

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**



**Thèse**

Présentée pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT**

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Matériaux**

**THEME  
VALORISATION D'UNE BOUE DE DRAGAGE  
DANS LA MATRICE CIMENTAIRE D'UN  
MORTIER ET BETON ORDINAIRES**

**Présentée Par  
Riad ALI HALASSA**

**Année Universitaire : 2021/2022**

# Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Numéro de série.....

Numéro d'inscription.....

## Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

### DOCTORAT

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux

### THEME

## VALORISATION D'UNE BOUE DE DRAGAGE DANS LA MATRICE CIMENTAIRE D'UN MORTIER ET BETON ORDINAIRES

Présentée Par

Riad ALI HALASSA

Soutenue le : 20 Novembre 2022

Devant le jury composé de :

<u>Nom &amp; Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Qualité</u>
Zine El Abidine RAHMOUNI	Professeur	Univ. de M'sila	Président
Mekki BIBI	Professeur	Univ. de M'sila	Encadreur
M.Azziz CHIKOUCHE	MCA	Univ. de M'sila	Co-Encadreur
Kamel AIT TAHAR	Professeur	Univ. de Bouira	Examinateur
Abdelhamid GUETTALA	Professeur	Univ. de Biskra	Examinateur
Bachir MELBOUCI	Professeur	Univ. de Tizi Ouzou	Examinateur

Année Universitaire : 2021/2022

# Remerciements

A la fin de cette recherche, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont apporté leur aide, leur soutien, leurs conseils et leur amitié. Cette thèse est à la fois le résultat de mon travail et la participation directe et indirecte d'un grand nombre de personnes. Je leur adresse toute ma sympathie et mes sincères remerciements.

Je tiens également à remercier personnellement :

En premier lieu, je tiens à remercier tout particulièrement mes encadrants, Monsieur Mekki BIBI, Professeur et Monsieur Mohamed Azziz CHIKOUCHE, Maître de Conférences à l'Université Mohamed Boudiaf de Msila, qui n'ont pas hésité à me faire confiance pour se lancer dans cette aventure sur le bassin versant d'Oued K'sob. C'était une belle aventure ! Qu'ils trouvent ici la preuve de toute ma reconnaissance et mes remerciements pour leurs grandes disponibilités et pour le temps qu'ils m'ont consacré à la critique de mes résultats en me faisant bénéficier de leurs grandes expériences.

Je tiens pareillement à exprimer mes plus sincères remerciements au Professeur Zine El Abidine RAHMOUNI pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse, je le remercie également pour ses encouragements et ses conseils motivants.

Je remercie également Monsieur Abdelhamid Guettala, Professeur à l'Université de Biskra, pour son aide et ses conseils ainsi d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail

J'adresse mes sincères remerciements aux Professeurs Kamel AIT TAHAR de l'université de Bouira, Bachir MELBOUCI de l'université de Tizi Ouzou, qui nous ont honoré d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Une partie de ma thèse n'aurait pas eu lieu sans les institutions qui ont m'ont accordé les facilités et la confiance avec un accès sans réserve aux matériels et aux produits. Pour cela, je suis très reconnaissant aux personnels de :

- Laboratoire de Développement des Géo-matériaux et du Laboratoire des Matériaux et Mécanique des Structures, Département Génie Civil, Faculté de Technologie, Université Mohamed Boudiaf de M'sila ;
- La Plateforme Scientifique et Technologique (PFT-ST) de l'Université des Frères Mentouri de de Constantine ;
- L'Institut de Physique de l'Université des Frères Mentouri à Constantine, Algérie ;
- Laboratoire des Travaux Publics Est, Direction Régionale Est (LTPE) de Constantine ;
- Laboratoire de la cimenterie Aïn El Kbir à Sétif et de la cimenterie SIGUS à Oum EL Bouaghi;
- La Société Nationale des Granulats d'Ibn Badis de Constantine.

Un remerciement particulier et personnel à mon collègue de travail Monsieur Mohamed OUCHENANE, responsable du Laboratoire Central de la Direction Régionale Est du CTC qui a grandement contribué à cette recherche.

En fin ;

A la mémoire de mon très cher père  
A ma Mère

À mon épouse et mon adorable Fiston, *DOUDOU, RAID –YOUCEF.*

A mes Frères et Sœurs.

**Merci à tous !**

# Résumé

## Valorisation d'une Boue de Dragage dans la Matrice Cimentaire d'un Mortier et Béton Ordinaires

Ce travail expose la volonté de contribuer à l'utilisation de matériaux écologiques et respectueux de l'environnement issus du phénomène d'envasement et de donner une certaine résilience aux barrages algériens affectés par des périodes de sécheresse et de précipitations irrégulières dues au changement climatique durant une grande partie de l'année. Cette menace écologique, affecte la durabilité et le potentiel des barrages, ainsi le dragage devient une nécessité même s'il implique des volumes considérables de boues qui peuvent altérer l'environnement. L'étude présentée met en évidence et propose une alternative intéressante pour la valorisation des boues de dragage dans le domaine de la construction en les intégrant dans la composition du mortier et du béton ordinaires. Plus précisément, les boues extraites du barrage K'sob ont été caractérisées chimiquement, physiquement, minéralogiquement et mécaniquement et ont été introduites à la fois comme substitut de ciment et comme composant dans le mélange d'un béton et d'un mortier ordinaires. Les boues ont d'abord été activées par calcination et ajoutées au ciment aux doses de masse de 10 %, 15 % et 20 % séparément. Le comportement mécanique, notamment sous compression, des matériaux cimentaires (béton/mortier) à base de boues traitées a été étudié par des tests en laboratoire. Les résultats des tests montrent que cette innovation technique confère au produit fini trois propriétés majeures, à savoir une haute résistance, une économie et un impact écologique bénéfique. Les résultats obtenus sont encourageants et promettent une exploitation optimale des boues provenant de barrages similaires. Outre le comportement mécanique, les différents bétons et mortiers de l'étude ont présenté des résultats des essais à l'absorption d'eau et à l'attaque des acides (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), satisfaisants indiquant que la boue de dragage calcinée a une influence sensiblement meilleure sur la durabilité des mortiers et des bétons dans lesquels elle est incorporée.

**Mots clés :** Envasement, Barrage, Boue de dragage, Mortier, Béton, Comportement mécanique, Absorption d'eau, Attaque des acides, Durabilité.

# Abstract

## Valorization of a Dredging Sludge in the Cementitious Matrix of a Mortar and an Ordinary Concrete

This work exposes the will to contribute to the use of ecological and environmentally friendly materials resulting from the phenomenon of silting and give a certain resilience to the Algerian dams affected by frequent drought and irregular rainfalls, which are resulted from climate change during a large part of the year. This ecological threat, affecting the sustainability and potential of dams, makes dredging a necessity even if it involves considerable volumes of sludge that can alter the environment. The presented study highlights and proposes an interesting alternative for the valorisation of dredging sludge in the construction field by integrating it in the composition of mortar and ordinary concrete. Specifically, the sludge extracted from the K'sob dam was characterized chemically, physically, mineralogically, and mechanically, and introduced both as a substitute of cement and a component in the mixture of ordinary concrete/mortar. The sludge was firstly activated through calcination, and added to cement at the mass dosages of 10%, 15%, and 20% separately. The mechanical behavior especially that under compression, of cementitious materials (concrete/mortar) based on the treated sludge was studied through lab tests. The test results show that this technical innovation gives the finished product three major properties, namely, high strength, economy, and a beneficial ecological impact. The results obtained are encouraging and promise an optimal exploitation of the sludge from similar dam areas. besides the mechanical behaviour, the various concretes and mortars in the study showed satisfactory test results for water absorption and acid attack (HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), indicating that calcined dredged sludge has a significantly better influence on the durability of the mortars and concretes in which it is incorporated. .

**Key words:** Siltation, Dam, Dredged sludge, Mortar, Concrete, Mechanical behaviour, Water absorption, Acid attack, Durability.

## ملخص

### تثمين حمأة التجريف في المصفوفة الإسمنتية للملاط والخرسانة العادية

يكشف هذا العمل عن الرغبة في المساهمة في استخدام المواد البيئية والصديقة للبيئة الناتجة عن ظاهرة الطمي وإعطاء مرونة معينة للسدود الجزائرية المتأثرة بفترات الجفاف وعدم انتظام هطول الأمطار بسبب تغير المناخ خلال معظم العام. يؤثر هذا التهديد البيئي على استدامة وإمكانات السدود، لذلك يصبح التجريف ضرورة حتى لو اشتمل على كميات كبيرة من الحمأة التي يمكن أن تغير البيئة. قدمت هاته الدراسة النقاط البارزة وبديلاً مثيراً للاهتمام لاستعادة الحمأة المجروفة في صناعة البناء من خلال دمجها في تركيبة الملاط والخرسانة العاديتان. على وجه التحديد، تم تصنيف الحمأة المستخرجة من سد القصب كيميائياً وفيزيائياً ومعدنياً وميكانيكياً وتم إدخالها كبديل للأسمنت ومكون في خليط الخرسانة والملاط العاديتان. تم تنشيط الحمأة أولاً عن طريق التكليل وإضافتها إلى الأسمنت بجرعات سائبة بنسبة 10% و15% و20% على حدة. تمت دراسة السلوك الميكانيكي، خاصة تحت الضغط، للمواد الإسمنتية (الخرسانة / الملاط) على أساس الحمأة المعالجة عن طريق الاختبارات المخبرية. تظهر نتائج الاختبار أن هذا الابتكار التقني يمنح المنتج النهائي ثلاث خصائص رئيسية، وهي المقاومة العالية والاقتصاد والتأثير البيئي المفيد. النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة وتبشر بالاستخدام الأمثل للحمأة من السدود المماثلة. بالإضافة إلى السلوك الميكانيكي، قدمت الخرسانة والملاط المختلفة للدراسة نتائج اختبارات امتصاص الماء والهجوم الحمضي، والتي كانت مرضية مما يشير إلى أن حمأة التجريف المكلسة لها تأثير أفضل بشكل ملحوظ على متانة الملاط والخرسانة التي تم دمجها فيها

**الكلمات المفتاحية:** الطمي، السد، حمأة التجريف، الملاط، الخرسانة، السلوك الميكانيكي، امتصاص الماء، هجوم الأحماض، المتانة

# Communications et Travaux

## Publications

1. **Ali Halassa, R.**, Bibi, M., Chikouche, M.A. (2021). Behavior of Cementitious Materials under the Effect of an Eco-Cement Based on Dredged Sludge. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, 45(6) : 455-465.  
<https://www.iieta.org/journals/acsm/paper/10.18280/acsm.450604>
  - Titre du journal : *Annales de Chimie - Science des Matériaux*
  - ISSN: 0151-9107
  - Principalement indexé par : Emerging Sources Citation Index (ESCI), Scopus, Ei compendex
  - Page d'accueil : <http://www.iieta.org/Journals/ACSM>

## Communications Orales en Conférences Internationales

1. **Ali Halassa, R.**, Chibane-Bensaci, L.M, Bibi, M. Evaluation de la Résistance à la Compression sur Site des Structures en Béton. Fifth International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution. (ICEMAEP2019), October 22-24, 2019, Constantine, Algeria.
2. **Ali Halassa, R.**, Chibane-Bensaci, L.M, Bibi, M. Critères d'Estimation de la Résistance à la Compression sur Site des structures en Béton en cas de Litige. The 1<sup>ST</sup> International Congress on Advances in Geotechnical Engineering and Construction Management (ICAGECM'19), December 9-10, 2019, Skikda, Algeria.
3. **Riad ALI HALASSA**, Mekki Bibi, Mohamed-Aziz Chikouche. Barrage K'sob de Msila : Caractérisation de la Boue de Dragage en vue de sa Valorisation dans la Matrice Cimentaire d'un Béton Ordinaire. Article ID M016. 1st International Symposium on Materials, Energy and Environment (MEE'2020), January 20-21, 2020, El Oued, Algeria.
4. **Riad ALI HALASSA**, Mekki Bibi: Valorization of the Vase of Algerian Dams in the Manufacture of Building Materials and Ordinary Concrete. Article ID: 272. International Conference on Innovative Applied Energy (Smart Exhibition) Hassi Messaoud, Ouargla, Algeria, 26-27 March 2021.

## Communications Orales en Conférences Nationales

1. **Riad Ali Halassa**, Mekki Bibi, Mohamed-Aziz Chikouche. Mise en Valeur de la Boue de Dragage des Barrages Envasés dans le Domaine de Génie Civil : Quelques Exemples Algériens. Article M2. The national conference on Energy Systems, Environment, Plasma and Materials "ESEPM2020", MESTEL Laboratory, University of Ghardaia, March 07-08, 2020, Ghardaia, Algeria.

# Sommaire

<b>Remerciements</b> .....	i
<b>Résumé</b> .....	iii
<b>Abstract</b> .....	iv
<b>Résumé (en arabe)</b> .....	v
<b>Liste des communications et travaux</b> .....	vi
<b>Liste des figures</b> .....	x
<b>Liste des tableaux</b> .....	xii
<b>Liste des abréviations et notations</b> .....	xiii
<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Les sédiments de barrages</b> .....	<b>6</b>
1.1 Introduction .....	7
1.2 Définitions .....	8
1.3 Caractéristiques d'un sédiment.....	9
1.3.1 <i>La structure granulaire</i> .....	9
1.3.2 <i>La composition minéralogique</i> .....	10
1.4 L'érosion dans les bassins versants.....	11
1.5 L'envasement.....	13
1.5.1 <i>Processus de l'envasement</i> .....	13
1.5.2 <i>Influence de l'envasement sur les projets de barrage</i> .....	14
1.5.3 <i>Origine et causes de l'envasement des barrages</i> .....	16
1.5.4 <i>Solutions au problème d'envasement des barrages</i> .....	16
1.6 Le dragage.....	20
1.6.1 <i>Techniques de dragage (le curage)</i> .....	20
1.6.2 <i>Transport des sédiments de dragage</i> .....	25
1.6.3 <i>Dépôts et stockage des sédiments de dragage</i> .....	25
1.7 La boue de dragage des barrages.....	26
1.7.1 <i>Précisions lexicales : « sédiment » ou « boue » de dragage ?</i> .....	26
1.7.2 <i>Origine des boues</i> .....	27
1.7.3 <i>Caractéristiques physiques et minéralogiques des boues</i> .....	27
1.8 Conclusion du chapitre.....	28
<b>Chapitre 2 : Problématique de l'envasement des barrages en Algérie</b> .....	<b>29</b>
2.1 Introduction .....	30
2.2 Historique des barrages Algériens .....	31
2.2.1 <i>Barrages algériens de première et seconde génération</i> .....	31
2.2.2 <i>Barrages algériens durant l'indépendance</i> .....	32
2.3 Importance de l'envasement des barrages Algérien.....	34
2.3.1 <i>Perte de capacité de stockage</i> .....	34
2.3.2 <i>Blocage des organes de vidange</i> .....	36
2.3.3 <i>Sécurité de l'ouvrage</i> .....	37
2.4 Solutions de dévasement adoptées en Algérie.....	37
2.5 Particularité de la retenue du barrage K'sob.....	42
2.5.1 <i>Présentation du bassin versant du K'sob</i> .....	43

2.5.2 Conséquences de l'envasement sur le barrage K'sob et mesures prises...	49
2.6 Conclusion du chapitre.....	51
<b>Chapitre 3 : Filières de valorisation des sédiments issus des opérations de dragage .....</b>	<b>53</b>
3.1 Introduction .....	54
3.2 Valorisation dans la filière de l'industrie du ciment.....	55
3.2.1 Notions essentielles et caractéristiques des ciments.....	55
3.2.2 Valorisation matière de sédiments .....	58
3.2.3 Spécifications normatives .....	58
3.2.4 Applications aux sédiments.....	59
3.2.5 Avantages de la valorisation dans la filière de l'industrie du ciment.....	65
3.3 Valorisation dans la filière des bétons et mortiers .....	65
3.3.1 Notions essentielles et caractéristiques des bétons et mortiers.....	65
3.3.2 Exigences à satisfaire dans la confection des bétons.....	68
3.3.3 Applications aux sédiments.....	70
3.3.4 Avantages de la valorisation dans la filière des bétons et mortiers.....	74
3.4 Valorisation dans la filière des matériaux routiers .....	75
3.4.1 Notions essentielles et caractéristiques des routes.....	75
3.4.2 Applications aux sédiments.....	78
3.4.3 Avantages de la valorisation dans la filière des matériaux routiers.....	81
3.5 Valorisation dans la filière des matériaux céramique .....	82
3.5.1 Notions essentielles et caractéristiques des produits céramiques .....	82
3.5.2 Procédés et techniques de fabrication .....	83
3.5.3 Applications aux sédiments.....	84
3.5.4 Avantages de la valorisation dans la filière des matériaux céramique.....	87
3.6 Conclusion du chapitre.....	87
<b>Chapitre 4 : Valorisation de la boue de dragage du barrage K'sob dans la filière des bétons et mortiers .....</b>	<b>89</b>
4.1 Introduction .....	90
4.2 Présentation du plan expérimental .....	91
4.3 Identification des matériaux de l'étude.....	93
4.3.1 Boue de dragage .....	93
4.3.2 Ciment .....	94
4.3.3 Granulats.....	94
4.3.4 Formulations .....	95
4.4 Méthodes expérimentales.....	96
4.4.1 Essais sur la boue de dragage .....	96
4.4.2 Essais sur pâtes .....	98
4.4.3 Essais sur mortiers .....	99
4.4.4 Essais sur bétons .....	100
4.5 Analyse et interprétation des résultats.....	102
4.5.1 Résultats des essais sur la boue de dragage.....	102
4.5.2 Résultats des essais sur pâtes .....	106
4.5.3 Résultats des essais sur mortiers .....	108
4.5.4 Résultats des essais sur bétons.....	110
4.6 Conclusion du chapitre.....	116

<b>Chapitre 5 : Etude de durabilité .....</b>	<b>117</b>
5.1 Introduction .....	118
5.2 Notion de durabilité des bétons .....	118
5.2.1 Facteurs influençant la durabilité.....	119
5.3 Méthodes de mesure.....	121
5.3.1 Méthode de mesure de l'absorption d'eau.....	121
5.3.2 Méthode de mesure de la résistance aux attaques acides .....	124
5.4 Analyse et interprétation des résultats.....	126
5.4.1 Résultats de mesure de l'absorption d'eau.....	126
5.4.2 Résultats de mesure de la résistance aux attaques acides .....	129
5.5 Conclusion du chapitre.....	136
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>138</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>143</b>

# Liste des Figures

Figure	Page
1.1. Progression du delta d'éléments grossiers [11].....	12
1.2. Comportement des sédiments fins[11] .....	12
1.3. Processus d'envasement d'un barrage réservoir [12] .....	14
1.4. Dragues mécaniques [14] .....	21
1.5. Dragues hydrauliques aspiratrices [14] .....	21
1.6. La drague à agitation [15] .....	22
1.7. Dragage à injection d'eau [15] .....	23
1.8. Dragage par rotodévaseur [15].....	23
1.9. La drague à injection d'air [15] .....	24
1.10. La drague à charrue Alligator et détail d'une niveleuse [15] .....	24
2.1. Répartition des barrages en exploitation dans le Nord algérien [23].....	33
2.2. Envasement barrages d'Ighil Emda et de Foum El Gherza [28,29].....	36
2.3. Blocage de la vanne de fond de la deuxième digue du barrage Boughezoul [28] .....	37
2.4. Surélévation des barrages algériens [29,31].....	38
2.5. Opération de dragage des retenues de barrages Algériens[32].....	40
2.6. Vannes d'évacuation de la boue par les chasses du barrage de Beni Amrane [29].....	40
2.7. Soutirage des courants de densité des barrages Algériens [26, 29,32] .....	42
2.8. Protection antiérosive à l'amont des barrages Algériens [29].....	42
2.9. Carte de localisation des grands ensembles du Nord de l'Algérie.....	43
2.10. Bassins hydrographiques du territoire Algérien [34].....	44
2.11. Situation géographique du bassin versant du K'sob [35].....	45
2.12. Vue en 3D de l'image Alsat-2A montrant la discordance angulaire de la montagne de Maadid [38] .....	47
2.13. La carte lithologique du bassin versant du k'sob.....	48
2.14. Vue sur le barrage K'sob lors de sa construction.....	49
3.1. Schéma de fabrication du ciment.....	56
3.2. Résistances mécaniques des 4 mélanges étudiés [22].....	64
3.3. Résistances à la compression des mortiers [22].....	71
3.4. Evolution de la fraction des résistances en compression des bétons à base de vase par rapport au béton témoin (sans vase) [55] .....	71
3.5. Perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% HCl et 5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) [57] .....	72
3.6. Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% MgSO <sub>4</sub> [58].....	73
3.7. Coupe type d'une structure de chaussée.....	75
3.8. Classification des sols ( $D_{max} < 50 mm$ ) [59] .....	76
3.9. Résistances à la compression du sédiment traité au ciment à différents âges de maturation [62].....	80
3.10. Variation de la résistance à la flexion en fonction de la température [65].....	85
3.11. Evolution de la résistance en fonction de l'intensité de pression pour différents âges de la brique [66].....	85

<b>3.12.</b>	Evolution du retrait à la cuisson et au séchage en fonction de la teneur en vase [67] .....	86
<b>4.1.</b>	Organigramme du plan expérimental de l'étude.....	92
<b>4.2.</b>	Etapas de préparation de la boue.....	94
<b>4.3.</b>	Etapas de l'essai XRF sur la boue.....	97
<b>4.4.</b>	Dispositif de mesure de densité et finesse de la boue .....	98
<b>4.5.</b>	Dispositif de mesure du temps de début et de fin de prise.....	99
<b>4.6.</b>	Dispositif d'essais sur mortier.....	99
<b>4.7.</b>	Préparation du béton et dispositif de mesure de l'affaissement.....	100
<b>4.8.</b>	Confection et conservation des éprouvettes de béton.....	101
<b>4.9.</b>	Essais réalisés sur béton durci.....	102
<b>4.10.</b>	Courbes granulométriques de la boue de dragage du barrage K'sob.....	103
<b>4.11.</b>	Diffractogrammes des rayons X de la boue de dragage du barrage K'sob.....	104
<b>4.12.</b>	Influence de la teneur en boue sur le temps de prise des différents mélanges de pâtes.....	107
<b>4.13.</b>	Évolution de la fraction des résistances à la flexion des mortiers à base de boue par rapport au mortier témoin (MB0).....	108
<b>4.14.</b>	Évolution de la fraction des résistances à la compression des mortiers à base de boue par rapport au mortier témoin (MB0).....	109
<b>4.15.</b>	Évolution de la résistance à la compression du béton à base de boue par rapport au béton témoin BB0.....	114
<b>5.1.</b>	Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire sur mortier.....	123
<b>5.2.</b>	Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire sur béton.....	124
<b>5.3.</b>	Etapas de l'essai de mesure de la résistance aux attaques acides.....	125
<b>5.4.</b>	Evolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction du temps, des différents mortiers après 28 jours de conservation.....	127
<b>5.5.</b>	Evolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction du temps, des différents mortiers après 90 jours de conservation.....	127
<b>5.6.</b>	Evolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction du temps, des différents bétons après 28 jours de conservation.....	128
<b>5.7.</b>	Variation de perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion en 5% HCl.....	129
<b>5.8.</b>	Variation de perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion en 5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	130
<b>5.9.</b>	Variation de perte de masse des bétons en fonction de la période d'immersion en 5% HCl.....	131
<b>5.10.</b>	Variation de perte de masse des bétons en fonction de la période d'immersion en 5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	131
<b>5.11.</b>	Etat des éprouvettes de mortier après 6 semaines d'immersion dans les solutions acides (HCl et H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	133
<b>5.12.</b>	Etat des éprouvettes de béton après 12 semaines d'immersion dans les solutions acides (HCl et H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ). .....	133
<b>5.13.</b>	Evolution de la résistance à la compression des mortiers immergés dans les solutions acides (HCl et H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	134
<b>5.14.</b>	Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans les solutions acides (HCl et H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	135

# Liste des Tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Page</b>
2.1. Valeurs des paramètres morphométriques du bassin versant du K'sob	46
3.1. Principales phases du ciment Portland et leurs caractéristiques[39].....	55
3.2. Types de ciments courants et leurs compositions [40] .....	57
3.3. Composition chimique des matériaux argileux bruts [41] .....	59
3.4. Résistances à la compression des mortiers et bétons (MPa) à base de ciments composés de matériaux argileux calcinés [41] .....	60
3.5. Composition chimique et minéralogique de la boue de dragage naturelle [42] .....	60
3.6. Composition chimique des matériaux utilisés [43] .....	62
3.7. Résistance à la compression des ciments mélangés [44].....	63
3.8. Exigences normatives - chimiques et physiques- sur les métakaolins [53] .....	69
3.9. Influence d'ajouts des liants hydrauliques et matériau granulaire sur les valeurs de l'optimum Proctor modifié des formulations étudiées [60] .....	79
4.1. Formulation des Mortiers.....	95
4.2. Formulation des bétons.....	95
4.3. Dosage des constituants de la pâte de ciment.....	98
4.4. Propriétés physiques et géotechniques de la boue de dragage du barrage de K'sob.....	102
4.5. Composition minéralogique de la boue de dragage du barrage de K'sob.....	105
4.6. Résultats de l'analyse chimique de la boue de dragage du barrage de K'sob.....	105
4.7. Mesures de la consistance.....	106
4.8. Surface spécifique Blaine des mélanges ciment-boue calcinée (cm <sup>2</sup> /g)	107
4.9. Résistance à la flexion du mortier de contrôle MBO (MPa) .....	108
4.10. Résistance à la compression des mortiers (MPa) .....	109
4.11. Résistance à la compression des mortiers (MPa) et indice d'activité de résistance à 28 jours.....	110
4.12. Affaissement en fonction du volume d'eau de gâchage et du pourcentage de boue calcinée pour un béton ordinaire.....	111
4.13. Valeurs moyennes des paramètres de calcul des résistances à la compression des échantillons.....	111
4.14. Résistance moyenne à la compression des bétons (MPa) .....	113

# Liste des Abréviations et Notations

## Entreprises, Organismes et Administrations

AASHTO :	American Association of State Highway and Transportation Officials
AFNOR :	Association Française de NORmalisation
AFPC :	Association Française Pour la Construction
AFREM :	Association Française pour la Recherche et les Essais sur les Matériaux et les constructions
ANBT :	Agence Nationale des Barrages et Transferts
ASTM :	American Society for Testing and Materials
CERAL :	Céramique Algérienne
CTC :	Contrôle Technique de Construction
ENG :	Enterprise Nationale des Granulats
LTP/Est :	Laboratoire des Travaux Publics de l'Est de la ville de Constantine
L.C.P.C :	Laboratoire Central Ponts Et Chaussées -Paris, France
SCS :	Société des Ciments de Sigus de la ville d'Oum El Bouaghi
SCAEK :	Société des Ciments de Aïn El Kebira de la ville de Sétif

## Liste des abréviations

ATD :	Analyse Thermique Différentielle
ATG :	Analyse Thermo-Gravimétrique
BAP :	Béton Auto-Plaçant
COD :	Carbone Organique Dissous
COC :	Carbone Organique Colloïdal
COP :	Carbone Organique Particulaire
DAS :	Dragues Aspiratrices Stationnaires
DAM :	Dragues Aspiratrices en Marche
DRX :	Diffraction des Rayons X
DSC :	Differential Scanning Calorimetry (calorimétrie différentielle à balayage)
FTIR :	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier
GTR :	Guide Technique Routière
MEB :	Microscope Electronique à Balayage
NA :	Norme Algérienne
XRF :	Fluorescence aux Rayons X

## Liste des notations

R <sub>c</sub> :	Résistance à la compression
I <sub>p</sub> :	Indice de plasticité
VBS :	Valeur au bleu de méthylène
W <sub>n</sub> :	Teneur en eau naturelle
WOPN :	Teneur en eau à l'optimum Proctor normal
I <sub>c</sub> :	Indice de consistance

IAR :	Indice d'Activité de Résistance
IRC :	Indice de Résistance à la Compression
$\omega$	Teneur en eau
$W_L$ :	Limite de liquidité
$W_p$ :	Limite de plasticité
IPI :	Indice Portant Immédiat
CBR :	<i>Californian Bearing Ratio</i>
PAF :	Perte Au Feu
P	Poids de l'échantillon
$\gamma$	Masse volumique du béton
$V_u$ :	Vitesse ultrasonore
Ed :	Module d'Elasticité Dynamique
$\mu_d$ :	Coefficient de Poisson dynamique
Is :	Indice sclérométrique.
Rcé :	Résistance à la compression par écrasement
Rcu :	Résistance à la compression par ultrason
Rcs :	Résistance à la compression au scléromètre
$C_t$ :	Coefficient d'absorption à l'échéance « t »
VM :	Variation de la Masse

# Introduction

Le dragage est une technique d'envasement sûre pour récupérer la capacité de stockage. Mais l'opération de dragage reste très coûteuse et peu rentable, si un volume considérable de boue est en jeu. Il est hautement nécessaire d'effectuer cette opération, lorsqu'il n'existe pas de sites appropriés pour la construction de nouveaux barrages, ou que le barrage est menacé par une forte pression sédimentaire. Lors de chaque opération de dragage, le problème qui peut se poser est celui de la recherche d'un site de déversement pour les matériaux dragués. En général, les boues sont déversées directement dans la source d'eau en aval du barrage, ou transportées vers le site de traitement le plus proche, quelles que soient les considérations esthétiques ou écologiques. Si les boues sont déversées en aval, la concentration de particules fines augmente dans le cours d'eau, ce qui nuit à la végétation naturelle et à la vie animale. Les agriculteurs qui utilisent l'eau en aval sont susceptibles de se plaindre d'une forte turbidité. Ce fut le cas en 1993 peu après le dragage du barrage de Zardezas en Algérie.

Les impacts environnementaux étant inévitables, il est important d'évaluer et de comparer les avantages des opérations de dragage. Une énorme quantité de boues a été évacuée dans plusieurs barrages algériens, notamment le barrage de K'sob de M'sila dans l'Est Algérien, mais cette évacuation s'est avérée destructrice pour l'environnement. Pour ce barrage, des quantités considérables de boues ont été déversées dans la nature à raison de 0,3 million de m<sup>3</sup>/an, causant des dommages écologiques inévitables. Les usagers de l'eau en aval peuvent se plaindre que l'eau soit perturbée par les particules en suspension. Une attention particulière devra être portée aux désordres induits par les dépôts et le stockage de matériaux à particules fines. Prenons, par exemple, le dragage du barrage de Fergoug en Algérie. Le dépôt de sédiments en aval du barrage a provoqué une catastrophe écologique en travers du barrage en aval.

Selon l'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT), l'Algérie a entamé une deuxième opération de dragage du barrage de K'sob entre 2015-2019, qui a permis d'extraire 3 millions de m<sup>3</sup> de boues supplémentaires. Cette opération, à laquelle s'ajoute la première opération de 2006 à 2008, a permis de rétablir quasiment la capacité de rétention initiale du barrage de K'sob, soit environ 31 millions de m<sup>3</sup>. Cette quantité d'eau est utilisée pour irriguer 4 250 hectares de cultures intensives et de 2 000 hectares de céréales. Pour des avantages économiques et la protection de l'environnement, une direction de recherche potentielle consiste à récupérer la boue de dragage du barrage en matériaux de construction.

En se concentrant sur les problèmes environnementaux, certains chercheurs Algériens ont essayé d'utiliser les boues de dragage des barrages, en particulier le barrage de K'sob, comme un liant naturel rentable par rapport au ciment Portland, dont le rendement est soumis aux conditions de production dans les cimenteries. D'autres chercheurs se sont concentrés sur la résistance et la durabilité après qu'une partie du ciment Portland ait été remplacée par les boues de dragage des barrages.

Le ciment est le composant le plus cher du béton. La production de ciment consomme beaucoup d'énergie. Chaque tonne de ciment produite libère environ la même quantité de dioxyde de carbone dans l'air. En revanche, la calcination des boues n'engendre que de la vapeur d'eau. Par conséquent, certains chercheurs ont proportionnellement échangé le ciment Portland du béton par de la boue calcinée. Dans l'industrie du ciment, les recherches récentes sur la valorisation des boues déterminent principalement les propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et de durabilité. Les résultats de ces recherches démontrent l'opportunité d'utiliser la boue comme matériau liant auxiliaire dans le génie civil, en particulier comme substitut partiel du ciment.

Plusieurs chercheurs ont étudié l'utilisation des boues draguées du barrage de K'sob comme matériaux cimentaires. Par exemple, Chikouche et al, ont chauffé les boues de dragage à 20°C/min, ont traité les boues de dragage à 600°C, ont modifié le ciment avec les boues traitées et ont préparé des mortiers à partir du ciment modifié.

Il a été observé que les mortiers atteignaient une résistance à la compression « Rc » la plus élevée à un âge avancé, ce qui révèle que le traitement des boues améliore la résistance du mortier. Certains auteurs ont constaté que l'ajout de différentes quantités d'argile calcinée aux matériaux de clinker a abouti à : L'eau utilisée pour hydrater les minéraux du clinker a été absorbée par l'argile additive ; la consistance des ciments composés résultants a augmenté

avec la quantité d'argile calcinée ; la consistance et la réponse mécanique (42-43MPa) du ciment composé avec 10% d'argile calcinée étaient les plus proches du ciment Portland (44MPa). Pour certains chercheurs, en modifiant le béton de ciment avec des boues traitées, ils ont appris que le béton modifié a atteint une résistance globale acceptable, lorsque le dosage des boues traitées était de 5% et 10%. Cependant, la résistance du béton modifié était au-dessous de celle du béton CEM I, car la boue traitée contient un faible pourcentage de metakaolin, c'est-à-dire qu'une quantité limitée de silice est fournie pour la réaction pouzzolanique. La même chose a été observée dans l'étude ultrasonique, car le rapport vides/solides du béton de référence a changé rapidement, ce qui a entraîné un bon effet d'hydratation.

