel du rhéomètre RS 600.

Nous avons testé deux barbotines: une préparée par l'argile de Ain Franine utilisée dans l'usine CERAL et une autre préparée par la vase du barrage de l'Oued Fodda dont le but est de comparer le comportement rhéologique et l'écoulement sous l'application d'une vitesse variable en mesurant la contrainte équivalente pour chaque vitesse.

La variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse est linéaire pour les deux mixtures mesurée. Ils obéissent au model linéaire de Bingham avec un coefficient de corrélation qui s'approche beaucoup à un. Il est de l'ordre de 0.93 pour la barbotine de CERAL et de 0.94 pour la barbotine de la vase du barrage de l'Oued Fodda. Les équations des deux courbes de tendance sont:

- Barbotine de CERAL :  $y = -0.7714 \dot{\gamma} + 20.677$  ..... (VII-1)

- Barbotine de l'Oued Fodda :  $y = -0.3935 \dot{\gamma} + 12.472$  ..... (VII-2)

La contrainte du seuil de la barbotine de l'Oued Fodda est inférieure à la contrainte du seuil de la barbotine de CERAL, ça veut dire que la première (celle de l'Oued Fodda) s'écoule mieux dans le circuit à partir des bacs de stockage de la barbotine jusqu'aux injecteurs de l'atomiseur en passant par les pompes à pistons.

Donc, la barbotine de la vase du barrage de l'Oued Fodda s'écoule avec moins de risque de colmatage des conduites et un bon rendement des pompes. Cela est confirmé par la variation de la viscosité tracé dans la figure (VII.2), dont la barbotine préparée par la vase est moins visqueuse que celle préparée par l'argile de Ain Franine avec les mêmes concentrations est pour chaque vitesse de cisaillement appliquée.

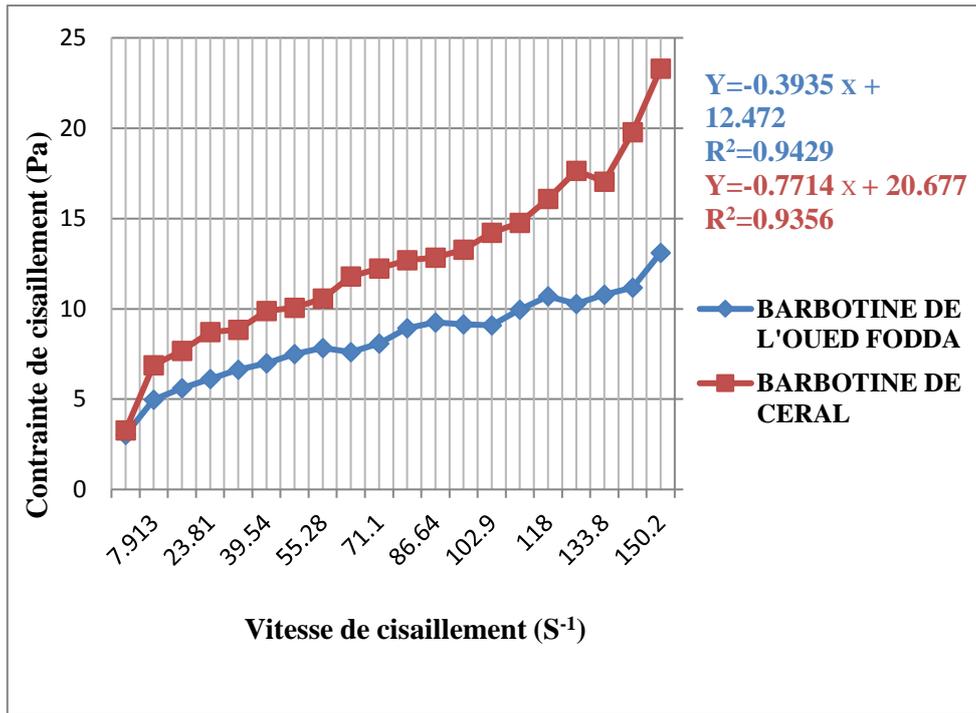


Figure (VII.1) : Contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse

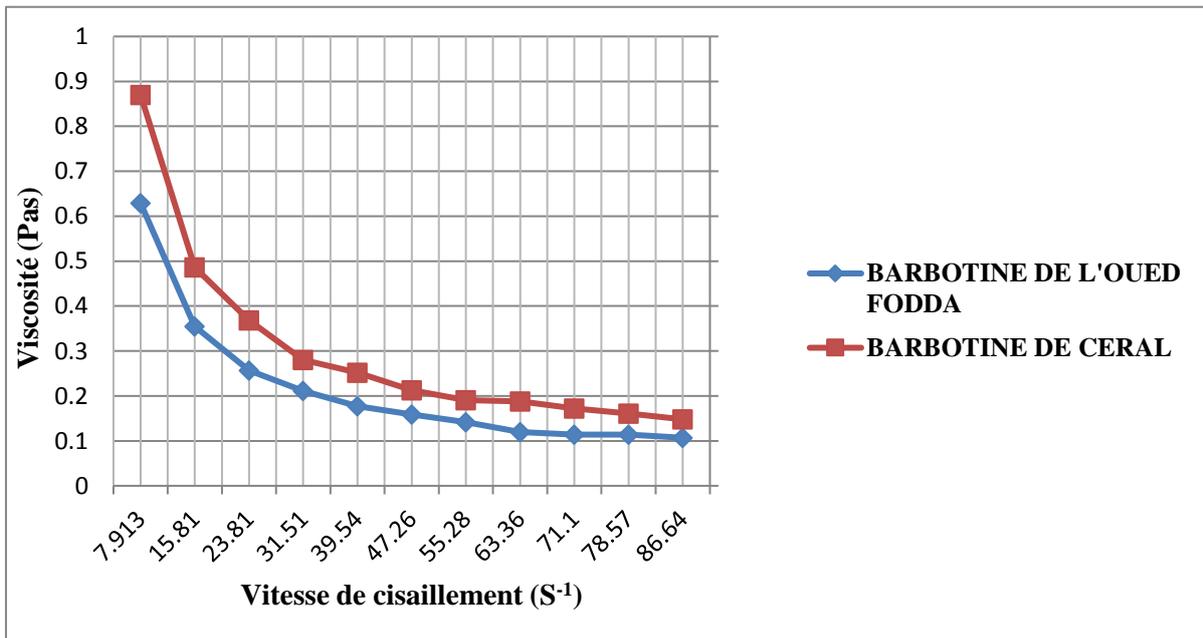


Figure (VII.2) : Viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement

### VII-3-5-1-2 La densité

**A-But** : ce test nous permet de savoir si les conditions de travail sont respectées les normes.

La densité idéale est entre 1570 et 1600 g/l.

**B-Description de la méthode**

On prend un échantillon des 2 types de barbotine pour l'analyser à l'aide d'un densimètre (Photo (VII.4)) de 200g soit Pd et de volume 100cm<sup>3</sup> rempli avec la barbotine ensuite pesé le tout soit Pt.

$D = \frac{Pt - Pd}{V}$  on doit trouver une densité entre 1,57kg/l et 1,6 kg/l.



**Photo (VII.4) :** Densimètre VF2099

**On a trouvé une densité de 1583 g/L pour la barbotine préparée par le mélange proposé et de 1592 g/l pour la barbotine de CERAL.**

**VII-3-5-1-3 Le résidu**

**A-But :** le but de ce travail est de savoir si le mélange est bien broyé.

Le résidu doit être Inférieur ou égale à 3g.

**B-Description de la méthode**

- On prend 100 ml de chaque barbotine, on verse le contenu dans un tamis à 230 maille/cm<sup>2</sup> (0,6mm) : voir (photo (VII.5)) ;



**Photo (VII.5) :** Tamis de 230 maille/cm<sup>2</sup>

- On rince le contenu du tamis avec de l'eau en agitant avec la main ;
- Mettre le contenu dans un étuve pendant 30min ;
- Retirer de l'étuve et on pèse la quantité sèche qui doit être  $\leq 3g$  .ce grammage obtenu est appelé le résidu R.

**On a trouvé un résidu de 2,2 g pour la barbotine de CERAL et de 2,7g pour la barbotine préparée par le mélange proposé**

### **VII-3-5-2 Analyse de la poudre atomisée**

A la fin de l'opération d'atomisation, on est amené à tester la poudre atomisée comme suit :

**-Test d'humidité**

**-Test de la granulométrie**

#### **VII-3-5-2-1 Test d'humidité de la poudre atomisée**

La mesure d'humidité se fait par une méthode automatique à l'aide d'une balance thermique (Photo (VII.6)).

- On Pèse un échantillon de 7g de chaque poudre (CERAL et préparée par le mélange proposé) sur assiette spécial ;
- Le mettre dans la machine thermique;
- La machine nous donne la valeur de l'humidité de la poudre sur l'écran.



**Photo (VII.6):** La balance thermique

L'humidité de la poudre atomisée doit être entre 4,2% et 5,5%. Si l'humidité est inférieure à 4,2% on obtient un carreau mal pressé et fragile après la cuisson et si l'humidité est supérieure à 5,5% on obtient un carreau fissuré après la cuisson.

**On a trouvé que l'humidité de la poudre atomisée de CERAL est :  $H = 4,97\%$  et une humidité  $H = 4,89\%$  pour la poudre préparée par le mélange proposé.**

#### **VII-3-5-2-2 Test de granulométrie de la poudre atomisée**

Le but de cette opération est de déterminer le pourcentage successif des diamètres des différents constituants de la poudre.

##### **A- Mode opératoire**

On assemble 06 tamis chacun à un diamètre de mailles précis :

- Tamis de 40 mailles/cm<sup>2</sup>
- Tamis de 50 mailles/ cm<sup>2</sup>
- Tamis de 100 mailles/ cm<sup>2</sup>
- Tamis de 120 mailles/ cm<sup>2</sup>
- Tamis de 140 mailles/ cm<sup>2</sup>
- Tamis de 200 mailles/ cm<sup>2</sup>

Ces tamis sont superposés de telle façon à avoir le tamis à diamètre plus grand le premier ensuite au fur et à mesure qu'on descend le diamètre diminue :

- On pèse une quantité de la poudre atomisée (CERAL ou préparée) soit de poids  $P_1 = 100\text{g}$  ensuite on verse cette quantité dans le 1<sup>er</sup> tamis ;
- Superposer les 6 tamis dans un vibreur (Photo (VII.7)) Pendant 30 min ;
- On pèse la quantité restante dans chaque tamis ;
- On calcule le pourcentage de ces quantités.



**Photo (VII.7) :** Tamis superposés dans le vibreur

### B-Remarque

- Les trois 1<sup>ers</sup> tamis doivent contenir un taux qui varie entre 70-80 % de poudre tamisée.
- Les tamis restants doivent contenir un taux qui varie entre 15-25%.
- Le reste doit être inférieur à 5%.

### C-Résultats

Le tableau (VII.3) ci-dessous donne les valeurs de l'analyse granulométrique des 2 types de poudres atomisées (de CERAL et préparée par le mélange proposé).

**Tableau (VII.3) :** Analyse granulométrique des 2 types de poudres atomisées

<b>Poids des tamis</b>	<b>Poudre atomisée de CERAL</b>	<b>Poudre atomisée préparée par le mélange proposé</b>
<b>Poids de trois premiers tamis</b>	<b>75g</b>	<b>72g</b>
<b>Poids de deux tamis suivi</b>	<b>23g</b>	<b>24g</b>
<b>Poids de dernier tamis</b>	<b>2g</b>	<b>4g</b>

**VII-3-5-3 Analyse des carreaux éprouvette crus (pressés)**

On a effectué les tests suivants sur des carreaux éprouvette crus :

**VII-3-5-3-1 Test de pénétration du carreau éprouvette cru**

Ce test nous permet de voir si le carreau est bien pressé ; pour cela on dispose d'un appareil appelé pénétromètre (Photo (VII.8)) on mesure la pénétration au milieu et aux extrémités du carreau.

La pénétration doit être  $\leq 1\text{mm}$ .



Photo (VII.8) : Pénétromètre

**On a trouvé une valeur de pénétration égale à 0,6mm pour le carreau éprouvette de CERAL et une valeur de 0,8mm pour le carreau préparé par la poudre atomisée du mélange proposé**

**VII-3-5-3-2 La résistance à la flexion des carreaux éprouvette crus  $R_f$** 

Le test détermine si le carreau est assez résistant de tel façon après le séchage supportera les différents chocs mécaniques exercés .un appareil appelé machine à résistance à la flexion (Photo (VII.9)) nous permet de mesurer sa dureté.

La résistance du carreau pressé doit être  $\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ .



**Photo (VII.9) :** Machine à résistance à la flexion

Les résultats de la résistance à la flexion des 2 types de carreaux crus sont mentionnés dans le tableau (VII.4) ci-dessous.

**Tableau (VII.4) :** Résistance à la flexion des carreaux crus en N/mm<sup>2</sup>

		Oued Fodda	Ain Franine
Crus	1	1.7	2
	2	2.6	2.8
	3	1.8	2

Les carreaux préparés par la vase du barrage de l'Oued Fodda ont donné une résistance crue moyenne de 2.03N/mm<sup>2</sup>. Les autres carreaux préparés par l'argile de Ain Franine ont donné une résistance crue moyenne de 2.26N/mm<sup>2</sup>.

#### VII-3-5-4 Analyse des carreaux éprouvette séchés

On a effectué les tests suivants sur des carreaux éprouvette séchés :

- L'humidité du carreau séché
- Résistance à la flexion du carreau séché

##### VII-3-5-4-1 Test d'humidité du carreau éprouvette séché

On pèse le carreau pressé soit du poids P1. Après séchage à l'étuve à une température de 105°C pendant 5 heures on le pèse soit du poids P2.

L'humidité est calculée par la formule suivante :  $H = (P1 - P2) * 100\% / P1$

Si l'humidité du carreau à l'entrée du four dépasse 2% une transformation brusque de l'eau interstitielle de l'état liquide à l'état gazeux engendre l'explosion du carreau.

**On a trouvé une humidité H=1% pour le carreau éprouvette séché de CERAL et une humidité H= 1,2% pour le carreau éprouvette séché préparé par la vase de l'Oued Fodda.**

#### VII-3-5-4-2 Test de la résistance à la flexion des carreaux éprouvette séchés

Il se fait par le même principe que le test du carreau pressé.

-la résistance du carreau séché doit être  $\geq 6 \text{ N/mm}^2$

Les résultats de la résistance à la flexion des 2 types de carreaux séchés sont mentionnés dans le tableau (VII.5) ci-dessous.

**Tableau (VII.5) : Résistance à la flexion des carreaux séchés en N/mm<sup>2</sup>**

		Oued Fodda	Ain Franine
Séchés	1	5.5	5.7
	2	6.6	6.9
	3	6.2	6.3

Les carreaux préparés par la vase du barrage de l'Oued Fodda ont donné une résistance sèche moyenne de 6.1 N/mm<sup>2</sup>. Les autres carreaux préparés par l'argile de Ain Franine ont donné une résistance sèche moyenne de 6.3 N/mm<sup>2</sup>.

Le comportement des carreaux préparés par la vase du barrage de l'Oued Fodda est très bon vis-à-vis le pressage et le séchage. Nous avons trouvé des résultats acceptables en comparant par les carreaux préparé par l'argile de Ain Franine (celle utilisé dans l'usine CERAL). Le produit de CERAL résiste mieux à la flexion que le produit de l'Oued Fodda mais les deux sont dans la marche des exigences demandés et suivant la norme internationale.

### VII-3-5-5 Analyse des carreaux éprouvette cuits

Pour avoir un produit final conforme aux normes et exigences internationale (ISO 13006) [48] des carreaux éprouvette séchés sont passés par un four au niveau de laboratoire de l'usine CERAL pour les températures maximales de cuisson: 800, 900 et 1000°C. D'autres carreaux sont passés par le four tunnel dans la ligne de production de l'usine dont la température maximale de la cuisson est de 1100°C.

Le but de varier la température maximale de cuisson est de déterminer son influence sur les paramètres physiques du carreau tel que la résistance à la flexion, l'écart de longueur et de largeur et la perte au feu.

Pour chaque température, nous avons utilisé trois carreaux secs préparés par la vase du barrage de l'Oued Fodda dont l'humidité est environ de 1.2% et trois autres préparé par l'argile de Ain Franine.

Les tests effectués sur les carreaux éprouvette cuits sont :

#### VII-3-5-5-1 Retrait à la cuisson

La détermination de la valeur de retrait se fait par l'étude de la variation de la moyenne des longueurs et largeurs des traits enregistrés sur les éprouvettes entre le séchage à 105°C pendant 5 heures et la cuisson à différentes températures. La formule suivante permet le calcul du retrait à la cuisson :

$$\text{Retrait à la cuisson } r \text{ (\%)} = (L_{105} - L_t / L_{105}) * 100\%$$

**L<sub>t</sub> (mm):** longueur ou largeur carreau cuit à une température (t)

**L<sub>105</sub> (mm):** longueur ou largeur du carreau éprouvette séché à 105°C

Le retrait à la cuisson **r** doit être : ± 0,5 %.

Les résultats du retrait à la cuisson sont présentés dans les figures (VII.3 et 4) ci-dessous :

L'écart de longueur (figure (VII.3)) augmente en fonction de la température, il est au dessous de la limite minimale de la norme ISO 13006 pour la température 1100°C.

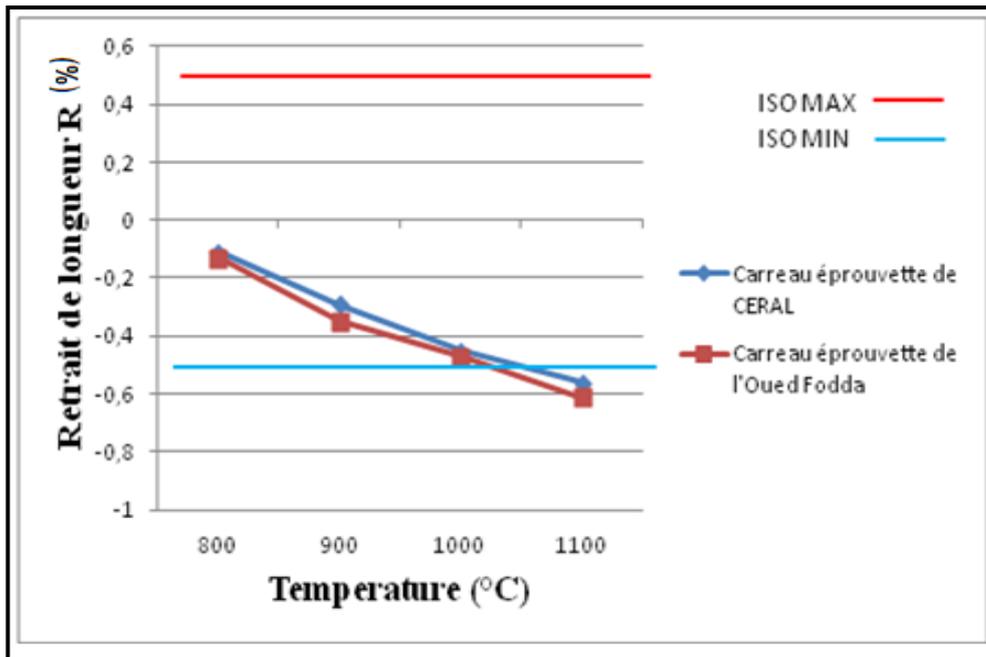


Figure (VII.3) : Variation de l'écart de longueur en fonction de la température

L'écart de largeur (figure (VII.4)) augmente aussi en fonction de la température.

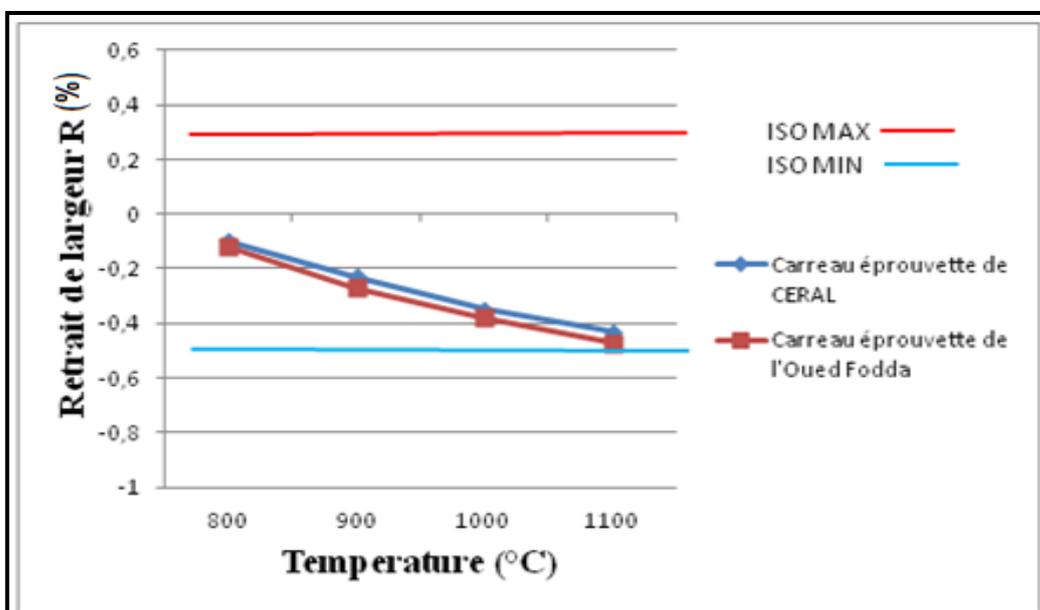


Figure (VII.4) : Variation de l'écart de largeur en fonction de la température

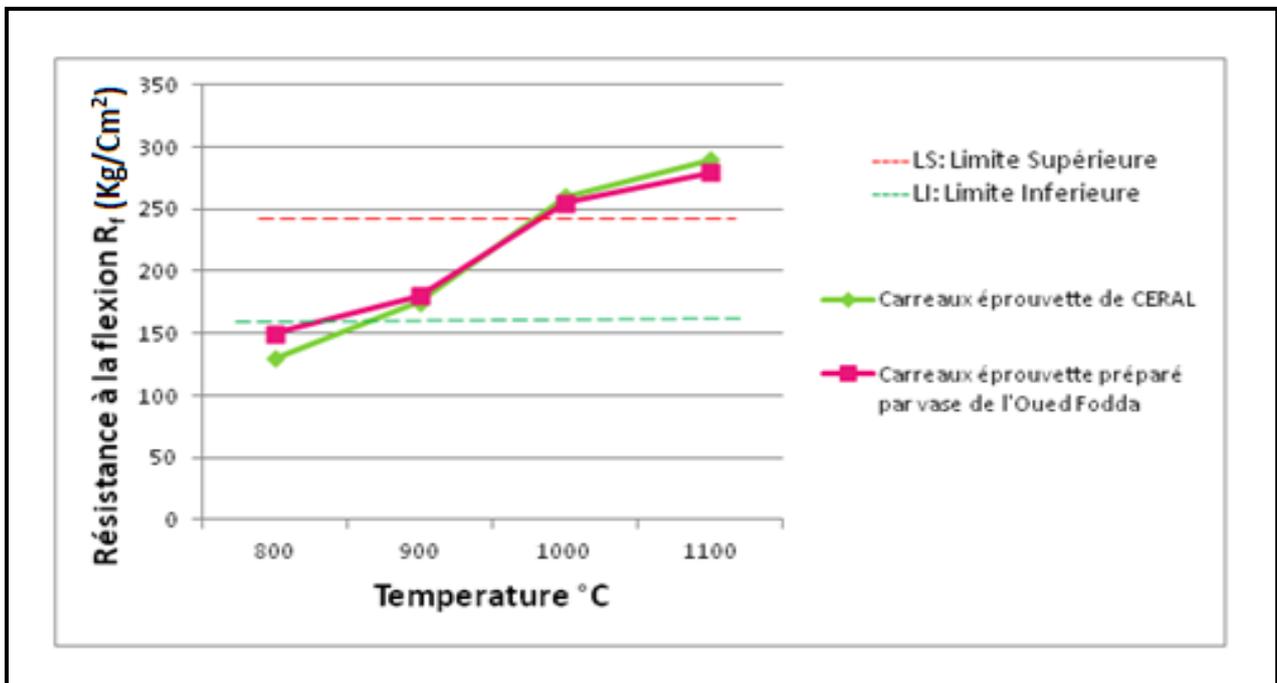
Pour la déformation il est bien clair que celle de l'Oued Fodda perd une longueur de 0.47% et une largeur de 0.38% par contre que les carreaux de CERAL perd que 0.45% en longueur et de 0.35% en largeur.

**VII-3-5-5-2 Test de la résistance à la flexion des carreaux éprouvette cuits**

Ce test se fait par le même principe que le test du carreau séché

-la résistance du carreau cuit doit être  $\geq 245 \text{ kgf/ cm}^2$ .

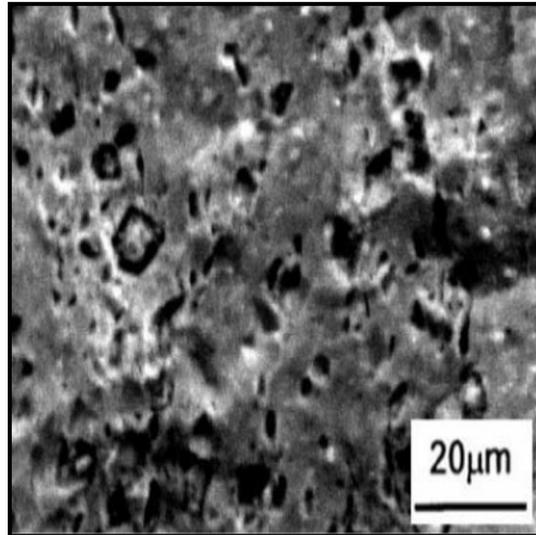
La figure (VII.5) ci-dessous présente une comparaison entre la résistance à la flexion des carreaux préparés par la vase du barrage de l'Oued Fodda et celle des carreaux préparés par l'argile de Ain Franine. Cette comparaison est effectuée sur des carreaux crus, secs et après cuisson à la température de 1100°C. Suivant les résultats trouvés la résistance à la flexion des carreaux préparés par la vase du barrage de l'Oued Fodda est proche à celle de Ain Franine pour les différentes températures de cuisson.



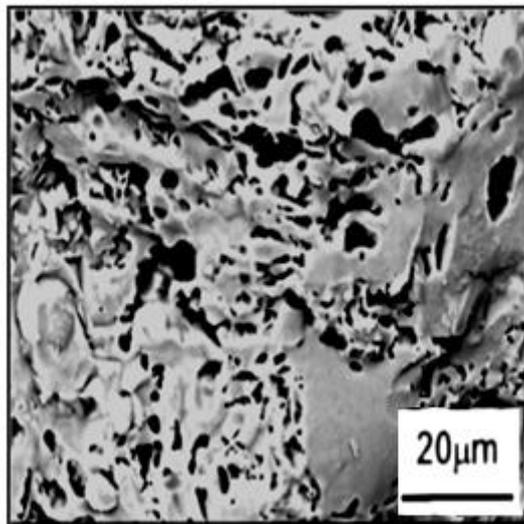
**Figure (VII.5) :** Variation de la résistance à la flexion en fonction de la température

Elle est au dessous de la limite inférieure ( $170 \text{ Kg/cm}^2$ ) pour la température  $800^{\circ}\text{C}$ , elle est bonne pour les températures  $900^{\circ}\text{C}$ , et elle est au dessus de la limite supérieure de la norme avec une résistance moyenne de  $280 \text{ Kg/cm}^2$  à la température  $1000$  et  $1100^{\circ}\text{C}$  dont la norme exige seulement une résistance de  $245 \text{ Kg/cm}^2$ . Plus la température de cuisson augmente plus que le carreau produit résiste bien à la flexion, dans notre cas, et suivant les résultats trouvés, une température de  $1000^{\circ}\text{C}$  est suffisante pour avoir un carreau qui répond aux normes et exigences internationale ISO 13006.

Finalemment et pour justifier les résultats de la résistance à la flexion trouvés, on a fait une microscopie électronique à balayage (MEB) des 2 poudres (préparée par la vase de l'Oued Fodda : figure (VII.6) et de CERAL : figure (VII.7)) obtenues après concassage et broyage des carreaux éprouvettes cuits à 1000°C et tamisage de 1mm.



**Figure (VII.6) :** MEB de la poudre du carreau éprouvette préparé par la vase cuit à 1000°C



**Figure (VII.7) :** MEB de la poudre du carreau éprouvette de CERAL cuit à 1000°C

La microscopie électronique à balayage des 2 poudres frittées à 1000°C révèle une structure hétérogène, avec des pores dont la taille peut atteindre 2 à 3 µm. L'assemblage quartz-liquide silicaté est toujours entouré d'espaces vides. A cette échelle d'observation, il ne semble pas y avoir d'autres minéraux présents dans la matrice. On observe aussi des grains distincts de tailles variables correspondant probablement à du quartz et à une masse vraisemblablement amorphe. Les images de MEB révèlent un nombre plus important de grains distincts tandis que la densité des pores à grand diamètre a considérablement diminué. C'est sans doute cette répartition homogène de pores et de grains qui confère aux 2 matériaux une meilleure résistance à la flexion. La matrice liquide renferme toujours du quartz et les pores sphériques semblent grossir avec la température de cuisson.

#### VII-3-5-5-3 Perte au feu (PAF)

La perte au feu de chaque carreau entre le séchage à 105°C et les différentes températures de cuisson est déterminée selon la formule suivante :

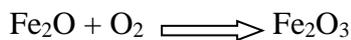
$$\text{Perte au feu \%} = 100\% * (m_{105} - m_t) / m_{105}$$

**m<sub>105</sub> (g):** masse du carreau éprouvette séché à 105°C

**m<sub>t</sub> (g):** masse du carreau éprouvette cuit à la température (t)

La perte au feu permet seulement de connaître la quantité des produits susceptibles de se décomposer ou de se volatiliser au cours de la cuisson. A 500°C, le produit perd son eau de constitution. Entre 700 et 900°C, les réactions suivantes peuvent se produire (Lefort, 1988):

#### - Oxydation de FeO :



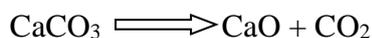
#### - Décomposition des sulfates:



#### - Décomposition des nitrates :

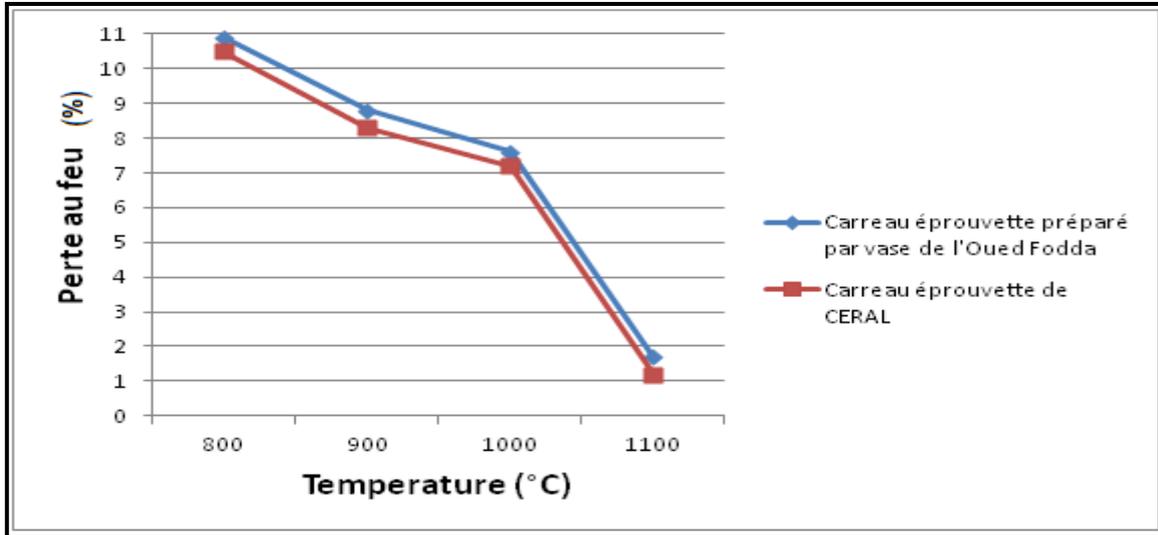


#### - Décomposition des carbonates :



La perte au feu doit être : < 8 %.