Cette étude vise à atteindre trois objectifs : l'objectif écologique, de minimiser les boues de dragage stockées dans la nature ; l'objectif technique, de fabriquer des mortiers et des bétons à base de boues de dragage ayant des résistances intéressantes à la compression ; et l'objectif économique, de mettre à la place du ciment, en grande quantité, les boues de dragage traitées.

A ces fins, la boue extraite du barrage de K'sob a été caractérisée chimiquement, physiquement, minéralogiquement et mécaniquement, et introduite comme matériau de construction, à la fois comme substitut du ciment et comme composant du mélange de béton/mortier ordinaire. La boue a d'abord été activée par calcination, puis ajoutée au ciment à raison de 10%, 15% et 20% séparément. Le comportement mécanique, notamment en compression, des matériaux cimentaires (*mortier/béton*) à base de boues traitées a été étudié par des essais en laboratoire. Plusieurs résultats notables ont été obtenus :

- La boue a pu être activée à 600°C après avoir été entièrement déshydroxylée par traitement thermique. La boue de dragage contient des minéraux bruts essentiels des liants hydrauliques courants.
- Le temps de prise des pâtes n'était pas fortement touché, tant que moins de 20% du ciment était remplacé par la boue.
- Tous les mortiers ont montré des résistances aussi bien à la flexion qu'à la compression augmentant régulièrement avec l'âge et ne diminuent pas. Par rapport au mortier témoin, la diminution de la résistance à la flexion à l'âge de 28 jours du mortier MB20 (*après la substitution de 20% du ciment par la boue calcinée*) n'a pas dépassé 7%; la résistance « Rc » à la compression à 28 jours des bétons préparés (*10, 15 et 20% de boue calcinée*) a dépassé la valeur normative de 42.5MPa.

- La « Rc » à 28 jours du béton préparés était généralement acceptables, et supérieures à la valeur caractéristique minimale (21MPa) du béton sur site. La résistance mécanique du béton, dont 10% du ciment a été remplacé par la boue, était bien meilleure que celle de tous les bétons à base de boue. Ce béton, à l'âge de 90 jours est parvenu à atteindre une « Rc » allant jusqu'à 30 MPa. Les autres bétons, avec des teneurs en boues de 15% et 20%, ont également donné des résultats satisfaisants, dépassant ceux du béton témoin.

Outre le comportement mécanique, les différents bétons et mortiers de l'étude ont présenté des résultats des essais à l'absorption d'eau et à l'agression acides (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), satisfaisants révélant que la boue de dragage traitée a un bon effet significatif sur la durabilité du mortier et du béton dans lesquels elle est incorporée.

La dite thèse est structurée en six parties :

La première partie est consacrée au chapitre 1, présentant un contexte général et une bibliographie sur les concepts généraux des sédiments de barrages, les modalités de dragage et les difficultés rencontrées dans la gestion des sédiments extraits lors des opérations de dragage qu'il faut contrôler leur incidence sur l'environnement au sens large moyennant des enquêtes publiques et étude d'impact.

Dans la seconde partie, réservée au deuxième chapitre, nous abordons la problématique de l'envasement des barrages en Algérie en mettant l'accent, d'une part, sur les procédés employés en Algérie pour contrer l'envasement, et d'autre part, sur les techniques de dévasement adoptées. Nous présentons aussi dans ce chapitre le barrage de Ksob, son historique, son bassin versant ainsi que les conséquences d'envasement et les mesures prises.

La troisième partie du chapitre 3 passe en revue les domaines de récupération et d'exploitation des sédiments de dragage des barrages, en particulier le secteur de la construction.

Le quatrième chapitre expose et détaille les traitements et les essais adoptés pour la valorisation des boues de dragage de la retenue du barrage K'sob dans les matrices cimentaires béton/mortier (*formulations des mélanges, procédure de mesure et critères d'évaluation...*), ainsi que l'interprétation et l'analyse des résultats obtenus.

Dans le chapitre cinq, nous avons présenté l'étude sur la durabilité des bétons et des mortiers à base de ciment et de boue de dragage, fabriqués en laboratoire. L'analyse des résultats des tests effectués est présentée dans ce chapitre.

La sixième et dernière partie expose les conclusions générales de la thèse ainsi que les perspectives de recherches futures.

# Chapitre 1.

## Les Sédiments de Barrages

*Dans ce chapitre est présenté le contexte général et bibliographique sur les notions globales des sédiments de barrages (origine et constitution), les modalités de dragage et les difficultés rencontrées dans la gestion des sédiments extraits lors des opérations de dragage qu'il faut contrôler leur incidence sur l'environnement au sens large moyennant des enquêtes publiques et étude d'impact.*

### Plan du chapitre

---

1.1	INTRODUCTION.....	7
1.2	DEFINITIONS.....	8
1.3	CARACTERISTIQUES D'UN SEDIMENT.....	9
1.4	L'EROSION DANS LES BASSINS VERSANTS.....	11
1.5	L'ENVASEMENT.....	13
1.6	LE DRAGAGE.....	20
1.7	LA BOUE DE DRAGAGE DES BARRAGES.....	26
1.8	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	28

## 1.1 INTRODUCTION

Les taux élevés de sédimentation de nombreux barrages et la réflexion tenue à leur durabilité à long terme ont aggravé ce problème. Ainsi, il est nécessaire d'estimer le véritable effet de la sédimentation de la retenue et la performance économique des diverses solutions pour atténuer ce souci. Les principales préoccupations sont : la perte de stockage de la retenue, les endommagements aux turbines et l'impact sur le lit de cours d'eau de la rivière en aval.

Dans tous les cas, la grande attention portée à la sédimentation est expliquée par les arguments suivants :

- Des coûts excessifs et une excellente compréhension fondée sur le vécu de différents états et pays favorisent la minimisation de ces difficultés ;
- Risque élevé de sédimentation dans de nombreuses zones où d'autres barrages seront construits ;
- Au-delà de l'optimisation économique, la prise en compte de leur durabilité à long terme est un facteur clé pour déterminer l'acceptabilité des futurs barrages.

Une grande partie des dommages ou de la perte d'anciennes retenues dus à la sédimentation réelle est liée à des estimations inexactes du volume et de la taille des sédiments et qui aurait pu être atténuée par des projets et des activités bien adaptés aux circonstances.

Il n'y a pas de solution standard et différentes variations doivent être étudiées pour tenir compte de l'incertitude dans l'évaluation du potentiel de précipitations. Combiner plusieurs solutions peut être la meilleure option. Citons à titre d'exemples, La mise en place d'un projet de dragage, de l'extraction à la gestion finale des sédiments, dépend de l'analyse d'un certain nombre de facteurs techniques, environnementaux et économiques. Dès le départ, la caractérisation physico-chimique des sédiments permet d'orienter les opérations de dragage. Elle fournit des informations sur la gestion appropriée des sédiments en fonction de leur teneur en contaminants, du choix de la technique d'extraction et du besoin de traitement ou de prétraitement des sédiments.

Par conséquent, la gestion de ces dépôts doit être effectuée dans le respect de l'environnement et de la réglementation applicable. Les plus importants dispositifs impliqués dans la sédimentation des retenues doivent être maîtrisés. Il est nécessaire de déterminer les effets de l'accumulation de sédiments sur les ouvrages hydrauliques. Des moyens de gestion des sédiments sont ultérieurement identifiés pour évaluer clairement les avantages et les besoins de la récupération des sédiments.

## 1.2 DEFINITIONS

**Le sédiment** est un dépôt meuble laissé par l'eau, le vent et d'autres agents d'érosion, et selon son origine, il peut être alluvial, glaciaire, lacustre ou marin. Il est donc formé de plusieurs particules entraînées par les facteurs d'érosion et déposées en couches consécutives par gravité. C'est un phénomène de sédimentation, sa grandeur et son influence dépendent d'agents et facteurs climatiques, écologiques, géomorphologiques et hydrologiques.

**La sédimentation** est un ensemble d'étapes qui conduisent à la formation de dépôts. Ainsi, la sédimentation est la tendance des particules en suspension à se déposer du liquide dans lequel elles sont entraînées et à rester immobiles devant un obstacle, devenant ainsi des sédiments. Cela est dû à leur mouvement dans le liquide en réponse aux forces agissant sur eux. Ces forces peuvent être dues à la gravité, à l'accélération centrifuge ou aux forces électromagnétiques.

**L'environnement sédimentaire** est initialement aquatique, mais peut devenir terrestre après la disparition de l'eau. Si la zone de dépôt est grande, le sédiment déposé depuis longtemps est un bassin sédimentaire, la vitesse de sédimentation peut être mesurée. La sédimentation intervient dans de nombreux domaines : hydraulique fluviale, hydraulique urbaine et hydraulique marine.

**La sédimentation des barrages** est directement due aux taux d'érosion élevés des bassins hydrographiques, les particules solides sont drainées directement par les courants d'eau et vont créer des écoulements de densité à l'entrée des retenues qui les contiennent.

**En géologie, la sédimentation** est souvent utilisée comme l'exact **opposé de l'érosion**, à savoir l'extrémité terminale du transport des sédiments. En ce sens, elle comprend la cessation de transport par saltation (*déplacement par sauts des sables et graviers*) ou véritable transport de fond. **Le tassement** est la chute des particules en suspension dans le liquide, tandis que la sédimentation est la fin du processus de décantation.

Le terme est généralement utilisé en géologie pour décrire le **dépôt de sédiment** qui se traduit par la formation de roche sédimentaire, et dans divers domaines de la chimie et de l'environnement pour décrire les mouvements de particules souvent plus petites et des molécules.

### 1.3 CARACTERISTIQUES D'UN SEDIMENT

Les matières particulaires qui constituent un sédiment sont soit des fragments du sol portés par les eaux de ruissellement, les courants, ou le vent (*appelé, sédiment terrigène*), soit des fragments résultant de la décomposition de débris d'organismes (*appelé, sédiment organogène ou biogène*). Ces fragments ou particules sédimentaires qui ont la capacité de retenir et ou de lier des substances polluantes, se présentent sous différentes tailles, formes et compositions minéralogique ou organique.

La définition statistique de la fréquence des différentes tailles de particules permet d'identifier les conditions sédimentaires et d'expliquer la distribution des sédiments dans les milieux aquatiques. Effectivement, les particules les plus fines vont se retrouver en aval alors que les grosses resteront en amont.

Pareillement, la vitesse de l'eau est un facteur qui impacte la sédimentation (*transport et dépôt*) ; plus le courant est faible, plus la sédimentation est importante. Pour des pentes douces, de 1 à 5 %, on trouve du sable fin.

Le sable grossier et les cailloux se déposent dans les parties les moins abritées avec un maximum de turbulence. Les vases et les limons sont présents sur le rivage [1]. Les sédiments sont principalement distingués par leur structure granulaire et leur composition minérale.

#### 1.3.1 La structure granulaire

Une structure granulaire est un assemblage de grains dont les tailles sont caractérisées par une distribution donnée. Les sédiments sont classés proportionnellement à leur granulométrie comme suit [2] :

- Les particules de plus de 63  $\mu\text{m}$  de diamètre sont typiquement des sédiments grossiers constitués principalement de matériaux inorganiques, sable et silicate. Ils présentent une cohésion faible et des surfaces de contact des particules disparates petites, qui ne se lient donc pas aux contaminants. Fréquemment, il est différencié un sable ( $63 \mu\text{m} < \varnothing < 2 \text{ mm}$ ) d'un gravier ( $\varnothing > 2 \text{ mm}$ ).
- Les particules fines inférieures à 63  $\mu\text{m}$  se présentent en deux classes de diamètre, de 0,2 à 2  $\mu\text{m}$  et de 2  $\mu\text{m}$  à 63  $\mu\text{m}$  respectivement pour les minéraux argileux et le silt. Comme ils peuvent aussi renfermer la matière organique.

La matière organique sédimentaire, caractérisée par du carbone organique est constituée de macromolécules polymériques hétérogènes qui ont des sites hydrophiles leur permettant d'être adsorbés à la surface des particules argileuses et de bloquer de nombreux contaminants [3,4].

### 1.3.2 La composition minéralogique

Le sédiment est un milieu complexe et hétérogène composé d'eau (*jusqu'à 80%*), de matières inorganiques et organiques et de composés d'origine artificielle (*anthropique*) [5].

Le sédiment présente essentiellement trois composantes :

- **Eau interstitielle :**

Cette eau correspond à celle occupant l'espace entre les particules de sédiment et constitue une partie importante du sédiment avec un volume total de plus de 50% [6,7].

- **Phase inorganique :**

C'est une phase composée de minéraux issus de l'érosion de la croûte terrestre et de débris coquilliers. Ses composés sont essentiellement des argiles, des carbonates et des silicates. Les particules inorganiques ont une grande capacité d'adsorption des contaminants qui leur est conférée par les hydroxydes de fer et de manganèse ainsi que de composés organiques qui recouvrent fréquemment ces particules inorganiques.

- **Phase organique :**

Malgré que cette phase occupe un petit volume de sédiments, elle a un rôle essentiel en régulant le mouvement et donc la biodisponibilité d'un nombre important de contaminants, notamment les composés organiques non ioniques. [5].

La matière organique est classée selon la taille des particules de la façon suivante [23] :

- $COD < 1 \text{ kDalton}$  : carbone organique dissous,
- $1 \text{ kDalton} < COC < 0,22 \mu\text{m}$  : carbone organique colloïdal
- $COP > 0,22 \mu\text{m}$  : carbone organique particulaire.

Certainement, la taille des particules a un effet considérable dans l'augmentation du taux des composés organiques ou des métaux des sédiments. Tous ces indices gouvernent la distribution des polluants entre les diverses phases du sédiment et du milieu aquatique et contrôlent ainsi leur biodisponibilité [8].

#### 1.4 L'ÉROSION DANS LES BASSINS VERSANTS

Les influences atmosphériques telles que la pluie, le gel et le vent sont les causes essentielles de l'érosion des sols, où les eaux de surface sont responsables du transport des solides vers les plans d'eau. Les retenues du barrage forment un espace favorable au dépôt des solides décomposés. La sédimentation dans les réservoirs due à l'érosion affecte la capacité de stockage des barrages par des phénomènes d'envasement.

Les taux d'érosion sont souvent élevés et la quantité de sédiments transportés est très variable selon la configuration du bassin, la pente des berges, l'état de la végétation, etc.

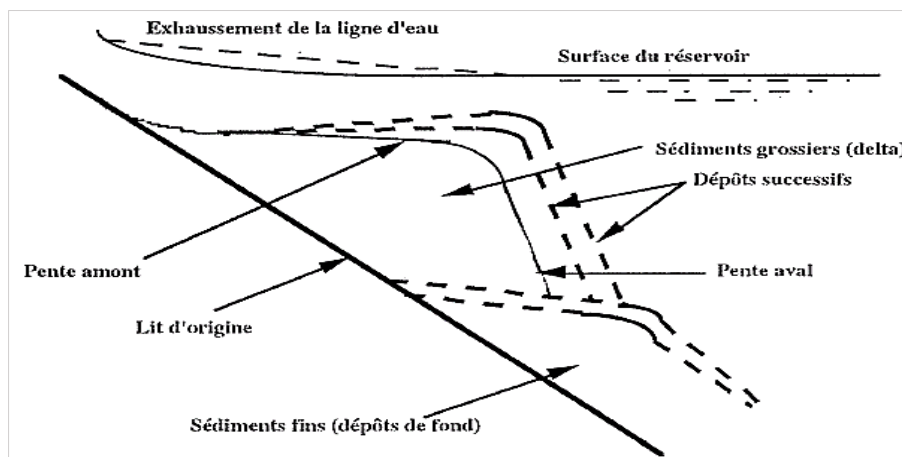
La répartition des sédiments déplacés dans les retenues est un fait déroutant. L'ampleur et l'influence de ce phénomène sont déterminées par le taux annuel d'érosion (*par exemple en t/Km<sup>2</sup>/an*). Ce paramètre peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers [9].

Le plus souvent, la granulométrie des matériaux en dépôt dans les retenues diminue d'amont en aval [10]. Une fois que ces sédiments auront atteint la retenue, ils seront déposés d'une manière différente [11].

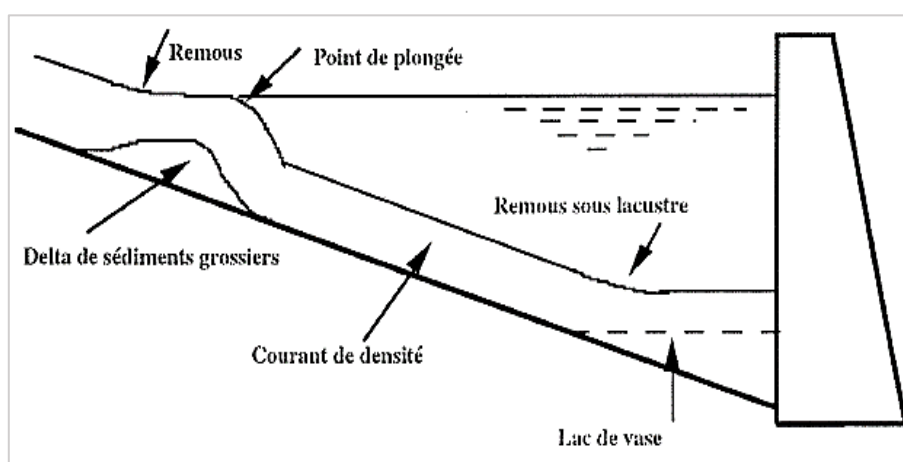
Les matériaux massifs portés par la charge (apportée par l'eau ou le vent) se déposent largement à proximité de l'entrée de la retenue sous forme de delta, ce sont les matériaux les plus grossiers (*Figure 1.1*). Cette quantité de poids du lit transporté représente 10 à 40 % de la quantité totale de sédiments transportés [11].

Les matières transportées en suspension sont déposées de façon presque uniforme et dans multiples zones de la retenue.

Aussi, les matières les plus fines peuvent s'approcher du barrage, où elles s'installent (*Figure 1.2*). En général, la quantité de sédiments en suspension est de 5 à 10 fois la masse des sédiments en charge assise (*sous forme de dépôt*).



**Figure 1.1.** Progression du delta d'éléments grossiers [11]



**Figure 1.2.** Comportement des sédiments fins [11]

L'érosion hydrique est un événement observable dans la nature régi par des facteurs physiques naturels tels que l'agressivité du climat, la topographie, la pétrologie et la couverture végétale. Ce phénomène naturel est généralement intensifié par l'action humaine à travers le déboisement des forêts, le pâturage du bétail ainsi que l'agriculture sur les pentes abruptes.

De nos jours, les phénomènes d'érosion des sols ne cessent de s'aggraver en raison des extensions démesurées des surfaces imperméables, de la disparition des dispositifs antiérosifs du paysage, et de l'évolution du parcellaire et des pratiques agricoles. Ce phénomène d'érosion pourra occasionner la disparition des couches fertiles des sols entraînées par le ravinement, l'inondation et la détérioration de la propriété des eaux.

Les éléments et les facteurs déterminants qui interviennent dans le phénomène d'érosion peuvent être naturels ou humains :

▪ **Facteurs naturels :**

La configuration et la morphologie du terrain impactent forcément la vitesse de ruissellement des eaux sur une parcelle. Plus la vitesse est élevée, plus les particules de sol seront arrachées. La durée et l'intensité des précipitations sont le principal facteur d'érosion.

Les sols les plus favorables au phénomène d'érosion sont les sols fins ou les limons.

▪ **Facteurs humains :**

L'accroissement de la taille des parcelles et leur regroupement pour l'agrandissement des zones servant de culture sur les versants ont aggravé les problèmes d'érosion. En effet, une disparition de nombreux dispositifs structurants du paysage ayant une fonction fondamentale dans le ruissellement des eaux et l'affinement trop poussé du sol avantage la formation d'une croûte de battance engendrant une diminution de pénétration d'eau dans le sol et donc une accentuation de ruissellement.

La mécanisation agricole, les technologies de traitement et la forte augmentation des interventions culturales (*équipement sophistiqué et motorisé, produit phytosanitaire de protection et traitement des plantes, apports d'engrais*) engendrent des tassements superficiels des sols et amplifient l'intensité du ruissellement par la concentration des eaux dans les traces de pneus d'engins lourds dans la boue.

De plus, labourer le sol dans le sens de la pente facilite la circulation de l'eau et amplifie le phénomène de ruissellement (*création de lignes et couloirs préférentiels d'écoulement de l'eau*).

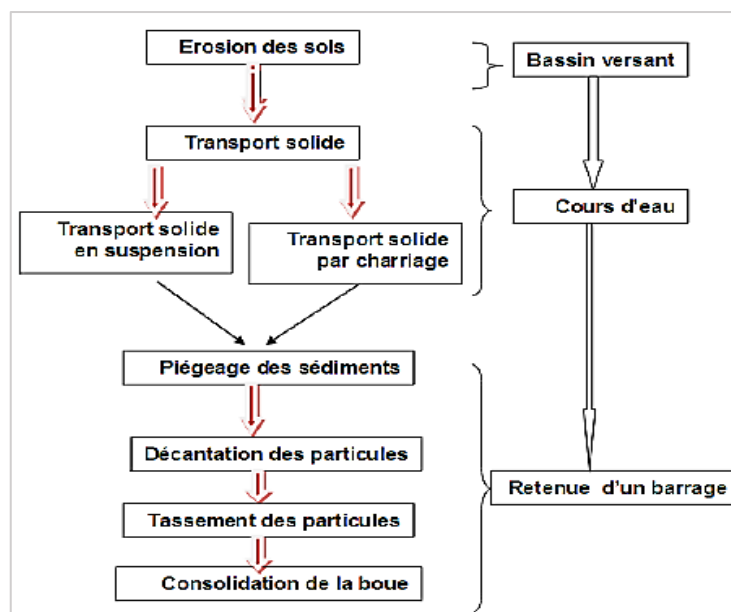
## **1.5 L'ENVASEMENT**

### **1.5.1 Processus de l'envasement**

Les rivières, contrairement à leur nature, déplacent graduellement d'importantes quantités de sédiments vers la mer. Le ruissellement des eaux pluviales est l'agent qui entraîne l'arrachement des sédiments aux versants des montagnes. Le transit naturel de ces sédiments qui sont piégés dans les eaux calmes des retenues, qu'elles comblent progressivement avec le temps peut être modifié par un arrangement et agencement des cours d'eau en construisant des barrages. A terme cela pose de graves problèmes pour le maintien et la préservation du potentiel hydraulique mobilisé à un prix de revient élevé.

Ce phénomène connu sous le nom de « l'envasement des barrages » est sans aucun doute, l'effet le plus grave de l'érosion des bassins versants. Il s'agit d'une forme de sédimentation avec de la vase.

La figure 1.3, illustre le processus de l'envasement dans les retenues des barrages.



**Figure 1.3.** Processus d'envasement d'un barrage réservoir [12]

### 1.5.2 Influence de l'envasement sur les projets de barrage

Il est important d'évaluer l'effet réel du processus d'envasement (*sédimentation des retenues*) et la viabilité économique des différentes solutions pour atténuer ce problème.

L'envasement pose d'énormes problèmes pour le barrage, ses exploitants et son environnement, et parmi les principaux problèmes que nous soulevons:

- **Réduction progressive de la capacité de stockage du barrage** et donc de son volume utile en raison de l'accumulation de sédiments dans la retenue. Ceci conduit à une diminution du niveau de service fourni par la retenue. L'impact de la réduction du volume annuel devient progressivement important au même rythme que l'augmentation des besoins en eau à satisfaire à partir du barrage;

- **Réduction progressive du volume de la tranche réservée à l'écrêtage des crues** qui augmente le risque de débordement. Ce risque est un signe qui présage un danger sur la sécurité de l'ouvrage et des zones inondables en aval, entraînant des pertes d'eau pour l'alimentation en eau domestique, l'irrigation et la production d'énergie;
- **Les dommages causés aux turbines et organes de vidange** : dans certaines situations d'urgence, des sédiments s'opposeront à l'ouverture des vannes en cas de besoin de réduire le niveau d'eau dans le réservoir;
- **Altération des parois des ouvrages** traduit par la détérioration de leurs caractéristiques de résistance due notamment aux attaques chimiques des sulfures et des acides provenant des dépôts sédimentaires et des eaux agressives;
- **Empêchement de la mise en œuvre de moyens d'inspection subaquatique et visuelle** après vidange. Cet empêchement est dû aux sédiments déposés masquant ainsi le parement d'amont et interdisant l'accès depuis la cuvette;
- **Dégradation des eaux des retenues de barrages** due au phénomène d'eutrophisation du lac. Ce phénomène est lié aux apports trop importants en phosphore, en manganèse et en azote entraînant une explosion du développement des végétaux aquatiques. Cette végétation constitue une source abondante de matière organique et engendrera le développement de nombreuses bactéries aérobies impactant la qualité de l'eau par la modification du chimisme de cette eau et la stratification thermique de la retenue;
- **La stabilité de la structure du barrage sera affectée** en raison de l'augmentation de la poussée hydrostatique due à la substitution progressive des volumes par les sédiments et l'augmentation de la densité de l'eau due à la suspension.

Résoudre de tels problèmes ne peut qu'être onéreux. L'évacuation des sédiments est une action sensible et compliquée qui fréquemment nécessite et implore l'arrêt du barrage, ce qui est quasiment irréalisable dans les pays aux caractéristiques climatiques extrêmes saisonniers et aux précipitations imprédictibles.

Pour certaines centrales hydroélectriques, les coûts des dommages en aval peuvent être considérés comme des pertes d'énergie, des frais d'entretien et d'usure des turbines.

### 1.5.3 Origine et causes de l'envasement des barrages

L'érosion hydrique est l'origine qui constitue le point de départ de l'envasement de barrages. Alors que les facteurs physiques naturels tels que l'agressivité climatique, la topographie, la pétrologie et la couverture végétale peuvent en être la cause. L'érosion hydrique est souvent provoquée par d'autres causes, en raison de l'impact humain à travers la déforestation, le surpâturage et l'agriculture sur des terres en pente.

L'envasement est le résultat du dépôt de boue dû à l'érosion des sols dans les bassins versants et à l'érosion des berges. C'est en période de crue que les barrages s'ensavent par les courants de densité. C'est la première crue d'automne qui draine la plus grande quantité de boue.

Les extensions démesurées des surfaces imperméables, la disparition des dispositifs antiérosif du paysage, et l'évolution du parcellaire et des pratiques agricoles ne font qu'aggraver les phénomènes d'érosion des sols et donc l'envasement des retenues des barrages.

### 1.5.4 Solutions au problème d'envasement des barrages

Les solutions au problème d'envasement des barrages peuvent revêtir un caractère de remédiation et prévention ou un caractère curatif d'interventions de désenvasement.

#### 1.5.4.1 Les solutions de remédiation et de prévention

Ce sont toutes les solutions dites amont, c'est-à-dire curatives et préventives :

- **Le reboisement** : la plantation d'arbres à l'entrée d'une retenue sert à piéger et à retenir les sédiments à l'amont des cours d'eau. Il s'agit absolument d'un écran de végétation efficace qui empêchera les matériaux solides de pénétrer dans une retenue, diffusera l'écoulement entrant et réduira sa vitesse. Une végétation abondante conduira à une forte consommation d'eau;

- **La plantation de végétation à longues tiges** dans les oueds pourra constituer de véritables pièges aux sédiments;

- **La plantation des arbres le long des courbes de niveau et stabilisation des berges** : c'est une solution technique de stabilisation végétale soit à l'aide de végétaux pour corriger des problèmes d'érosion peu importants, soit par la mise en place des armatures végétales qui requièrent un discernement meilleur de la structure des sols en place ainsi que des végétaux;

▪ **la restauration des sols** : Cette approche consiste à appliquer des processus biologiques qui augmentent la résistance de l'eau ou du vent aux sols du bassin versant en utilisant l'impact de la végétation naturelle ou cultivée. Ce sont des plantations d'arbustes pratiquées avec la sélection d'espèces adaptées à des fonctions spécifiques liées à leur capacité à résister à l'érosion et à enrichir le sol. Certaines espèces sont toujours plus adaptées que d'autres. Par conséquent, le choix doit être fait très soigneusement pour éviter les effets indésirables. De plus, la technique dite « le paillage » permet de recouvrir le sol de matières organiques, minérales ou plastiques pour protéger et améliorer sa structure, réduisant ainsi l'érosion et augmentant la perméabilité;

▪ **La formation des banquettes** : aménagement des versants en banquettes mécaniques qui réduisent l'érosion hydrique du sol, retiennent les ruissellements, favorisent l'infiltration sur les pentes et assurent la rétention des sédiments en amont. Ces bancs mécaniques sont constitués de digues en terre construites d'une manière perpendiculaire à la pente du sol et d'un canal qui retient les eaux de ruissellement et les sédiments de l'espace interbanquettes.

En vue d'avantager l'infiltration, atténuer l'érosion sur les pentes et empêcher le ruissellement des eaux, les banquettes sont à construire sur des pentes inférieures à 25% ;

▪ **La construction de petits barrages en gabions dans les talwegs** : il s'agit d'une technique très pratique et simple à exécuter au niveau du cours d'eau principal débouchant dans la retenue. Elle consiste en la réalisation d'un système de berge artificielle non étanche dit « *gabion* » qui sert à capturer des sédiments fins en amont de la retenue dans le cours d'eau principal. Les dépôts captés peuvent être dégagés moyennant des outils mécaniques simples;

▪ **La création de plages d'épandage** : il s'agit d'ouvrages à parement aval vertical destinés à favoriser les dépôts sédimentaires et garantissant la recharge et l'approvisionnement des barrages lors des crues. Il existe des ouvrages de dérivation traditionnels qui comportent souvent un seuil pour barrer tout le lit ou seulement une partie de celui-ci formant un chenal avec la rive de l'oued se prolongeant dans le barrage.

Outre cela et pour empêcher les sédiments d'arriver jusqu'au barrage, un ouvrage de dérivation ou de retenue et décantation des apports solides peut être construit (*un autre barrage*) en amont du barrage principal.

#### 1.5.4.2 Les solutions curatives et d'interventions de désenvasement

Il s'agit de toutes les solutions de lutte contre l'érosion pour empêcher l'arrivée et ou la concentration des sédiments dans un réservoir. Elles consistent notamment à l'évacuation des matières solides et à l'épuisement des fonds (*vidange*).

- **La chasse par vidange** (*Les chasses à l'Espagnol*) : L'opération vise à faire descendre le niveau de l'eau et à accélérer le débit d'écoulement pour enlever une quantité des sédiments retenus par le barrage. La décharge du barrage implique l'ouverture des vannes, ce qui peut limiter l'encombrement du barrage et les risques d'inondation qui y sont associés.

C'est une technique préconisée pour les barrages de faible importance, à régulation annuelle et pendant les premières crues. Par contre elle est déconseillée pour les barrages en zones sèches définies par leur rareté en eau et où les précipitations sont contrebalancées par l'évaporation des surfaces et la transpiration végétale;

- **Les chasses de dévasement par les vidanges de fond à barrage plein** : c'est un moyen qui consiste à équiper le barrage d'un dispositif de vidange de fond (*vannes de fond*). Celui-ci permettra d'assurer les fonctions de vidange de l'ouvrage et d'évacuateur de crue et des sédiments accumulés en fond de retenue. C'est un dispositif absolument indispensable pour tout barrage et à prévoir lors de sa conception notamment s'il peut y avoir une menace de sédimentation;

- **Le soutirage des courants de densités** : cette solution permet d'équiper le barrage d'un dispositif formé de batterie de vannes installée exclusivement pour le soutirage des sédiments. Elle permet d'exporter et chasser une partie des sédiments avant qu'elle soit déposée au fond du barrage par un cours d'eau à grande vitesse et forte turbulence et par conséquent diminuer la portée et l'envergure du dépôt dans la retenue.

La batterie de vannes est composée essentiellement de pertuis de dégrèvement, de conduites et de vannettes de dévasement.

Le dispositif de soutirage est accompagné d'un appareillage détectant d'une manière rapide l'ampleur et la distribution verticale des solides à proximité de la prise d'eau.

Pour ce moyen de soutirage, l'aspect général et la forme géométrique de la retenue du barrage doivent être favorables et avantagent l'apparition d'un écoulement dense à l'entrée de la retenue et éventuellement propagé jusqu'à la base du barrage;

- **La surélévation de la digue** (*aussi appelée levée*) : la hauteur de la digue sera rehaussée pour empêcher le passage de l'eau en excédant suite au dépôt de sédiments (*fonction principale d'une digue de protection*). Cette surélévation est tributaire d'un diagnostic des ouvrages du barrage afin de déterminer la nature et les dimensions de la partie à projeter sur la structure existante dont la stabilité ne doit pas être compromise. Cette technique permet à la retenue d'augmenter sa capacité et constituera une réserve supplémentaire qui compensera la perte de volume due à la sédimentation.

Cette partie d'ouvrage en surélévation sera soumise à une charge hydraulique en situation quasi-permanente et est considérée comme un ouvrage associé au barrage au titre de la réglementation. Il y a donc lieu d'appliquer les spécifications techniques concernant les barrages.

Les différentes solutions pour surélever un barrage possèdent des avantages et des inconvénients.

De manière générale, les solutions légères et peu onéreuses permettront une installation rapide de la surélévation pour des hauteurs moindres. Les solutions rigides sont beaucoup plus onéreuses mais résisteront mieux aux poussées hydrostatiques en plus d'une longévité considérable.