On a trouvé que La perte au feu ou la différence en poids du carreau (figure (VII.8)) diminue en fonction de la température de la cuisson pour les deux types des carreaux.



**Figure (VII.8) :** Variation de la perte au feu en fonction de la température

Selon les résultats trouvés on peut déduire que le taux de la perte au feu est presque identique dans les 2 types de carreau sachant que le taux de perte au feu dans le carreau préparé par la vase du barrage de l'Oued Fodda est de 7.6% dont l'autre carreau de CERAL a un taux de perte au feu de 7.2% .La température de cuisson 1000°C a donné des carreaux de bonne qualité de point de vue déformation le long de la longueur et de la largeur.

#### VII-3-5-5-4 Porosité

La détermination de la porosité permet d'évaluer le pourcentage des vides dans le matériau. On procède par mettre des carreaux éprouvette cuits dans un Becher rempli d'eau distillée, qu'on porte à ébullition pendant deux heures. Ensuite on laisse reposer les carreaux 24 h, on les retire du Becher, puis, on les pèse. La porosité selon ISO 13006 doit être :

**3% < P ≤ 6%**, elle est déterminée par la formule suivante :

$$P (\%) = (m1 - m0) / m0 \cdot 100$$

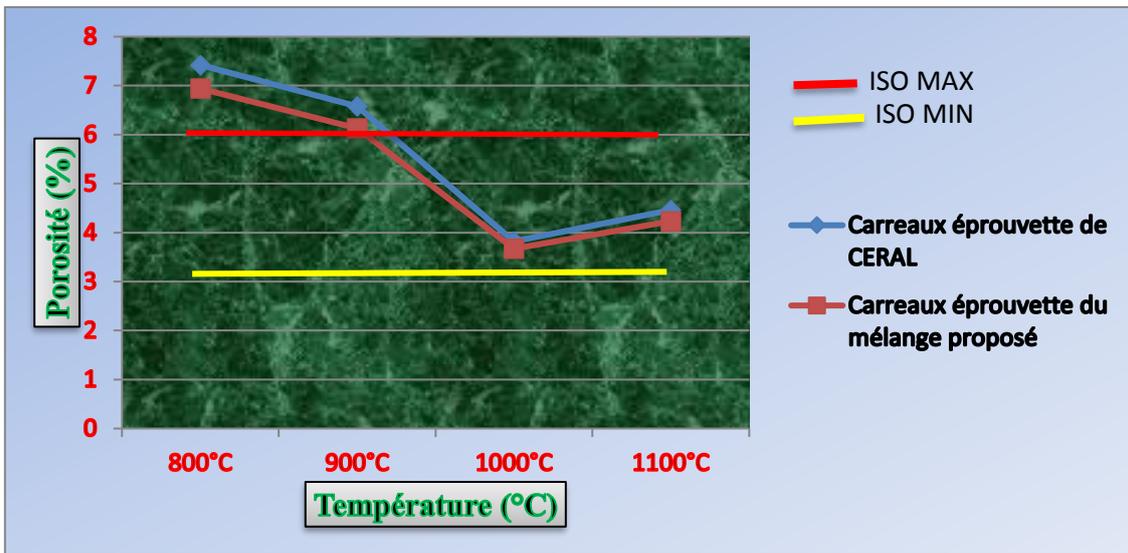
**m0:** Masse initiale du carreau éprouvette cuit

**m1 :** Masse finale du carreau éprouvette après l'essai

Le tableau (VII.6) et la figure (VII.9) ci-dessous présentent les résultats de la porosité des carreaux éprouvette préparés par le mélange proposé et de CERAL.

**Tableau (VII.6) :** Résultats de la porosité des carreaux éprouvette du mélange proposé et de CERAL cuits à des différentes températures

	800°C	900°C	1000°C	1100°C
Porosité des carreaux éprouvette de CERAL	7,42	6,58	3,82	4,46
Porosité des carreaux éprouvette du mélange proposé (%)	6,94	6,13	3,67	4,23



**Figure (VII.9) :** Variation de la porosité des carreaux éprouvette de CERAL et du mélange proposé en fonction de la température de cuisson

Il est à noter que la porosité d'un matériel céramique est composée par une porosité ouverte, et une porosité fermée. A 1000°C, la porosité ouverte est un peu faible pour les deux échantillons. Cette évolution de la porosité suit l'évolution de la texture du matériel en fonction de la température de cuisson. A cette zone de température (1000°C à 1050°C) correspond à la contraction du matériel après son frittage complet par réduction des espaces inter granulaires. Mais lorsqu'on dépasse une certaine valeur de température, la réduction des espaces inter granulaires conduit à de micro alvéoles contenant des gaz empoisonnés. A 1100°C, ces alvéoles formant la porosité fermée ont tendance à s'agglomérer par coalescence pour se développer en boursoufflant le matériau [49]. Au refroidissement, on obtient des produits ayant des propriétés différentes que celles des matériaux compacts.

On déduit que les sédiments du barrage de l'Oued Fodda peuvent être utilisés dans la fabrication des carreaux sols.

**VII-4 Conclusion**

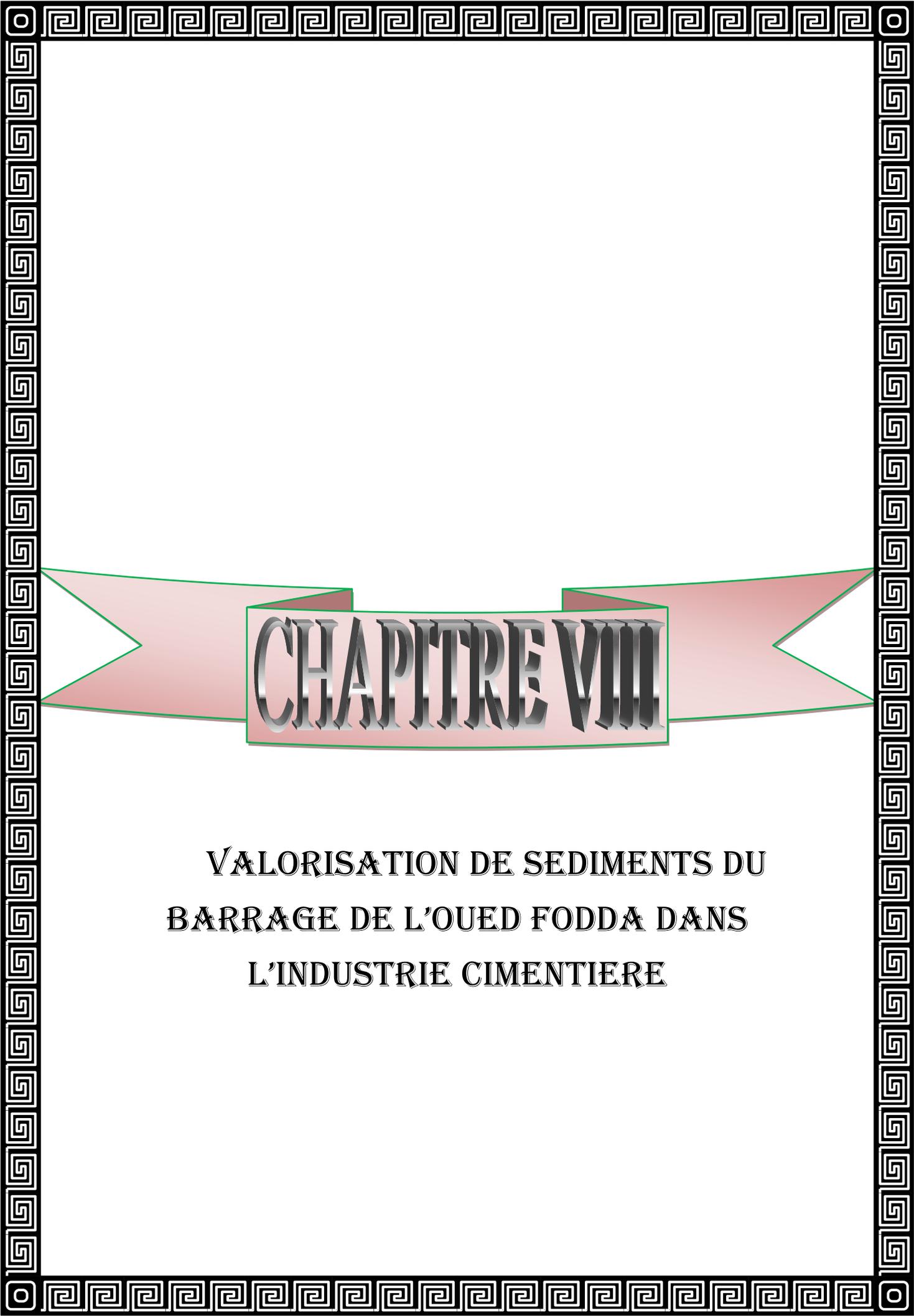
Le traitement et l'étude de la vase en vue de sa valorisation dans le domaine des matériaux de construction et plus particulièrement les carreaux de sol en céramique ont donné de très bons résultats. Les analyses chimiques de la vase confirment qu'elle est utilisable dans la fabrication des carreaux de sol en céramique jusqu'à un taux de 13%. Ces analyses sont complétées par des essais rhéologiques afin d'identifier l'écoulement de la barbotine préparée par la vase dans le broyeur et à travers le circuit jusqu'à l'arrivée à l'atomiseur, là où la barbotine est transférée en poudre pour le pressage par la suite.

Le comportement rhéologique de la barbotine préparée par la vase est identique à celui de la barbotine préparée par l'argile de Ain Franine, les deux sont obéies au modèle Herschel Bulkley.

L'argile de Ain Franine est utilisée comme matière première dans la fabrication des carreaux de sol en céramique au niveau de l'usine CERAL situé à une distance de 15 Km à l'Est d'Oran (Algérie) dans la zone industrielle de Hassi Ameer. Le produit final doit répondre à certaines exigences et normes pour qu'il trouve sa place dans le marché à savoir les dimensions, le poids, l'absorption et la résistance à la flexion.

Des tests physico-mécaniques sont effectués sur des éprouvettes sous forme de petits carreaux de dimension 55x110 mm<sup>2</sup> ont été préparés par deux types de mélanges: un basé sur l'argile de Ain Franine et un autre basé sur la vase du barrage de l'Oued Fodda. Les résultats de ces tests sur les carreaux préparés par la vase du barrage sont favorables et respectent les normes internationales exigées dans la fabrication de céramique ce qui confirme la possibilité d'utiliser la vase dans la fabrication des carreaux de sol en céramique.

Nous avons abouti à ce qu'on a projeté dans notre travail qui est l'utilisation de cette vase dans l'industrie de la céramique. Ce travail peut être développé par des essais physico-céramique pour industrialiser le produit.



# CHAPITRE VIII

VALORISATION DE SEDIMENTS DU  
BARRAGE DE L'OUED FODDA DANS  
L'INDUSTRIE CIMENTIERE

## **VIII- Valorisation de sédiments du barrage de l'Oued Fodda dans l'industrie cimentière**

### **VIII-1 Introduction**

L'objectif principal de cette partie est de voir l'influence du remplacement d'une partie de ciment par une pouzzolane synthétisée à partir de la vase de l'Oued Fodda sur les propriétés physico mécaniques des mortiers élaborés à base de cette vase calcinée. Au début, on se limitera aux propriétés physiques sur pate de ciment (consistance normale, délai de prise, et expansion à chaud) et aux principales propriétés physico mécaniques sur mortier tels que (la résistance à la compression et à la flexion). A cet effet, des variantes de pâte de ciment et de mortier dont la teneur on ajout est de 10, 20 et 30 % en masse par rapport au ciment et suivre l'évolution de la résistance à la compression en 2j, 07j et 28 j pour un rapport E/C=0.5.

### **VIII-2 Essais et tests effectués en laboratoire**

#### **VIII-2-1 Caractéristiques des matériaux utilisés**

##### **VIII-2-1-1 Pouzzolane artificielle (vase de l'Oued Fodda calcinée à 750°C)**

###### **➤ Traitement thermique et réactivité pouzzolanique de la vase de l'Oued Fodda**

En raison des études faites auparavant par différents auteurs quant à la réactivité des minéraux tels que les argiles en milieu normal de température et de pression [50], et vue les résultats obtenus dans la caractérisation des sédiments du barrage de l'Oued Fodda, nous procédons au traitement thermique par calcination des sédiments à une température optimale choisie parmi les différentes températures proposées afin d'avoir une meilleure calcination possible qui nous permet de gagner plus d'énergie et réduire l'émission du CO<sub>2</sub> qui a un impact sur l'environnement (gaz à effet de serre) d'une part et d'autre part rendre la silice et l'alumine plus réactives avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment. Nous avons choisi des températures de calcination de 400,550, et 750°C. La calcination de notre vase a été effectuée au laboratoire des essais chimiques de la cimenterie de Zahana. La vase est séchée à l'étuve à 105°C pendant 48 heures après concassée et broyée à l'aide d'un broyeur ensuite tamisée enfin le produit cru est calciné dans un four électrique programmé (Controlab) : température de cuisson, durée de cuisson 5 heures - montée de température 5°C/minute : voir Photo (VIII.1).