C'est possible aussi de réaliser une surélévation du corps total du barrage et de tous ces ouvrages annexes (*matériaux en remblai, composants structurels rigides tels que les murs en béton et composants plus souples comme les géotextiles*) soit par la mise en place de digues amovibles (*batardeau à planche, inclinés, membranaires, autostable*);

- **Le dragage de barrages** : il a pour objectif la restauration des sources d'eau à leur pleine capacité après que la capacité est réduite par sédimentation chaque fois qu'il pleut. Les travaux de dragage permettent l'extraction des matériaux sédimentaires se trouvant au fond de l'eau (*particulièrement les boues, les limons, les sables et les graviers...*).

## 1.6 LE DRAGAGE

Le dragage dans les barrages est particulièrement une opération d'entretien des fonds où les dépôts sont souvent constitués de particules fines ou d'un mélange de sable et de boue. Le recours au dragage est à envisager lorsque des solutions citées ci-dessus ne sont pas réalisables ou sont inefficaces en termes d'économie et ou de technicité.

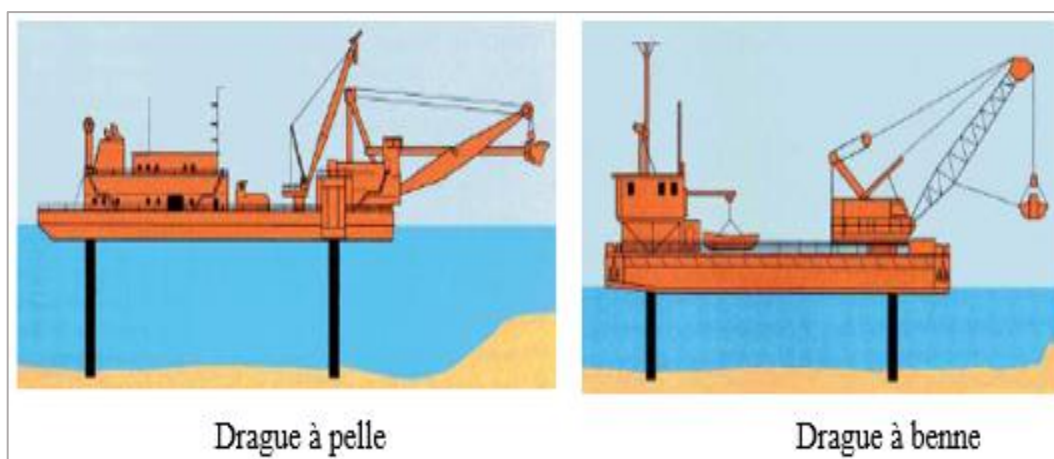
Deux facteurs importants du dragage peuvent impacter l'environnement, la technologie de dragage et les caractéristiques des sédiments nécessitant ainsi de développer une gestion environnementale du dragage plus intégrée notamment pour les nations en développement. Les opérations de dragage se déroulent généralement en trois étapes, à savoir : le nettoyage proprement dit, les opérations de dragage, le transport et l'élimination des sédiments dragués [13].

### 1.6.1 Techniques de dragage (*le curage*)

Il peut s'agir d'un dragage mécanique, hydraulique et hydrodynamique selon la quantité de sédiments à enlever et le principe général de fonctionnement de l'équipement.

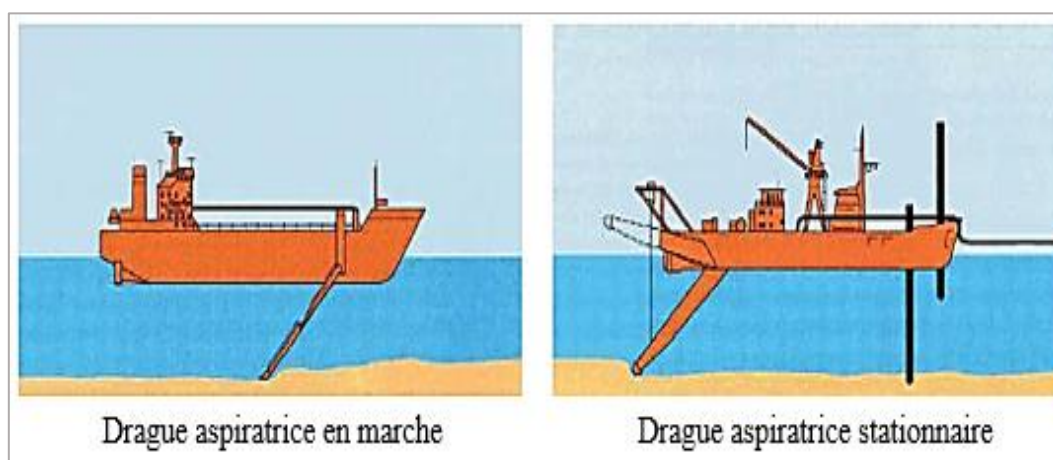
- **Dragage mécanique** : Les dragues mécaniques conviennent à des opérations de précision et dans des espaces plus réduits. Les modèles les plus typiques de dragues mécaniques sont : à benne preneuse, à pelles et à godets (*Figure 1.4*). Elles sont employées dans des zones à accès difficiles (*bords de quai, bassins étroits*) et pouvant opérer à des profondeurs allant de 25 m (*dragage au godet*) à 30 m (*dragage à la benne*).

La benne preneuse employée fréquemment est posée sur le fond en position ouverte et s'enfonce sous l'influence du mécanisme de fermeture et de son poids dans le sédiment à récupérer. La libération de la ligne de godet permet de déverser le contenu du godet dans le puisard de la drague, dans la barge ou à terre [14].



**Figure 1.4.** Dragues mécaniques [14]

▪ **Dragage hydraulique** : La drague aspiratrice agit de manière à aspirer un mélange d'eau et de sédiments en traversant un tuyau (*élinde*) équipé d'un embout (*bec d'élinde*) à l'aide d'une pompe centrifuge. Le mélange est déversé, selon la drague, dans des puits, des barges ou dans des conduites menant à la zone de dépôt. La drague peut atteindre les 30 m de profondeur. L'efficacité de l'opération de dragage peut être augmentée en ajoutant une cisaille en acier (*type cutter*) à lames ou griffes sur sol dur ou compacté au niveau du bec d'élinde; ce dernier système conduit à une augmentation de l'activité de retour de fond lors des opérations de dragage. Il existe deux types de dragues (*Figure 1.5*) : les dragues aspiratrices stationnaires (*DAS*) et les dragues aspiratrices en marche (*DAM*).



**Figure 1.5.** Dragues hydrauliques aspiratrices [14]

▪ **Dragage hydrodynamique** : effectué à l'aide de différents outils, ce dragage permet une remise en suspension dont le fondement de base est la réutilisation des substances déposées dans la colonne d'eau qui sous l'action de courants naturels sont dispersées ou transférées dans une zone bien définie [1]. C'est à propos de:

- Dragage par agitation (dit à « l'américaine ») : ce procédé a pour objectif la réutilisation des sédiments ciblés. L'agitation peut être accomplie en mélangeant les sédiments dans la colonne d'eau avec un jet d'eau puissant et/ou en raclant un instrument de fond ou en utilisant un système de pompe surélevé. Par exemple, une drague suceuse (*aspiratrice*) en marche maintient un débordement complet en tout temps ou écarte les matériaux (*Figure 1.6*) [15].

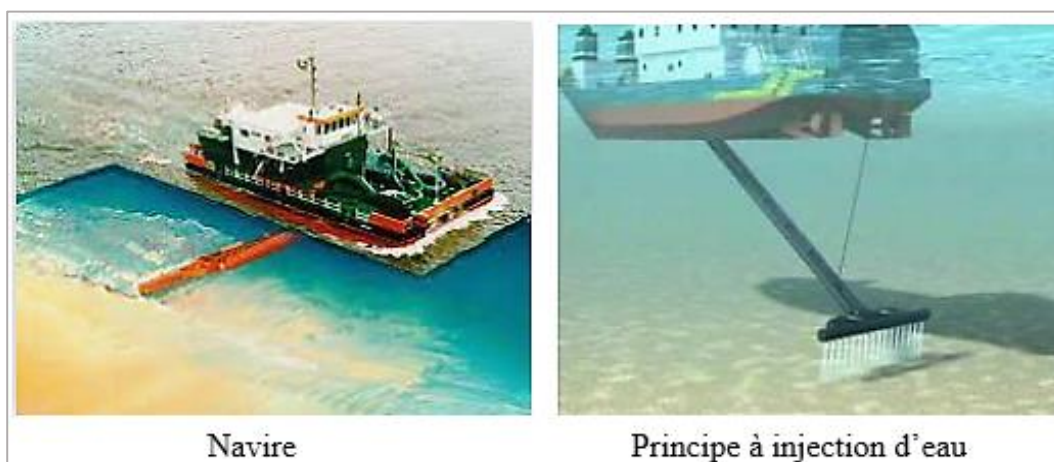
Ce dragage à l'américaine permet le rejet des boues pompées dans l'environnement en continu. Il est également plus opérant lorsqu'il est adopté dans les endroits à courants forts capables de drainer le mélange par débordement vers les zones souhaitées.

Il est parfaitement raisonnable d'utiliser ce genre de dragage pour des considérations économiques plutôt qu'environnementales [14].



**Figure 1.6.** La drague à agitation [15]

- Dragage par injection d'eau : c'est un dragage basé sur le principe des courants de densité. Une quantité importante d'eau est introduite dans les sédiments par des buses dans une direction orthogonale au mouvement de la drague. Les résidus deviennent plus liquides et se séparent et produisent ainsi un liquide plus dense que l'eau. Ce mélange se déplace alors sur la surface inférieure sous l'influence du courant électrique et de la gravité. (*Figure 1.7*) [14, 15].



**Figure 1.7.** Dragage à injection d'eau [15]

- Rotodévasage : Le rotodévasage consiste à remettre les sédiments en suspension à l'aide d'une embarcation équipée d'une fraise transversale de plusieurs mètres de large (*Figure 1.8*).



**Figure 1.8.** Dragage par rotodévaseur [15]

- Dragage à injection d'air : un système d'injection d'air sous pression est utilisé en pulvérisons les sédiments afin de les diviser en fines particules, détruire leur cohésion et les disperser dans la colonne d'eau. En raison de son rendement moins efficace que le dragage à injection d'eau, cette technique est rarement employée (*Figure 1.9*) [15].



**Figure 1.9.** La drague à injection d'air [15]

- Drague à charrue : le déplacement d'un volume restreint de sédiments d'une localité à une autre est possible par le passage d'une charrue ou d'une niveleuse (*Figure 1.10*).

L'endroit cible pour les sédiments peut être pour la conservation (*en vue d'une extraction ultérieure par des techniques conventionnelles*) ou la dispersion (*pour empêcher l'érosion entraînant le retour des matériaux à la nature naturelle du lieu*). La charrue reçoit le matériau lorsqu'il est tiré sur le fond. Elle laisse alors les sédiments s'accumuler dans la zone ciblée, puis répète l'opération tant de fois qu'il est essentielle.

Il y a des dragues à charrue de diverses tailles. Une charrue peut avoir une largeur de 3 à 35 m, et une surface de 1,5 à 50 m<sup>2</sup> [15].



**Figure 1.10.** La drague à charrue Alligator et détail d'une niveleuse [15]

### **1.6.2 Transport des sédiments de dragage**

Les différents types de transport des sédiments dragués seront choisis par rapport au lieu de dépôt. Le transport des sédiments aux zones d'immersion peut se faire par voie d'eau en bateaux et par camions vers les dépôts à terre. Le volume important des sédiments dans un état détrempé nécessite des opérations de déshydratation à l'effet de réduire leur teneur et leur volume et par conséquent répondre aux enjeux économiques et écologiques vis-à-vis des moyens de transport.

Le mode de transport par voie d'eau permet de réduire considérablement la consommation de carburant, les émissions de CO<sub>2</sub> et les coûts en comparaison au transport routier.

Néanmoins, l'emploi de ce type de transport est aujourd'hui en danger, la circulation est difficile, voire impossible sur certaines sections, ceci est dû à l'entassement de sédiments au fond des voies d'eau, limitant la hauteur d'eau. Pour garantir les niveaux d'eau suffisants, les gestionnaires entreprennent régulièrement des opérations de dragage pour retirer les sédiments, qui déposés à terre, obtiennent le statut de déchet.

### **1.6.3 Dépôts et stockage des sédiments de dragage**

Les sédiments sont transportés vers des sites de transit ou de regroupement où ils seront évacués par la suite pour suppression ou valorisation. Au-delà de certaines périodes de leur entreposage, les sédiments s'ils ne sont pas éliminés ou valorisés leur stockage est considéré comme définitif.

En fonction des caractéristiques des sédiments et de leur aléa spécifique, l'emplacement des sédiments peut être une cuve creusée dans le sol sans aucun matériau d'étanchéité spécifique, elle doit être en zone non inondable, à accès commode et à proximité immédiate de la zone nettoyée pour faciliter le transport des sédiments extraits.

Après l'exploitation, les sites doivent être réaménagés et doivent être contrôlés [16].

La récupération comprend la réutilisation, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir des matériaux ou de l'énergie réutilisables à partir des sédiments.

Les filières de valorisation sont divisés en trois secteurs [17] : le génie civil et les travaux publics, l'agriculture pour la bonification des terres et la restauration des sites naturels.

Si les sédiments sont inertes ou si aucun impact sanitaire ou environnemental n'a été démontré après étude et recherche, ils peuvent être utilisés pour créer des espaces naturels et des aires de loisirs.

## 1.7 LA BOUE DE DRAGAGE DES BARRAGES

### 1.7.1 Précisions lexicales : « sédiment » ou « boue » de dragage ?

Des appellations ou dénominations sont fréquemment utilisées pour désigner les sédiments, par exemple, des termes comme, **vases**, **silts**, ou **boues**.

Pour les géologues, la « **vase** » -du hollandais **wase**- est un « sédiment meuble gorgé d'eau, à éléments détritiques très fins (*sablons, limons, argiles*), à colloïdes en grande partie d'origine biologique (*bactéries, diatomées, pollens, humus, ...*) à hydroxydes et sulfures de fer ;... » [18]. Cette définition informe donc remarquablement sur la typologie du matériau qui est ici de texture fine, contenant de la matière organique essentiellement authigène (*formée sur place*) et en conditions chimiques réductrices [19].

Au contraire, « **Silt** » informe très peu sur cette nature, si ce n'est sur la texture du matériau : « **silt** » est un mot anglais qui désigne un « *sédiment détritique meuble dont le grain est compris entre 3.9  $\mu\text{m}$  et 62.5  $\mu\text{m}$*  » [18]. Même registre pour les termes d'origine latine : « **sable** » (*grains compris entre 50  $\mu\text{m}$  et 2 mm*) ou encore « **limons** » (*2  $\mu\text{m}$ -50  $\mu\text{m}$* ). Ces coupures granulométriques ne sont pas connues de manière précise mais l'expérience montre que ces termes sont employés sans erreur lexicale majeure. En outre, les termes « **vase** », « **silt** » ou « **limon** » peuvent être utilisés pour désigner un même sédiment avec raison [19]. Enfin, la « **boue** » est, pour les géologues comme pour les pédologues, un terme général de tout dépôt fin, gorgé d'eau et pouvant facilement s'écouler [18]. Les géologues l'utilisent également pour désigner les dépôts des bassins océaniques à teneurs élevées en argiles minéralogiques. Mais, le terme « **boue** » est largement employé pour désigner divers résidus de traitement industriels. C'est d'ailleurs dans ce sens que le vocabulaire « **boue de dragage** » est utilisé [19].

Au contraire, le terme « **sédiment** » est utilisé pour désigner ces mêmes matériaux lorsqu'ils sont « *déplacés au sein des eaux de surface* », situation dans laquelle ils ne sont pas considérés comme des déchets. De plus, le terme « **boue de dragage** » permet de faire la distinction entre sédiments dragués pour entretien et sédiments dragués pour le génie civil [19].

### 1.7.2 Origine des boues

Les boues de dragage (*ou de curage*) sont le produit de l'entretien des fonds de retenue des barrages. Après le curage, par une drague, ou par suçage, ces boues sont généralement disposées sur des terrains de dépôt où elles sècheront lentement. En géologie et pédologie, « **boue** » désigne tout dépôt fin (*grain plus petit ou égal 64  $\mu\text{m}$* ); classe des **lutites**, gorgé d'eau et pouvant facilement s'écouler. Les **lutites** ou **pélites** sont au sens strict une classe de roches sédimentaires détritiques dont les éléments ont un diamètre inférieur à 1/16 mm. Elles constituent la fraction fine et colmatante des **vases** et se déposent dans les régions abritées. Le mot **pélite**, du grec **pêlos**, « **boue** », terme initié par Karl Friedrich Naumann en 1873 (*géologue saxon.*), désignait originellement une roche finement détritique, argileuse, faisant pâte avec l'eau. Les termes **pélite** et **lutite**, du latin **lutum**, « **boue** », désignent désormais des roches sédimentaires détritiques à grain très fin ; **lutite** est réservé quelquefois pour les roches meubles et **pélité** est réservé pour les roches consolidées. La **boue** représente à la fois la fin du cycle de l'érosion et du transport, et le début de la diagenèse (*par enfouissement et transformation*) de nouvelles roches. La **boue** qui s'accumule sur le fond du canal des cours d'eau prend le nom de **vase** (*la vase est un dépôt de boue*).

### 1.7.3 Caractéristiques physiques et minéralogiques des boues

Les boues de dragage se caractérisent typiquement par leur granulométrie fine qui leur permet d'être assimilées à des limons sableux, des limons ou encore des argiles. Ce type de boues se caractérise également par une teneur en eau naturelle supérieure à 100 % et une forte teneur en matière organique. Les principaux minéraux identifiés dans la boue draguée sont le quartz, le feldspath, la calcite et les aluminosilicates. (*illite, kaolinite...*). D'autres minéraux sont parfois identifiés mais dans des proportions moindres: dolomite, halite, muscovite, pyrite,... [19]. En particulier, les silicates et les carbonates entrent dans la composition du clinker de ciment.

## 1.8 CONCLUSION DU CHAPITRE

D'une manière globale, l'envasement des barrages n'est pas aussi nuisible que quelquefois clamé, par contre c'est un problème sérieux pour un grand nombre de barrages, particulièrement pour les pays où des futurs barrages seront construits. Rendre moins grave ce problème nécessite une attention particulière quant à la mise en pratique des mesures et dispositions qui ont trait aux exigences pour la durabilité à long terme.

La gestion du risque d'envasement sera bientôt orientée vers la maîtrise des écoulements de surface considérés comme une source majeure de danger pour la sécurité et l'entretien des barrages. Elle peut varier considérablement selon l'emplacement du barrage, l'objectif et le fonctionnement de la retenue.

Les études de barrages doivent prendre en considération certains paramètres inéluctables dans l'estimation de la sédimentation. Partant de la sélection du site d'implantation générale du barrage, ses ouvrages jusqu'aux évacuations des apports.

Des chasses et/ou dragages, des galeries de dérivation définitives, peuvent être efficaces et à peu de frais selon les conditions spécifiques locales du site du barrage. L'analyse des performances réelles des ouvrages existants permettra de bien mener l'opération de dessablement des eaux turbinées. La retenue elle-même peut produire l'effet attendu d'une façon moins coûteuse pour le dévasement. Généralement, des solutions combinées conviennent.

Du fait d'estimer un risque d'envasement assez faible n'exclue pas d'accomplir une analyse critique de la durabilité à long terme. Certainement cette analyse, au départ peut proclamer des investissements en surplus, mais elles seront faibles et sans impact au regard des futurs investissements qui seront réservés pour le traitement de l'envasement réellement mesuré. Cette action anticipative réduira énormément les futurs investissements.

Des développements progressifs dans la diminution de l'envasement sont à réaliser en bénéficiant des données et des informations sur les coûts réels et l'efficacité de diverses solutions qui ont été utilisées avec succès à travers le monde, et mieux encore à travers les défis des difficultés rencontrées et les changements apportés au bâtiment apportées aux ouvrages.

# Chapitre 2.

## Problématique de l'Envasement des Barrages en Algérie

*Dans ce chapitre est sera abordé l'importance de l'envasement dans les retenues de barrages en Algérie, la mise en évidence du rôle joué par la dégradation du bassin versant amont et les problèmes posés par ce phénomène ainsi que les solutions de dévasement adoptées à partir d'exemples Algériens. La particularité de la retenue du barrage K'sob est abordée à partir d'une présentation du barrage son historique et son bassin versant ainsi que les conséquences de l'envasement et les mesures prises.*

### **Plan du chapitre**

---

2.1	INTRODUCTION.....	30
2.2	HISTORIQUE DES BARRAGES ALGERIENS.....	31
2.3	IMPORTANCE DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES ALGERIEN.....	34
2.4	SOLUTIONS DE DEVASEMENT ADOPTEES EN ALGERIE.....	37
2.5	PARTICULARITE DE LA RETENUE DU BARRAGE K'SOB.....	42
2.6	CONCLUSION DU CHAPITRE .....	52

## 2.1 INTRODUCTION

Selon Remini [20], l'Algérie est l'un des pays les plus menacés par l'érosion et l'envasement des retenues. Les retenues en Algérie étant essentiellement destinées à stocker et réguler l'eau, elles sont d'autant plus vulnérables qu'elles sont défavorisées au regard du régime fluvial lié à la pluviométrie sous forme de fortes pluies et de courte durée. La réduction de la capacité des retenues et le colmatage des exutoires sont des menaces qui pèsent lourdement sur la rentabilité des ouvrages hydrotechniques quand ce n'est pas sur la sécurité même de l'ouvrage.

En se rapportant aux sources de l'Agence nationale des barrages et transferts, ANBT [21], le taux d'envasement national des barrages est de 15% sur les 8,6 milliards m<sup>3</sup> de capacité totale des barrages.

Parallèlement aux projets de lutte contre ce phénomène d'envasement, le gouvernement Algérien compte faire passer le nombre de barrages de 81 actuellement, à 139 en 2030.

La capacité de stockage serait ainsi portée à 12 Mds de mètres cubes contre 8.6 Mds en 2021.

Parmi les nombreuses solutions de lutte rendues habiles par l'expérience sur les barrages algériens, soit :

- le reboisement des bassins versants,
- la surélévation des digues,
- la construction de barrages de décantation et l'utilisation du barrage à onde de chasse,
- le dragage.

La première drague suceuse, obtenue en 1986 et nommée « *Rezoug Youssef* », fût celle du barrage de Fergoug de 1986 à 1689. Elle a été aussi employée au niveau d'autres sites pour la récupération d'une partie des volumes de stockage perdus par envasement.

L'opération de dragage de grands volumes de solides à l'état de boue, sans réglementation ni traditions établies sur le devenir de ces matériaux à la suite du dragage, a engendré des impacts environnementaux dramatiques [22].

---

## 2.2 HISTORIQUE DES BARRAGES ALGERIENS

### 2.2.1 Barrages algériens de première et seconde génération

Les premiers travaux remontent au XIXe siècle lorsque plusieurs petits barrages ont été construits dans l'Ouest du pays. Les premiers barrages construits à l'Est du pays remontent au milieu du XXe siècle, à savoir : Foum El Gueiss en 1939, suivi du K'sob en 1940 et du Zardezas en 1945. Certains d'entre eux ont été rapidement emportés par les oueds et d'autres ont été reconstruits à de nombreuses reprises, notamment à Cheurfas, Tlélat, Fergoug, car les techniques de construction de l'époque étaient encore incomplètes. Cela peut être commenté comme suit :

- la technologie des barrages n'est pas maîtrisée;
- le régime des rivières est mal connu;
- les méthodes techniques de mise en œuvre des barrages sont généralement insuffisantes, ce qui a fait perdurer les chantiers. La construction du barrage de Djidiouia à Relizane ( $0,7 \text{ hm}^3$ ), par exemple, a duré vingt ans (1857-1877), celui de Hamiz à Boumerdes ( $14 \text{ hm}^3$ ) plus de 25 ans ;
- des problèmes de conception surviennent à cause des techniques de construction (*fondations instables, sous-estimation des débits de crue*).

Le premier barrage construit en 1859 à Meurad avec une très faible capacité ( $0,8 \text{ hm}^3$ ) ne sert plus à l'irrigation mais seulement à l'alimentation en eau potable des communes de Meurad et de Hadjout. Le deuxième barrage en terre construit à Tlelat en 1860, d'une capacité de  $0,7 \text{ hm}^3$  et de 27 mètres de haut s'est rompu après avoir été mis en exploitation en 1862 pour des raisons d'étanchéité. Il fut reconstruit en 1870 et renforcé en 1904. Il est toujours en activité et il est utilisé par la cimenterie de Zahana.

La construction du barrage de Hamiz a été un long chantier qui a duré 40 ans. Il a été conçu en 1854 dont les travaux n'ont commencé qu'en 1869 et se sont terminés en 1894.

Depuis 1920, il a été décidé de réaliser des barrages de grande et moyenne capacité sur les emplacements les plus convenables. Entre 1932 et 1948, neuf barrages seront construits : Oued Fodda à Chlef (1932), Boughzoul à Médéa (1934), Bakhadda à Tiaret (1936), Ghrib à Aïn Defla et Foum El Gueiss (1939), K'sob (1940), Zardezas (1945) et Beni-Bahbel à Tlemcen (1946), Bouhanifia à Mascara (1948). Au cours de la même période, deux barrages de première génération ont été surélevés celui de Hamiz et de Cheurfas.

Les capacités initiales de stockage sont respectivement : 228 ,55 , 56 , 280 , 3.4 , 12.4 , 14.9 , 63 , 73 , 14 , 18 hm<sup>3</sup>.

Deux autres importants barrages hydro électriques furent lancés. Il s'agit d'Ighil Emda à Bejaia, construit en 1954 et d'Erraguene à Jijel qui n'a été achevé qu'en 1963.

Certains barrages ne semblent pas avoir été construits selon les exigences spécifiques du climat Algérien. Presque tous ont subi des inondations très dévastatrices, de véritables « montées » qui ont nécessité des fondations sur des roches très dures.

Près de la moitié des barrages ont soit été envasés précocement et sont donc largement inutilisables (K'sob, Zardezas, Hamiz, Fom El Gueiss) soit construits sans réseau d'alimentation en aval (Beni Bahbel, Oued Fordda, Ghrib). Moins d'un tiers du périmètre est classé et la moitié des périmètres irrigués sont effectivement irrigués.

### 2.2.2 Barrages algériens durant l'indépendance

De 1962 à 1980, seulement trois nouveaux barrages ont été construits. En 1965, celui de **Cheffia** à El Tarf, en 1969 celui de **Djorf Torba** à Béchar et en 1970 celui de **Sidi Mohamed Ben Aouda** à Relizane. Ces barrages ont augmenté leur capacité de 910 à 1 660 hm<sup>3</sup>. Durant cette période, l'envasement a fait perdre annuellement à ces barrages entre 2 à 3 % de leur capacité utile. Aussi, pour préserver ce potentiel, il est nécessaire de surélever les barrages (*Zardezas en 1974, Ksob en 1977*), ou de les désenvaser, opération trop coûteuse et, de surcroît, d'immobiliser le barrage lors des travaux, ce qui n'est pas sans préjudice pour les usagers, ou à terme les reconstruire entièrement (*comme les barrages de Fergoug et Cheurfas*).

De 1985 à 1989, quinze barrages ont été mis en service, à raison de trois barrages par an, portant le nombre total à trente-sept barrages et une capacité de stockage de 3,9 milliards de m<sup>3</sup>. Onze à l'Ouest, neuf au Cheliff, sept au Centre et dix à l'Est.

Malheureusement, au cours de la décennie 1990 à 2000, seuls sept barrages ont été mis en service.

Depuis 2000 et avec le rythme croissant de construction et d'utilisation de nouvelles technologies, pas moins de treize barrages ont été remplis. Ainsi, chaque année un ou deux barrages sont mis en service. en 2009, soixante barrages sont entrés en service, dont cinquante-huit barrages d'une capacité de chaque barrage dépassant 10 millions de m<sup>3</sup> et d'un volume réglementaire global supérieure à 7 milliards de m<sup>3</sup> (*Figure 1.2*).

Actuellement le nombre de barrages est de quatre-vingt-un (81) avec une capacité totale de 8,6 milliards m<sup>3</sup>.

Ce capital hydrique existant du pays est souvent confronté à l'une des menaces les plus graves pour les installations d'irrigation, à savoir l'envasement qui se produit en l'absence de mesures de protection. L'érosion, en partie due à l'activité agricole, a des conséquences directes, outre la perte de terres, l'envasement des barrages et des retenues collinaires, entraînent une moindre mobilisation de l'eau.

La protection contre l'érosion est prise en compte, mais pas suffisamment, par des travaux de terrassement, de remblai, de banquettes, ou de correction torrentielle, voire de fixation des berges.

Les grands barrages interfèrent directement avec le débit des rivières. De plus, la spatialité même des bassins versants est profondément altérée à tous les niveaux par les activités humaines, qu'il s'agisse de modifier les pratiques agricoles ou de changer l'occupation des sols. Cependant, les conséquences de ces différentes actions s'influencent mutuellement, à différentes échelles spatiales et temporelles.

La surélévation des barrages et le dragage des réservoirs sont deux techniques curatives et très coûteuses. Ils prolongent certes la durée de vie d'un barrage, mais ils ne ralentissent pas la sédimentation.

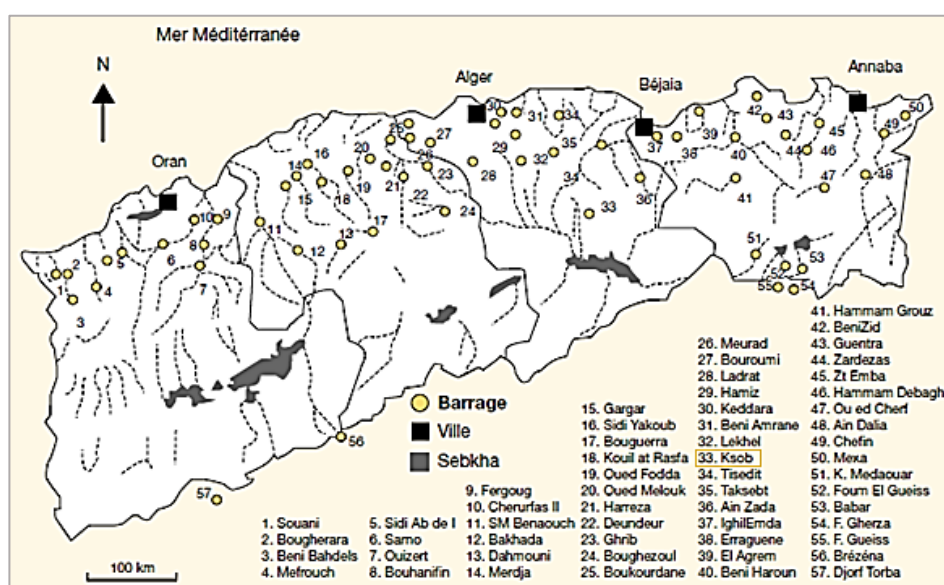


Figure 2.1. Répartition des barrages en exploitation dans le Nord algérien [23]

## 2.3 IMPORTANCE DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES ALGERIEN

En Algérie, du fait de la forte érosion des bassins versants, les barrages empilent chaque année un volume important de sédiments estimé à 20 millions de m<sup>3</sup>, engendrant ainsi une diminution progressive de la capacité de stockage de l'eau là où vivent les bénéficiaires restants du pays [24].

Le taux d'érosion dépasse 2000 t/km<sup>2</sup>/an pour la majorité des bassins du Tel. Bien que l'envasement des barrages et des retenues collinaires reste le résultat le mieux quantifié par les hydrologues, d'autres zones sont affectées par ce transport de solides (*envasement des exutoires*) [25]. D'une région à l'autre, l'intensité de l'érosion varie dont la proportion est plus à l'Ouest du pays avec 7%, suivi de la région du Centre avec 27% et de l'Est avec 26%.

Ce dépôt est dû à l'apport régulier de solides des oueds qui proviennent de l'érosion générale du sol. Atteignant la retenue d'un barrage, l'eau boueuse peut atteindre une concentration en particules solides de plus de 100 g de matière sèche par litre d'eau turbide, formant des courants de densité qui parcourent les réservoirs proches du fond, provoquant l'accumulation de sédiments jusqu'au barrage où ils s'installent pour former un lac de boue horizontal et remplir progressivement le réservoir [24].

Progressivement, que les sédiments se déposent dans la retenue, la capacité utile est de plus en plus réduite et aussi l'enlèvement de la vase devient délicat et difficile rendant souvent obligatoire la mise en hors service la retenue. Ceci est quasiment irréalisable dans les pays arides et semi-arides. Dans les deux cas, il en découle des dommages importants à l'environnement et à l'économie du projet et qui pourraient être à risque.

### 2.3.1 Perte de capacité de stockage

L'envasement qui représente le dépôt successif de sédiments, pose des problèmes de quantité et de qualité de l'eau des barrages. En termes de quantité, l'infrastructure hydrotechnique de l'Algérie est forte avec 81 grands barrages, d'une capacité de 8,6 milliards de m<sup>3</sup>, réduisant chaque année la capacité de plus de 50 millions de m<sup>3</sup>.

Selon le dernier rapport de juillet 2021 de l'ANBT [21] sur l'évolution de la profondeur et de la qualité des sédiments stockés dans les retenues, la quantité de sédiments perdus par l'envasement des barrages est estimée à partir de 2020 à 1 279,26 millions de m<sup>3</sup> soit 16,4 % de la capacité totale initiale de stockage qui est de l'ordre de 7 754,83 millions de M<sup>3</sup>.

---

Dans le même rapport, il était également noté que tous les barrages à envasement avancé avaient plus de 50 ans et étaient situés dans des zones ouvertes sans autant d'arbres que de barrages à l'instar du barrage **K'sob de M'sila**.