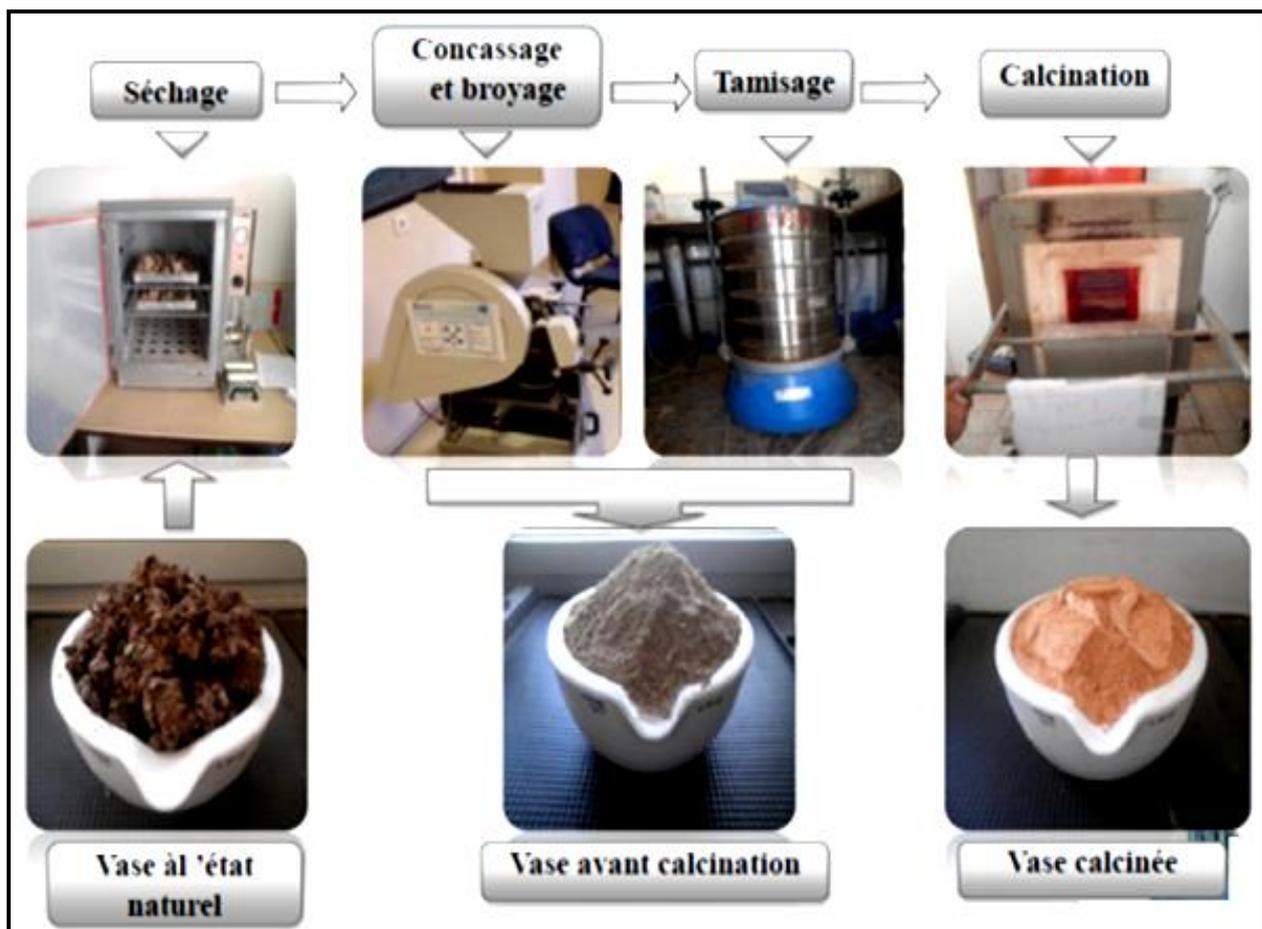
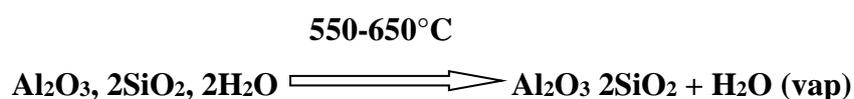
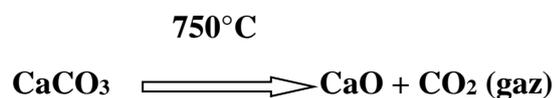


Photo (VIII.1) : Processus de calcination de vase de l'Oued Fodda

On remarque d'après les résultats de diffraction aux rayons 'X', que la température de calcination pour laquelle le pic de la calcite ainsi que la kaolinite disparaissent complètement est de 750°C. Le traitement thermique transforme fortement la composition minéralogique du matériau, élimine les matières organiques et entraîne la destruction des minéraux argileux par le départ de H<sub>2</sub>O, si bien que des combinaisons amorphes apparaissent selon les réactions suivantes :



La possibilité de transformer les structures minérales de la vase de barrage dans le but d'en fabriquer des liants hydrauliques à usage courant, semble réalisable à condition que la teneur en argile 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 stable, en structures amorphes en raison de la fission des carbonates de calcium.

On constate d'après les résultats des différents diffractogrammes obtenus sur la vase calcinée à différentes températures (figure (VIII.1) ) , qu'à la température de 400°C aucun changement ne se produit dans la structure minérale, à partir de 550°C les pics correspondant aux argiles types kaolinites disparaissent et ceux des carbonates commencent à diminuer et disparaissent complètement à la température de 750°C.

Les minéraux argileux sont détruits par le départ d'ions OH effets endothermiques vers 600°C et se reconstituent vers 1000°C effets exothermiques, tandis que les carbonates par le départ du CO<sub>2</sub>, cela veut dire que le traitement thermique transforme fortement la composition minéralogique du matériau. Des combinaisons amorphes apparaissent et la vase est transformée en pouzzolane de synthèse.

La microscopie électronique à balayage (figure (VIII.2)) nous a permis d'identifier les éléments actifs, à savoir, la silice et l'alumine présentés dans la vase étudiée.

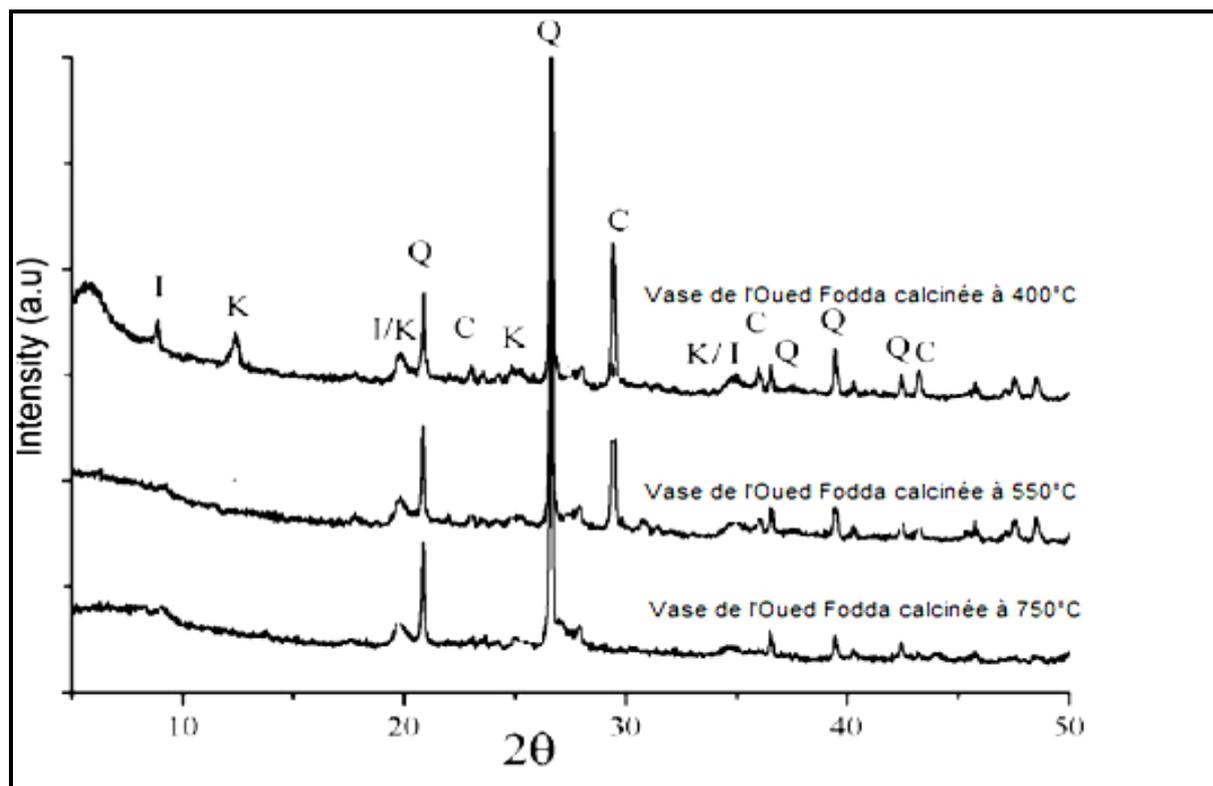


Figure (VIII.1) : DRX de vase de l'Oued Fodda calcinée à des différentes températures

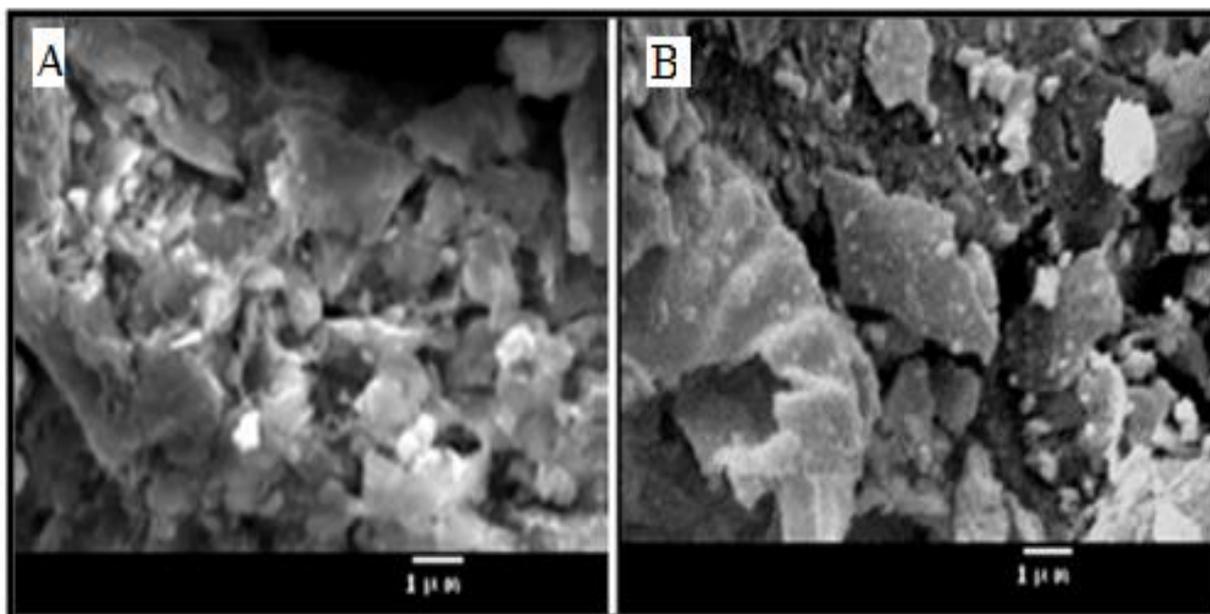


Figure (VIII.2) : Microscopie électronique à balayage de la vase de l'Oued Fodda : A : brute, B : calcinée

### VIII-2-1-2 Sable normalisé

Le sable normalisé CEN (**Photo (VIII.2)**) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\,350 \pm 5$  g.

Les livraisons se font en cartons de 20 sachets pesant 27.5 kg et en palettes de 36 à 45 cartons d'une masse brute de 1 005 kg à 1 253 kg protégés par une housse en polyéthylène (transport routier) ou en carton renforcé (transport maritime).

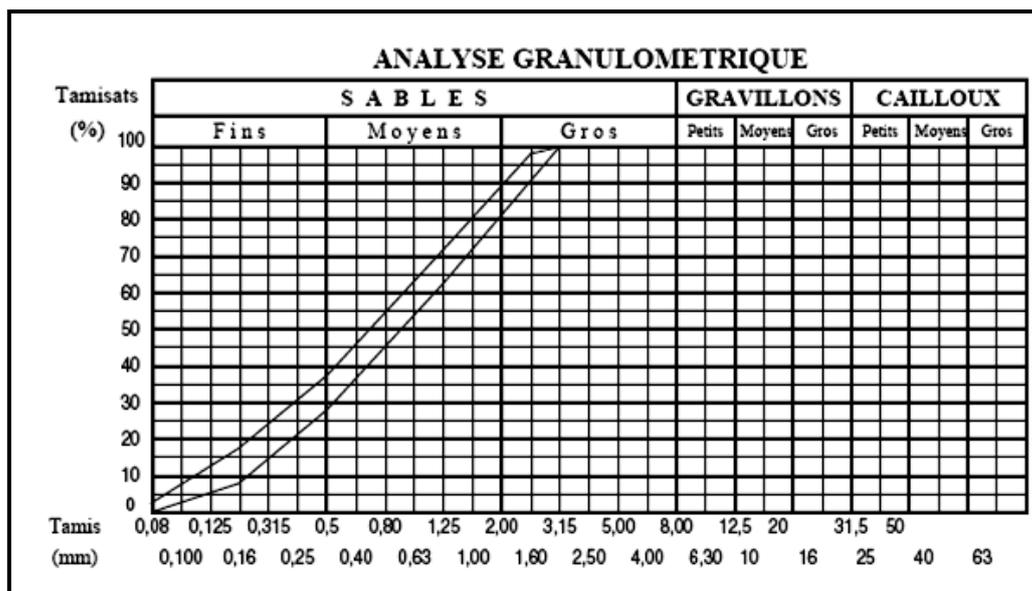


**Photo (VIII.2) :** Sable normalisé

La composition granulométrique (tableau (VIII.1) et figure (VIII.3)) déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 et ISO 679 : 2009.

**Tableau (VIII.1) :** Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage du sable normalisé

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



**Figure (VIII.3) :** Courbe granulométrique du sable normalisé

➤ **Caractéristiques physiques du sable normalisé**

Les caractéristiques du sable, déterminées selon les normes en vigueur (NF EN 196-1), sont indiquées dans le tableau (VIII.2) suivant :

**Tableau (VIII.2) :** Caractéristiques physiques du sable normalisé

Caractéristiques		Sable Normalisé
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )		<b>1.71</b>
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )		<b>2.63</b>
Equivalent de sable	E.S.V (%)	<b>94</b>
	E.S (%)	<b>93</b>
Teneur en eau (%)		-
Module de finesse M <sub>f</sub> (%)		<b>2.52%</b>

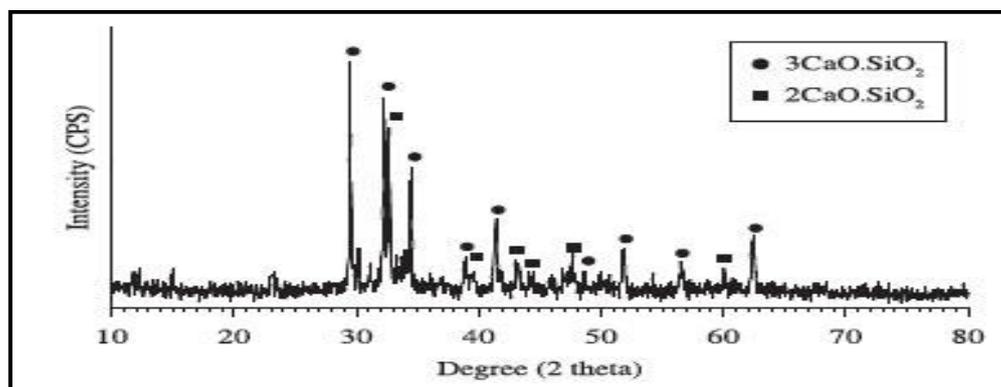
Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 et ISO 679 : 2009.

### VIII-2-1-3 Le ciment CPA

Le ciment utilisé pour la confection des pâtes et des mortiers est un CPA-CEM I 42.5R. Il a une surface spécifique Blaine de 3425cm<sup>2</sup>/g et une densité de 3,2. La composition chimique et celle minéralogique (figure (VIII.4)) selon les formules de Bogue sont données par les tableaux (VIII.3) et (VIII.4) respectivement.

**Tableau (VIII.3) :** Composition chimique de ciment CPA-CEMI 42.5R de la cimenterie de Zahana

Oxydes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PAF
%	22.53	4.88	4.98	60.48	2.04	0.37	2.60	0.001	0.001	1.78



**Figure (VIII.4) :** DRX de ciment CPA-CEMI 42,5R de la cimenterie de Zahana

**Tableau (VIII.4) :** Composition minéralogique selon Bogue de ciment CPA-CEMI 42,5R de la cimenterie de Zahana

Phase	Clinker			
Minéraux	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Teneur (%)	34.62	38.09	9.95	12.65

### VIII-2-1-4 L'eau de gâchage

L'eau utilisée est l'eau distillée (PH=6.7).

## VIII-2-2 Préparation des mélanges, pâtes et des mortiers de ciment

### VIII-2-2-1 Préparation des mélanges

#### 1. Mode opératoire

Tous les échantillons, ont été élaborés avec une composition comportant un ciment CPA-CEMI 42,5R (95% de clinker et 5% de gypse), provenant de la cimenterie de Zahana (Mascara -Algérie). Pour la préparation des mélanges de ciment on a suivi cette procédure :

- Le broyage des mélanges : On a utilisé un broyeur (type laboratoire) HERZOG HSM 100, en acier coulé GS 52 : voir la photo(VIII.3). Nombre de vibration normale :  $n = 50$  vibrations/mn pour 220 / 380 V de courant triphasé, 50 Ps. Commande directe par moto réducteur électrique accolé de :  $P = 1.1$  kW.



**Photo (VIII.3) :** un broyeur « HERZOG HSM 100 »

Le broyage s'effectue en introduisant dans le broyeur les deux matériaux : Les différentes quantités de ciment CPA et les différents pourcentages de la vase calcinée à 750°C (broyage mixte). L'opération est terminée lorsqu'on atteint une surface spécifique de Blaine :  $SSB = 3000$  cm<sup>2</sup>/g.

On a appliqué la procédure du broyage mixte puisqu'il présente beaucoup plus d'avantages que le broyage séparé:

- Dépense d'énergie et gain du temps,
- Aucun investissement supplémentaire,
- Simplicité du procédé lui même.

Le tableau (VIII.5) suivant donne la composition des différents mélanges de ciment préparés soigneusement à différentes proportions de substitution de pouzzolane artificielle (PA) « la vase de l'Oued Fodda calcinée à 750°C ».

**Tableau(VIII.5) :** La composition des différents mélanges de ciment préparés

Pourcentage d'ajout	Ciment CPA(g)	Vase de l'Oued Fodda calcinée à 750°C(g)
0%PA	500	0
10% PA	450	50
20% PA	400	100
30% PA	350	150

## 2. Analyse chimique des mélanges de ciment

Après un séchage, broyage, et analyse spectrométrique à fluorescence X, les compositions chimiques des différentes variantes sont résumées au tableau(VIII.6). On peut déduire que la plupart de nos variantes répondent aux exigences, telles que le taux de la perte au feu, la teneur en sulfate et la teneur de MgO. Les valeurs des modules silicique (MS) et aluminoferrique (MA) sont dans les plages de données acceptables, excepté pour les modules hydrauliques 'MH'. Pour le module LSF (degré de saturation en chaux), à chaque augmentation du pourcentage d'ajout, il y a une diminution du taux de CaO, mais aussi une augmentation du dénominateur et surtout du silicium. Ce dernier est présent en quantité considérable dans les ajouts.

**Tableau(VIII.6) :** Les compositions chimiques des différents mélanges de ciment préparés

Mélanges de ciment	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PAF
0%PA	22.53	4.88	4.98	60.48	2.04	0.37	2.60	0.001	0.001	1.78
10% PA	24.74	5.21	5.04	56.89	2.80	0.37	2.72	0.001	0.001	2.23
20% PA	27.36	6.19	5.34	53.73	2.40	0.37	2.27	0.001	0.001	2.34
30% PA	29.22	7.17	5.60	50.62	2.30	0.36	2.15	0.001	0.001	2.58

### 3. La surface spécifique de Blaine (S.S.B) des mélanges de ciment préparés

La notion de finesse de mouture est liée à la notion de "surface spécifique" qui désigne le total des aires de tous les grains contenus dans une quantité unité.

Cette aire est d'autant plus grande que les grains sont plus petits, donc que la finesse de mouture est grande.

Il est connu, par ailleurs, que la vitesse d'écoulement d'un fluide à travers un corps granulaire est d'autant plus faible que les grains qui composent ce corps sont plus fins : cette vitesse décroît donc quand la finesse de mouture augmente.

La surface spécifique et la vitesse d'écoulement sont liées à un même facteur la finesse de mouture.

On a cherché une relation entre ces trois grandeurs. Il est possible de déterminer la surface spécifique d'un corps granulaire en mesurant la vitesse d'écoulement de l'air à travers ce corps; et cette surface massique caractérise la finesse de mouture

#### ❖ Objectif de l'essai

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante: lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète.

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en  $\text{cm}^2$  de surface des grains de ciment par gramme (g) de poudre. La surface spécifique du ciment se situe entre 2500 et 4500  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

#### ❖ Equipements nécessaires

- Un appareil appelé «Perméabilimètre de Blaine» (figure (VIII.5))
- Une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester
- Un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur D'une huile légère.
- La cellule est équipée d'une grille en Sa partie inférieure.
- Un piston sert à tasser le ciment Dans la cellule sous un Volume V défini
- Une balance précise à 0,001 g.
- Un chronomètre précis à 0,2 s près.
- Des rondelles de papier filtrent adaptées au diamètre de la cellule.

- Du mercure pour mesurer le volume V de la couche tassée.
- Un thermomètre précis à 0,1 °C près pour mesurer température de l'air

❖ **Mode opératoire**

Le liant hydraulique dont on désire mesurer la surface spécifique doit être à une porosité constante (égale à 0,5).

- Peser à 0,01 g près, une masse m de liant telle que, compte tenu de son volume V après tassement dans la cellule, sa porosité soit égale à 0,5 ;

La masse de matière à prendre s'écrit:  $m = (1 - \epsilon) \cdot \rho \cdot A \cdot H$  avec :

- A : section du lit de poudre (cm<sup>2</sup>)
- H : hauteur du lit de poudre (cm)
- $\rho$  : masse volumique absolue de la poudre de ciment étalonnée (g/cm<sup>3</sup>)=3.24 g/cm<sup>3</sup>
- $\epsilon$  : porosité du lit de poudre
- Placer la grille au fond de la cellule. Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'une équerre, un disque neuf de papier-filtre ;
- Verser la masse de ciment dans la cellule à l'aide d'un entonnoir après avoir placé la grille et le disque de papier filtre,
- Tasser avec un piston en évitant la remontée de la poudre. Retirer le piston. Placer la cellule sur son ajutage,
- Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur (n° 4). Aspirer lentement au moyen de la poire l'air jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur (n° 1). Fermer le robinet,
- Mettre en marche un chronomètre quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait, l'arrêter quand le niveau atteint le troisième trait. Noter le temps t ainsi que la température de la pièce. Faire 3 mesures et prendre la moyenne arithmétique des 3 temps.

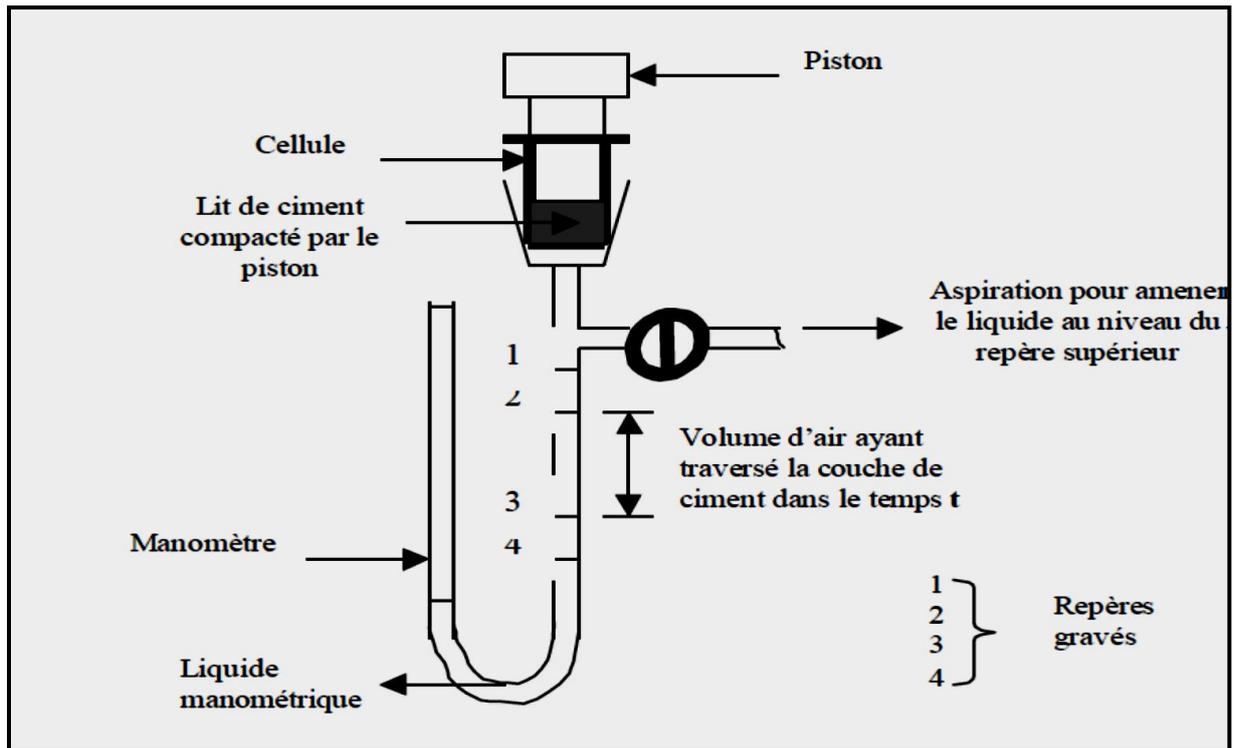


Figure (VIII.5) : Appareil de Blaine

La surface spécifique est calculée par la formule:

$$S_m = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{\varepsilon^3}}{1-\varepsilon} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1 \cdot \eta}}$$

$S_m$  : finesse ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

$K$  : constante de l'appareil sans dimension

$\rho$  : masse volumique absolue de la poudre ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\varepsilon$  : porosité du lit de poudre

$t$  : temps d'écoulement du liquide (dibutyl phthalate) entre les deux repères n°2 et n°3 (s)

$h$  : viscosité dynamique de l'air à la température de l'essai (Pa.s)

$m$  : masse de poudre tassée dans la cellule de mesure (g)

$A$  : section du lit de poudre ( $\text{cm}^2$ )

$H$  : hauteur du lit de poudre (cm)

Les résultats du tableau(VIII.7) ci-dessous présentent l'effet de l'addition la vase calcinée à 750°C sur le poids spécifique du ciment.

Selon les résultats obtenus, on note que l'augmentation de la quantité de la vase calcinée incorporé dans le ciment à un effet significatif sur le poids spécifique de ciment. Ceci peut être dû à la porosité crée par la substitution partielle du ciment et par la vase calcinée (taux de substitution de la vase calcinée).

**Tableau(VIII.7) :** Les résultats de la finesse pour les différents mélanges de ciment préparés

Les mélanges de ciment préparés	S.S.B (cm <sup>2</sup> /g)
0% PA	3425
10% PA	3496
20% PA	3551
30% PA	3720

### VIII-2-2-2 Préparation des pâtes de ciment

On a préparé les pâtes selon la norme **NF EN 196-3**. Les 5 échantillons de ciment ont été préalablement pesés sur une balance de précision  $\pm 0.1g$ . L'eau a été mesurée à l'aide de burette graduée. Puis le malaxage de chaque échantillon de pâte se fait par cette mode opératoire :

- Mettre le ciment (500g) pour chaque échantillon dans le bol (**Photo (VIII.4)** du malaxeur HOBART (**Photo (VIII.5)**))

-Prendre un volume d'eau distillée à l'aide d'une éprouvette et l'introduire dans le bol du malaxeur.

-Ajouter soigneusement le ciment à l'eau pour éviter toute perte d'eau ou de ciment.

La durée de cette opération est de 5 à 10 secondes. Noter la fin de cette opération comme le temps zéro.

-Mettre le malaxeur en marche immédiatement à vitesse lente pendant 90 secondes.

-Au bout de ces 90 secondes, arrêter le malaxeur pendant 15 secondes durant lesquelles toute la pâte adhérant au bol du malaxeur doit être grattée et remise dans la gâchée.

-Remettre alors la machine en route à vitesse lente pour une nouvelle durée de 90 secondes, le temps total de fonctionnement est de 3 minutes.



Photo (VIII.4) : Bol du malaxeur



Photo (VIII.5) : Malaxeur HOBART

### VIII-2-2-3 Préparation des mortiers de ciment

On a préparé des mortiers normaux, selon la norme **NF EN 196-1** dont la composition est la suivante :

-450g de liant (pâtes de ciment préparées après broyage des différentes quantités de ciment CPA de Zahana les différents pourcentages de la vase calcinée à l'aide de broyeur HERZOG HSM 100), les ajouts étant toujours introduits en substitution du ciment (tableau(VIII.8)) :

**Tableau(VIII.8) : Composition des différentes pâtes préparées**

Les mélanges de ciment préparés	Quantité de ciment (g)	Quantité de vase calcinée à 750°C ajoutée (g)
0% PA	450	0
10% PA	405	45
20% PA	360	90
30% PA	315	135

-1350g de sable normalisé.

Ceci correspond donc à un rapport sable/ciment égal à 3/1.

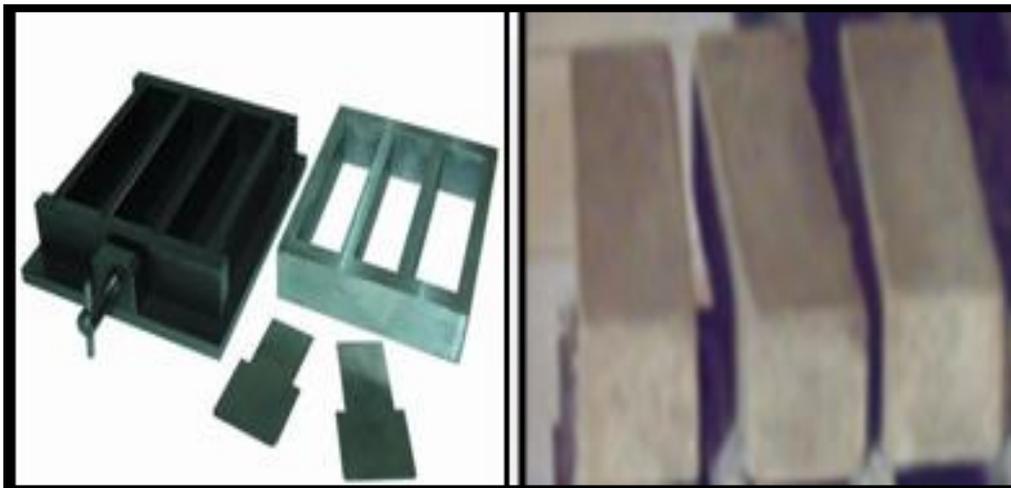
-225g d'eau de gâchage, le taux de l'eau de gâchage à été maintenu constant pour l'ensemble des gâchées :  $E/C = 0.5$

- Le mortier normal est réalisé à l'aide d'un malaxeur HOBART dans un bol de cinq litres répandant aux caractéristiques de la norme **NF EN 196-1**.

- on mélange la composition d'un mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme :
  - \* Introduire l'eau en premier dans le bol du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.
  - \* Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30 s suivants. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.
  - \* Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
  - \* Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.Après l'arrêt du malaxage, on effectue un malaxage manuel des pâtes.

Nous avons élaboré les séries d'éprouvettes (**Photo (VIII.6)**) suivantes :

Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm (40×40×160mm).



**Photo (VIII.6) :** Moule à 3 alvéoles des mortiers de 40x40x160 mm

Ensuite on a mis les moules dans un appareil de choc (**Photo (VIII.7)**) permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de  $15 \pm 0,3$  millimètres à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 secondes.