L'ANBT a souligné dans son rapport que l'envasement des barrages est dû principalement aux changements climatiques caractérisés par la survenance de facteurs extrêmes, notamment des températures élevées et des intempéries intenses qui provoquent l'érosion des sols. Cette quantité de sédiments, selon les estimations prévisionnelles de l'agence, atteindra un volume de 1400 millions de m<sup>3</sup> uniquement pour les barrages existants d'ici 2025, soit 18,05 % de la capacité totale de stockage d'eau.

Selon Remini et al. [25], En 1962, 16 barrages principaux sont entrés en service avec une capacité de stockage de 1,3 Gm<sup>3</sup> et un envasement de 240 Mm<sup>3</sup>. En 2006, les sédiments ont atteint 492 Mm<sup>3</sup>, et la perte de capacité est de 38 %.

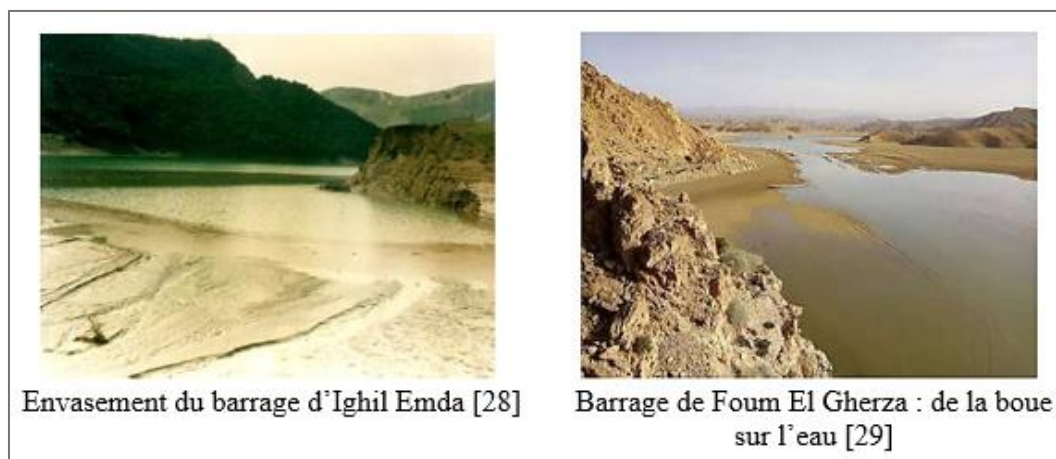
A titre d'exemple, les courants de densité des barrages de Beni Haroun de Mila (*998 millions de m<sup>3</sup>*) et Koudiat Acerdoune à Bouira (*650 million de m<sup>3</sup>*) se produisissent dans les retenues des deux barrages lors des crues induisant annuellement et consécutivement 3,5 et 10,5 millions de m<sup>3</sup> de vase [26].

Le barrage de Gargar d'une capacité de 450 millions de m<sup>3</sup> est situé dans le bassin hydrographique de Chelif Zahrez qui est considérée comme la zone la plus érodée du nord Algérien. D'après la première étude de levé bathymétrique réalisée en 2004 par l'ANBT, le barrage a perdu 92 millions de mètres cubes en volume durant 15 ans d'exploitation après un rapide envasement [27].

Entre 1986 et 2006, le taux d'envasement du barrage Djorf Torba à Béchar passe de 1,3 à 2,6 Mm<sup>3</sup>/an et celui de K'sob à M'sila de 0,3 à 0,6 Mm<sup>3</sup>/an.

Cette dramatique augmentation, non uniformément observée, serait une conséquence des sécheresses des années 90. Le couvert végétal diminuerait donc et les sols dégradés résisteraient difficilement au retour des pluies et des inondations intenses de ces dernières années, provoquant une ablation intense de la couche superficielle du sol et favorisant une forte érosion. [23].

Les pertes en volume moyennes interannuelles pour les barrages de Bouhanifia (*Mascara*) 45,45 hm<sup>3</sup>, Ouizert (*Mascara*) 20,28 hm<sup>3</sup> et Foug El Gherza (*Biskra*, *Figure 2.2*) de 39 hm<sup>3</sup> [25]. Le barrage d'Ighil Emda, mis en eau en 1953 pour une capacité initiale de 155 Mm<sup>3</sup>, enregistre un envasement annuel de 1,33 Mm<sup>3</sup> (*Figure 2.2*)



**Figure 2.2.** Envasement barrages d'Ighil Emda et de Foug El Gherza

### 2.3.2 Blocage des organes de vidange

Les courants de densité dans une retenue accélèrent la sédimentation et auront pour effet le colmatage des sorties de décharge (organes de vidange). Le fait de ne pas maîtriser le mécanisme des courants de densité impactera négativement la vanne de fond de purge. Effectivement, le retard dans l'ouverture des entrées de fond, comparée à l'apparition des courants de densité, facilite le renforcement de la boue à proximité des vannes de sortie et rendra plus dur leur manœuvre. On peut citer le cas du barrage Oued El Fodda, après la consolidation rapide de la vase et depuis 1948, la vanne de fond s'est trouvée bloquer. En 2003, elle se trouvait sous 40 m de hauteur de vase, de sorte que toute opération de vidange de la retenue était impossible. Le barrage de Foug El Gherza, sa vanne a été bloquée entre 1981 et 1989 et celle de Zardézas dans les années 90 [30].

La figure 2.3 illustre la situation de la 2<sup>ème</sup> digue du barrage Boughezoul dont la vanne de fond est complètement bloquée.



**Figure 2.3.** Blocage de la vanne de fond de la deuxième digue du barrage Boughezoul [28]

### 2.3.3 Sécurité de l'ouvrage

L'accroissement des forces hydrostatiques dues au remplacement rapide de la masse d'eau par la vase suite à une sédimentation des retenues entrainera une augmentation de la densité pouvant atteindre  $1,8 \text{ t/m}^3$  (*mettant en péril la stabilité de l'ouvrage*). C'est le même évènement enregistré au niveau des barrages de Zardézas, K'sob, Oued El Fodda et Foum El Gherza [27]. En 1990 et juste pour assurer la sécurité du barrage de Zardezas, le volume d'eau a été réduit d'environ 9,10 m. Cela au dépens de l'alimentation de la population de la ville dont le volume a été réduit à environ  $10 \text{ Mm}^3$  au lieu de  $20 \text{ Mm}^3$ .

La rupture du barrage de Fergoug I en 1927 est due à la présence dans la tranche supérieure de la digue au-dessus des sédiments, d'une force ou poussée supérieure à celle de l'eau. C'est un liquide plus lourd dont la teneur en vase ne peut pas être déterminée (*au moins 30 % de vase mélangée à l'eau, donnant une poussée du liquide à densité proche de 1,3*).

## 2.4 SOLUTIONS DE DEVASEMENT ADOPTEES EN ALGERIE

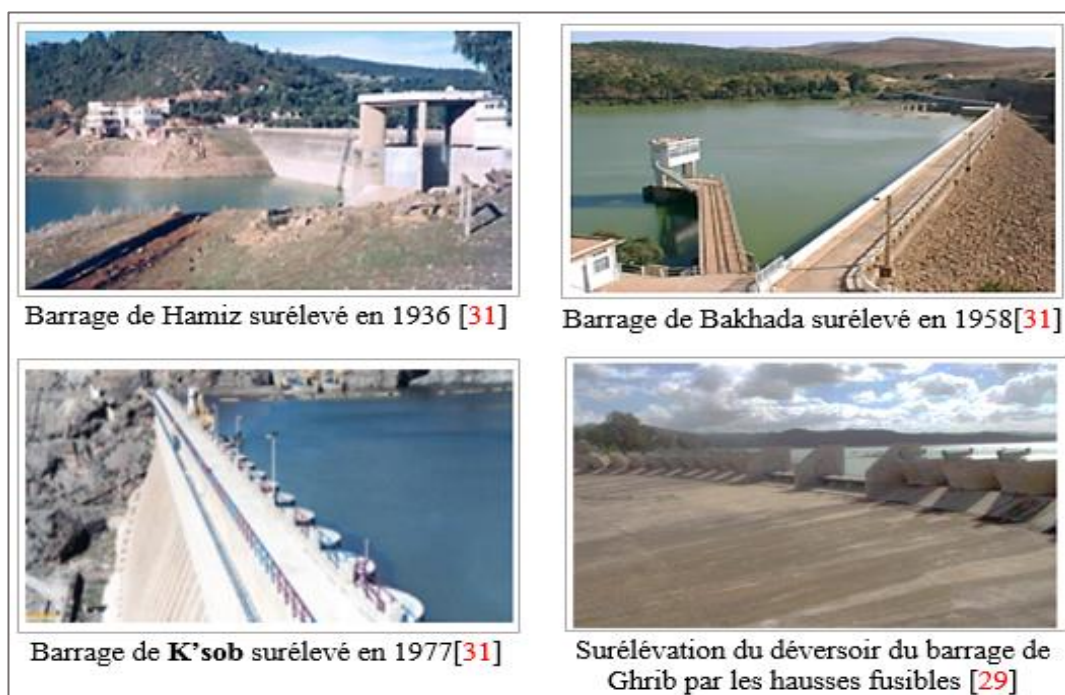
Selon l'ANBT, une vaste campagne de dévasement des barrages est en cours au niveau national pour extraire un total de 38 millions de mètres cubes de sédiments. Au total, neuf barrages sont concernés par cette opération de la 4<sup>ème</sup> campagne nationale de dévasement prévue pour 2019 à 2024. L'opération concerne les barrages de Fergoug et Bouhanifia (*Mascara*), Foum El Gueiss (*Khenchela*), **K'Sob** (*M'sila*), Zardézas (*Skikda*), Djorf Torba (*Béchar*), Merdja Sidi Abed (*Relizane*), El Hamiz (*Boumerdès*) et le barrage Ghrib (*Ain Defla*). Cette campagne a pour objectif d'accroître la longévité des barrages en luttant contre ce phénomène d'envasement.

Diverses solutions ont été appliquées, notamment le rehaussement du barrage, le dragage ainsi que l'expulsion des dépôts par les ouvertures de vidanges. A titre d'exemple, on peut citer certains barrages ayant fait l'objet de solutions et de techniques de dévasement [23,30] :

▪ **Surélévation de la digue**

Avec cette solution la capacité de la retenue peut être augmentée en compensant ainsi la quantité des sédiments. Il s'agit, par exemple, des barrages de Fergoug, Mefiouch, Zardézas, Hamiz, Bakhada et K'sob (*Figure 2.4*)

- Barrage de K'sob de M'sila : construit entre les années 1934 et 1940 pour irriguer la périphérie de la zone de voisinage, de hauteur égale à 31 m et une capacité initiale de 11,5 Mm<sup>3</sup>. Durant l'année 1975, le barrage a connu une surélévation de 15 m supplémentaires pour atteindre une hauteur totale de 46 m et montant sa capacité à 31 Mm<sup>3</sup>. Cette dernière est réduite à moins de 4 Mm<sup>3</sup> à cause de l'envasement de la retenue.
- Barrage du Hamiz de Boumerdes : édifier en 1879 pour irriguer le périmètre de la Mitidja Est. En 1883, le barrage a été surélevé de 7 m portant sa capacité à 23 Mm<sup>3</sup> pour faire face à l'envasement accéléré de la retenue.
- Barrage de Zardézas de Skikda : rempli en 1945, hauteur 37 m, capacité 14,9 Mm<sup>3</sup>. En 1977, le barrage a été surélevé de 12,5 m (*hauteur totale devenue 45 m*) pour augmenter sa capacité à 31 Mm<sup>3</sup>, réduite en 1974 à 7,5 Mm<sup>3</sup> du fait de l'envasement accéléré.



**Figure 2.4.** Surélévation des barrages algériens

---

- **Dragage des barrages**

L'ANBT, qui gère actuellement 80 grands barrages au niveau national, a réalisé quatre campagnes de dévasement depuis 1962 pour acquérir une longue expérience du dragage et répondre aux obstacles heurtées au moment de la pose en dépôt des sédiments et leur récupération. Durant la troisième campagne de dévasement entre 2012 et 2018, il est restauré 16,1 millions de m<sup>3</sup> de volume de stockage des barrages de Bouhanifia, Foum El Gherza, K'Sob.

En ce qui concerne les moyens et les équipements de dragage, les services de l'agence font appel à des entreprises publiques et privées ainsi qu'à leurs propres équipements achetés pour cette tâche. Cependant, cette opération est "coûteuse" et nécessite une drague suceuse d'une capacité d'aspiration de 2000 m<sup>3</sup>/h à 4500 m<sup>3</sup>/h et doit être associée à un navire de service qui assure l'approvisionnement en gasoil et autres services.

Le dragage nécessite également la mobilisation d'un système d'évacuation (*conduite*) déterminé par la nature des boues, étant donné que le coût des boues extraites est estimé à 160 à 170 DA pour 1 m<sup>3</sup> [21].

Huit barrages ont été désenvasés par dragage durant le dernier demi-siècle. De 1958 à 1969, la première drague a été utilisée au niveau des barrages Cheurfas, Sig, Fergoug II et Hamiz dont les volumes respectifs des vases récupérées est 10,2 et 8 Mm<sup>3</sup>. Entre 1989 et 1992, une 2ème opération a été prévue dans le barrage de Fergoug III pour dégager 7 Mm<sup>3</sup> de vase puis entre 1993 et 2002 au niveau du barrage des Zardezas il a été dégagé 10 Mm<sup>3</sup> de vase.

Aujourd'hui, deux autres dragues sont engagées au niveau des barrages de Foum El Gherza, Merdja Sidi Abed, Ksob et Fergoug III dont le volume des sédiments enlevés est respectivement 4, 5, 4 et 7 Mm<sup>3</sup>. Le volume dévasé cumulé des huit barrages avoisine 60 Mm<sup>3</sup> [23]. La figure 2.5, illustre les opérations de dragage des retenues des barrages Zardezas, Fergoug, Foum El Gherza et K'sob.

- **Réalisation de barrage de décantation**

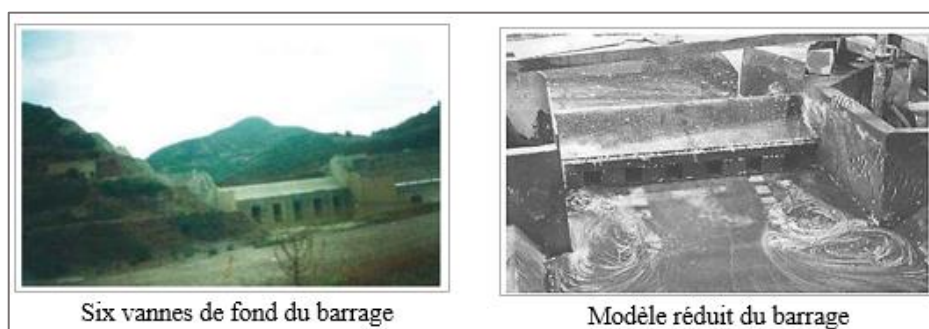
Le barrage de Boughezoul exploité en partie en tant que bassin de décantation pour le barrage de Ghrib. Depuis sa construction, il a retenu environ 35 Mm<sup>3</sup> de vase et réduisant de près de 24 % l'envasement de Ghrib.



**Figure 2.5.** Opération de dragage des retenues de barrages Algériens

▪ **Chasses dites à l'Espagnole**

C'est la méthode employée lors des premières crues au niveau des barrages les moins importants (comme *Hamiz, Beni Amrane, K'sob*). Le barrage sera vidé complètement au début de l'automne et laissé vide avec toutes vannes ouvertes, jusqu'aux premières pluies. La première crue emporte facilement les vases qui n'avaient pas été accumulées au cours de l'année. Le barrage de Beni Amrane de  $15,6 \text{ Mm}^3$  est équipé de six vannes de fond (Figure 2.6). Durant la période 1988 à 2000, à peu près  $3 \text{ Mm}^3$  de vase ont été évacués avec un rendement de 26% du total des sédiments entrants.



**Figure 2.6.** Vannes d'évacuation de boue par les chasses du barrage de Beni Amrane [29]

### ▪ Soutirage des courants de densité

Cette méthode est utilisée aux barrages Ighil Emda, Oued El Fodda, Foum El Gherza et Beni Haroun (*Figure 2.7*). Elle a produit des résultats spectaculaires.

- Barrage d'Ighil Emda (Bejaia) : fonctionnel en 1953, de 156 Mm<sup>3</sup>. environ 50 % de vases ont été retirées par le prélèvement dit de soutirage soit 88.773.564 m<sup>3</sup> de matières solides entrantes jusqu'à l'année 84. Seuls 45 657 458 m<sup>3</sup> sont arrivés à se décanter et se consolider tandis que 43 1 16 106 m<sup>3</sup> sont soutirées avec succès.
- Barrage d'Oued El Fodda (Chlef) : mis en service en 1932 pour une capacité initiale de 28 Mm<sup>3</sup>. L'évolution de l'envasement de la retenue a provoqué un blocage de la vanne de fond. Devant cela et en 1961, 04 vannettes de dévasement ont été percées dans le barrage permettant l'évacuation de 1961 jusqu'à 1993 environ 12 Mm<sup>3</sup> de sédiments.
- Barrage de Foum El Gherza (Biskra): de 1989 à 1993, 600 000 m<sup>3</sup> de vase ont été vidangées à travers la vanne de fond. Cette dernière était bouchée par la vase durant la période de 1982 à 1989.



**Figure 2.7.** Soutirage des courants de densité des barrages Algériens

### ▪ Protection antiérosive à l'amont

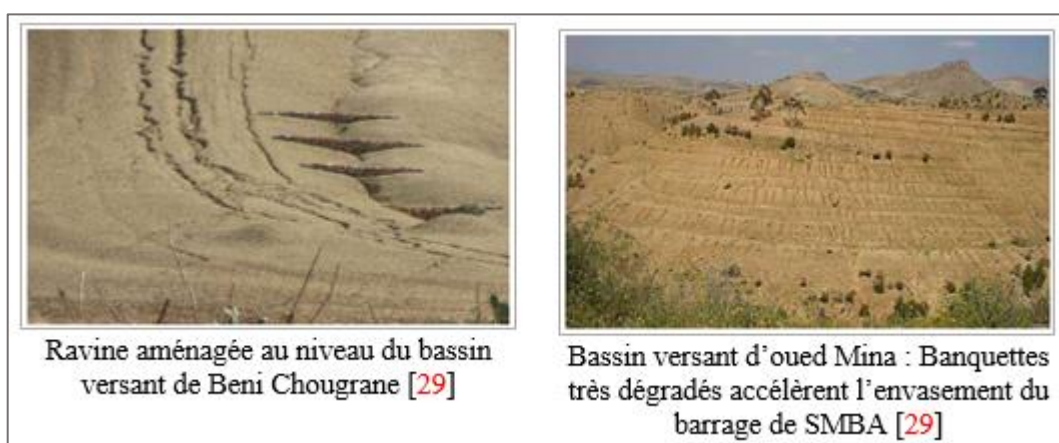
Il s'agit notamment des opérations de reboisement, d'amélioration des sols, la création de banquettes et le boisement de végétation à longues tiges dans les oueds.

Les tamaris qui poussent en amont des barrages sont des vrais pièges à sédiments (*cas des barrages Bouhanifia, Fergoug et Cheurfas*).

Actuellement, le barrage de Sid Mhamed BenAouda (*SMBA*) de Relizane est classé parmi 20 barrages les plus envasés. Ceci est une conséquence de la dégradation du bassin versant aménagé, et l'érosion qui augmente plus rapidement qu'avant (*Figure 2.8*).

Auparavant un plan spécial mis en place par l'administration forestière qui comprenait le traitement d'une superficie de 1,5 million d'hectares permettant ainsi de protéger des bassins versants.

Actuellement et parallèlement à la campagne de dragage, à partir de janvier 2021, l'ANBT a entamé une opération de reboisement de plus de 300 000 arbres autour des pentes immédiates des bassins versants pour éviter l'érosion des sols, pouvant potentiellement entraîner le phénomène d'envasement.



**Figure 2.8.** Protection antiérosive à l'amont des barrages Algériens

## 2.5 PARTICULARITE DE LA RETENUE DU BARRAGE K'SOB

Le barrage « K'sob » de M'sila est l'un des barrages les plus menacés d'Algérie en raison de l'érosion et de l'envasement des réservoirs. La forte érosion de son bassin versant, accumule chaque année une grande quantité de boue évaluée à 0,6 jusqu'à 0.8 Mm<sup>3</sup>/an (*en d'autres termes, plus de la moitié de la consistance du barrage est constituée que de vase soit à hauteur d'envasement entre 53,22% à 60%*) entraînant ainsi une réduction progressive de la capacité de stockage des eaux et par conséquent il ne sera plus en mesure de garantir la quantité requise d'eau potable et d'irrigation.



Le territoire algérien est subdivisé en cinq grands bassins versants créant dans chacun d'entre eux des organismes de bassin (*Figure 2.10*).



**Figure 2.10.** Bassins hydrographiques du territoire Algérien [34]

Parmi ces bassins, le bassin **Algérois-Hodna-Soummam**, de superficie égale à 47 588 Km<sup>2</sup>, limité au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est par le bassin Constantinois-Seybouse-Mellègue à l'Ouest par le bassin Chellif-Zahrez et enfin au Sud par le bassin du Sahara. Il s'étend sur 14 wilayas (*6 en totalité et 8 partiellement*).

Pour collecter les eaux pluviales et centraliser le ruissellement vers les cours d'eau, le bassin du **Hodna**, situé au sud du bassin Algérois-Hodna-Soummam est un bassin endoréique de 25 843 Km<sup>2</sup> dont le chott El Hodna en forme l'exutoire naturel. Les principaux oueds de ce bassin coulant du nord vers le Chott sont : les oueds M'sila, K'sob, El Ham, Soubella, Barika et Bitam. Les oueds Boussaada et M'cif sont quant à eux les principaux oueds coulant du sud vers le chott (*Figure 2.11*) [35].

Le bassin versant du Hodna est le cinquième grand bassin de l'Algérie. Il est situé à 150 Km à vol d'oiseau au Sud de la côte méditerranéenne (*Golf de Bejaïa*).

Le bassin du Hodna se situe entre les massifs montagneux Nord et Sud, organisant le bassin autour d'une cuvette fermée quasi plate à 400 m d'altitude et recevant les eaux de surface de la région [36].

Le bassin versant du barrage de K'sob appartient à celui de chott Hodna. Il s'étend sur une superficie de 1460 km<sup>2</sup> avec une circonférence d'environ 180 km dont il occupe 41% de surface (Tableau 2.1). Son coefficient caractéristique (*de Gravelouse*) est de 1,26 indiquant une forme allongée (Figure 2.11).

D'une superficie de 1 480 km<sup>2</sup> au site du barrage, l'Oued Ksob a un bassin-versant situé essentiellement dans le Tell. Il reçoit ainsi des précipitations appréciables. C'est également le seul oued sur lequel a été construit un barrage-réservoir. Ses principaux affluents lui permettent d'avoir un écoulement permanent mais dont l'importance est faible en dehors des périodes de pluies [35].

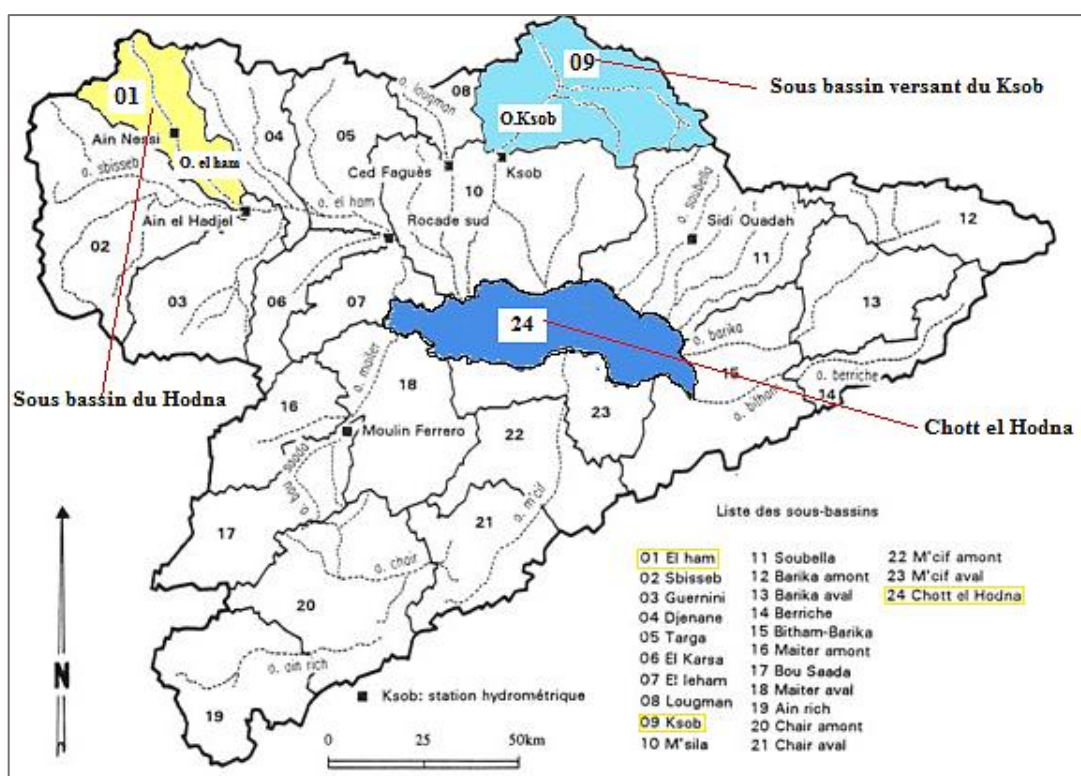


Figure 2.11. Situation géographique du bassin versant du K'sob [35]

**Tableau 2.1.** : Valeurs des paramètres morphométriques du bassin versant du K'sob

<b>Paramètres morphométriques</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Superficie (Km<sup>2</sup>)</b>	1460
<b>Périmètre (Km)</b>	180
<b>Altitude moyenne (m)</b>	1070
<b>Indice de Graveleuses</b>	1.26 ( <i>Forme allongée</i> )
<b>Indice de pente globale (m/Km)</b>	0,012 ( <i>Relief modéré</i> )
<b>Pente moyenne (m/Km)</b>	15,8
<b>Capacité initiale (hm<sup>3</sup>)</b>	11,6
<b>Surface de plan d'eau (Ha)</b>	121
<b>Altitude max de retenu (m)</b>	590
<b>Hauteur max (m)</b>	46
<b>Superficie du B V (Km<sup>2</sup>)</b>	1460
<b>Envasement moyen annuel (hm<sup>3</sup>/an)</b>	0,800
<b>Volume de vase existante (hm<sup>3</sup>)</b>	15
<b>Hauteur de l'envasement actuel (m)</b>	27

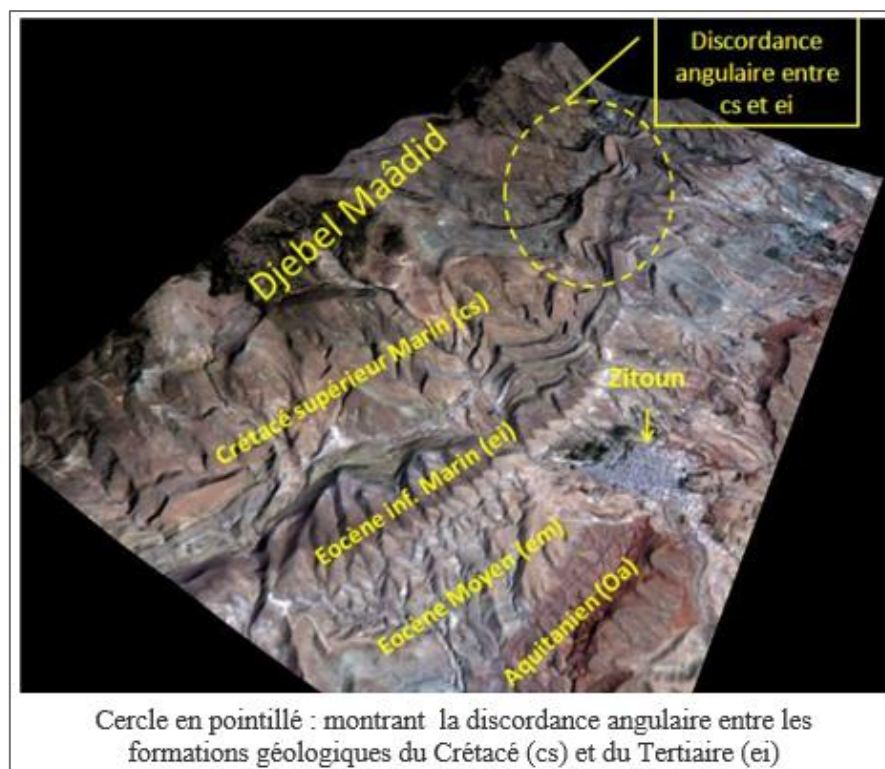
### 2.5.1.1 Caractéristique géologique et lithologique du bassin versant du K'sob [33, 37]

Le flanc Sud des monts du Hodna (*djebel Gourin. Maadid, Sidi Sahab. Guedil*) sont des anticlinaux à un fort pendage. Les vastes chevrons que l'érosion a sculptée dans les couches sénoniennes ou cénomaniennes, sont souvent recouverts de petites écailles de calcaire éocène et doublés, au-delà de l'étroite gouttière creusée dans les dépôts oligocènes, par une barre plus ou moins continue des grès burdigaliens redressés.

Dans la montagne (*Djebel*) de Maadid on remarque des séries récentes de crétacé supérieur et d'éocène inférieur et moyen (*Figure 2.12*). La discordance apparaît après le sénonien dont les couches terminaux ont été érodées par un éocène transgressif.

Plus loin, Djebel Mzaïta a aussi une formation très variée et alternée de calcaires et de marnes en plusieurs unités de taille variable. Ces calcaires marneux affleurent largement l'Est du Mzaïta.

Les formations gréseuses occupent 1/3 du bassin versant, la série exclusivement gréseuse occupe une surface très réduite se limitant à un affleurement au Sud du djebel Morissane. Les séries à l'alternance de grés et d'argile, de grés et de marne s'étendant sur des surfaces relativement importantes, la première occupe le Nord -Est du bassin en un ensemble continu; Elle présente à sa base une assise argileuse surmontée de grés grossiers alternant avec des argiles noires. La seconde affleure en plusieurs endroits discontinus notamment au Sud-Ouest.

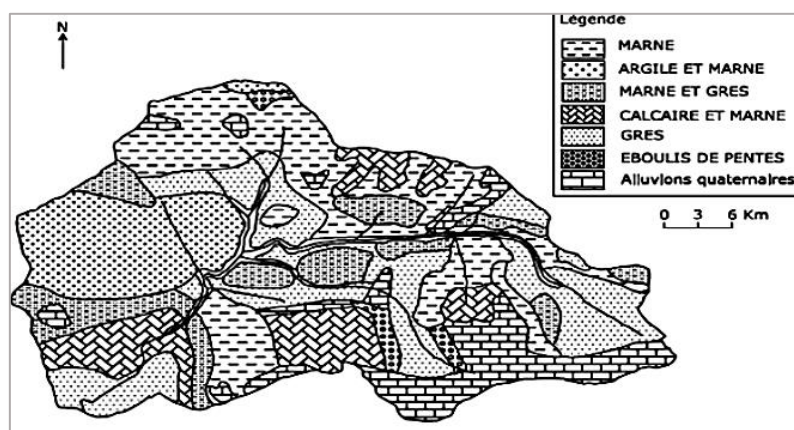


**Figure 2.12.** Vue en 3D de l'image Alsat-2A montrant la discordance angulaire de la montagne de Maadid [38].

Cette longue muraille de montagnes est profondément sillonnée par les rivières qui descendent dans le Hodna. Les plus importantes la traversent : L'oued Lougman supérieur grâce à une dépression transversale et l'oued El K'sob qui a la faveur d'un abaissement d'axe entre les deux montagnes Gourîn et Maadid.

L'Est de la rivière El K'sob, est dominé par des collines plus élevées, faites de dépôts continentaux mio-pliocènes et parfois, à la base, de sédiments marins du Burdigalien. Ces terrains plongent dans l'ensemble vers le centre de la cuvette. Les bancs plus résistants sont formés de grès et de conglomérat forment de petits reliefs monoclinaux (*Koudiat*) au-dessus des assises marneuses et argileuses.

À l'Ouest, il y a une série de pentes qui s'inclinent différemment vers l'aval et se coupent en bandes; ils descendent des flancs calcaires (*Eocène*) de la montagne jusque dans les environs de M'sila où ils disparaissent. Ils nivellent les marnes burdigaliennes et la série miopliocène dont les couches plongent nettement vers le Sud ; à l'amont les grès durs du burdigalien ont seuls échappés au nivellement et une partie des cailloux a comblé la dépression oligocène (*Figure 2.13*).



**Figure 2.13.** La carte lithologique du bassin versant du k'sob

### 2.5.1.2 Le climat du bassin versant du K'sob

Les paramètres climatiques d'un bassin versant sont les éléments les plus déterminants de l'écoulement. Les précipitations sont le facteur principal qui influence directement l'écoulement, pour le bassin versant du K'sob, la pluviométrie moyenne interannuelle est d'environ 363 mm. Pour la pluie journalière maximale interannuelle, elle est de l'ordre de 36.3 mm.

La température est un facteur considérable, créant les conditions des phénomènes et des paramètres de l'équilibre hydrologique notamment. La saison chaude dure de mai à octobre, le maximum en juillet atteint une valeur de 34,7 °C, par contre la saison froide correspond à novembre et avril avec un minimum en janvier de 1.7°C.

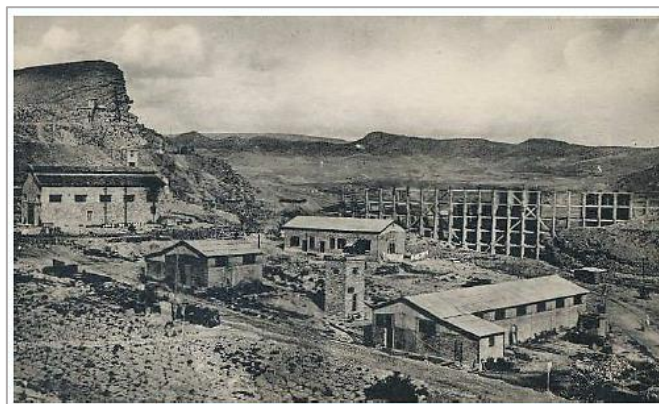
La baisse de température du nord au sud du bassin oued K'sob est principalement liée à l'altitude, mais aussi à l'influence de la continentalité dans la zone des hautes plaines.

### 2.5.1.3 Présentation de El-Oued et du barrage K'sob

M'sila est la 28ème Wilaya de l'Algérie avec une superficie de 18 175 Km<sup>2</sup> et plus d'un million d'habitants. Elle s'éloigne de la capitale Alger de 248 Km, avec un climat semi-aride et de vocation agro-pastoral. Fondée en 935 la wilaya contient des gisements de calcaire et d'argile et dispose d'un grand réservoir de sable quartzueux dunaire.

L'utilisation de ce sable est élargie à la production du plâtre, céramique ainsi que le ciment. Le Barrage K'sob est situé à « **HAMMAN** » entre les monts de Kef El Ouerad et Djebel El Groun à 15 Km au nord de la ville de M'sila sur la route nationale en direction vers la ville de Bordj Bou Arreridj.

Il fut construit à cet endroit sur l'oued K'sob entre les années 1934 et 1940 permettant l'irrigation du périmètre agricole de la commune de M'Sila (*Figure 2.14*).



**Figure 2.14.** Vue sur le barrage K'sob lors de sa construction

Le K'sob est le plus tellien des rivières du Hodna ; son bassin versant s'étend jusqu'à Medjez, station située à environ 8 Km. Il pénètre dans la Medjana après avoir franchi des collines éocènes et miocènes. Son affluent, la rivière Oussedjit-Rhedir, né entre 1700 et 1750 m sur le versant Nord de la montagne Sidi Sahab, traverse le bassin synclinal de Bordj Ghedir, puis une zone de collines burdigaliennes avant de se jeter dans le K'sob. Celui-ci, après le confluent, prend une direction Sud-Ouest et contourne le djebel Maadid dans une vallée encaissée qu'il élargit de ses méandres [37].

### **2.5.2 Conséquences de l'envasement sur le Barrage K'sob et mesures prises**

La nature du sol favorise l'érosion et l'envasement du barrage. Le bassin versant est dénudé. Le barrage a bénéficié de plusieurs opérations de dévasement. A l'époque déjà, une réflexion avait été lancée soit pour le dévaser, soit pour le surélever ou construire un barrage en amont.

Le barrage a connu de grands problèmes d'envasement impactant fortement sa capacité initiale de remplissage passée de 11,5 millions m<sup>3</sup> depuis sa première mise en eau en 1940 à moins de 4 millions seulement après 32 ans d'exploitation, soit en 1972. De 1986 à 2006 le taux d'envasement passe de 0,3 à 0,8 Mm<sup>3</sup>/an.

Le barrage assurait dans les années 70 l'irrigation de 13000 hectares de terres agricoles, unique à l'échelle de la wilaya, ce barrage n'arrose plus aujourd'hui que 4 840 hectares du fait de son envasement avancé.

L'envasement a affecté la stabilité de la structure du barrage et en raison de l'augmentation des forces hydrostatiques due au remplacement rapide de la masse d'eau par la vase, la densité a augmenté en atteignant  $1,8 \text{ t/m}^3$ .

Finalement, après estimation, une action a été prise en 1970 pour procéder à une surélévation de 15 m qui viendra donc s'ajouter au niveau initial de 31 m, soit un total de 46 m, augmentant ainsi sa capacité de stockage à 31 millions  $\text{m}^3$ . Le projet de surélévation s'est achevé en 1976. Cela pour assurer une régularisation à l'irrigation de 13 000 Ha dont 4 250 Ha pour la culture intensive et 2 000 Ha pour la culture de céréales.

En 1994, il a été enregistré des crues exceptionnelles. Heureusement que la retenue était vide. En une nuit, elle était pleine au maximum et les évacuateurs ont même relâché 58 millions  $\text{m}^3$ , soit l'équivalent de presque deux autres barrages de la même taille. C'est à partir de là qu'il y a eu un problème dans les vidanges de fond. A l'époque, une contrainte s'est posée. Est-ce qu'on va ouvrir ou pas les vidanges de fond. Si on le faisait, les vannes pourraient être détériorées par les résidus charriés par les crues, comme les troncs d'arbre par exemple. Finalement, la décision prise étant de ne pas ouvrir. C'est à partir de là que la vase a commencé à s'accumuler.

En 2001, une première opération de dévasement d'un volume de 4 millions  $\text{m}^3$  a été lancée. La difficulté rencontrée lors de cette opération est que la drague utilisée arrivait seulement à une profondeur de 16 m, alors que celle du barrage faisait 46 m. Aujourd'hui, le stress hydrique est venu aggraver la situation et accentuer le problème d'envasement. Sans eau, il ne peut y avoir d'opération de dévasement.

C'est par rapport aux conséquences qu'aujourd'hui, que la vidange de fond n'a pas pu être ouvert. Il y a des vannes de garde appelées des batardeaux qui s'ouvrent sur le parc amont du barrage. Avant, la vanne de garde avait un grillage pour le filtrage, mais avec le temps, la vase ne passait plus par les mailles de ce grillage, d'où la décision de l'extraire. Il y a eu après des problèmes de la vanne de garde qui s'arrêtait à une certaine profondeur à cause de la montée justement de la vase. Avec cette 4<sup>ème</sup> opération de dévasement, il est question d'un dragage ciblé et de dégagement des vidanges de fond.

La première opération de dévasement de 4 millions m<sup>3</sup> s'est effectuée entre 2001 et 2005, suivie d'une deuxième de 2005 à 2008 avec le dévasement de 3 millions. La troisième, de 2014 à 2018, a été marquée par une quantité de dévasement de 2,1 millions m<sup>3</sup>.

Ces opérations de dévasement s'inscrivent dans l'optique de préserver l'infrastructure.

Le reboisement est-il la solution pour contrecarrer le phénomène de l'érosion?

La qualité du sol n'est pas appropriée pour faire des plantations. Plusieurs opérations de reboisement sont effectuées, mais sans résultat concluant. En 2019, une instruction a été donnée pour la plantation de 15000 arbres par barrage. Malheureusement au niveau du barrage du K'sob seulement 10% ont réussi à être réalisés.

## 2.6 CONCLUSION DU CHAPITRE

Le phénomène de l'envasement est l'effet direct de l'érosion qui s'est amorcée plus en amont des bassins après la diminution du couvert végétal.

La conséquence la plus grave est certainement la perte de réserves d'eau utiles.

Réaliser de nouveaux barrages n'est pas la seule solution à envisager (*manque de nouveaux sites, coûts élevés...*), les capacités existantes doivent être préservées avec les mêmes bénéfices.

Par ailleurs, et pour l'instant, il y a lieu de réfléchir à une nouvelle politique de conservation des barrages face au problème de l'envasement. Il y a lieu de se doter de tous les moyens vitaux pour contrer ce phénomène tels que la chasse, le dragage, l'aspirant de flux de densité. Il y a aussi la mise en hauteur (*surélévation*), ou mieux encore l'utilisation de nouvelles barrières végétales.

Les premières opérations de dragage en Algérie ont causé de grands impacts sur l'environnement.

Les retenues sont soumises à des dépôts de sédiments avec des impacts variables selon la zone de captage du bassin versant, la taille et la conception de la retenue.

Les dépôts sédimentaires doivent être gérés dans le respect de l'environnement et de la réglementation pour garantir l'efficacité de l'ouvrage ou l'utilisation de l'eau,

La récupération des produits de l'opération de dragage contribue certainement au développement des zones et résout les problèmes liés au lâchage des boues. Pour ces raisons, il est important de développer une approche qui oriente les sédiments fins du barrage vers les filières de récupération des matériaux. Dans le cadre de la gestion des sédiments fins de ces barrages, la connaissance de leurs caractéristiques est essentielle pour une meilleure extraction et valorisation.

# Chapitre 3.

## Filières de Valorisation des Sédiments Issus des Opérations de Dragage

*Ce chapitre présente et décrit les différentes voies et filières fondamentales de valorisation présumées parmi de multiples utilisations possibles des sédiments provenant des opérations de dragage. L'accent est mis sur la présentation des filières, des spécifications techniques et des caractéristiques standards des matières premières couramment utilisées afin de pouvoir discuter de la concordance entre les sédiments de barrage à l'étude et les usages potentiels. A la fin, il est rapporté les travaux et les études de recherche effectués sur les sédiments de dragage.*

### **Plan du chapitre**

---

3.1 INTRODUCTION.....	54
3.2 VALORISATION DANS LA FILIERE DE L'INDUSTRIE DU CIMENT.....	55
3.3 VALORISATION DANS LA FILIERE DES BETONS ET MORTIERS.....	65
3.4 VALORISATION DANS LA FILIERE DES MATERIAUX ROUTIERS.....	75
3.5 VALORISATION DANS LA FILIERE MATERIAUX CERAMIQUE.....	82
3.6 CONCLUSION DU CHAPITRE.....	87

### 3.1 INTRODUCTION

Les opérations de dragage génèrent une grande quantité de sédiments qui sont rejetés en aval du site du barrage ou transportés vers des sites de transit ou de regroupement. La gestion de ces sédiments en déblais issus de dragages peut être envisagée sous forme de deux types de gestion bien distincts :

- en tout premier lieu la **valorisation** des déblais, piste à **privilégier** dans un esprit de développement durable.
- en cas d'impossibilité, par une mise en stockage définitif de ces déblais dans des bassins de décantation et/ou de stockage.

En plus de l'impact économique, les sédiments en déblais présentent une menace sérieuse pour l'environnement. La réutilisation de ces sédiments constitue tout l'enjeu d'une programmation efficiente pour de nouvelles opérations qui consistent à récupérer les boues de sédiments et de les valoriser. Donc, il serait plus juste d'exercer une réflexion sur l'emploi judicieux des boues de dragage qui peuvent être valorisées dans plusieurs filières.

La connaissance des propriétés des sédiments est essentielle pour mieux les valoriser. Ces sédiments dragués méritent d'être considérés comme une ressource alternative potentiellement précieuse.

Pour favoriser leur utilisation à grande échelle, leur perception est un enjeu majeur. Notamment en approfondissant les connaissances sur les propriétés et les contraintes de ces sédiments et sur les voies de valorisation permettant de construire des filières solides.

Parmi les voies de valorisation potentielle de ces sédiments issus des opérations de dragages dans les matériaux de Génie Civil, les filières suivantes sont retenues : ciment, bétons, mortiers, matériau routier et matériau céramique.

## 3.2 VALORISATION DANS LA FILIERE DE L'INDUSTRIE DU CIMENT

### 3.2.1 Notions essentielles et caractéristiques des ciments

Le ciment est un matériau inorganique finement broyé, mélangé à de l'eau, forme une pâte qui fait prise et solidifié à la suite de réactions et d'hydratation et après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

Le ciment dit « **Portland** » est un ingrédient important dans la production de béton. L'industrie cimentière propose aujourd'hui à ses utilisateurs un grand nombre de ciments aux propriétés précises et adaptés à des domaines d'utilisation spécifiques.

#### 3.2.1.1 Principales phases du ciment Portland

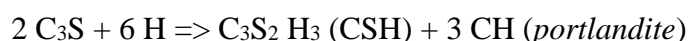
Les phases principales couramment rencontrées dans l'industrie du ciment sont en nombre de quatre désignées par C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, et C<sub>4</sub>AF et d'autres phases minoritaires.

Le tableau 3.1 présente les caractéristiques de chaque phase [39] :

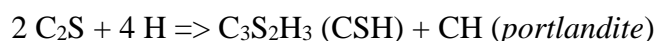
**Tableau 3.1.** : Principales phases du ciment Portland et leurs caractéristiques [39]

Paramètres	Principales phases			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
<b>Formule chimique</b>	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>1</sub>
<b>Teneurs dans CEM I (%)</b>	40-80	0-30	3-15	4-15
<b>Nom technique</b>	Alite ( <i>silicate tricalcique</i> )	Bélite ( <i>silicate bicalcique β</i> )	Phase aluminat ( <i>aluminat tricalcique</i> )	Phase ferrite ( <i>alumino-ferrite tétracalcique</i> )
<b>Réactivité</b>	élevée	faible	très élevée	faible
<b>Contribution à la résistance</b>	élevée à jeune âge	élevée à un âge avancé	élevée à jeune âge	très faible

Le C<sub>3</sub>S est essentiel pour le durcissement du béton. Lorsqu'il est ajouté à l'eau, différents ions sont immédiatement dissous de la surface du grain ( $H_2SiO_4^{2-}$ ,  $OH^-$ ,  $Ca^{2+}$ ). L'hydratation du C<sub>3</sub>S génère deux formes d'hydrates, la portlandite et les phases CSH selon [39] :

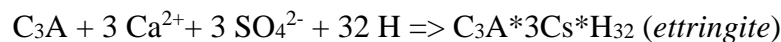


Les produits d'hydratation de C<sub>2</sub>S sont essentiellement les mêmes que pour C<sub>3</sub>S, tandis que le taux d'hydratation est beaucoup plus lent [39] :

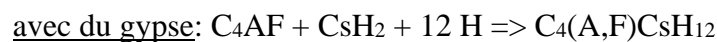
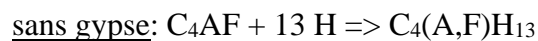


L'hydratation de  $C_3A$  est très influencée par la présence de gypse. Sans gypse la réaction d'hydratation initiale est très rapide, ce qui conduit immédiatement à une consistance ferme.  $C_3A$  est d'abord converti en phases instables, puis en phase stable d'aluminate de calcium hydraté ( $C_3AH_6$ ), qui a une forme hexagonale plate d'environ  $10\ \mu\text{m}$  de taille.

L'ajout de gypse rend le béton maniable. En présence de ses composants dissous  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , le  $C_3A$  est converti en ettringite, qui est un trisulfate d'aluminate de calcium [39] :



Selon la composition de la matière première, le  $C_4AF$  est une solution solide entre les éléments finaux  $C_2F$  et  $C_2A$ . L'hydratation du  $C_4AF$  est beaucoup plus lente que celle du  $C_3A$ , mais les réactions peuvent être écrites de façon analogue [39] :



### 3.2.1.2 Processus de fabrication du ciment

Pour produire du ciment, il faut rassembler quatre matériaux essentiels selon des dosages fixés à l'avance : la chaux, la silice, l'alumine, l'oxyde de fer. L'élément principal étant le calcaire. L'ensemble de ces éléments est ensuite traité par deux principales méthodes de fabrication du ciment. La plus ancienne et par voie humide et la plus utilisée et celle par voie sèche. La figure 3.1 montre le principe de fabrication du ciment.

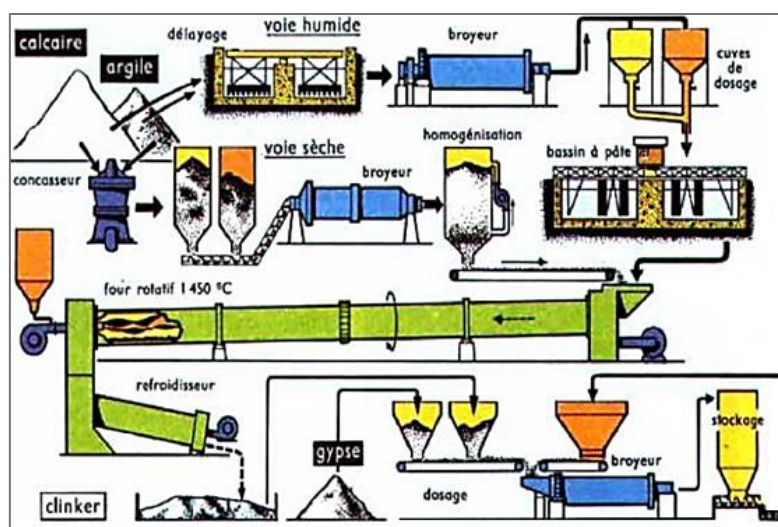


Figure 3.1. Schéma de fabrication du ciment

### 3.2.1.3 Classification des de ciments

Il existe 5 types de ciments, selon les constituants utilisés et leurs proportions :

- Le Ciment Portland : un minimum de 95 % de clinker et un maximum de 5% de composants auxiliaires;
- Les Ciments Portland composés : contenant autres éléments que le clinker: fumée de silice, laitier, pouzzolane, schistes calcinés, cendres volantes issues des centrales thermiques. Ils représentent un maximum de 35 % du mélange;
- Les ciments de haut fourneau contenant au moins 81 % de laitier issu des usines sidérurgiques et 5 à 19 % de clinker;
- Les ciments pouzzolaniques;
- Les ciments composés contiennent de 20 à 64 % de clinker, de 18 à 50 % de cendres volantes et de 18 à 50 % de laitier de haut fourneau.

La proportion et la nature des ajouts est une des clés de la classification des ciments. Le tableau 3.2 résume ce classement pour les différents ciments usuels et leurs compositions selon la norme NF EN 1971 [40].

**Tableau 3.2.** : Compositions des différents types de ciment courant [40]

Types de ciments courants	Notation	Taux (%)		
		Constituants principaux		Constituants secondaires
		clinker (K)	autres constituants	
<b>Ciment Portland</b>	CEM I	95	-	0 à 5
<b>ciment Portland composé</b>	CEM II A	80 à 94	6 à 20	0 à 5
	CEM II B	65 à 79	21 à 35	
<b>Ciment de haut fourneau</b>	CEM III A	35 à 64	36 à 65	0 à 5
	CEM III B	20 à 34	66 à 80	
	CEM III C	5 à 19	81 à 95	
<b>Ciment pouzzolanique</b>	CEM IV A	65 à 89	11 à 35	0 à 5
	CEM IV B	45 à 64	36 à 55	
<b>Ciment composé</b>	CEM V A	40 à 64	36 à 60	0 à 5
	CEM V B	20 à 38	62 à 80	

**Autres constituants** : laitier de haut-fourneau (**S**), fumée de silice (**D**), pouzzolane naturelle (**P**), cendres volantes siliceuses (**V**), schiste calciné (**T**), calcaire (**L** ou **LL**).

### 3.2.2 Valorisation Matière de sédiments

L'utilisation de matériaux issus des opérations de dragage se substituant au clinker, principal constituant des ciments courants, permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> liées à sa production. Elle a été développée comme une alternative permettant à la fois une réduction des rejets ainsi qu'une économie d'énergie primaire pour aboutir à la fabrication de ciment. De plus, La valorisation « **Matière de sédiments** » privilégiera l'économie des ressources naturelles, essentiellement le calcaire et l'argile.

L'action de valorisation aura lieu immédiatement après la formation de la matière première dit « **crû** » (*préparation de la matière première pour la cuisson dans le four*) pour obtenir le clinker (*composant principal du ciment*). Ainsi une partie des matières premières de référence (*Calcaire et Argile*) peut être remplacée par des matériaux sédimentaires ou par des coproduits issus d'autres domaines d'activité.

Le processus de valorisation matière peut également avoir lieu pour les constituants entrants du ciment. Il s'agit de réduire le pourcentage de clinker dans le ciment tout en conférant des propriétés spécifiques aux ciments ainsi produits.

### 3.2.3 Spécifications normatives

L'objectif des travaux de normalisation dans le secteur cimentier est double : élaborer des normes d'essais communes à tous les pays d'une région donnée et élaborer des normes de spécification des produits. Il s'agit d'un référentiel indéniable commun proposant des solutions techniques et commerciales pour simplifier les relations contractuelles. Il existe un grand nombre de normes nationales et internationales.

En Europe les exigences sur les propriétés du ciment sont imposées par d'autres normes spécifiques relatives aux classes d'exposition à savoir:

- Ciments pour travaux à la mer (*PM*) : norme NF P 15-317;
- Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (*ES*): norme NF P 15-319;
- Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint (*CP*): norme NF P 15-318;
- Ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme : norme NF EN 197-4;
- Ciments sursulfatés (*CSS*) : norme NF P 15-313;
- Ciment alumineux fondu : norme NF EN 14-647;
- Ciment prompt naturel : norme NF P 15-314;
- Ciment à maçonner : norme NF EN 413-1.

Au niveau national, il est adopté la norme algérienne NA 442 « **ciment : composition, spécification et critères de conformités des ciments courants** » dont le contenu technique est équivalent à la norme EN 197-1. La norme NA 443 « **Liants hydrauliques : ciments pour les travaux dans les milieux fortement agressifs** » présente un contenu technique équivalent à celle de la norme P15-319.

### 3.2.4 Applications aux sédiments

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques de la plus grande partie des sédiments issus des opérations de dragage sont comparables à celles des matières premières traditionnelles provenant des carrières. Cela dit que les sédiments issus des opérations de dragage peuvent être utilisés comme matériau substitutif de certaines matières premières pour la production du clinker. Dans l'optique d'une exploitation de ces sédiments comme matériau substitutif, des possibilités de l'utilisation de ces derniers ont été étudiées par beaucoup de chercheurs que nous citons en exemple les études suivantes :

- **Bibi et al.** [41] conduisent une recherche sur un sédiment dragué du barrage K'sob de la wilaya M'sila (*Algérie*) en vue de sa valorisation comme constituant du ciment. L'objectif de leur travail était d'estimer l'impact de l'ajout de matériau argileux calciné sur les propriétés du matériau liant.

Leurs compositions chimiques et minéralogiques sont rapportées dans le tableau 3.3.

**Tableau 3.3.** : Composition chimique des matériaux argileux bruts [41]

<b>Composition chimique (%)</b>									
	<b>Oxydes</b>								
	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>P.F</b>
<b>Sédiment du barrage (vase)</b>	37,37	13,52	5,00	17,02	2,75	0,36	1,92	0,45	20,73
<b>Composition minéralogique (%)</b>									
	<b>Oxydes</b>								
	<b>Quartz</b>	<b>Calcite</b>	<b>Dolomite</b>	<b>Feldspath plagioclase</b>		<b>Gypse</b>			
<b>Sédiment du barrage (vase)</b>	22	30	0	0		0			
	<b>Oxydes</b>								
	<b>Minéraux ferrugineux</b>		<b>Kaolinite</b>	<b>Illite / Muscovite</b>		<b>Chlorite</b>			
<b>Sédiment du barrage (vase)</b>	5		11	20		12			

A chaque augmentation du taux d'ajout des matériaux argileux calcinés dans la composition du ciment, la diminution de la densité et l'augmentation du temps de prise ont été enregistrées. Il a été constaté que l'incorporation de 10 % de matériaux calcinés offre au mortier et au béton une résistance assez proche de celle obtenue avec le ciment Portland ordinaire (*Tableau 3.4*).

**Tableau 3.4.** : Résistance à la compression des mortiers et bétons (MPa) à base de ciments composés de matériaux argileux calcinés [41]

	Proportion de matériaux calcinés dans les ciments			
	Témoin	Sédiment du barrage		
	0%	10%	20%	30%
<b>Rc des mortiers à 28 jours</b>	44,22	42,63	38,01	35,67
<b>Rc des bétons à 28 jours</b>	58	54	50,83	42,25

▪ **Chikouche** [42] utilise la boue issue du dragage du barrage K'sob de la wilaya de M'sila (*Algérie*). D'abord, une étude chimique et minéralogique a été effectuée révélant que la boue contient de kaolinite, d'illite et des proportions non négligeables d'alumine et d'oxyde de calcium. Ceci a encouragé l'incorporation de cette boue à côté du clinker, pour la production d'un éco-ciment. L'analyse chimique de la boue naturelle est obtenue par la technique de fluorescence des rayons X tandis que les composants minéralogiques sont obtenus par la technique DRX (*Tableau 3.5*).

**Tableau 3.5.** : Composition chimique et minéralogique de la boue de dragage naturelle [42]

Composition chimique (%)								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF
45.31 <sup>±0.08</sup>	10.16 <sup>±0.34</sup>	4.31 <sup>±0.05</sup>	16.18 <sup>±0.21</sup>	1.95 <sup>±0.06</sup>	0.24 <sup>±0.03</sup>	1.28 <sup>±0.01</sup>	0.30 <sup>±0.02</sup>	19.98 <sup>±0.4</sup>
Composition minéralogique (%)								
Quartz	Calcite	Minéraux ferrugineux		Kaolinite	Illite/Muscovite		Chlorite	
22	30	05		11	20		12	

Ensuite, et afin d'améliorer l'activité chimique de la silice et de l'alumine, la boue a subi un protocole de traitement thermique permettant l'augmentation du pouvoir pouzzolanique des ajouts. Trois températures sélectionnées dans la gamme entre les températures de déshydroxylation et de décarbonatation (600, 700 et 800°C) atteintes en adoptant différentes vitesses de chauffage (5, 10 et 20 C/min).

L'analyse des résultats par DRX, DSC-TG, FTIR a montré que les cycles de traitement thermique ont permis le changement de la structure de la boue permettant son utilisation comme additif pouzzolanique pour la production de ciment. Le cycle de traitement thermique optimal est de 600°C, le temps de maintien 5 heures et la vitesse de chauffage est de 20°C/min.

Des mortiers normalisés ont été conçus en utilisant des ciments modifiés constitués de 5% de gypse, de différents pourcentages de boue traitée thermiquement (5,10% et 15%) et de clinker. Les « Rc » à 28 jours ont conduit au choix de mélanger 85% de clinker, 10% de boue traitée thermiquement et 5% de gypse pour produire des ciments modifiés. L'influence de l'activation thermique de boue de barrage sur les propriétés techniques telles que la consistance normale, la finesse, le temps de prise, la chaleur d'hydratation, la résistance à la compression a été étudiée et les tests ont été réalisés conformément aux normes européennes. Les résultats ont montré qu'un traitement thermique à 600 °C à 20 °C/min n'entraînait aucune émission de dioxyde et en donnant une boue activée avec une résistance plus élevée lorsque 10 % sont ajoutés au clinker.

A 28 jours la plus haute « Rc » est enregistrée pour le mortier à base de ciment CC800/20 (*Indice de résistance à la compression IRC = 0.98*), alors que la plus basse résistance est enregistrée pour le type de ciment CC700/5 (*IRC = 0.80*). Concernant les mortiers de ciment composé avec boue traitée à 600° C, la plus haute « Rc » est obtenue pour le ciment CC600/20 avec un *IRC= 0.87*. Toutefois, une amélioration de l'indice IRC du mortier CC600/20 est observée à 90 jours (*IRC = 0.89*), alors qu'une réduction de cinétique du même rapport pour le mortier CC800/20 (*IRC = 0.91*), soulignant que la meilleure pouzzolanité à long terme est attribué au ciment CC600/20.

- **Mazouzi et al.** [43] ont concentré leurs travaux sur la production de ciment bélitique, où l'alite (C<sub>3</sub>S) a été remplacée par la bélite (C<sub>2</sub>S). La recherche est portée sur la synthèse d'un clinker bélitique à haute réactivité hydraulique par voie hydrothermale employant le sédiment du barrage et la poussière de chaux récupérée dans des ateliers d'ensachage. La matière première primaire est constituée de deux déchets industriels : un sédiment du barrage de Fergoug situé à l'Ouest Algérien comme source de silice, et une poussière de chaux éteinte récupérée des ateliers d'ensachage de l'unité de Fleuris à la ville d'Oran, comme source d'oxyde de calcium (CaO).

Le tableau 3.6 présente la composition chimique des matériaux étudiés.

**Tableau 3.6.** : Composition chimique des matériaux utilisés [43]

	Composition chimique (%)						
	Oxydes						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P.F
<b>Sédiment du barrage</b>	38,72	11,94	7,23	15,81	2,66	0,37	21,03
<b>Chaux éteinte</b>	0,73	0,29	0,14	74,40	0,36	0,04	23,30

Les compositions minéralogiques des déchets sont déterminées par DRX. Les sédiments sont constitués essentiellement de quartz, de kaolinite, de calcite, de gypse et de micas.

La poussière de chaux éteinte est composée d'hydroxyde de calcium et de calcite résultante de la carbonatation partielle de la chaux au cours du stockage. La bélite doit avoir une réactivité améliorée (*sous plusieurs formes cristallines ou moléculaires différentes  $\alpha'$  ou  $\beta$ -C<sub>2</sub>S*) pour pouvoir produire un ciment béliteux aux propriétés mécaniques appropriées.

Pour un mélange cru, composé de sédiments de barrage et de chaux éteinte de rapport molaire CaO/SiO<sub>2</sub> = 2, mis dans une solution alcaline contenant de la potasse KOH (1M), de rapport massique solide/liquide de 5. Le mélange liquide est bien agité pendant 4 heures à pression atmosphérique.

La suspension obtenue a été filtrée sous vide, séchée à l'étuve à 100°C puis le mélange hydrothermal a été caractérisé par DRX. La seconde étape de la synthèse consiste à chauffer le mélange hydrothermal dans un four à 1100°C.

Le ciment béliteux est synthétisé à partir d'un mélange de chaux éteinte et de sédiment de barrage, contenant une forte proportion de bélite réactive ( $\beta$ -C<sub>2</sub>S) et un très faible pourcentage de chaux libre.

Le suivi temporel par analyse DRX des phases minérales de ce mélange hydraté a révélé une présence notable de CSH et de portlandite et leur augmentation de 2 à 28 jours, ce qui indique une réactivité hydraulique de ce ciment. Cette réactivité est confirmée par des tests physiques et mécaniques : le ciment béliteux prend plus rapidement qu'un ciment normal.

La résistance mécanique de ce ciment béliteux est similaire à celle du ciment classique CEM I-CRS 42,5.

- **Rodriguez et al.** [44] ont créé un mélange avec des sédiments de 5 barrages en Algérie (*Tiaret, EL bayadh, Oran, Ain Defla et Tipaza*) sans traitement préalable, avec du ciment.

Le résultat attendu de leur étude était l'estimation de l'activité pouzzolanique des sédiments en question. Les cinq boues étudiées sont principalement composées de  $\text{SiO}_2$  (33.6%, 56.8%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (11,4%, 16,5%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (4,6%, 12,2%) et  $\text{CaO}$  (3,4%, 27,8%). La composition minéralogique des boues est complexe, le quartz étant la principale phase cristalline, sauf dans le cas du sédiment de Tipaza.

L'échantillon du sédiment de Tipaza est le plus actif et présente un comportement similaire à la fumée de silice, l'une des pouzzolanes les plus actives utilisées dans l'industrie du ciment. Toutes les boues ont des surfaces spécifiques très élevées et une activité pouzzolanique considérable.

Il est confectionné des échantillons de mortier normalisé avec un ciment de type CEM I 42.5N dont 20 % du poids de ce ciment sont remplacés par les sédiments des 05 retenues.

Les valeurs des consistances sont plus élevées que celle du mortier témoin (*sauf l'échantillon du sédiment d'Ain Defla*) en raison de la demande en eau accrue des pouzzolanes. Le temps de prise est également plus élevé à cause des effets de dilution typiques des ajouts pouzzolaniques. Quatre échantillons de sédiments ont montré à l'âge 90 jours, une « Rc » inférieure de celle du mortier témoin (60.3 MPa).

Le mélange qui a été préparé avec des sédiments du barrage de Tipaza (SLD5), sa Rc à 90 jours (*Tableau 3.7*) était supérieure à celle du mortier témoin. Cependant, c'est aussi le sédiment avec la cristallinité la plus faible parmi les sédiments étudiés.

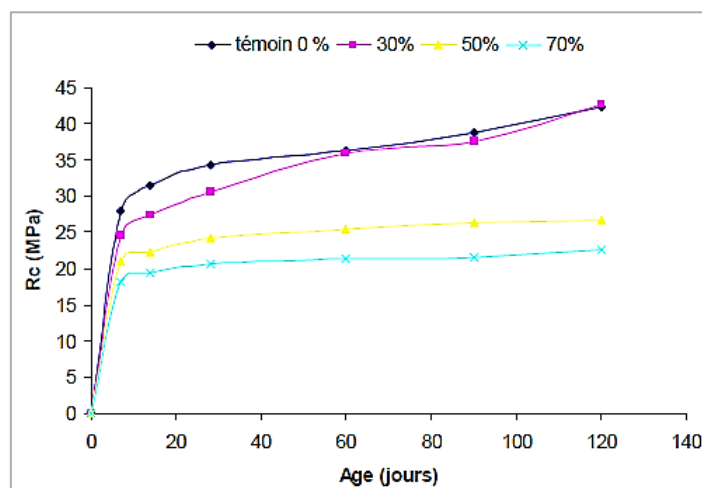
**Tableau 3.7.** : Résistance à la compression des ciments mélangés [44]

ciments mélangés	Rc (MPa)			
	2 jrs	7 jrs	28 jrs	90 jrs
OPC	23.3±1.2	38.8±1.9	50.8±2.5	60.3±3.0
OPC+20% SLD1( <i>Tiaret</i> )	18.3±0.9	29.7±1.5	40.9±2.1	45.7±2.3
OPC+20% SLD2( <i>EL bayadh</i> )	12.4±0.6	30.3±1.5	38.6±1.9	51.9±2.6
OPC+20% SLD3 ( <i>Oran</i> )	14.2±0.7	28.4±1.4	42.7±2.1	55.8±2.8
OPC+20% SLD4( <i>Ain Defla</i> )	13.9±0.7	29.6±1.5	41.0±2.1	52.6±2.6
OPC+20% SLD5( <i>Tipaza</i> )	15.9±0.8	31.7±1.6	47.9±2.4	61.4±3.1
Exigences UNE-EN 197-1	≥10	-	≥32.5, 42.5	-

▪ **Semcha** [22] utilise des sédiments fins provenant du barrage de Fergoug, une retenue d'eau de la wilaya de Mascara en Algérie. Cette recherche l'a aidé à concevoir une pouzzolane artificielle en traitant thermiquement la partie argileuse des sédiments fins.