**Photo (VIII.7) :** Appareil de chocs (Toni-Technik)

Après on a mis les moules dans une chambre ou une armoire humide (**Photo (VIII.8)**) Maintenu à une température de 20 °C et à une humidité relative supérieure à 90 % pendant 24 heures.



**Photo (VIII.8) :** Armoire humide

A la fin Les éprouvettes sont conservées dans l'eau dans une armoire humide (T=20°C, Humidité=100% : **Photo (VIII.9)**) comme suivant :

- Pendant 24 heures pour mesurer la résistance mécanique de 2 jours
- Pendant 6 jours pour mesurer la résistance mécanique de 7 jours
- Pendant 27 jours pour mesurer la résistance mécanique de 28 jours



Photo (VIII.9) : Mortiers dans une armoire d'eau

### VIII-2-3 Résultats des essais physiques sur les différentes pâtes préparées

#### 1. Essais de consistance (EN 196-3)

##### A-Matériels utilisés:

- Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,
- Malaxeur normalisé : avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn),
- Appareil de VICAT (du nom de l'ingénieur français).

L'appareil est composé d'un moule tronconique ( $h=40$  mm  $d_1=70$  mm et  $d_2=80$  mm) et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de  $\Phi = 10$  mm,

- Balance précise à 0,1 g près,
- Chronomètre précise à 0,1 s près.

##### B-Mode opératoire :

On procède par tâtonnements :

- préparer 0.5 kg de ciment, une pâte pure de rapport  $E/C=0,26$  après verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment,
- mettre le malaxeur en marche (voir le tableau(VIII.9)) qui suit pour la marche à suivre) et déclencher le chronomètre.

Tableau (VIII.9): Démarche du malaxage

Opérations	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Mettre en route	Raclage de la cuve	Mettre en route
Durée des opérations		5 à 10 secs	90 secs	15 secs	90 secs
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente	Arrête	Vitesse lente

• la pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat (figure (VIII.6)).

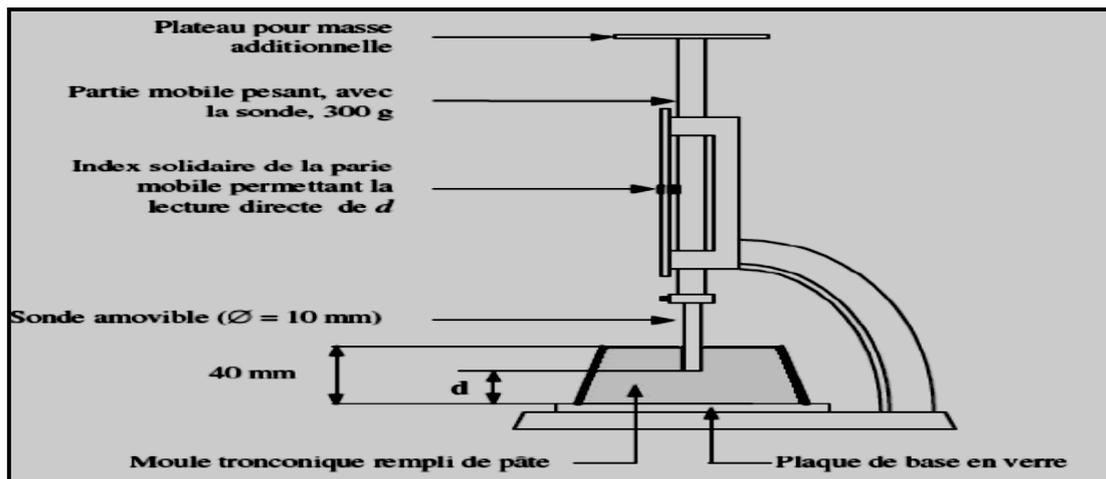


Figure (VIII.6) : Appareil de Vicat

• la sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse).

La sonde alors s'enfonce dans la pâte.

Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance  $d$  séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

• la pâte sera à consistance normale si  $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$ :

-Si  $d > 7\text{mm}$  : il n'y a pas assez d'eau,

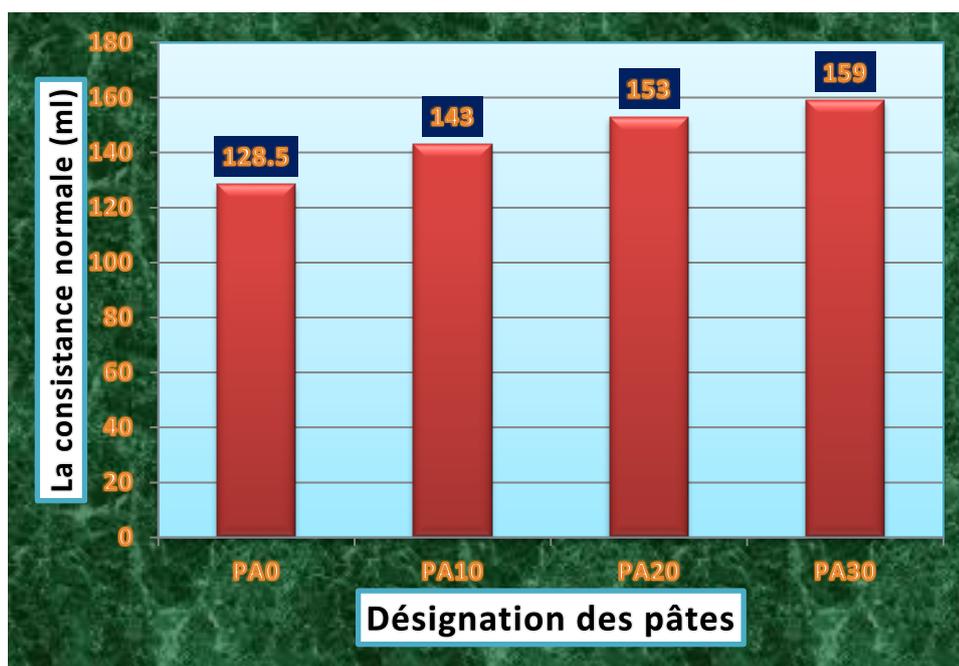
-Si  $d < 5\text{mm}$  : il y a trop d'eau.

Dans les 2 cas, jeter la pâte, nettoyer et sécher le matériel et recommencer à nouveau.

Le tableau(VIII.10) et la figure (VIII.7) ci-dessous montrent l'évaluation de la quantité d'eau pour obtenir une pâte normale en fonction de la teneur d'ajout.

**Tableau(VIII.10) :** Les résultats de la consistance normale pour les différentes pâtes préparées

Les pâtes de ciment préparées	Quantité d'eau en ml et en (%)
0% PA	128.5 ml (25.7%)
10% PA	143ml (28.6%)
20% PA	153ml (30.6%)
30% PA	159ml (31.8%)



**Figure (VIII.7) :** Les résultats de la consistance normale des pâtes préparées en fonction de la teneur d'ajout

Nous remarquons d'après les résultats mentionnés ci-dessus que pour garder une maniabilité constante des différents mélanges, il a fallu augmenter la quantité d'eau de gâchage au fur et à mesure que la teneur des ajouts (vase calcinée à 750°C) augmente.

Selon les résultats obtenus nous pouvons conclure que la consistance normale augmente d'une façon continue. Ce qui est expliqué par le remplacement d'une partie de ciment par l'ajout ayant un caractère argileux ainsi qu'une finesse élevée (inférieur à 80 µm), ce qui engendre une consommation excessive d'eau et l'absorption d'une partie d'eau destinée à l'hydratation. Etant donné que le taux de fixation de la chaux, responsable en majeure partie du gonflement et de l'instabilité des structures, augmente en fonction de l'augmentation de la teneur en ajout.

## 2. Essais de prise (EN 196-3)

Le temps de prise est déterminé à l'aide de l'appareil de Vicat Automatique (**Photo(VIII.10)**) muni d'une aiguille selon la norme NF EN 196-3 à la température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Pour mesurer le temps de prise il faut :

- Placer le moule dans l'appareil de Vicat automatique pour connaître le début et la fin de prise du ciment.
- Le temps de début de prise correspond à la lecture de  $4 \pm 1$  millimètres du fond du moule, noté à partir du temps 0.
- Le temps de fin de prise correspond à la lecture de 0,5 millimètres de la surface du moule, noté à partir du temps zéro.



**Photo(VIII.10):** Appareil de Vicat automatique (Toni-Technik)

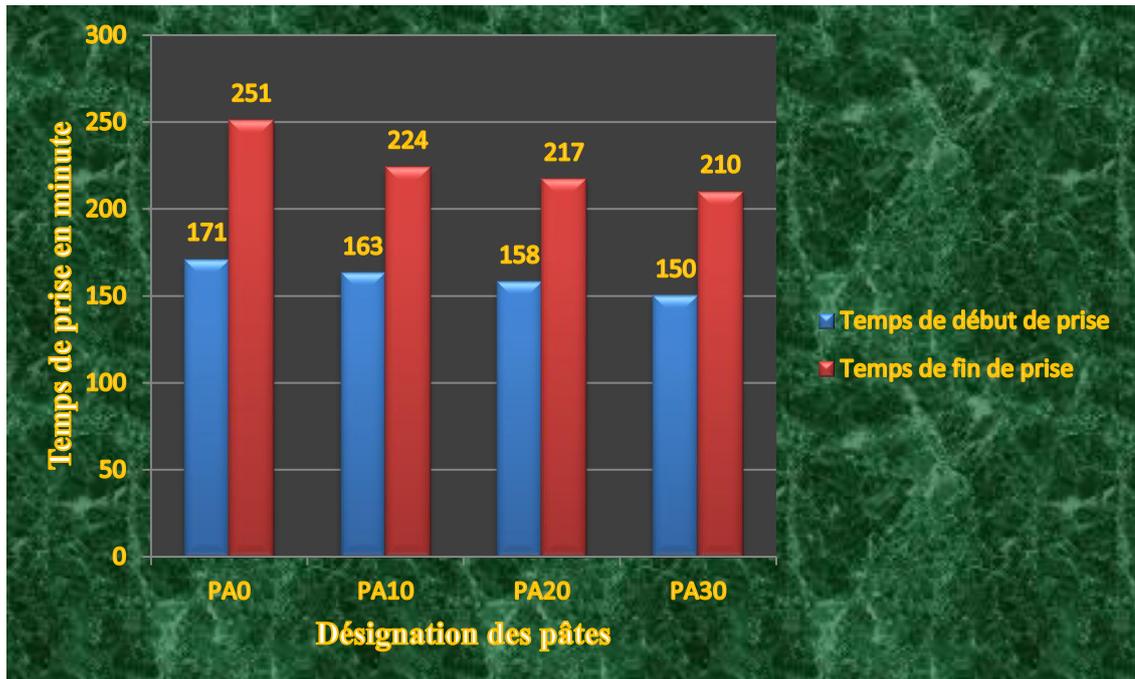
Nous avons tenté de présenter ces valeurs de temps de début et de fin de prise sur un graphique.

La figure (VIII.8) donne les valeurs des temps de début et de fin de prise mesurés sur des pâtes témoin et contenant 0,10, 20 et 30% de vase calcinée à  $750^{\circ}\text{C}$  par rapport au dosage en masse du ciment.

D'après les résultats il apparaît que l'ajout de la vase affecte légèrement sur les temps de prise puisqu'un écart maximal de 20 minutes est enregistré entre la pâte témoin et celle dont 30% de ciment a été remplacée par la vase.

Par contre en comparant les temps de début de prise et de fin de prise, nous remarquons que ces derniers diminuent avec l'augmentation du dosage en vase.

Pour la même maniabilité des pâtes des liants élaborés, des temps de prises sont mesurés (début et de fin de prise) conformes aux normes 196-3 en vigueur.



**Figure (VIII.8) :** Les temps de début de prise et de fin de prise des différentes pâtes préparées

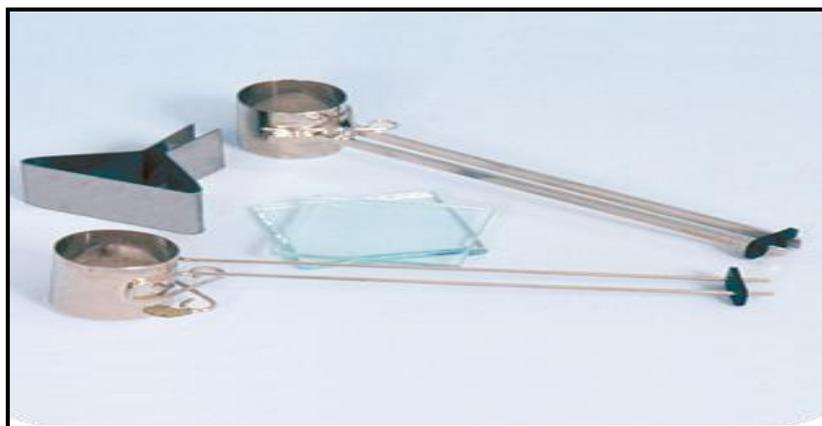
### 3. Essais d'expansion (EN 196-3)

#### ❖ Définition

Le moule d'expansion est de la forme cylindrique de 30 mm de diamètre et 30 mm de hauteur, constitués par une feuille de laiton (épaisseur 0,5 mm), comportant deux aiguilles longues de 15 cm (aiguilles Le Châtelier : **Photo(VIII.11)**) soudées de chaque côté de la fente. La variation de l'écartement des ces aiguilles nous renseignera sur la valeur du gonflement.

#### ❖ Mode opératoire

- On met la pâte préparée sur une plaque de verre et on remplit le moule d'expansion, puis on couvre avec une deuxième plaque de verre.
- On conserve les aiguilles dans l'armoire humide pendant 24 heures.
- Ensuite, on enlève les aiguilles de l'armoire humide et on marque l'écartement entre les deux aiguilles, et les mettre dans un bain marie à température 100 °C pendant 3 heures.
- Ensuite, on mesure l'écart (pendant la confection du moule). La variation de l'écartement représente l'expansion à chaud.



**Photo(VIII.11) : Aiguilles de Le Châtelier**

Le tableau (VIII.11) ci-dessous donne les résultats d'expansion des différentes pâtes de ciment préparées.

**Tableau(VIII.11) : Les résultats de l'expansion pour les différentes pâtes préparées**

Les pâtes de ciment préparées	Expansion à chaud (mm)
0% PA	0.5
10% PA	0.5
20% PA	0.4
30% PA	0.2

Cet essai de déformation à chaud indique la présence de chaux et de magnésium non combiné (libre). Ce qui n'est pas trouvé dans nos ciments composés à la pouzzolane artificielle (vase calcinée à 750°C).

On a enregistré une diminution de l'ouverture des aiguilles de Le Chatelier en fonction de l'augmentation de la teneur en ajout, qui est inférieure à 1mm, donc une meilleure stabilité pour des teneurs élevées en ajout.

#### **VIII-2-4 Résultats des essais mécaniques sur les différents mortiers préparés**

##### **1. Essai de traction par flexion des mortiers (EN 196-1)**

###### **❖ Introduction**

On définit la classe de résistance d'un liant à 28 jours c'est la résistance à la compression à 28 jours d'une éprouvette prismatique de dimensions données (4 x 4 x 16 cm) en mortier normal. Ce résultat nous permet de vérifier la conformité d'un liant. La valeur de la résistance à la traction sera déduite par les formules de la résistance des matériaux.

L'indication CEM I 42.5 sur un sac de ciment veut dire que la résistance nominale à la compression de ce ciment à 28 jours est de 42.5 MPa.

Compter l'âge des éprouvettes à partir du moment du malaxage du ciment et de l'eau, jusqu'au début de l'essai.

Effectuer les essais de résistance à différents âges dans les limites suivantes :

- 48 h  $\pm$  30 min;
- 7 jours  $\pm$  2 h ;
- 28 jours  $\pm$  8 h.