Les sédiments fins subissent en premier lieu un traitement thermique par cuisson à une température de 750°C maintenue constante pendant 5 heures permettant de transformer la composition minéralogique des matériaux. La vitesse de cuisson est fixée à 5 degrés/min évitant les chocs thermiques. Le suivi de cette activation thermique et la détermination de cette température optimale de calcination (750°C) se fait moyennant les techniques d'analyse minéralogique. Les essais sur mortiers effectués pour déterminer les résistances mécaniques ont concerné trois taux de substitution de ciment par rapport à la masse totale : 30, 50 et 70 %. Ainsi, la création de trois mélanges de ciment et de sédiment calciné, avec un seul échantillon de ciment.

Les performances mécaniques du mortier à 30 % de sédiment calciné sont similaires à ceux constitués uniquement de ciment. A partir de 60 jours, la résistance de ce mélange atteint celle du mélange témoin, et à partir de 120 jours, elle dépasse la résistance du ciment seul. La résistance obtenue à 120 jours dépasse 45 MPa, il peut donc être considéré comme un ciment à hautes performances. (Figure 3.2).



**Figure 3.2.** Résistances mécaniques des 4 mélanges étudiés [22]

Il a conclu que ce « ciment pouzzolanique synthétique » constitué de 30 % de sédiment calciné et de 70 % de ciment portland (*CEM I*), présente un réel avantage économique en termes de performances mécaniquement semblables, même mieux que le liant conventionnel. La pouzzolane synthétique à base de sédiment calciné présente de meilleures propriétés mécaniques.

### 3.2.5 Avantages de la valorisation dans la filière de l'industrie du ciment

- Possibilité de stockage temporaire des sédiments dans les aires réservées à l'entreposage de la matière première des cimenteries disposant de carrières à proximité. Ceci permettra en premier lieu le séchage des sédiments qui seraient par la suite, régulièrement utilisés autant que substituant de matière première;
- Les sédiments peuvent servir comme réserves et ressources potentielles limitant ainsi l'extraction de matières premières d'autant plus que l'approvisionnement en ces dernières, passe par un processus complexe dans les cimenteries et l'extension des carrières et l'ouverture de nouveaux sites d'extraction sont souvent confrontés à des exigences et des contraintes importantes;
- L'étape de broyage peut être préservée et économiser du fait que les sédiments présentent une finesse de qualité supérieure;
- L'identification précise de la composition minéralogique des sédiments peut contribuer dans la correction de la minéralogie des matériaux provenant des carrières;
- Les sédiments ne seront plus considérés comme des déchets coûteux à éliminer mais comme une véritable ressource.

## 3.3 VALORISATION DANS LA FILIERE DES BETONS ET MORTIERS

### 3.3.1 Notions essentielles et caractéristiques des bétons et mortiers

A la fois économique et facile à manipuler, le béton répond à de nombreux critères de performance. Sa durabilité et sa résistance en font un matériau incontournable dans le secteur de la construction. Sa composition est variable, ce qui permet d'obtenir un béton répondant à des besoins spécifiques.

Les granulats constituent la phase béton prédomine (représentant 60 à 70 % du volume). Les granulats forment la charpente, le squelette du béton. Ils rendent le béton économique car on met le max.

Lorsque les granulats utilisés avec du ciment « **liant hydraulique** » sont réduits en sable, on parle de « **mortier** ».

#### 3.3.1.1 Propriétés des bétons

Le terme « **béton** » enferme une équivoque. Le matériau doit vraiment être considéré sous deux formes [45] :

- **Béton frais**, mélange homogène de matières premières solides en suspension dans l'eau. C'est l'état dans lequel il était lors de sa fabrication;
- **Béton durci**, un solide dont les propriétés physiques et mécaniques s'obtiennent dans les réactions physico-chimiques s'opérant entre ses composants à une vitesse relativement rapide d'abord, puis décroissant fortement avec le temps.

Un béton peut être caractérisé par trois critères :

- **L'ouvrabilité et la consistance**

Le concept d'ouvrabilité du béton englobe plusieurs propriétés comme la consistance, la cohésion, la tendance à la ségrégation, la pompabilité, la viscosité et la thixotropie ainsi que leur évolution dans le temps. Habituellement, la quantité qui caractérise la maniabilité du béton est la consistance.

Sa mesure peut facilement être réalisée sur site avec la méthode du cône d'Abrams ou « **slump test** », qui est un test d'affaissement avec des volumes de béton tronqués.

La norme NF EN 206-A1 [46] spécifie cinq classes de consistance béton de S1 à S5 qui sont déterminées par la mesure de l'affaissement.

- **Résistance**

Pour un béton dur, la principale caractéristique recherchée est sa résistance à la compression. C'est la base de calcul et dimensionnement d'une structure en béton. En particulier, cela dépend de la quantité du ciment et de la quantité d'eau. Cette résistance augmente progressivement durant le premier mois après le coulage et est considérée comme stable et plafonne presque à 28 jours.

Encore, le béton subit généralement certains traitements chimiques après avoir séché en fonction de son utilisation, des restrictions et des conditions météorologiques auxquelles il sera confronté. Ces traitements affectent sa valeur de résistance qui dépend aussi en grande partie du type de sollicitation auquel le béton est soumis.

Le béton a de très bonnes valeurs « Rc », typiquement autour de 20 MPa à 40 MPa, mais cela peut être multiplié par dix pour certains bétons spéciaux. La résistance à la traction est l'une des principales faiblesses du béton et n'est que de 10 % à 15 % de la résistance en compression.

---

### ▪ Durabilité

La durabilité liée directement à l'environnement immédiat ou futur de l'ouvrage et d'une partie de l'ouvrage d'aujourd'hui est un paramètre important à considérer afin d'optimiser la résistance du béton aux chocs extérieurs : intempéries, sol agressif, atmosphère chimiquement agressive.

La durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à elle seule à garantir la durée de vie de l'ouvrage. Par conséquent, spécifier une classe de béton durable nécessite d'évaluer, dès sa conception, toutes les contraintes environnementales ainsi que les dommages et agressions potentiels qu'il subira pendant sa durée d'utilisation, tout en respectant et en mettant en œuvre les recommandations en vigueur. La durabilité des produits de construction ne doit pas être assimilée à la durabilité des structures.

En effet, la construction d'un béton durable est essentiellement inutile si sa mise en œuvre dans l'ouvrage ne respecte pas les règles de l'ingénierie et si les différentes sollicitations auxquelles il est soumis ne sont pas correctement évaluées, ce qui a pour conséquence que l'ouvrage ne remplit pas en permanence sa fonction pendant la durée de vie requise.

Les exigences de la norme NF EN 206-A1 doivent être intégrées dans la formulation d'un béton. Cette norme définit 18 classes d'exposition regroupées en 6 « **Familles** » selon le risque de corrosion, d'attaque ou d'agression dépendant des actions environnementales et des conditions dans lesquelles le béton de l'ouvrage ou chaque partie de l'ouvrage est exposé lors de son utilisation.

A chaque classe correspondent les spécifications de composition du béton, les valeurs limites étant respectées. Chaque classe est décrite avec des conditions environnementales et illustrée par des exemples informatifs. Les 18 classes d'exposition sont :

- Classe XO : aucun risque de corrosion ou d'attaque;
- Classes XC1 à XC4 : corrosion induite par carbonatation;
- Classes XD1 à XD3 : corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine;
- Classes XS1 à XS3 : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer;
- Classes XF1 à XF4 : attaque gel / dégel avec ou sans agent de déverglaçage;
- Classes XA1 à XA3 : attaques chimiques.

De même, pour chaque environnement donné, le fabricant exigera une résistance garantie de 28 jours pour les échantillons d'essai.

### **3.3.1.2 Caractéristiques principales des mortiers**

Le mortier est l'un des matériaux de construction utilisés pour relier les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage et combler les vides entre les blocs de construction. Généralement, le mortier est composé de ciment ou de chaux, de sable, d'eau et d'additifs.

Les principales caractéristiques du mortier sont : l'ouvrabilité, la prise, la résistance mécanique et le retrait et gonflement.

Pour l'évaluation des propriétés du mortier, une référence est généralement considérée comme un mortier 1/3 composé de : une partie de ciment et trois parties de sable standardisé ayant une granulométrie de 80 microns à 2 mm et traversant un fuseau bien définie.

Le mortier normal est un mortier utilisé pour déterminer certaines propriétés du ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est fabriqué conformément à la norme NF EN 196-3 [47].

### **3.3.2 Exigences à satisfaire dans la confection des bétons**

La norme NF EN 206-A1 spécifie les exigences applicables aux constituants du béton, leurs qualité et les limites sur leurs proportions garantissant ainsi l'obtention des caractéristiques finales que le béton doit avoir à l'état frais et à l'état durci. Elle définit la production, la livraison et le contrôle de conformité des bétons, et prend en compte la durabilité en s'appuyant sur la notion de classes d'exposition.

La valorisation des sédiments dans la filière des bétons et mortiers permet de faire des économies de matières premières en réduisant la quantité des constituants les plus onéreux, notamment le ciment et les granulats. Sur le plan normatif, la norme NF EN 206-A1 met en valeur les constituants tout en les listant d'une façon précise et détaillée les additions possibles à employer. Les seuls additions minérales qui peuvent être utilisés en substitution partielle du ciment selon le concept de liant équivalent sont déterminées dans la norme NF EN 206-A1.

Il s'agit :

- des additions calcaires : NF P 18-508[48];
- des additions siliceuses : NF P 18-509[49];
- des cendres volantes de centrale thermique : NF EN 450-1[50];
- des laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau : NF EN 15671-1[51];
- des fumées de silice : NF EN 13263-1[52];
- des métakaolins : NF P 18-513[53].

Pour ce qui des métakaolins, ce sont des poudres de grande surface spécifique obtenues par calcination-broyage ou broyage-calcination d'une argile composée majoritairement d'une argile kaolinique. Le métakaolin est principalement composé de particules de silicate d'alumine amorphe aux propriétés pouzzolaniques ; Il est essentiellement composé de réactifs  $\text{SiO}_2$  et d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

La température de calcination varie de  $600^\circ\text{C}$  à  $850^\circ\text{C}$  selon le degré d'arrangement de la kaolinite. Il y a une déshydroxylation du matériau avec destruction de la structure cristalline d'origine conduisant à l'amorphisation du matériau.

La norme NF P18513, qui régit le métakaolin, prévoit que : les produits issus de la calcination des argiles autres que la kaolinite ou de l'incinération des boues de papeteries et autres déchets industriels ne sont pas concernés par la présente norme.

Par conséquent, les autres matériaux argileux, qui ne contiennent pas de kaolinite, et qui ont subi le même traitement, cuits à des températures comprises entre  $600^\circ$  et  $850^\circ$ , n'entrent pas dans le champ d'application de cette norme, même s'ils ont des propriétés similaires.

Le tableau 3.8 reprend les exigences normatives sur les métakaolins.

**Tableau 3.8.** Exigences normatives - chimiques et physiques- sur les métakaolins [53]

<b>Exigences chimiques</b>		
<b>Paramètre</b>	<b>Taux</b>	<b>Norme d'essai NF EN</b>
<b><math>\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	> 90 %	196-2
<b>MgO</b>	$\leq 4,0$ %	196-2
<b>Chaux libre</b>	$\leq 1,0$ %	451-1[50]
<b>Sulfate (<math>\text{SO}_3</math>)</b>	< 1,0 %	196-2
<b>Chlorure</b>	< 0,10 %	196-2
<b>Perte au feu</b>	$\leq 4,0$ %	196-2
<b>Fixation du <math>\text{Ca}(\text{OH})_2</math></b>	$\geq 700$ mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / g	P 18-513 (annexe A)
<b>Exigences physiques</b>		
<b>Finesse/granularité</b>	D70 < 63 $\mu\text{m}$	451-2[51] 933-10 [52] 933-1[53]
<b>Valeur au bleu</b>	< 10 g/kg	933-9
<b>Indice activité</b>	> 100 % à 28j (type A) (1)	Selon addition
<b>Stabilité</b>	< 10 mm	196-3
<b>Temps de début de prise</b>	Variation < à 25 % du temps du ciment seul	196-3

<sup>(1)</sup> l'indice d'activité est calculé avec un taux de substitution de ciment de 15 %

### 3.3.3 Applications aux sédiments

Plusieurs études ont porté sur l'utilisation des sédiments dragués pour remplacer partiellement le ciment dans la production de mortier et de béton. Des essais ont été réalisés sur ces derniers incorporant des sédiments calcinés après détermination de leurs caractéristiques chimiques et physiques.

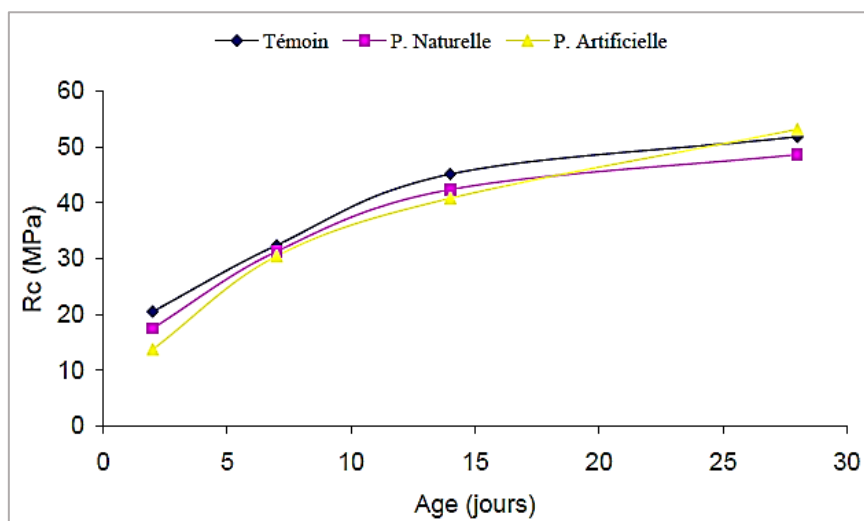
Parmi ces études, nous citons certaines à savoir :

- **Chikouche** [54] a modifié le béton de ciment avec des boues traitées du barrage K'sob de la wilaya de M'sila, et a appris que le béton modifié atteignait une résistance globale acceptable, lorsque le dosage des boues traitées était de 5 % et 10 %. Cependant, le béton modifié avait une résistance moindre par rapport à celle à base de CEM I, car la boue traitée contient un faible pourcentage de métakaolin, c'est-à-dire qu'une quantité limitée de silice est fournie pour la réaction pouzzolanique. Il en a été de même lors de l'étude par ultrasons, car le rapport vides/solides du béton de référence a changé rapidement, ce qui a entraîné un bon effet d'hydratation.

- Le travail d'**A. Semcha** [22], décrit dans la partie « **industrie du ciment** », a consisté à fabriquer une pouzzolane artificielle à partir des sédiments calcinés du barrage de Fergoug à la wilaya de Mascara (*Ouest d'Algérie*) dans les mêmes conditions expérimentales. Des micro-éprouvettes de pâte durcie ont été fabriquées à partir de ciment Portland (*CEM I*) auquel est substitué un pourcentage de pouzzolane de 10, 15, 20, 25 et 30% (*ciments pouzzolaniques*).

Un mortier « **Normal** » est aussi confectionné avec le même protocole expérimental. Les bonnes performances présentées par la pouzzolane artificielle conçue à partir des sédiments issues du dragage du barrage sont très encourageantes (*caractère d'hydraulicité acquis, pouzzolane très active, pouzzolane considérée comme très réactive, le mortier à base de sédiment calciné présente à 28 des résistances meilleures que celles du témoin*).

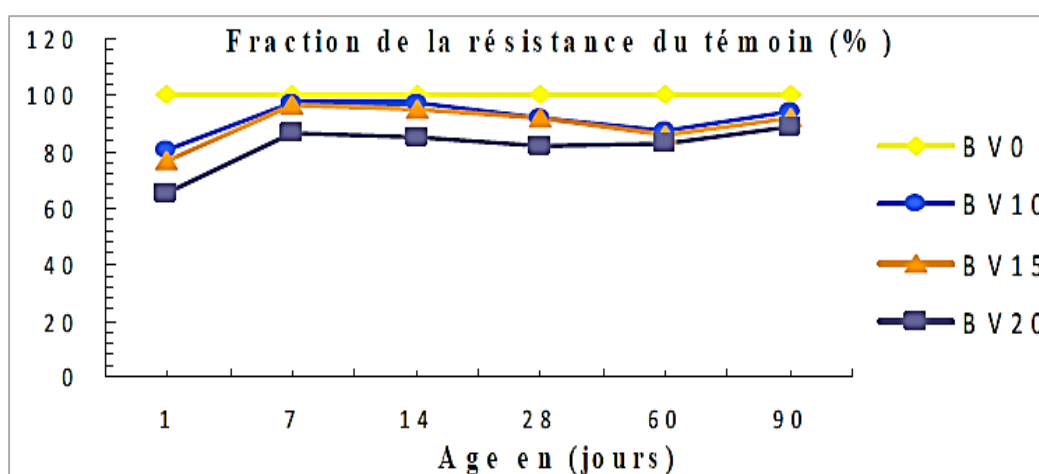
Sur la figure 3.3 est montré les résultats des « Rc » à différents âges des mortiers.



**Figure 3.3.** Résistances à la compression des mortiers [22]

▪ **Belas et al.** [55] et **Bouhamou et al.** [56] procèdent à une étude du comportement à l'état frais et durci d'un béton avec incorporation de pouzzolane artificielle à base de sédiments calcinés issus du barrage de Fergoug. Plusieurs formulations sont élaborées de dosages différents en pouzzolane. Les taux de sédiments calcinés venant en substitution à la masse de ciment de type CEM I 42.5 sont 10, 15 et 20 %. Les bétons confectionnés ont subi des essais pour leurs propriétés mécaniques et leur retrait. L'agrégat utilisé est composé de deux types de gravier, le 8/15 et le 3/8 avec un sable de taille 0/3 mm.

Les bétons à base de sédiments calcinés présentant des performances mécaniques satisfaisantes (*Figure 3.4*)



**Figure 3.4.** Evolution de la fraction des résistances en compression des bétons à base de vase par rapport au béton témoin (sans vase) [55].

▪ **Benkaddour et al.** [57] ont réalisé une étude comparative sur les performances des mortiers à base de ciment seul (*CEM I 42.5*) et des mortiers contenant différentes doses de pouzzolane naturelle de Beni-Saf et de pouzzolane artificielle à base de sédiments du barrage de Fergoug (*Mascara*).

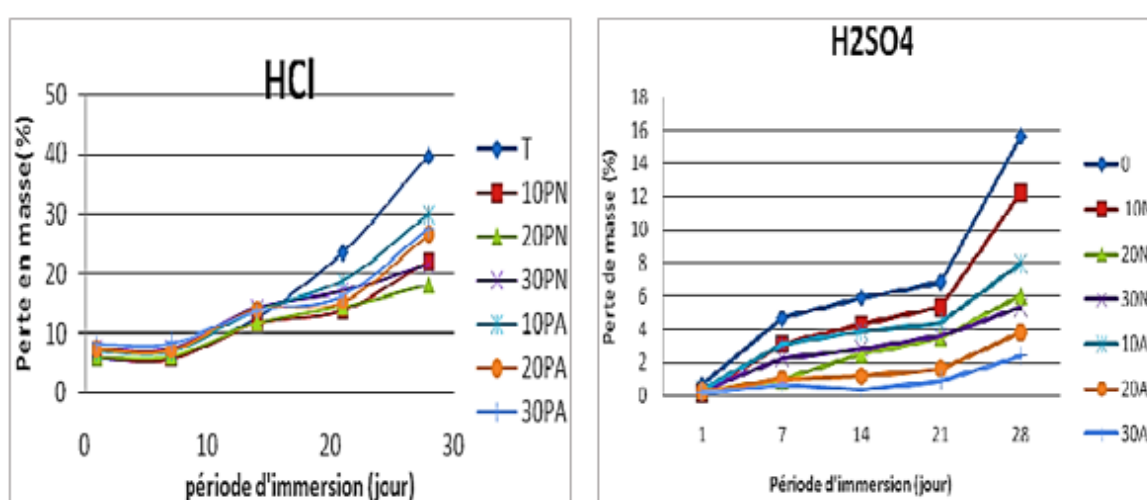
Les recherches portent sur la résistance mécanique et la durabilité en milieu acide des mortiers fabriqués.

Le sable est de nature calcaire concassé obtenu de la carrière de Kristel de dimension 0/3mm. Ils ont procédé à une correction de la granulométrie en mélangeant 40% de sable de mer et 60 % de sable de carrière. Deux types d'échantillons de mortier sont réalisés. Dans la première série de tests, la pouzzolane naturelle a été combinée à différentes doses à savoir : 0, 10, 20 et 30%. De même que pour la série d'échantillons de la pouzzolane artificielle.

Les différents tests ont donné des valeurs similaires pour les mortiers qui associent des pouzzolanes naturelles et artificielles.

Les performances mécaniques, déterminés à 2, 7 et 28 jours, des échantillons à base de ces pouzzolanes sont inférieurs à ceux des échantillons témoins. Néanmoins, la « Rc » à 28 jours du mortier à 10 % de pouzzolanes naturelles et artificielles atteint celle obtenue dans l'échantillon témoin sans pouzzolanes.

Pour la durabilité en milieu acide, l'ajout de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle améliore les performances du mortier lorsqu'il est soumis à l'attaque des acides HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (*Immersion dans 5%*). La figure 3.5 reporte les résultats de l'essai.

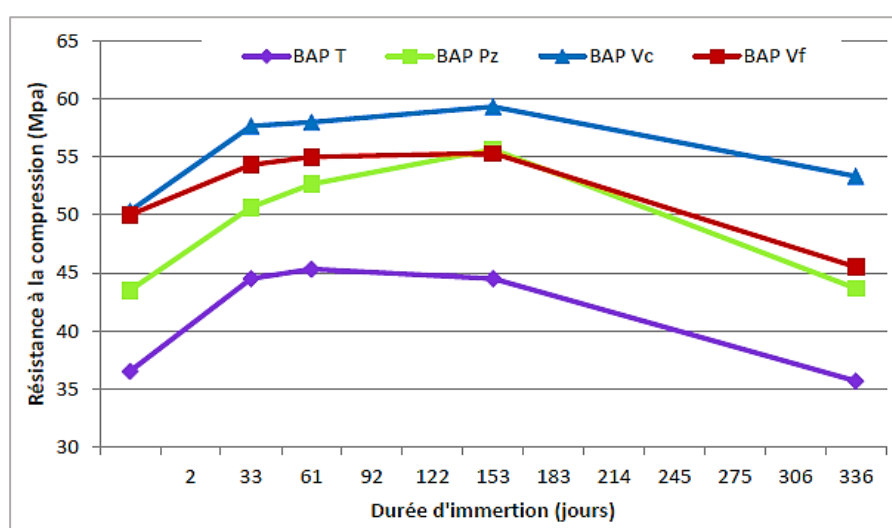


**Figure 3.5.** Perte de masse des différents mortiers à 28 jours d'immersion (5% HCl et 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) [57].

▪ **Belaribi** [58] utilise les sédiments des barrages Chorfa et Fergoug dans la wilaya de Mascara en remplacement partiel du ciment CEMI 42.5 dans la composition de mortier et de béton autoplaçant. Les pâtes, les mortiers et les bétons pour béton autoplaçant (BAP) sont fabriqués à partir de sédiments calcinés et de pouzzolane naturelle. Les essais réalisés portent sur l'examen des propriétés à l'état frais pour apprécier la fluidité et la ségrégation dynamique et statique ainsi que d'autres essais portant sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques (*résistance mécanique, carbonatation et attaque par les sulfates et les acides*). Les valeurs d'étalements obtenues (70 et 68 cm) classent le béton comme béton autoplaçant en milieu libre.

Les résultats de ségrégation statique des tests de stabilité au tamis montrent que les préparations testées ont une stabilité satisfaisante. À l'âge de 3, 7 et 28 jours, la « Rc » des mortiers à base de 20% de sédiment du barrage Fergoug s'est améliorée, en revanche celle des mortiers à base de sédiment du barrage de Chorfa a été très marquée à l'âge de 60, 90 et 180 jours. Pour les « BAP » à base de sédiments de Chorfa développent une « Rc » légèrement élevée par rapport à ceux à base de sédiments de Fergoug, surtout après 28 jours.

L'incorporation de sédiments calcinés dans les « BAP » améliore leur résistivité à l'attaque par l'acide sulfurique et réduit significativement la menace de carbonatation des bétons fabriqués par rapport aux « BAP » naturels à base de pouzzolane. À 360 jours d'immersion dans une solution de sulfate de magnésium, le « BAP » généré à partir du barrage de Chorfa avait la meilleure résistance à cet acide par rapport aux autres « BAP » (*Figure 3.6*).



**Figure 3.6.** Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans la solution de 5% MgSO<sub>4</sub> [58]

### 3.3.4 Avantages de la valorisation dans la filière des bétons et mortiers

- le béton est le premier matériau manufacturé de construction et le plus consommé au monde. Actuellement sa fabrication est faite dans des centrales à béton mobiles, plus flexibles, plus faciles à transporter et à installer que les centrales à béton fixes. Par conséquent l'avantage de la filière c'est qu'elle pourrait intégrer des quantités considérables de sédiments des barrages.

En outre ces sédiments sont des matériaux qui présentent une teneur en eau relativement importante qui peut être employée dans la production de mortier et de béton à base de liants hydrauliques;

- La production de béton est aujourd'hui confrontée à de fortes contradictions. La nécessité de produire en termes de coût et d'impact du carbone au plus près des chantiers à dominante urbaine est aujourd'hui un enjeu pour les riverains de ces centrales à béton. Par conséquent, les industries du béton et du ciment sont amenées à adapter leurs modèles de production en optimisant leur impact carbone.

L'optimisation environnementale de la fabrication peut trouver issue dans l'utilisation de sédiments des barrages à considérer comme un gisement alternatif de matériaux visant à substituer les combustibles fossiles, à éviter l'extraction des matières premières et permet une économie de ressources minérales;

- Les fines que renferment les sédiments des barrages vont avoir un grand impact sur les caractéristiques du béton frais. Elles procurent une meilleure ouvrabilité pendant toute la mise en œuvre et indirectement, elles augmentent la compacité et la résistance puisqu'elles améliorent la maniabilité ;
- Il est généralement admis que la présence de matière organique et d'argile dans les sédiments, même en faible quantité, affecte leurs propriétés mécaniques et peut nuire à la fabrication du béton. Un traitement thermique de ces dépôts est nécessaire pour éliminer les matières organiques et rendre l'argile plus inerte, corriger les effets de retrait et de gonflement, voire leur conférer une caractéristique particulière: des propriétés pouzzolaniques.

### 3.4 VALORISATION DANS LA FILIERE DES MATERIAUX ROUTIERS

Le secteur des travaux publics est un poids lourd dans l'économie de nombreux pays en raison de la forte consommation de matières premières. Le volume consacré à la construction des infrastructures routières est de plus en plus important. La valorisation des matériaux dans le domaine des travaux publics est actuellement une préoccupation majeure des producteurs et utilisateurs. Le domaine des terrassements performants (excavation de terre) est pointé par l'obligation de réutiliser au maximum les matériaux immédiatement au droit du projet, même les matériaux présentant des caractéristiques, notamment mécaniques faibles.

Les processus d'amélioration mécanique ne sont parfois pas suffisants pour que les matériaux de chaussée atteignent la capacité portante requise. Il est cependant possible de les améliorer en les traitant avec des liants hydrauliques (chaux et ciment), et permettant ainsi leur réutilisation. La réutilisation de sols bien traités est depuis devenue une habitude courante. Donc ce secteur apparaît avantageux pour la formation et le développement d'une voie de récupération des sédiments.

#### 3.4.1 Notions essentielles et caractéristiques des routes

Le rôle de la chaussée est de transmettre les efforts dus au trafic au sol en les répartissant correctement.

La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible pour être supportée sans détérioration. Comme la pression dans la couche de grains diminue fréquemment avec la profondeur, la chaussée peut se former en raison de la superposition de couches aux propriétés mécaniques croissantes.

En général, on rencontre les couches mentionnées dans la figure 3.7 :

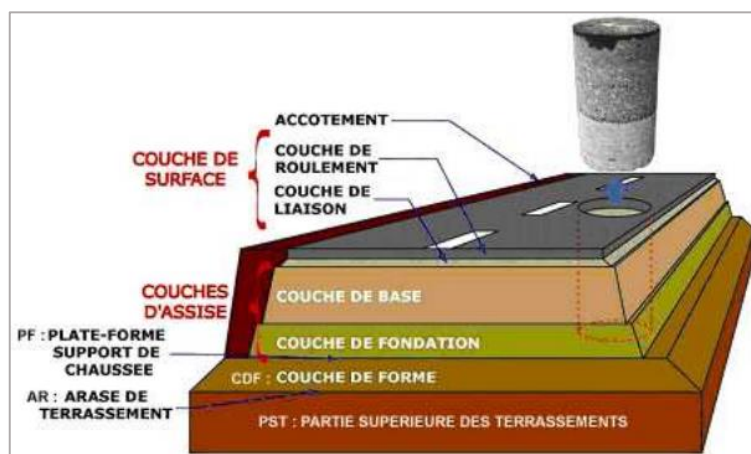


Figure 3.7. Coupe type d'une structure de chaussée

### 3.4.1.1 Classification GTR « Guide Technique Routière »

Ce guide s'articule autour de trois axes:

- Etablit une classification spécifique des matériaux répondant aux besoins urgents dans la réalisation des terrassements et d'ouvrages en terre;
- Procédures d'élimination des matériaux pour l'utilisation prévue, le remblayage ou la couche de forme;
- Méthodes pratiques pour effectuer le compactage.

Ce guide peut être utilisé pour classer les sédiments. Les dépôts de barrages fins se trouvent dans la partie des sols fins de la classification (*classe A*). La référence normative principale pour la classification des sols est la norme NF P11-300 qui a pour objet de déterminer une classification des matériaux utilisables pour la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières en fonction de critères représentatifs des problèmes posés par leur utilisation.

#### ▪ Les paramètres de nature

La nature des matériaux est caractérisée par deux grandes catégories : la granularité et l'argilosité.

**La granularité** est une analyse constituée de 3 paramètres principaux : le  $D_{max}$  (correspond à la taille des plus gros granulats présents dans le matériau, le pourcentage de tamisât à 0.08mm et le pourcentage de tamisât à 2mm.

**L'argilosité** s'appuie dans sa détermination sur deux essais, soit la valeur de l'indice de plasticité ou la valeur de bleu de méthylène. La figure 3.8 indique la nature des matériaux caractérisée par ces deux grandes catégories :

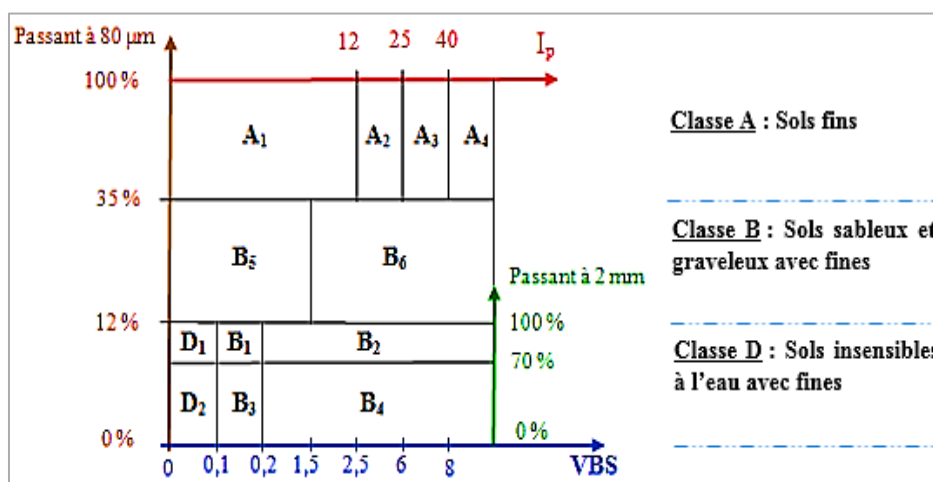


Figure 3.8. Classification des sols ( $D_{max} < 50 \text{ mm}$ ) [59]

Les sédiments fins de barrages se trouvent dans la partie des sols fins qui est la classe « A »

- **Les paramètres d'état**

Ce paramètre consiste à définir l'état hydrique du sol. Il existe 5 états hydriques différents : Très humide (*th*), Humide (*h*), Moyen (*m*), Sec (*s*), Très sec (*ts*).

Trois paramètres sont utilisés pour déterminer l'état hydrique :

- Le rapport entre la teneur en eau naturelle du matériau ( $W_n$ ), et sa teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal, exprimée par le rapport :  $W_n/W_{OPN}$ ;
- Le placement de la teneur en eau naturelle du matériau ( $W_n$ ) en fonction de ses limites d'Atterberg ( $W_L$  et  $W_P$ ) appelé indice de consistance  $I_C = (W_L - W_n) / (W_L - W_P)$ ;
- L'indice portant immédiat (*IPI*) du matériau à sa teneur en eau naturelle effectué par un poinçonnement CBR sans surcharges ni immersion sur un échantillon compacté à l'énergie Proctor normal.

- **Les paramètres de comportement mécanique**

Il s'agit du coefficient « Los Angeles » (*LA*), du coefficient « Micro-Deval en présence d'eau » (*MDE*) et du coefficient de « friabilité des sables » (*FS*). Ces paramètres servent à trancher entre certains sols similaires mais qui peuvent avoir des comportements différents lors de leur mise en œuvre ou sous l'action du trafic.