❖ **Objectif de l'essai**

Déterminer la résistance à la traction par flexion d'un mortier.

❖ **Equipement nécessaire**

Une machine d'essais de la résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une vitesse d'une mise en charge de  $50 \pm 10$  N/S.

La machine doit être équipée d'un dispositif de flexion. **(Photo (VIII.12))**



**Photo (VIII.12) :** Appareil d'essais de la résistance à la flexion

❖ **Conduite de l'essai**

1- Prendre les éprouvettes 4x4x16 cm préparées à l'avance et les placer entre les appuis de l'appareil de flexion. Les faces latérales (lisses) de l'éprouvette doivent être en contact avec les appuis.

2- Amener l'appui supérieur en contact avec la face supérieure de l'éprouvette et appliquer la charge.

3- Relever la valeur de la charge de rupture; soit " $F_f$ ".

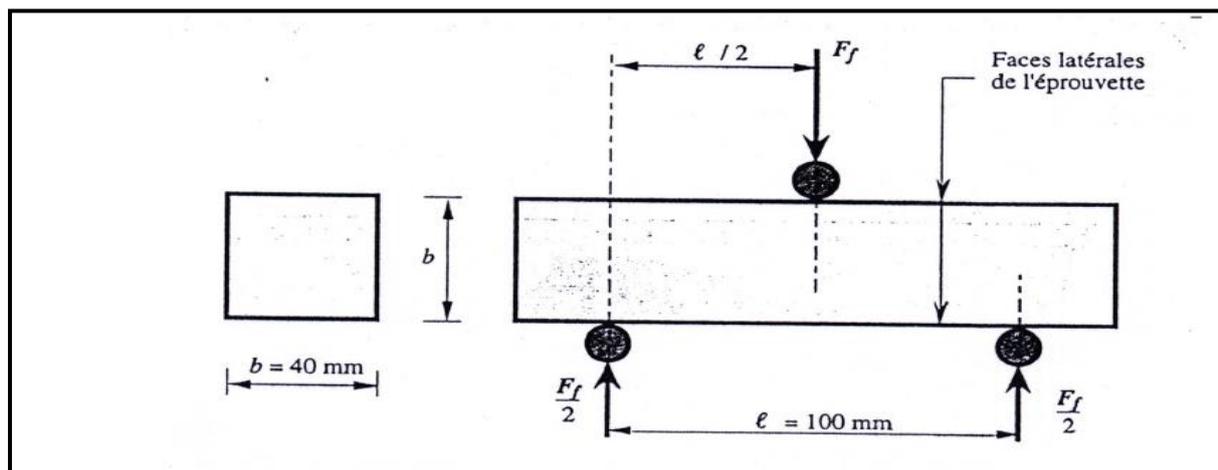
4- Refaire la même opération pour les autres éprouvettes.

5- Appliquer la formule suivante, pour calculer la résistance à la flexion du mortier (figure (VIII.9)) :

$$R_f = 1.5 F_f e / b^3$$

Avec :

- $R_f$  : Résistance à la flexion en Mpa ou  $N/mm^2$ .
- $F_f$  : Charge de rupture en newton (N).
- $b$ : Coté de l'éprouvette en mm ( $b = 40mm$ ).
- $e$ : Distance entre appuis inférieurs en mm ( $e=100mm$ ).



**Figure (VIII.9) :** Dispositif de flexion par trois points

Le tableau (VIII.12) et la figure (VIII.10) ci-dessous présentent les résultats de la résistance à la flexion des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation.

**Tableau (VIII.12) :** les résultats de la résistance à la flexion des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation

Pourcentage d'ajout (%)	Résistance à la traction par flexion (MPa)		
	2J	7J	28J
0%PA	3,80	5,60	7,07
10%PA	3,34	5,47	7,05
20%PA	3,25	5,25	7
30%PA	3,16	5,06	6,80



**Figure (VIII.10) :** Résistance mécanique à la flexion des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation

## 2. Essai de compression des mortiers (EN 196-1)

### ❖ Objectif de l'essai

Déterminer la résistance à la compression d'un mortier.

### ❖ Equipement nécessaire

Une machine d'essais à la compression permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 KN avec une vitesse d'une mise en charge de  $2400 \pm 200$  N/S. Cette machine est équipée d'un dispositif de compression. (**Photo (VIII.13)**)



**Photo (VIII.13) :** Appareil d'essais de la résistance à la compression

❖ **Conduite de l'essai**

Placer le demi-prisme (obtenu à partir de l'essai de traction par flexion) de l'éprouvette 4x4x16 cm entre les deux plateaux de la presse. Les faces de l'éprouvette qui sont au contact de la presse doivent être planes et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette.

- 1- Amener les plateaux en contact avec les faces de l'éprouvette, et appliquer la charge.
- 2- Relever la valeur de la charge de rupture; soit "  $F_f$  ".
- 3- Refaire les mêmes opérations pour les autres demi-prismes.

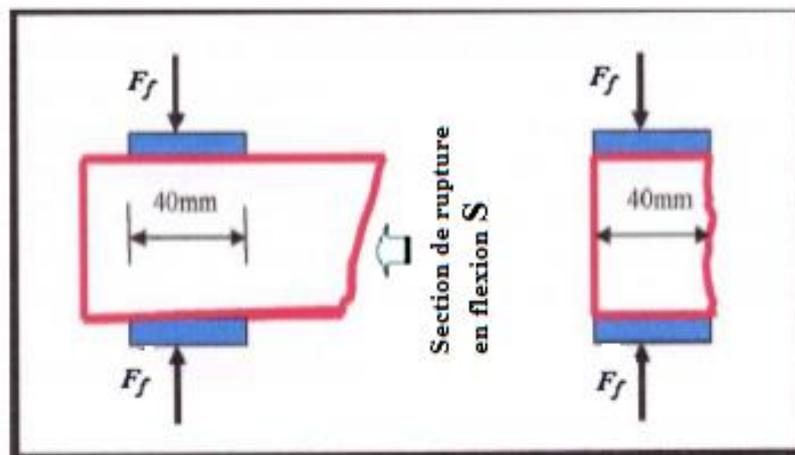
La résistance à la compression du mortier (figure (VIII.11)) se calcule par la formule suivante :

$$R_c = F_f / S$$

Avec, -  $R_c$  : Résistance à la compression en en Mpa ou N/mm<sup>2</sup>.

-  $F_f$ : Charge de rupture en newton (N).

-  $S$  : Section de l'éprouvette en mm<sup>2</sup> ( $S = 1600 \text{ mm}^2$ ).



**Figure (VIII.11) : Dispositif de compression**

Le tableau (VIII.13) et la figure (VIII.12) ci-dessous présentent les résultats de la résistance à la compression des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation.

**Tableau (VIII.13) :** les résultats de la résistance à la compression des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation

Pourcentage d'ajout (%)	Résistance à la compression (MPa)		
	2J	7J	28J
0%PA	16	34,8	46,23
10%PA	14,42	31,1	44,17
20%PA	13,40	28,60	41,08
30%PA	12,52	26,40	39,58



**Figure (VIII.12) :** Résistance mécanique à la compression des différents mortiers préparés en fonction de l'âge de conservation

### 3. Résultats des essais mécaniques :

Nous avons effectué des essais mécaniques sur un grand nombre d'éprouvettes pour chaque mélange (Fig. VIII.10-12) où on a constaté l'augmentation de la résistance mécanique à la compression et à la flexion en fonction de l'âge de conservation et le pourcentage en ciment. La résistance à la compression et à la flexion diminue considérablement avec l'augmentation du pourcentage d'ajout au jeune âge surtout à 2j, 7j et 28 jours. Le mélange composé de 90 % de ciment et 10% de vase calcinée à 750°C, présente des résistances mécaniques relativement élevées qui avoisinent celle du ciment (CEMI).

Ces résistances sont les résultats de l'hydratation du ciment d'une part et la réaction pouzzolanique du mélange d'autre part.

La silice ( $\text{SiO}_2$ ), l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se combinent avec la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pour donner des gels de silicates de calcium hydratés CSH (type tobermorite) et d'aluminates de calcium hydratés CAH, tous deux responsables de la résistance. Les résultats des résistances peuvent être améliorés en ayant un temps de conservation plus long, sachant que la réaction pouzzolanique intervient après celle de l'hydratation. [51]

Les réactions d'hydratation des ciments composés comprendront deux étapes. La première étape concernera l'hydratation du ciment (réaction I) et la deuxième étape concernera les réactions pouzzolaniques entre la chaux libérée par le ciment et les composants réactifs de la vase calcinée (réaction II). [52]

#### Réaction d'hydratation (I)



#### Réaction pouzzolanique (II)



Le silicate d'aluminate de calcium hydraté  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  est instable en présence d'une solution saturée en chaux. Il donne le CSH et l'aluminate tétracalcique  $\text{C}_3\text{AH}_{13}$

En conclusion, On peut dire qu'une partie de la chaux libérée du ciment a été consommée par la vase pour donner naissance à un gel de silicate de calcium hydraté type CSH.

### **VIII-3 Conclusion**

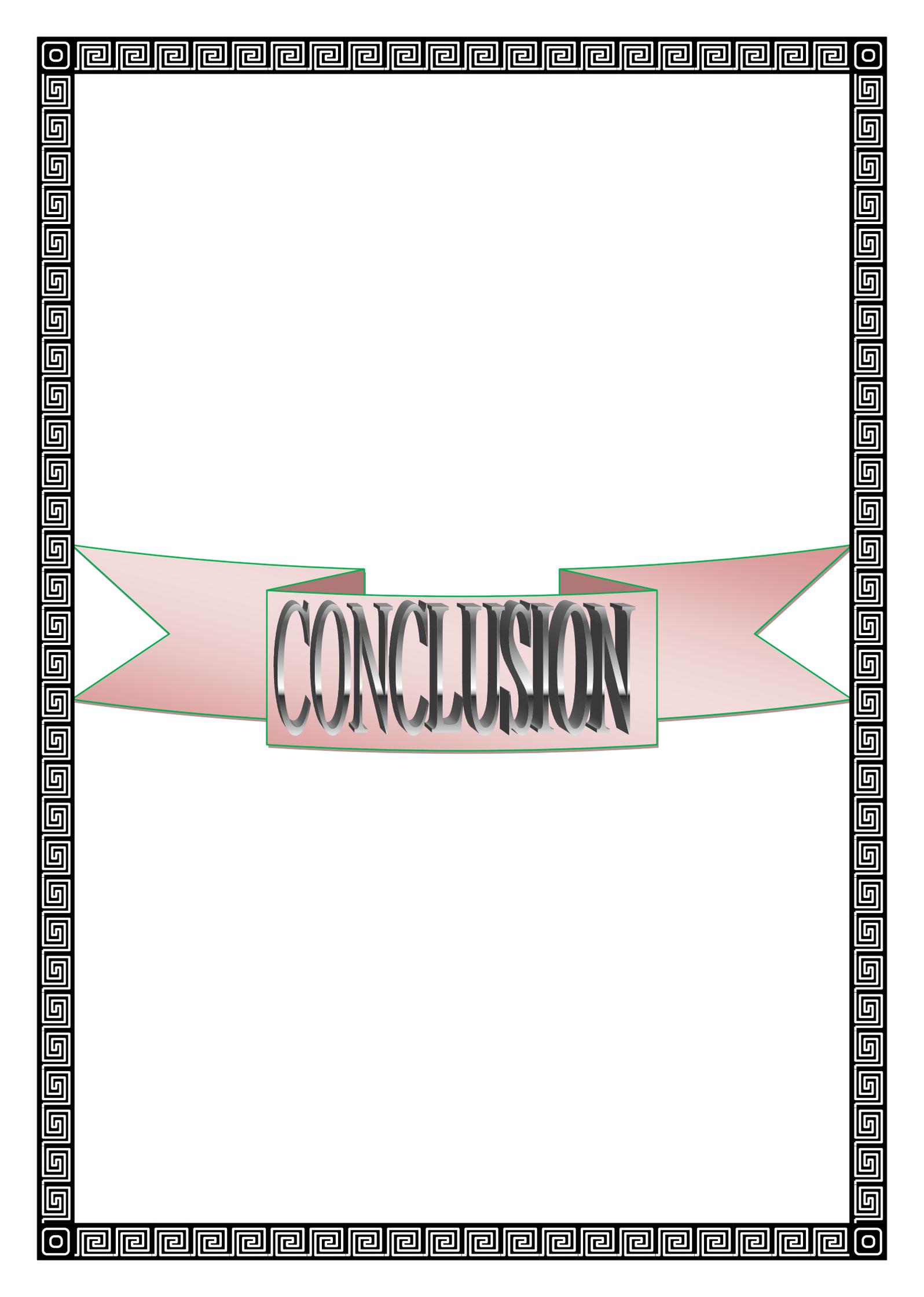
Notre étude a permis de confirmer la possibilité de la valorisation de la vase issue du barrage de l'Oued Fodda en tant que matériau substituable en partie au ciment ce qui pourrait en partie résoudre le problème de son stockage et participer au développement écologique et économique de notre pays.

L'intérêt majeur qui a été à l'origine de cette étude est la possibilité de remplacer partiellement un matériau industriel (le ciment) par un matériau naturel ; la vase de l'Oued Fodda.

Les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenus sont :

- ✓ La présence de la vase contribue au déclenchement rapide du début de prise ce qui peut être utile en cas de bétonnage par temps froid.
  
- ✓ Les résistances mécaniques des mortiers à base de 0, 10,20 et 30% de vase restent très proches. Quant aux mortiers contenant 30% de vase, ses résistances évoluent de manière ascendante à court terme, et probablement il continuera son ascension à moyen terme. Ce qui nous encourage à utiliser jusqu'à 30% de vase en remplacement du ciment.

Nous jugeons utile d'entreprendre des travaux de recherche qui permettront d'exploiter sérieusement la vase du barrage de l'Oued Fodda et pourquoi pas des autres barrages. Cette exploitation ne sera rentable que si elle l'est à vaste échelle, ce qui permettrait de résoudre définitivement le problème de la cherté du ciment et du stockage de la vase.



**CONCLUSION**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude que nous avons menée donne un certain nombre de résultats:

### **I- Une caractérisation des sédiments :**

Le poids volumique des grains solides de la vase a une valeur de  $2.5\text{g/m}^3$ .

La répartition granulométrique est représentée comme suite: (33.4% d'argile, 65.5% de limon et 1.1% de sable) donc il s'agit d'un sol fin, les limites d'Atterberg et l'essai au bleu de méthylène confirment que notre vase est un sol limono-argileux de plasticité moyenne selon la norme NF P94-068.

L'analyse chimique et minéralogique aux rayons X de cette vase mettent en évidence l'existence du quartz, la calcite, la kaolinite et l'illite.