Des seuils sont déterminés pour caractériser les sols utilisables pour les couches de forme ( $L.A$  et  $M.D.E \leq \text{à } 45$  et  $F.S \leq \text{à } 60$ ) et ceux à risque de ségrégation pour devenir des sols de composition primaire, les éléments faibles étant des éléments fins et donc inutilisables.

### 3.4.1.2 Traitement des sols

Le traitement est une opération qui consiste à mélanger le sol naturel avec de la chaux et/ou du liant hydraulique. Il permet, en améliorant ses propriétés, d'utiliser un sol inadapté à son état naturel.

De plus, cette technique conduit également à la préservation de l'environnement : en utilisant les matériaux du site, on économise des ressources naturelles précieuses (gros rochers) et on réduit les nuisances (pas de circulation de camions de transport sur la voie publique).

Pour la valorisation des sédiments traités en génie routier, la méthode appliquée sera la même que celle appliquée aux sols conventionnels.

- **Le traitement** à la (*chaux vive*) permet de réduire très rapidement la teneur en eau et permet ainsi de diminuer très rapidement la teneur en eau et rendre « portant » des sols non circulables à l'état naturel.

Lorsque le sol est argileux, le traitement à la chaux augmente les propriétés mécaniques du sol à long terme. Le dosage moyen de chaux est compris entre 1 et 4 %.

Le traitement au liant hydraulique confère au mélange des propriétés mécaniques durables et lui permet ainsi d'être utilisé comme couche de forme ou assises de chaussées.

Les sédiments fins peuvent avoir certaines caractéristiques qui ressemblent à des sols limoneux et/ou argileux. Le traitement à la chaux apporte une amélioration immédiate et durable du sol en faisant réagir la chaux avec des particules d'argile.

- **Les liants hydrauliques couramment** utilisés dans le traitement des sols sont le ciment et surtout les liants hydrauliques routiers (*liants hydrauliques à base de laitier avec peu ou pas de clinker*). La dose moyenne de liant hydraulique est d'environ 4 à 8% (*si le sol est argileux et donc malléable, il faudra le prétraiter avec environ 1% de chaux pour obtenir une mouture fin avant durcissement avec le liant hydraulique*).

### 3.4.2 Applications aux sédiments

Ces dernières années, la récupération des matériaux de dragage pour les utiliser en travaux publics est devenue une issue précisée pour les chercheurs et constitue ainsi un axe de recherche humoristique avec le concept de développement durable.

Nous citons quelques études et travaux notables.

- **Serbah** [60] a prélevé des spécimens de sédiments issus du dragage de barrage BAKHADDA de Tiaret pour réaliser des analyses physico-chimiques et mécaniques dans le but de les utiliser comme composants dans les couches d'assise d'une structure routière. Le traitement réalisé est conforme aux exigences du guide GTR [61], basé sur des formulations mixtes avec différentes proportions de sédiments dragués, de matériaux granuleux et de liant. Il a étudié l'effet d'ajout d'un matériau granulaire et d'un liant hydraulique et aérien (ciment, chaux) en tant que correcteur mécanique pour améliorer les paramètres géotechniques du sédiment, ainsi que les propriétés optimales sur la densité et la capacité portante des matériaux et leurs niveaux de résistance mécanique. Les tests géotechniques effectués sur les sédiments dragués ont montré que l'ajout de matériau granulaire améliorerait la distribution granulométrique, réduirait la densité sèche et augmenterait la teneur en eau optimale.

La densité du matériau n'est pas affectée par la teneur en matière organique, laquelle affecte négativement la capacité portante (*IPI*) du matériau. L'*IP* est faible pour les sédiments bruts qui ne garantissent pas la circulation des engins sur le site, sinon les autres mélanges leur « *IP* » permet immédiatement d'assurer la circulation des engins sur le site et permet aussi la vérification des conditions d'utilisation en couche de fondation,  $IPI > 35\%$  (Tableau 3.9).

**Tableau 3.9.** Influence d'ajouts des liants hydrauliques et matériau granulaire sur les valeurs de l'optimum Proctor modifié des formulations étudiées [60].

N°	N° Formulation de Mélange	Essais		
		densification		portance
		$W_{OPM}$ (%)	$\gamma_{dmax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$IPI_{OPM}$
1	Sédiment brut site 01 (S1)	23	1,9	16,3
2	97% S01+ 3%CH	25	1,77	33,75
3	94% S01+ 6%C	20	1,92	36,15
4	91% S01+6%C+ 3%CH	24	1,82	38,25
5	50% S01+50%Sol2 (sable)	26	1,74	40,33

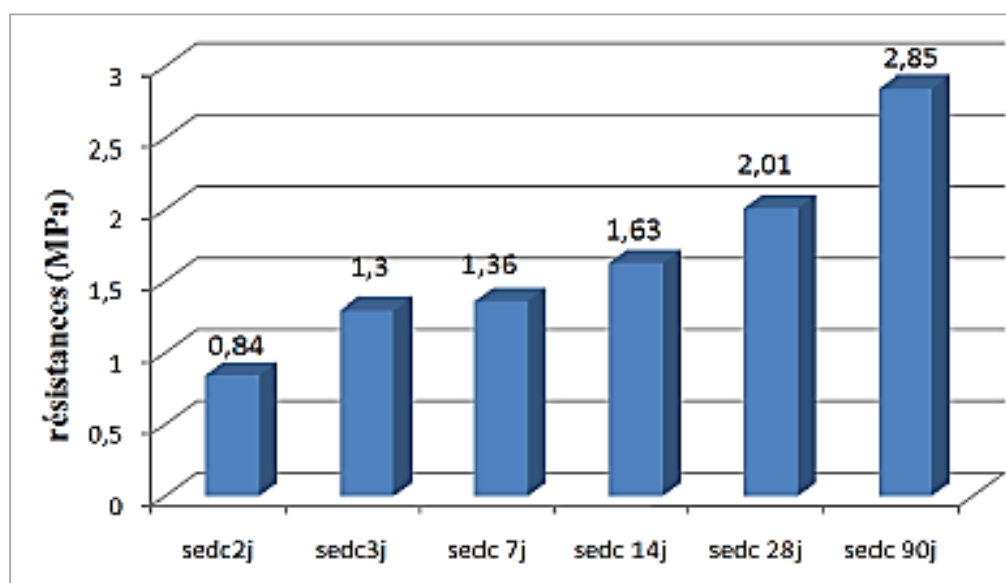
S01 : Sediment brut de site 01- CH : La chaux. - C : le Ciment. - Sol2 : sédiment de site 02 (sable).

Effectivement, les trois liants testés permettent de prédire une utilisation de sédiments traités pour former une couche de chaussée. Capacité avérée au traitement, excellente durabilité des traitements et absence d'effets indésirables (gonflement), bonne résistance mécanique à 90 jours. Ainsi, les propriétés du sédiment traité sont évaluées en fonction de l'âge laissé circuler sur la couche traitée (en général, la « *Rc* » à 7 jours ou à 28 jours  $\geq 1$  MPa).

- **Seklaoui-Oukid** [62] présente une solution aux sédiments dragués du barrage Merdja Sidi Abed à Relizane en testant la faculté d'employer ces dépôts dans les travaux publics (*en couche de forme*), surtout pour une solution de remplacement aux matériaux de base. Il a effectué des essais géotechniques et minéralogiques du sédiment (*diffraction X*, *MEB*) pour déterminer le type d'éléments existants.

Il a constaté la présence d'argile gonflante dans le sédiment qui est classée en « *A<sub>3</sub>* » avec une valeur de « *IPI* » égale à 13% l'alignant dans l'état hydrique moyen (*sous classe A<sub>3m</sub>*). Ensuite, un traitement au ciment est effectué avec un dosage de 5% afin d'améliorer les propriétés mécaniques du sédiment et de le réutiliser en couche de forme.

Au dosage testé, le sédiment est jugé apte au traitement, après immersion, il y a une amélioration de la capacité portante s'assurant ainsi de la résistance du matériau traité et l'absence de tout gonflement ou toute perte néfaste de liaison en cas de saturation en eau, un délai de mise en circulation rapide et une résistance à 3 jours de 1,3 MPa (Figure 3.9). Les performances mécaniques se sont améliorées.



**Figure 3.9.** Résistances à la compression du sédiment traité au ciment à différents âge de maturation. [62]

Avec 5% de ciment CEM II, le sédiment traité a donné des « Rc » largement supérieures à celles recommandées en couche de forme nonobstant l'existence d'argile gonflante.

Le traitement du sédiment avec seulement 5% de ciment CPJ 42,5 améliore considérablement la portance du matériau ce qui conduit à une épaisseur de la couche de 50 cm plus faible que celle réalisée avec un matériau local non traité qui est de 80 cm.

- **Bourabah** [63], a suggéré un matériau avec des sédiments dragués provenant du barrage de Cheufas au nord-ouest Algérien pour l'utiliser dans le secteur routier. Il contient majoritairement des particules fines < à 63  $\mu\text{m}$  et un taux de matière organique d'environ 7 %. Cette composition produit une résistance mécanique insuffisante et une compressibilité et sensibilité à l'eau élevées. Par conséquent, l'amélioration des performances mécaniques du matériau est nécessaire.

---

Une première approche concerne le traitement direct des sédiments en ajoutant un sol granulaire et un liant hydraulique et aérien (*ciment et chaux*) pour ajuster la granulométrie du matériau final et obtenir la cohésion de cimentation améliorant ainsi les caractéristiques mécaniques des sédiments d'origine. La seconde approche consiste à renforcer la couche de sédiments à l'aide de géotextiles.

La granulométrie des sédiments peut être améliorée à l'avance en ajoutant du matériau granulaire. Les résultats montrent que les diverses formulations présentées ont des propriétés mécaniques acceptables pour les exigences d'utilisation comme substrat routier (*couche d'assise*). La densité sèche et la réduction de teneur en eau se sont améliorées parfaitement avec l'addition de matériau granulaire. Le taux en matière organique n'affecte pas la compacité du matériau, au contraire, il affecte négativement la capacité portante du matériau. L'adjonction de liants hydrauliques a montré leur effet, largement sur la capacité portante du matériau, fortement améliorée encourageant ainsi sa mise en œuvre en tant que couche de fondation et de base.

Le renforcement du sédiment par du géotextile a amélioré l'angle de frottement à l'interface sol-géotextile que l'interface sol-sol.

### **3.4.3 Avantages de la valorisation dans la filière des matériaux routiers**

- La valorisation dans le domaine des travaux routiers semble prometteuse, étant donné le pouvoir d'absorber de grandes quantités de matériaux, comparé aux autres domaines de valorisation et de par le manque éventuel de granulats dans le futur. Aussi, ce secteur utilise des matériaux aux propriétés diverses ne nécessitant pas des résistances mécaniques élevées selon l'emplacement du matériau dans l'ouvrage routier ;
- Dans cette voie de valorisation dont les performances demandées et requises ne demandent pas un matériau noble, les sédiments des barrages peuvent constituer un gisement alternatif renouvelable;
- La réalisation des aménagements et des extensions de surfaces destinées à la fois aux piétons et aux cyclistes ainsi que les aires de stationnement peut tirer profit de l'avantage de cette valorisation en utilisant des sédiments de barrage où les performances techniques à acquérir sont moins importantes que celles exigées en couche de forme. De plus, ces travaux ne sont pas liés par des normes techniques ou des directives telles que définies pour l'ingénierie routière.

---

### 3.5 VALORISATION DANS LA FILIERE MATERIAUX CERAMIQUE

Le terme "céramique" (*produits céramiques*) fait généralement référence à des matériaux inorganiques changés de manière constante par la cuisson. Actuellement la céramique comprend en plus des matériaux à base d'argile, une variété de produits contenant un pourcentage d'argile faible ou pas du tout.

L'industrie céramique recouvre la production d'articles en céramique traditionnels tels que les carreaux, les produits réfractaires, la vaisselle et les appareils sanitaires, mais également la céramique technique dont les isolateurs électriques ou des pièces spécifiques destinées à des secteurs de pointe (*aéronautique, médical, défense, électronique...*).

La plupart des matières premières produites par l'industrie céramique sont consommées dans la construction d'ouvrages d'équipement et de logement. Les matériaux brique et tuile sont les plus utilisés et les plus répandus, donc ciblés dans le cadre de la récupération des sédiments.

#### 3.5.1 Notions essentielles et caractéristiques des produits céramiques

Pour se faire une idée sur les spécificités et les technologies propres aux matériaux céramiques, et aussi de mieux comprendre pourquoi ils font l'objet de tant d'études et de développements depuis une cinquantaine d'années, il est indispensable tout d'abord de présenter les éléments principaux d'identification de ces matériaux céramiques parmi les autres sortes de matériaux (*matière première, principaux produits céramiques, techniques de fabrication...*).

- **Matière première de base**

Pour préparer la pâte, l'industrie céramique traditionnelle utilise des matières premières de la catégorie « matière plastique ». Il s'agit essentiellement d'argile. L'argile est une roche composée des minéraux argileux essentiels, combinés à divers minéraux mineurs et impurétés.

- **Forme minéralogique**

Minéralogiquement parlant, un minéral argileux est constitué de silicates d'alumine hydratés, quelquefois légèrement magnésien ou ferreux, des fois faiblement calciques voire alcalins. Ils sont divisés en groupes multiples, avec seulement deux (02) groupes contenant les composants essentiels des argiles couramment utilisés dans l'industrie céramique [64].

- **Le groupe de la kaolinite** comprend la kaolinite, la dickite et la nacrite et l'halloysite. Ces minéraux peuvent briller. Ils ont une structure de feuille à deux couches. Les feuillets étant séparés par des couches d'eau dans le cas de l'halloysite. Ils proviennent des altérations météoriques spécialement hydrothermales de plusieurs silicates optiques, notamment le feldspath du granite acide [64];
- **Le groupe des micas**, parmi lesquels ne sont gardées que les illites est aussi parfois appelé : bravaisites. Ce sont l'alumino-magnésium, le potassium et parfois les minéraux, calcium et fer. Les illites sont les minéraux argileux les plus courants dans la nature et sont particulièrement caractéristiques du milieu marin.

- **Propriétés caractéristiques**

Les propriétés caractéristiques de la céramique sont : une résistance mécanique élevée, une résistance à l'usure, une longévité et chimiquement inerte. Ils sont intoxiques, résistants à la chaleur et au feu. Ils ont souvent des propriétés isolantes, et des fois encore une porosité spécifique.

### 3.5.2 Procédés et techniques de fabrication

Le procédé de fabrication des pièces céramiques présente différentes étapes : l'extraction de l'argile, la préparation de la pâte, le façonnage, le séchage et la cuisson.

La préparation du mélange cible l'élimination d'éventuelles impuretés, l'homogénéisation et l'ajustement de la teneur en humidité pour l'étape de prise et confection ou de mise en forme. Il existe un certain nombre de voies de profilage « mise en forme » qui exploitent différents états de la matière. A partir d'une suspension (*voie humide*), d'une pâte plastique (*voie semi-humide*) ou de granules (*voie sèche*).

L'étape finale du procédé céramique consiste à renforcer la structure granulaire, obtenue par l'une des voies décrites ci-dessus, par un procédé à haute température dit « **frittage ou cuisson** ». Lorsque le frittage commence, les particules constituant l'objet se soudent entre elles pour former des ponts qui assurent la cohésion de la structure granulaire. La porosité de cette structure est généralement de 40%, un frittage supplémentaire conduit à sa solidification accompagnée d'une réduction du volume de la pièce (*retrait dimensionnel*).

Le grossissement des grains peut également avoir lieu à la fin du processus de frittage.

### 3.5.3 Applications aux sédiments

La grande majorité de recherches menées sur la faisabilité de la récupération et l'exploitation des sédiments de barrages en céramique est basée sur la richesse typique des sédiments fins en minéraux, leur grande surface spécifique et les forces électrostatiques existantes entre les particules.

Certains de ces travaux ont abouti à des concrétisations industrielles grande nature. En fonction des caractéristiques des sédiments et du potentiel local d'extraction de matière, cette filière de recyclage pourrait être porteuse de perspectives intéressantes et résoudre le problème de l'envasement.

En Algérie, des études sont lancées pour produire des briques dont les sédiments fins des barrages sont utilisés comme matières premières.

- **Benasla** [65] utilise des sédiments fins provenant du barrage d'Oued Fodda, un réservoir de la ville Algérienne de Chlef. Il a effectué des analyses physiques, chimiques et minéralogiques sur des spécimens de sédiments enlevés dans le réservoir du barrage afin de les valoriser en les utilisant comme matériaux de construction et surtout comme carreaux de sol céramique. Il a substitué une argile utilisée dans la production de céramique par un sédiment fin du barrage après traitement. Les tests physico céramiques ont été réalisés sur des carreaux de 55x110x 6 mm confectionnés à partir d'un mélange constitué de 13 % de sédiment de barrage, 16 % de grés et 71% de schiste.

Les tests sont réalisés au niveau de l'usine CERAL qui produisait des carreaux à base d'un mélange de 13 % d'argile, 17 % de grés et 71% de schiste. Les températures maximales de la cuisson sont variables (800, 900, 1000 et 1100°C). Ceci pour apprécier le pouvoir de la température sur certaines grandeurs des carreaux (*résistance à la flexion, dimensions, perte au feu*). La résistance à la flexion des carreaux à base de sédiments du barrage est proche de celle des carreaux à base d'argile pour les différentes températures de cuisson (*Figure 3.10*).

Les éléments fabriqués à partir des sédiments du barrage ont une résistance crue moyenne de 2.03N/mm<sup>2</sup> et une résistance sèche moyenne de 6.1 N/mm<sup>2</sup> qui sont les deux proches de celles des carreaux à base d'argile (*crue moyenne de 2.26N/mm<sup>2</sup>, sèche moyenne de 6.3 N/mm<sup>2</sup>*). Le comportement vis-à-vis du pressage et du séchage des carreaux à base de sédiments est très satisfaisant. L'auteur conclut qu'un sédiment fin du barrage peut être utilisé dans la production de carreaux de sol en céramique.

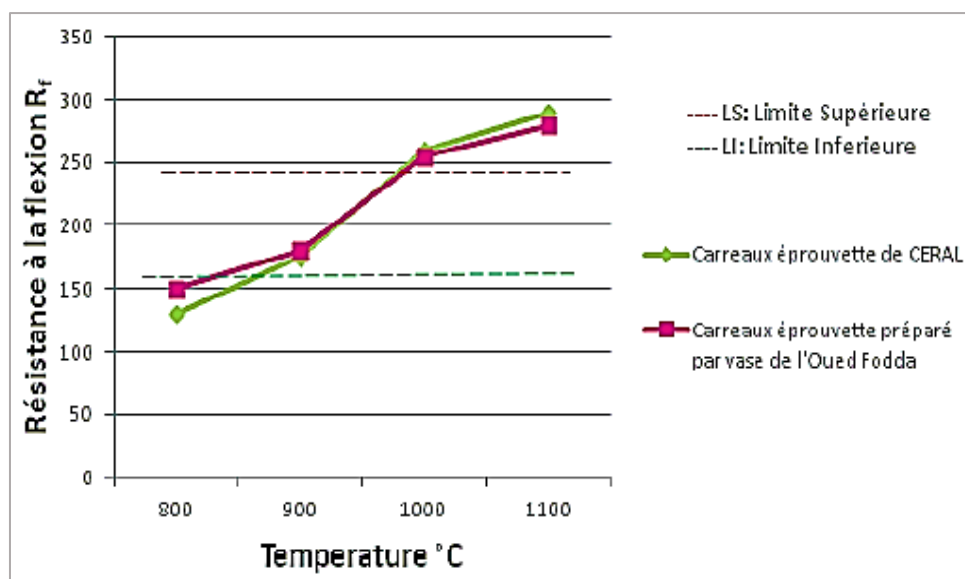


Figure 3.10. Variation de la résistance à la flexion en fonction de la température [65]

▪ **Benkadja et al.** [66] ont étudié les sédiments du barrage K'sob de Msila situé à l'Est Algérien pour la production de briques.

La brique 6x11x22 cm est produite depuis un mélange de sédiments à 65 % , de sable de dune à 25 % et de 10 % d'eau. La calcination a été fixée à 800°C pendant 6h. Les valeurs moyennes de certaines caractéristiques des briques pleines fabriquées sont les suivantes : Masse volumique = 1,4 g/cm<sup>3</sup>, Résistance mécanique = 10,47 MPa (Figure 3.11) et Absorption d'eau = 55,17 %.

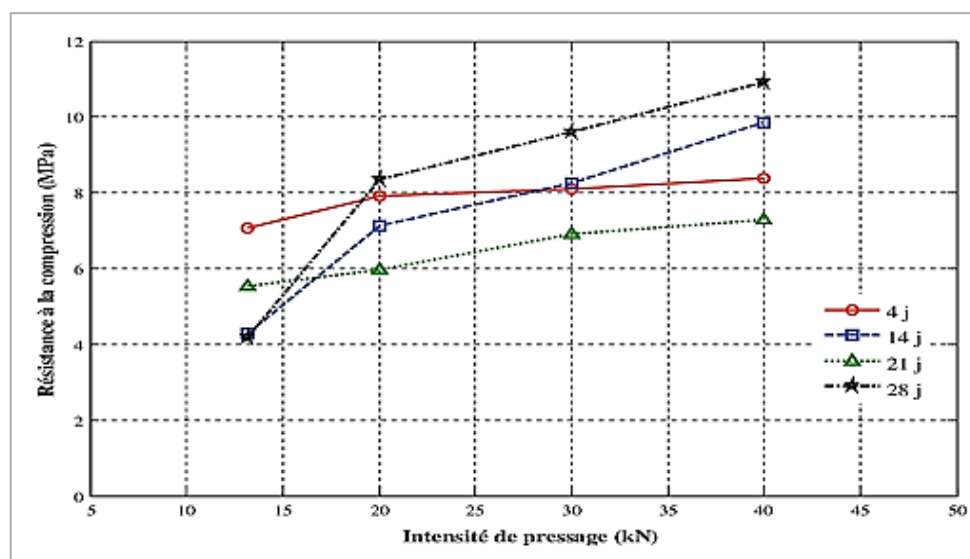
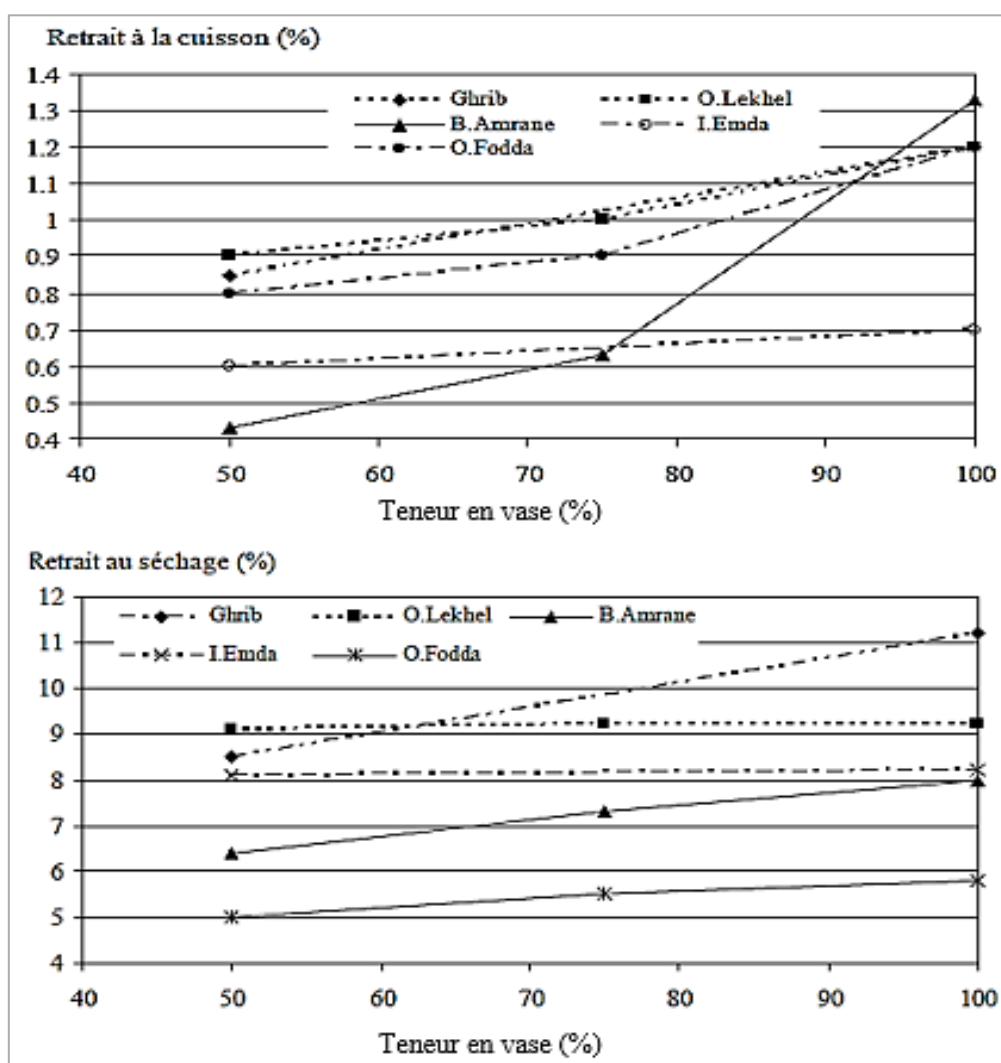


Figure 3.11. Evolution de la résistance en fonction de l'intensité de pression pour différents âges de la brique [66]

▪ **Remini** [67] a déterminé les caractéristiques des sédiments de 11 barrages Algériens pour étudier des mélanges avec une argile jaunâtre. Après préparation (broyage, mélange, homogénéisation, façonnage et séchage), les mélanges sont cuits à 900°C pendant 32 h et 30 min. L'effet du taux de sédiment (*mélange de 0,25, 50, 75 et 100% de la vase*) sur les propriétés du matériau calciné a été déterminé à l'aide d'une analyse dimensionnelle (*retrait au séchage et au chauffage*), de la physique du matériau (*porosité apparente, densité absolue, capacité et teneur en eau, coefficient d'absorption*) et des essais mécaniques. Toutes les valeurs de retrait sont comprises dans les limites admissibles spécifiées (*AFNOR, 1983*) : retrait de séchage  $\leq 10\%$  et retrait de cuisson  $0,5$  à  $3\%$  (*Figure 3.11*).



**Figure 3.12.** Evolution du retrait à la cuisson et au séchage en fonction de la teneur en vase [67].

### 3.5.4 Avantages de la valorisation dans la filière des matériaux céramiques

- Possibilité d'utiliser un mélange de matières premières de composition similaire à celle des sédiments fins issus du dragage des barrages. Par conséquent, les sédiments peuvent être une matière première alternative pour la fabrication de produits de matériaux de construction et ont donc une valeur économique considérable;
- De même que pour le cas des cimenteries, généralement les différentes usines qui produisent différents matériaux argileux disposent de carrières à proximité de leurs sites de production. Pour cette raison, il serait envisageable de déposer et stocker les sédiments provenant de dragage au niveau du site d'emprise des carrières ;
- On trouve des sédiments fins de certains barrages qui, en grande quantité, présentent toutes les spécificités d'une matière première employée dans la fabrication des matériaux céramiques ou du moins en sont très proches;
- La plupart des barrages sont soumis au phénomène inévitable de la sédimentation qui se présente d'une manière continue dans le temps et dont les techniques et les moyens d'en faire face sont généralement bien maîtrisés. Devant cet avantage d'approvisionnement régulier dans le temps, de matière première, les sédiments des barrages ne peuvent qu'être considérés comme des sources et des gisements renouvelables. Le fait d'élaborer des mélanges incorporant des matériaux miniers alternatifs peut réduire l'extraction de matières premières traditionnelles et, par conséquent, peut apporter des solutions à des problèmes financiers et notamment environnementaux. Sur le plan environnemental, les matériaux issus des carrières seront utilisés en moindre quantité pour changer les matériaux de remplacement d'origine à l'état de déchet. Si le sédiment est fourni gratuitement à l'usine de céramique ou à moindre prix, l'exploitation peut être réduite.

### 3.6 CONCLUSION DU CHAPITRE

Pour la valorisation des sédiments des barrages, une connaissance préalable des terrains est requise, ainsi qu'une bonne maîtrise des préconisations et des spécificités propres à chacun de ces domaines. Les exigences sont liées surtout aux spécificités du produit final et ont très peu à voir avec les matières premières.

Communément, beaucoup de sédiments de dragage présentent des propriétés convenables et adaptées, mais leur utilisation se trouve bloquer par le simple fait qu'ils ne figurent pas dans les règlements ou dans les normes. C'est une réelle contrainte et difficulté placée sur le parcours de la valorisation.

On peut citer par exemple, un possible cas d'utilisation de sédiments dans des produits ne nécessitant pas de béton normalisé selon la norme NF EN 206-1, qui liste une large gamme d'additifs possibles pouvant rentrer dans la composition du béton normalisé.

Les filières de valorisation « **industrie ciment** » et « **matériaux céramique** » qui utilisent le traitement thermique dans leurs procédés industriels, s'intéressent à la composition chimique des principaux éléments. Les caractéristiques des sédiments fins et des matériaux naturels provenant de carrières (*argile, calcaire*) sont systématiquement proches.

Les recherches réalisées garantissent une bonne possibilité pour utiliser des sédiments fins comme matière première de remplacement partiel. Concernant ces deux secteurs, en général, les usines produisant des matériaux différents disposent de carrières à proximité de leurs sites de production. Pour cette raison, il est faisable de déposer des sédiments dragués à forte teneur en eau, au niveau de la carrière.

Les cimenteries peuvent économiser de l'argent sur l'extraction en utilisant les sédiments comme une véritable ressource minérale.

Beaucoup de travaux de valorisation dans la filière « **matériau routier** » ont démontré la possibilité de prendre les matériaux issus de dragues comme matériaux routiers, après traitement avec des liants et/ou des ajouts modificateurs de granulométrie. De plus, la prise en considération des sédiments dans les documents de référence comme les guides techniques routiers (*GTR*) qui envisagent une application potentielle aux déblais de dragage, n'est qu'une reconnaissance de l'utilisation des sédiments fins issus des opérations de dragage.

# Chapitre 4.

## Valorisation de la Boue de Dragage du Barrage K'sob dans la Filière des Bétons et Mortiers

*Ce chapitre s'intéresse d'une part à l'étude des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques de la boue de dragage du barrage K'sob et d'autre part la description du programme expérimental de l'étude de recherche ainsi que la méthodologie utilisée pour chacun des essais. Les résultats de ces essais sont ensuite exposés et analysés.*

### **Plan du chapitre**

---

4.1 INTRODUCTION.....	90
4.2 PRESENTATION DU PLAN EXPERIMENTAL.....	91
4.3 IDENTIFICATION DES MATERIAUX DE L'ETUDE.....	93
4.4 METHODES EXPERIMENTALES.....	96
4.5 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....	102
4.6 CONCLUSION DU CHAPITRE.....	116

## 4.1 INTRODUCTION

La production de ciment en Algérie s'élèvera à plus de 40 Mio. Tonnes / an, dont le béton et le mortier utilisent la majeure partie. Ces deux matériaux sont des composants essentiels de la construction que nous connaissons et maîtrisons déjà. Ce sont les deux premiers types de matériaux de construction produits et consommés le plus dans le pays.

Actuellement, la fabrication du béton est faite dans des centrales à béton mobiles, plus flexibles, plus faciles à transporter et à installer que les centrales à béton fixes. Par conséquent l'avantage de la filière « **bétons et mortiers** » c'est qu'elle pourrait intégrer des quantités considérables de sédiments des barrages.

Compte tenu de la forte demande de ces deux matériaux dans des applications potentiellement différentes, la filière « **béton et mortier** » apparaît comme une filière prometteuse pour la valorisation des sédiments. Cependant, un choix approprié de la méthode et du taux d'incorporation des résidus est nécessaire pour répondre aux exigences de la norme applicable au béton. Comme il est nécessaire, tout d'abord de déterminer la capacité du sédiment à obtenir une caractéristique de la réaction pouzzolanique.

C'est pour cette raison que nous contribuons à travers cette étude qui permettra de valoriser les boues du barrage de K'sob comme alternative renouvelable dans la composition des mortiers et des bétons ordinaires.

Cette étude vise à atteindre trois objectifs :

- Objectif écologique : réduire les boues de dragage dans la nature en préservant ainsi l'environnement et réduisant l'utilisation de ciment qui émet des gaz à effet de serre;
- Objectif technique : préparer des mortiers et bétons à base de boue de dragage avec une résistance à la compression intéressante;
- Objectif économique : substituer une partie du ciment par des boues de dragage traitées (matériau intéressant et peu coûteux).

## 4.2 PRESENTATION DU PLAN EXPERIMENTAL

La préparation d'un béton ou d'un mortier ordinaires de qualité remarquable avec des matériaux locaux, impose la réponse à deux questions :

- La première : « Serait-il possible d'obtenir un béton ou un mortier ordinaires en incluant une quantité de boue issus des opérations de dragage du barrage de K'sob en remplacement d'une quantité de ciment? » ;
- La deuxième : « Ce béton ou ce mortier résisterai-t-il aux acides et à l'absorption d'eau ? »

Pour répondre à ces deux questions, un processus de test approfondi est arrêté. La problématique sera donc de mettre en évidence l'effet des combinaisons de boue de 10, 15 et 20 % comme alternative au ciment sur le développement de la résistance mécanique et de la durabilité des bétons et mortiers ordinaires. En termes de durabilité, l'objectif était d'étudier la résistance à l'absorption d'eau et aux attaques acides ( $HCl$  et  $H_2SO_4$ ) de ces bétons et mortiers. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux associés aux bétons et mortiers de référence.