### **II- Une valorisation des sédiments:**

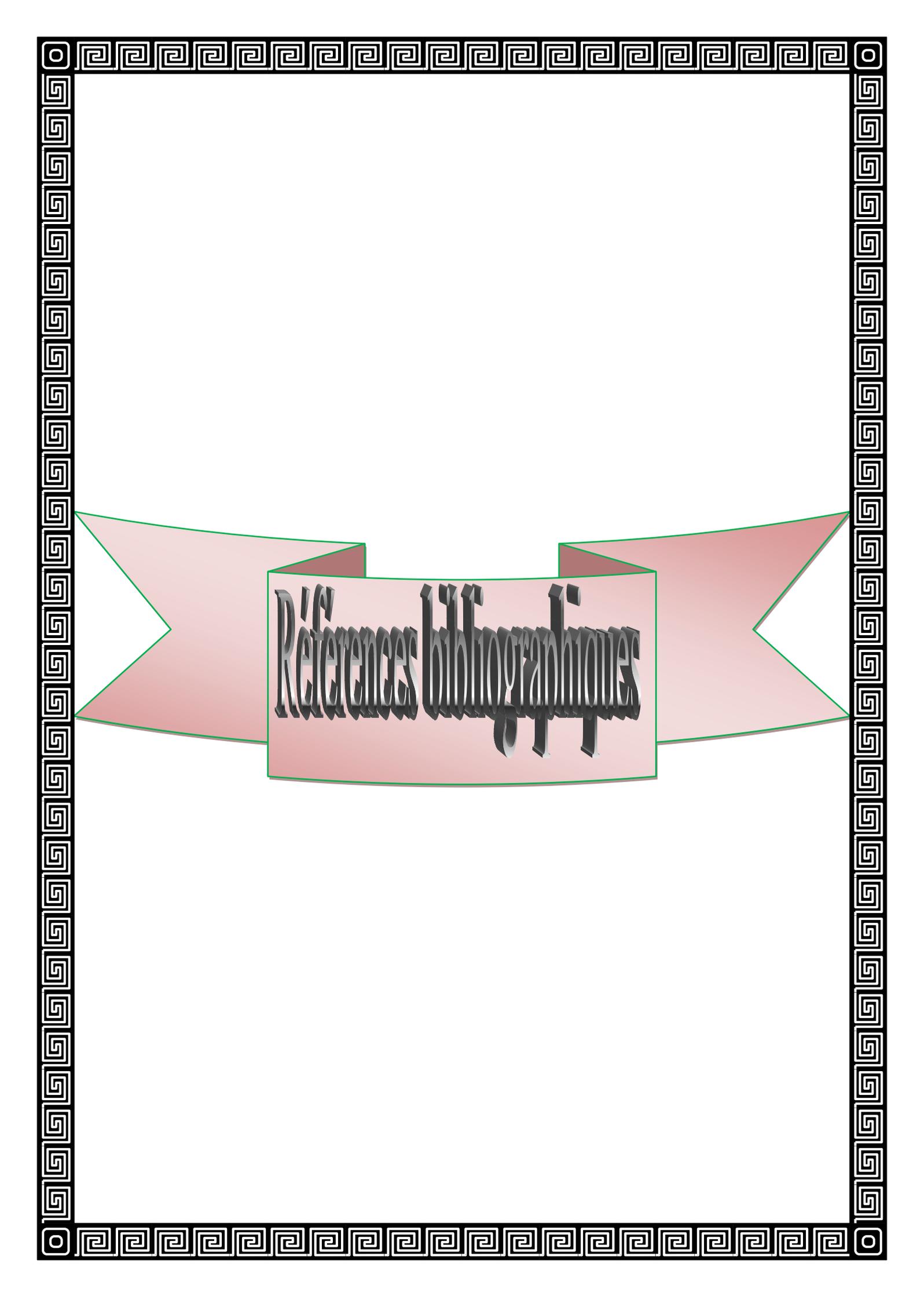
#### **II -1 - Dans l'industrie de fabrication de céramique :**

La composition chimique et minéralogique de la vase répond aux conditions du choix d'une argile pour l'industrie de la céramique. On peut conclure que la vase du barrage de l'Oued Fodda est utilisable pour fabriquer des carreaux de sol en céramique et donne un produit conforme aux normes internationales d'où l'intérêt d'un gain technico-économique.

#### **II -2 - Dans l'industrie cimentière :**

Les résultats obtenus des différents essais, nous ont permis de retenir que la substitution de 30% du ciment par la vase calcinée à  $750^\circ\text{C}$  présente une économie d'énergie et valorise les sédiments d'envasement des barrages longtemps considérés comme déchets.

On a finalement fourni quelques idées, qui peuvent être des lignes directrices, qui permettront de mieux structurer des recherches plus précises à venir dans un domaine si vaste.



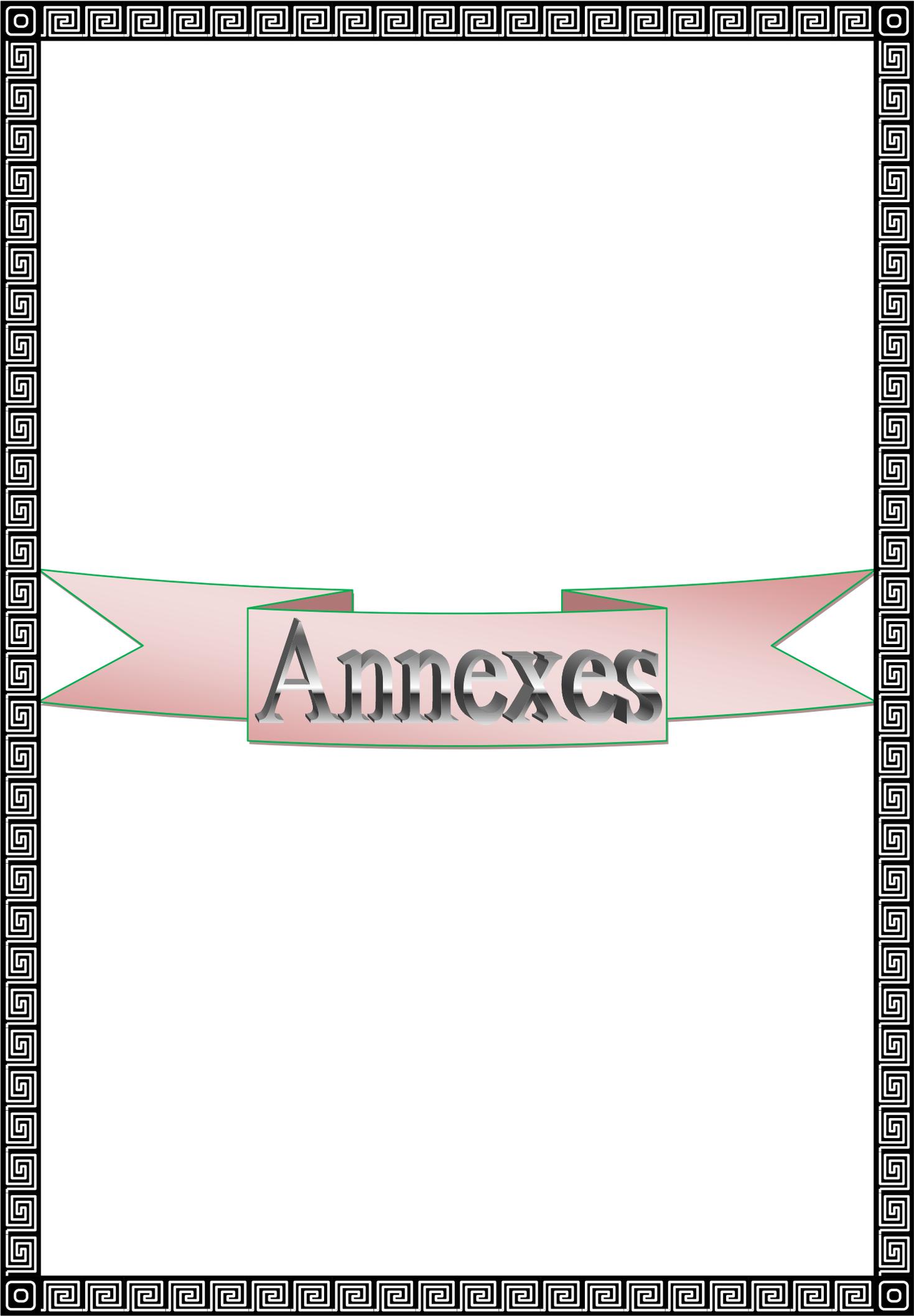
Références bibliographiques

# bibliographie

- [1] **B. REMINI, J.M. AVENARD** : Evolution de l'envasement dans le barrage de Foum El Gherza, p. 98-105,2001.
- [2] **B. REMINI, J.M. AVENARD, A. KETTAB** : Livre de l'envasement des barrages pages 5 à 89,1997.
- [3] Le barrage de Oued Fodda, Agence du Bassin Hydrographique Cheliff Zahrez .Available from <http://www.abh-cz.com.dz/Eau/barrages/brgouedfodda.htm>
- [4] **L. BENAMARA, K. OUHBA, A. HAMWI** : Élaboration d'une pouzzolane de synthèse à partir des sédiments de barrage, *Environnement & technique journal*, p.40-44,330 (2013).
- [5] **A.MEZENCEVOVA, N.N. YEBOAH, S.E BURNS, L.F. KAHN and K.E. KURTIS**: Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick, *J. Envir. Manag.*p.128-136, 113 (2012).
- [6] **J.BEAUCHAMP**: Sédiments et roches sédimentaires. Available from <https://www.u-picardie.fr/~beaucham/cours-sed/sed-1.htm>
- [7] **J.BEAUCHAMP** : Les milieux de sédimentation. Available from <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours-sed/sed-2.htm>
- [8] **P. JOEY** : Cours de géologie appliquée au génie civil chapitre 02 : notions de pétrographie, 2005.
- [9] **M.SAMARA** : Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite, 2 juillet 2012.
- [10] **N. VACHON** : L'envasement des cours d'eau : processus, causes et effets sur les écosystèmes, Mai 2003.
- [11] **D. GROSDÉMANGE** : Guide pour la gestion des opérations de dragage, 2 décembre 2005.
- [12] **B. BEKHTI, M. ERRIH, M. SIDI ADDA**: Modélisation de la sédimentation dans les retenues de barrages en Algérie (barrage Es-Saada), [Science et changements planétaires / Sécheresse. Volume 23, Numéro 1, 38-47, Janvier-Février-Mars 2012.](#)
- [13] **M. KEANG SE POUV**:Vers un lien entre propriétés mécaniques de sédiments cohésifs et leur érodabilité — Etude macroscopique et locale du comportement en rhéométrie et en érosion de matériaux modèles, DOCTORAT de l'UNIVERSITE de CAEN, 13 juillet 2011.
- [14] **M.SANCHEZ ANGULO** : [Dynamique des sédiments fins en milieu marin et agitation portuaire](#) .Mémoire d'Habilitation à diriger des Recherches par Martin de l'université de Caen, France, 2000.
- [15] **L'INFLITRATION ET LES ECOULEMENTS** : Available from <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre5/chapitre5.html>
- [16] **B.REMINI** : L'envasement des barrages quelques exemples algériens.
- [17] **L. XAVIER, J-M. AUGUSTIN**: A Measurement Quality Factor for Swath Bathymetry Sounders. *Journal of Oceanic Engineering*, 35(4), 852-862, 2010.
- [18] **N.PROULHAC., K. LANN** : Rapport final du schéma directeur du traitement des vases portuaires (SDTVP) du bassin d'Arcachon, juin 2006.
- [19] **A. MANSER** : Erosion et envasement des barrages.
- [20] **N. PROUHLAC** : Etudes préliminaires – Dragage et gestion des sédiments extraits, 29/01/12.
- [21] **B. REMINI** : les moyens techniques de lutte contre la sédimentation des barrages en Algérie, *Colloque International « TERRE et EAU »* Annaba, 21 Novembre 2004
- [22] **B. REMINI, Z. LABIOD, M. BELAREDJ** : Traitement de la vase du barrage de Bouhanifia en vue de sa valorisation. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n° 03, pp.7-12,

- Juin 2004.
- [23] **T. BRITO, F. BOUDJEMA, H. NABTI** : Barrage De Kerrada Injections D'imperméabilisation Algérie, 1<sup>er</sup> symposium méditerranéen de geoengineering (smge'09) Alger les 20 et 21 juin 2009.
- [24] **F. KAZI AOUAL-BENSLAFA**: Caractérisation des sédiments de dragage du barrage de Bouhanifia pour une réutilisation, XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Dunkerque, 2-4 juillet 2014.
- [25] **B. ANGER** : Caractérisation de sédiments fins de retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière, Thèse de doctorat, 17 décembre 2014.
- [26] **E. OLIVIER** : Technologie des matériaux de construction, Tome 2,335 p.1978.
- [27] **R. LAFITE, A. DELOUIS, S. SAMSON** : Etude des possibilités de valorisation des sédiments sableux de dragage d'entretien de l'estuaire du port Autonome de Rouen, Avril-Aout 2007.
- [28] **P. PICOMATA** : Travaux de mise à niveau de l'infrastructure portuaire du port de commerce de Porto-Vecchio : Travaux de dragage et de déroctage. Anteagroup, rapport n°67554/C, 12 septembre 2012.
- [29] **M. KHATTAOUI et al** : Etude du comportement mécanique de la vase du barrage de Ain Zaouia (Algérie) pour une valorisation dans la construction routière, 22<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, 24 au 28 Août 2015.
- [30] **M. BOURABAH** : Traitement de sédiments de dragage de l'ouest algérien pour une valorisation en construction routière. , *European Journal of Environmental and Civil Engineering, Volume, Issue 2, 2011.*
- [31] **C.THOMAS STURGIS, R.CHARLES LEE, and C.HENRY BANKS**: Evaluation of Toledo Harbor dredged material for manufactured soil, September 2001.
- [32] **FABRICATION DU CARRELAGE** : Available from <https://sites.google.com/site/laceramiqueunepassion/fabrication-du-carrelage>
- [33] **HISTOIRE DES CIMENTS** : Available from <http://www.infociments.fr/ciments-chaux-hydrauliques/historique>
- [34] **M. GUEYE** : Essais sur les ciments, 19 février 2014.
- [35] **A. BARAKAT** : Matériaux de carrière et de construction.
- [36] **M. MORANVILLE** : Ciments et bétons Composition, propriétés et utilisations. Département Génie Civil - ENS de Cachan - 94230 Cachan.
- [37] **LES DIFFERENTS TYPES DE CIMENT** : Available from <http://www.infociments.fr/ciments-chaux-hydrauliques/process-fabrication/composition/les-types-de-ciments>
- [38] **UTILISATIONS DE CIMENT** : Available from <http://www.universalis.fr/encyclopedie/ciment/6-utilisations/>
- [39] **HYDRATATION DE CIMENT PORTLAND** : Available from <http://doc.lerm.fr/lhydratation-du-ciment-portland/>
- [40] Monographe du barrage de l'Oued Fodda-ANB 1984.
- [41] Source: ANBT 2011.
- [42] **DRAGUES MECANIQUES**, 10 Octobre 2007.Available from <http://www.planete-tp.com/dragues-mecaniques-a345.html>
- [43] **E. GUAZZELLI** : Rhéologie des fluides complexes, Octobre 2001.
- [44] **N.VANDEWALLE** : Les fluides complexes
- [45] **P. GRAVEREAU** : Introduction `à la pratique de la diffraction des rayons X par les poudres, 17 février 2012.
- [46] **L. HAMMADI, A. PONTON, M. BELHADRI**: Rheological study and valorization of waste sludge from wastewater treatment plants in the dredging operation of hydraulic dams, *Energy Procedia Journal*, p.302-309, 6 (2011).

- [47] **A.MESKINE:** Caractérisation et valorisation des sédiments d'envasement du barrage de Gargar, mémoire de magister, USTO, 2014.
- [48] **A. ZIMMER, C-P.BERGMANN:** Fly ash of mineral coal as ceramic tiles raw material. Waste Management Journal, p.59-68, 27 (2007).
- [49] **F. THEVENOT :** Céramiques composites à particules, cas du frittage-réaction, *SEPTIMA vol 1, 1992,106 p.*
- [50] **I.ROBU, R.JAUBERTINE :** Etude diffractométrique de l'évolution des phases au cours du durcissement d'un ciment portland. Journal de physique, 2000, pp 473-479.
- [51] **J. GNIEWEK :** Réactivité des montmorillonites calcinées utilisation dans le Génie Civil, Thèse de Doctorat Es Sciences, INSA de Lyon 1987, 184 p.
- [52] **K. OUHBA et al:** Conception of a synthesis pozzolan from sediment dams calcined (Case: Gargar dams), *MATEC Web of Conferences, 2014.*



# Annexes