Les étapes du plan expérimental sont détaillées dans la figure 4.1.

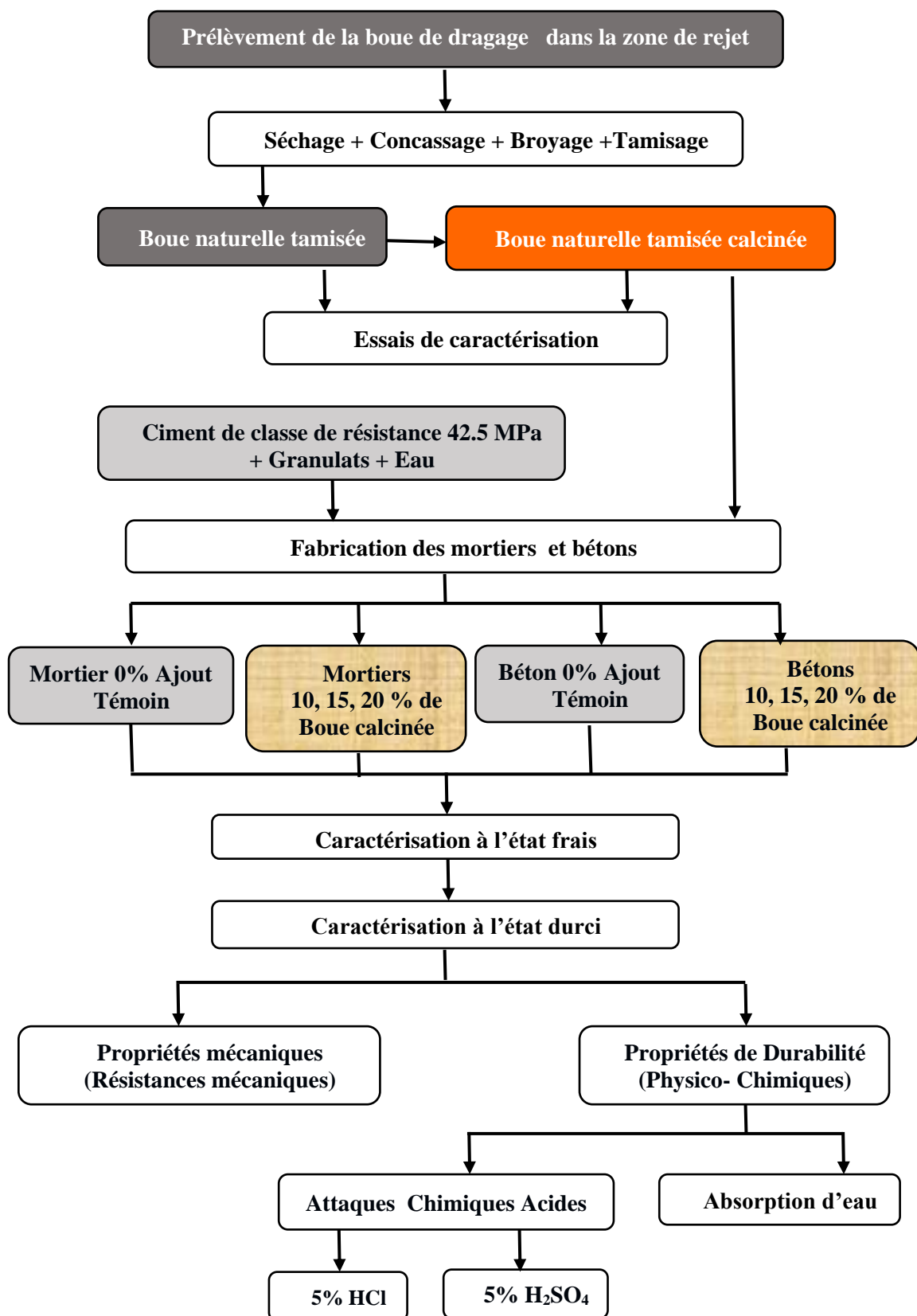


Figure 4.1. Organigramme du plan expérimental de l'étude

---

### 4.3 IDENTIFICATION DES MATERIAUX DE L'ETUDE

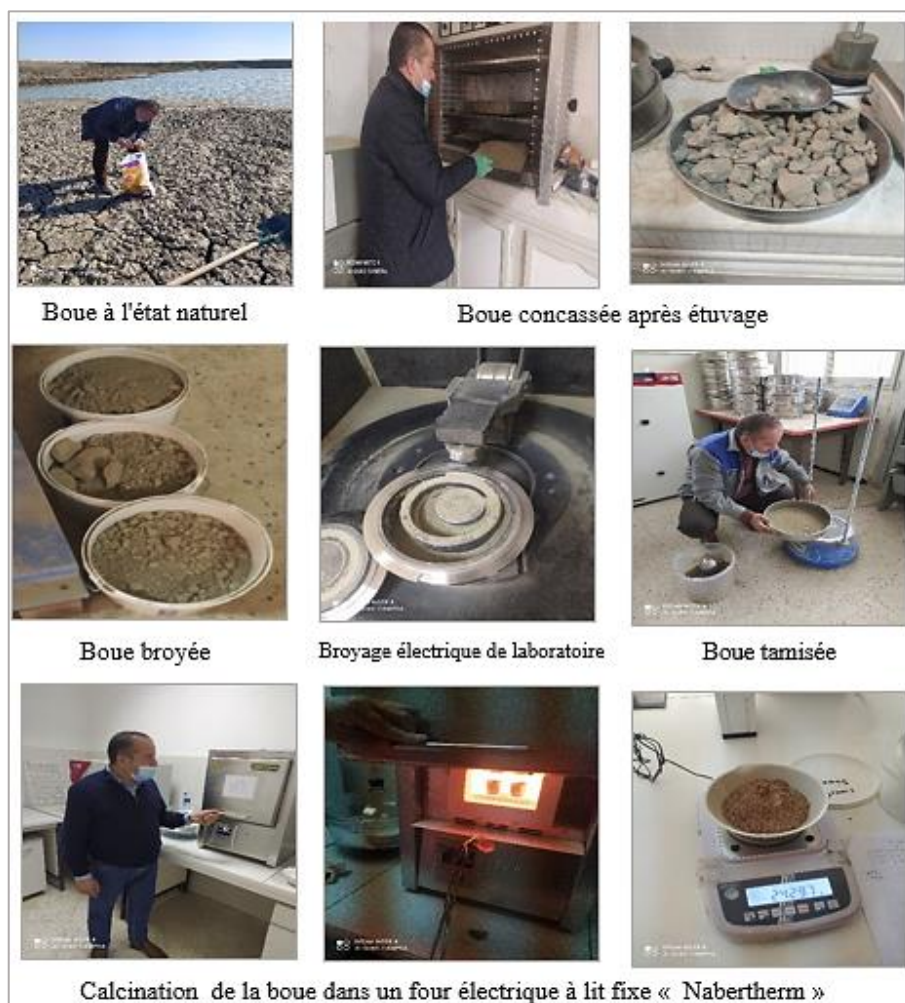
#### 4.3.1 Boue de dragage

Des échantillons de boue ont été prélevés à partir des boues de dragage pompées en aval des bassins de décantation construits sur des terres non cultivées. Les sites de ces bassins de décantation, caractérisés par de faibles pentes et de faibles vitesses d'écoulement, représentent une surface importante dans le bassin versant du barrage. Les faibles pentes favorisent le tassement, réduisent la vitesse d'écoulement de l'eau, contrôlent la hauteur de la digue et limitent l'encombrement de l'ouvrage.

Les boues de dragage ont été temporairement stockées dans les bassins, avant d'être transportées vers une zone d'évacuation éloignée du bassin versant du barrage. Au total, six bassins de ce type étaient prévus pour le barrage de K'sob. Trois d'entre eux sont déjà opérationnels et les trois autres sont en construction. Le bassin le plus proche n'est qu'à 4 km du barrage.

La boue collectée a été adéquatement préparée selon les étapes suivantes (*Figure 4.2*) :

- La boue a été **séchée** pendant 12h dans une étuve à 80°C pour exclure toute présence éventuelle d'humidité et faciliter le broyage et le tamisage (*opération au niveau du laboratoire CTC de Constantine*);
- Pour faciliter le broyage, la boue a été **concassée** (*opération au niveau du laboratoire du CTC et celui de l'ENG Constantine*);
- Un **broyage** de la boue concassée à l'aide d'un broyage électrique de laboratoire (*opération au niveau de la cimenterie SCS d'Oum El Bouaghi*);
- Un **tamisage** par voie sèche de la boue broyée au tamis de 80 µm (*opération au niveau du laboratoire de l'ENG*);
- La boue préparée a été calcinée dans le cadre d'un traitement thermique dans un four électrique à lit fixe appelé Nabertherm (*laboratoire de la cimenterie SCS*). L'échantillon a été chauffé à la vitesse de 5°C/min à 600°C, puis maintenu constant pendant 5h (*vitesse réglée pour éviter les chocs thermiques*). Après le traitement, la couleur des boues est passée de la couleur verdâtre naturelle à la couleur rouge brique. La boue calcinée est stockée loin d'humidité et d'air.



**Figure 4.2.** Etapes de préparation de la boue

### 4.3.2 Ciment

Le ciment de la préparation du béton/mortier est le CEM I 42.5N de la cimenterie « SCS » située à Oum El Bouaghi, une région de l'Est Algérien. Sa densité est de 3,10 et sa surface spécifique est de 4 356 cm<sup>2</sup>/g.

### 4.3.3 Granulat

Les granulats calcaires utilisés proviennent de la carrière d'Ain Abid située à Constantine à l'Est du pays.

Les principaux composants sont : le sable 0/3 de densité absolue égale à 2,66 g/cm<sup>3</sup>, et des graviers 3/8, 8/15 et 15/25, dont les densités sont respectivement de 2,60, 2,61 et 2,64 g/cm<sup>3</sup>. Le sable des mortiers est normalisé.

#### 4.3.4 Formulations

Quatre mélanges de béton et de mortier ont été développés. Trois d'entre eux contiennent des proportions différentes de boues (10%, 15% et 20%), et le quatrième est l'échantillon témoin (*sans boue*).

La limite supérieure du taux de substitution des boues a été fixée à 20 %. Si le taux dépasse cette limite, le besoin en eau augmentera à cause de la porosité des grains de boues et, par conséquent, la plasticité peut atteindre le pourcentage limite, faisant en sorte que les matériaux cimentaires s'effritent et perdent toutes leurs valeurs. Les tableaux 4.1 et 4.2 donnent les compositions respectives des différents bétons et mortiers.

Les données qui ont servi dans les formulations de béton sont inspirées des normes européennes EN 206-A1 [46] et EN 13791 [68] (*Classe de « Rc » C25/30, résistance caractéristique à la compression à 28 jours = 25 MPa, Résistance caractéristique minimale à la compression sur site = 21 MPa*).

La consistance désirée pour un béton plastique de vibration courante, évaluée par référence à l'affaissement au cône est entre 6 et 9 cm.

**Tableau 4.1.** Formulation des mortiers

	<b>MB0</b>	<b>MB10</b>	<b>MB15</b>	<b>MB20</b>
<b>Ciment (g)</b>	450	400	382,5	360
<b>Boue calcinée (g)</b>	0	45	67,5	90
<b>Sable normalisé (g)</b>	1350	1350	1350	1350
<b>Eau (g)</b>	225	225	225	225
<b>E/ (C+B) (%)</b>	0,5	0,5	0,5	0,5

**Tableau 4.2.** Formulation des bétons

	<b>BB0</b>	<b>BB10</b>	<b>BB15</b>	<b>BB20</b>
<b>Ciment (kg/m<sup>3</sup>)</b>	400	360	340	320
<b>Boue calcinée (kg/m<sup>3</sup>)</b>	0	40	60	80
<b>Sable (kg/m<sup>3</sup>)</b>	665	665	665	665
<b>Gravier 3/8 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	216	216	216	216
<b>Gravier 8/15 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	400	400	400	400
<b>Gravier 15/25 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	551	551	551	551
<b>Eau (kg/m<sup>3</sup>)</b>	205	210	214	219
<b>E/ (C+B) (%)</b>	0,513	0,525	0,535	0,547

## 4.4 METHODES EXPERIMENTALES

### 4.4.1 Essais sur la boue de dragage

De multiples essais ont été réalisés pour caractériser les échantillons de boue naturelle et calcinée.

#### 4.4.1.1 L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée par sédimentométrie d'après la norme franco-européenne NF EN ISO 17892-4 [69], visant à fixer la distribution pondérale de la taille des particules. La sédimentométrie a pour but l'analyse granulométrique des sols cohérents dont le diamètre des grains est inférieur à 0,080 mm (*0,100 mm*). Cet essai a été réalisé au Laboratoire LTP/Est de la ville de Constantine.

#### 4.4.1.2 La diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons « X » est une méthode couramment appliquée pour déterminer la nature et la structure des produits cristallins. En effet, cette méthode n'est applicable qu'aux milieux cristallins (*roches, cristaux, minéraux, pigments, argiles, etc.*) qui présentent les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire l'arrangement cyclique, ordonné et dans le réseau tridimensionnel des atomes constitutifs.

La « DRX » permet de reconnaître des produits de même composition chimique brute, mais de cristallinité différente, par exemple de distinguer différentes silices (*toutes de même formule brute  $SiO_2$  : quartz, cristobalite, etc.*) ou différentes alumines (*ont toutes la même formule  $Al_2O_3$  : corindon / alumine  $\alpha, \gamma, \delta, \theta...$* ).

Les diffractogrammes aux rayons « X » des deux échantillons ont été enregistrés sur le diffractomètre à rayons X PANalytical XPert MPD. La longueur d'onde des rayons « X » utilisée dans cette étude était le rayonnement K-Alpha Cu (*Matériau d'anode*) avec K-Alpha1 = 1 54060Å et K-Alpha2 = 1 54443Å. Les données ont été collectées pour chaque échantillon sur des valeurs de  $2\theta$  allant de 9,1744° à 68,5807°. Ce test a été réalisé à la plateforme scientifique et technologique (*PFT-ST*) et à l'institut de physique de l'Université des Frères Mentouri de Constantine.

#### 4.4.1.3 La fluorescence aux rayons X (XRF)

La « XRF » est une technique d'analyse élémentaire qui révèle les atomes composant l'échantillon et leurs proportions. Cependant, elle ne reflète pas l'organisation de ces atomes ni leur forme chimique. Cette technique d'analyse élémentaire globale permet d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent l'échantillon. Cet essai a été effectué au niveau des laboratoires des cimenteries « SCS » et « SCAEK » (Figure 4.3). La spectrométrie par fluorescence « X » est une technique analytique non destructive. Les données de Fluorescence X (XRF) ont été générées sur spectromètre Thermo Scientific ARL 9900.



**Figure 4.3.** Etapes de l'essai XRF sur la boue

#### 4.4.1.4 Classification des sols

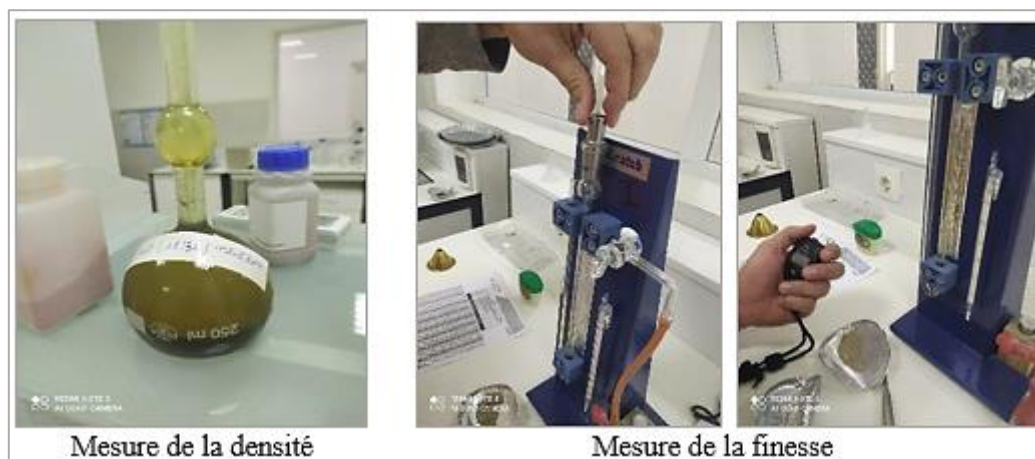
Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état par son indice de consistance. La classification des sols des échantillons de boues est basée sur la norme franco-européenne NF EN ISO 17892-12 [70]. Les limites d'Atterberg ont été déterminées au laboratoire LTP/Est de Constantine.

#### 4.4.1.5 Densité et finesse

La densité des grains solides de chaque échantillon de boue a été estimée suivant la norme franco-européenne NF EN ISO 17892-3 [71] (*Figure 4.4*).

La surface spécifique (*finesse Blaine*) de chaque échantillon a été mesurée selon la norme EN 196-6 [72], en utilisant la méthode de perméabilité à l'air Blaine (*Figure 4.4*).

Ces tests sont réalisés au niveau du laboratoire de la cimenterie « SCS ».



**Figure 4.4.** Dispositif de mesure de densité et finesse de la boue

#### 4.4.2 Essais sur pâtes

Les temps de début et de fin, ainsi que la durée de la prise des pâtes ont été déterminés selon la norme européenne EN 196-3+A1 [47] (*Figure 4.5*). Cet essai est réalisé au laboratoire de la cimenterie « SCS ».

Le tableau 4.3 indique les proportions de ciment, de boue et d'eau utilisées pour préparer les pâtes.

**Tableau 4.3.** Dosage des constituants de la pâte de ciment

	PS0	PS10	PS15	PS20
<b>Boue (%)</b>	0	10	15	20
<b>Ciment (g)</b>	500	450	425	400
<b>Boue calcinée (g)</b>	0	50	75	100
<b>Eau (ml)</b>	130	140	136	144
	131	138	142	147
				149
				7
<b>N° Test</b>	1	3	5	8
	2	4	6	9



**Figure 4.5.** Dispositif de mesure du temps de début et de fin de prise

#### 4.4.3 Essais sur mortiers

Conformément à la norme européenne EN 196-1-2016 [73], des essais de mortier ont été réalisés sur des mortiers normalisés des formulations du tableau 4.11. Les deux échantillons d'éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  des mortiers témoin et à base de boues (10, 15 et 20%) ont été soumis à des tests de flexion puis de compression à 2, 7 et 28 jours (Figure 4.6). Les essais sont réalisés dans le laboratoire de la cimenterie « Sigus /Oum El Bouaghi »

Compte tenu du pouvoir d'action de la boue calcinée, l'indice d'activité de résistance a été déterminé par des essais de compression mécanique sur des échantillons de mortier de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . L'indice peut être calculé par le rapport ( $IAR = A/B \cdot 100$ ) entre la « Rc » d'un mortier avec p% de boue ajoutée (A) et la « Rc » d'un mortier témoin avec 100% de ciment (B) au même âge.

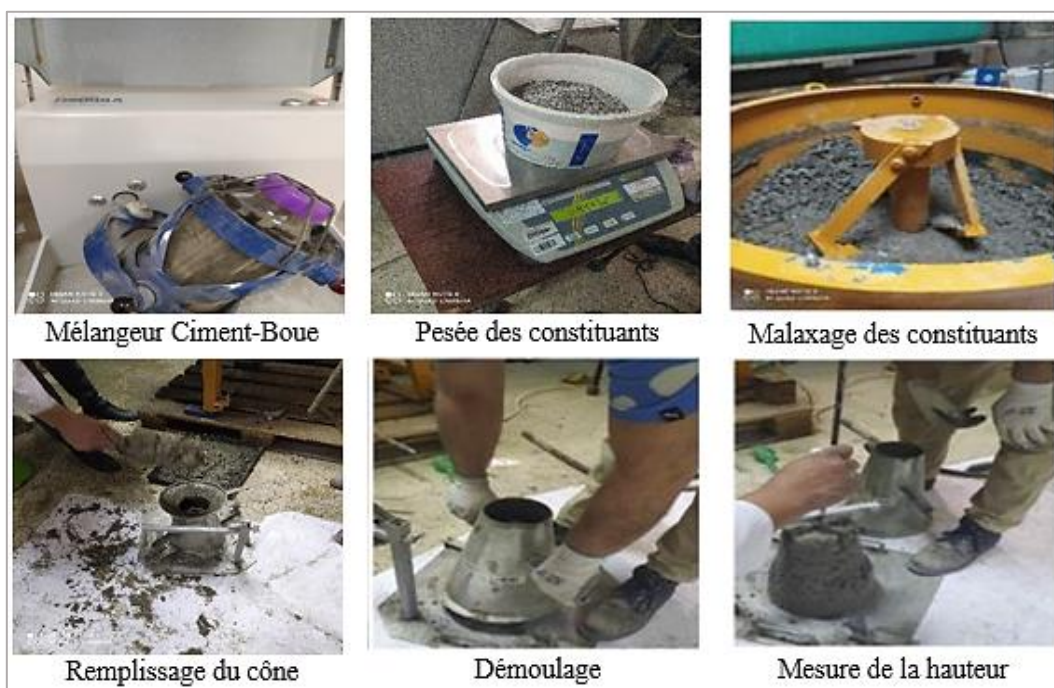


**Figure 4.6.** Dispositif d'essais sur mortier

#### 4.4.4 Essais sur bétons

Pour avoir un mélange homogène de ciment et boue, nous avons utilisé un agitateur type « *Turbula* ». Le récipient mélangeur fonctionne selon un mouvement tridimensionnel dont le produit est soumis à un mouvement pulsé rythmique changeant continuellement. Les mélanges obtenus en un minimum de temps sont d'excellente qualité (*Figure 4.7*).

L'affaissement des bétons est déterminé selon à la norme EN 12350-2 [74], en se basant sur celui requis par la formulation du béton (6 à 9 cm) indiquée ci-dessus (*Figure 4.7*).



**Figure 4.7.** Préparation du béton et dispositif de mesure de l'affaissement

Le béton est mis dans des éprouvettes cylindriques métalliques. Un total de 120 échantillons a été préparé pour les essais d'écrasement à différents âges (7, 14, 28, 60 et 90 jours). Chaque mélange est composé de six échantillons (0, 10, 15 et 20% de boue), qui ont tous été conservés dans de l'eau à 20°C. Les échantillons ont été serrés à l'aide d'une aiguille vibrante de 25 mm de diamètre. La fréquence de vibration dépend de la valeur de l'affaissement du cône d'Abrams et de l'angularité des granulats (*Figure 4.8*). La formulation du béton est spécifiée dans le tableau 4.2 ci-dessus.



**Figure 4.8.** Confection et conservation des éprouvettes de béton

Le béton durci a été soumis à des essais destructifs et non destructifs. Des échantillons cylindriques, d'un diamètre de 16 cm et d'une hauteur de 32 cm, sont testés respectivement à 7, 14, 28, 60 et 90 jours.

Conformément à la norme NF EN 12504-4 [75], un test d'auscultation sonore a été réalisé sur chaque échantillon. Durant l'essai, la méthode de transmission directe a été employée pour s'assurer que la direction de mesure du temps de transit est perpendiculaire au sens de la confection. Cet essai a été mis en œuvre pour mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores entre deux points du béton (*Figure 4.9*).

La vitesse ultrasonore  $V_u$  (m/s) peut être déduite de la distance émetteur-récepteur « L » (*longueur de l'échantillon*), et du temps de propagation « T ( $\mu s$ ) » des ondes ultrasonores dans le béton :

$$V_u = \frac{L}{T}$$

La vitesse ultrasonore obtenue est la moyenne des mesures sur la surface de l'échantillon. Elle permet par des formules empiriques de déterminer la résistance présumée «  $R_{cu}$  » (*MPa*) du béton en fonction du module d'élasticité dynamique, «  $E_d$  » [76] :

$$R_{cu} = 16.7 \times \frac{E_d}{\exp. 122500}$$

où,  $E_d$  peut être calculé par :

$$E_d = V^2 \times \frac{\gamma}{g} \times \frac{(1 + \mu_d)(1 - 2 \mu_d)}{(1 - \mu_d)}$$

où,  $\mu_d$  est le coefficient de Poisson dynamique (0,25 pour le béton jeune ; 0,20 pour le béton de plus de 28 jours) ;  $\gamma$  ( $\text{kg/m}^3$ ) est la masse volumique du béton (la moyenne de tous les échantillons dont le volume a été mesuré et pesé sur une balance électronique) ;  $g$  ( $\text{m/s}^2$ ) est l'accélération de la pesanteur.

Ensuite, les essais de dureté au rebond (*scléromètre*) réalisés selon la NF EN 12504-2 [77] sur tous les échantillons. Enfin, des essais destructifs sont réalisés par écrasement de l'échantillon surfacé selon la NF EN 12390-3 [78] (*Figure 4.9*).

Tous les essais sur bétons sont réalisés au niveau des laboratoires du CTC de Constantine, de la cimenterie de Sigus et du LTP/Est.



**Figure 4.9.** Essais réalisés sur béton durci

## 4.5 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

### 4.5.1 Résultats des essais sur la boue de dragage

#### 4.5.1.1 Résultats physiques et géotechniques

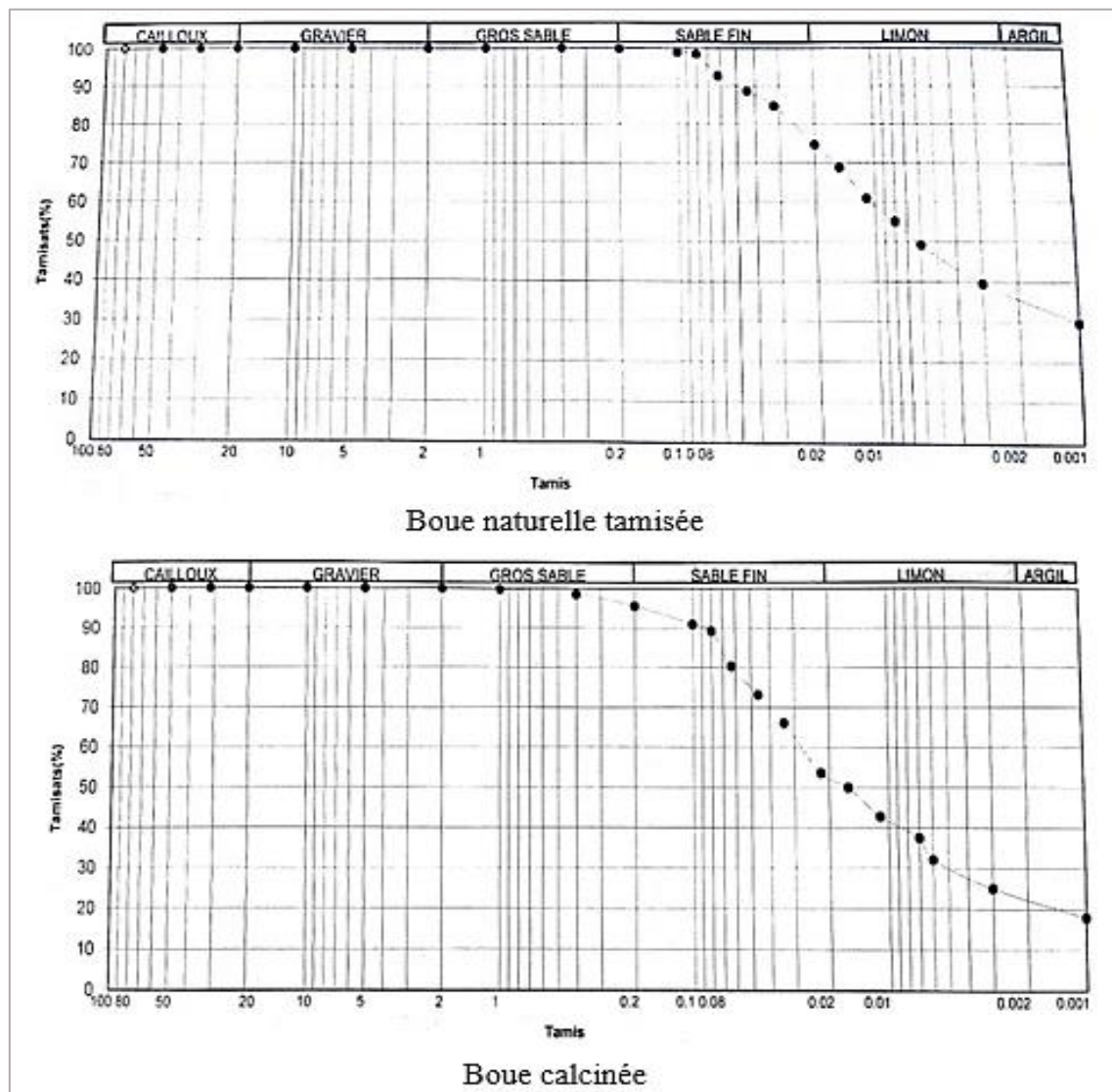
Le tableau 4.4 montre les propriétés physiques et géotechniques des échantillons préparés.

**Tableau 4.4.** Propriétés physiques et géotechniques de la boue de dragage du barrage de K'sob

	$\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$\omega$ (%)	$W_L$ (%)	$W_P$ (%)	$I_P$ (%)	Éléments à Poids < 80 $\mu\text{m}$ (%)
<b>Boue naturelle tamisée</b>	2,65	60	39,11	20,44	18,67	98
<b>Boue calcinée</b>	2,67	50	37,28	19,11	18,17	89

Les échantillons ont été dénommés selon la classification L.C.P.C. [79]. Plus de 50% des éléments en poids étaient inférieurs à  $80\mu\text{m}$ . Les courbes granulométriques (*Figures 4.10*) montrent que la boue du barrage de K'sob est un sol fin.

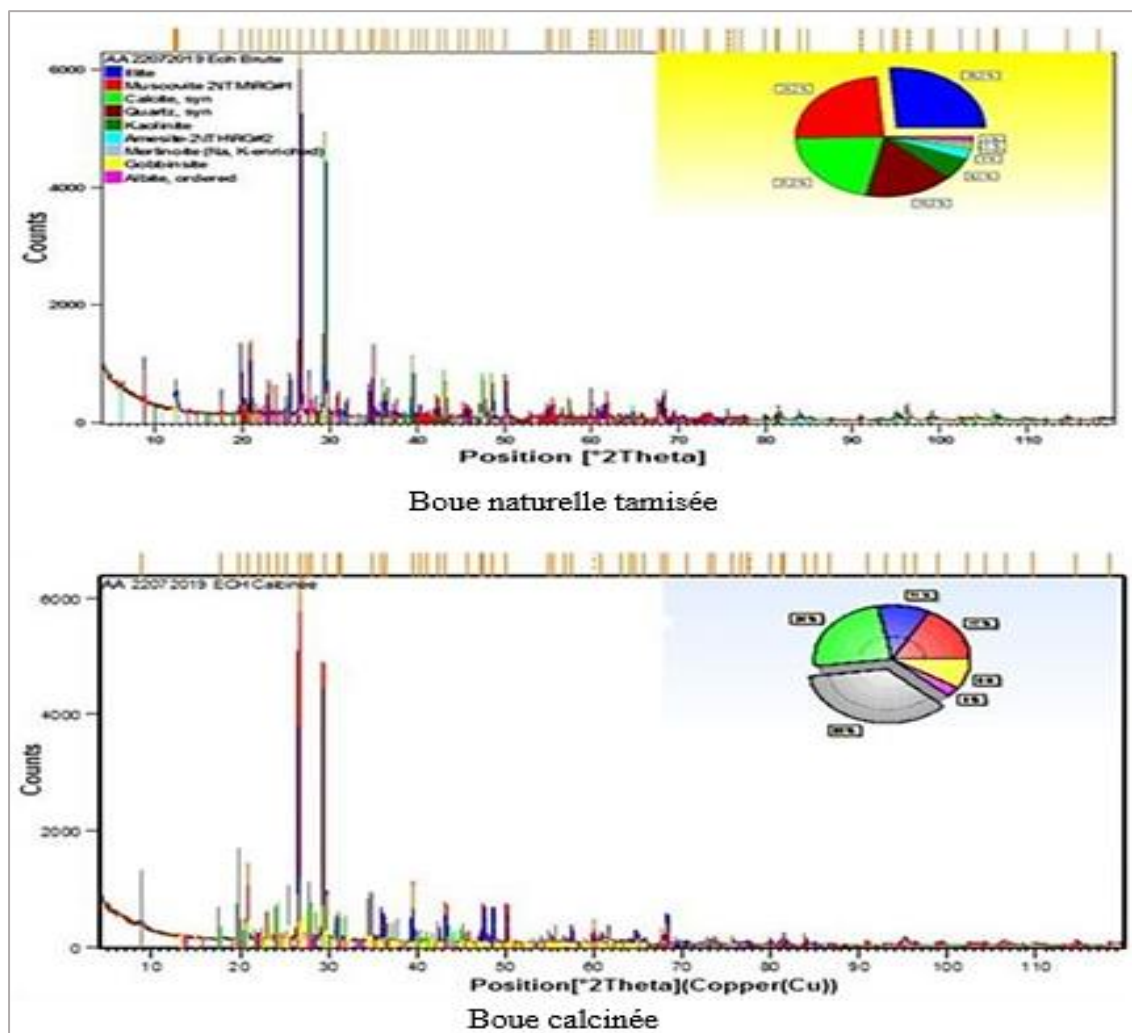
Les sols fins sont généralement classés avec les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Selon ce critère, la boue draguée du barrage de K'sob est un sol argileux, qui présente une plasticité dépendant de l'eau, et une limite de liquidité de la teneur en eau équivalente à 25 coups du test d'Atterberg [80].



**Figure 4.10.** Courbes granulométriques de la boue de dragage du barrage K'sob

#### 4.5.1.2 Résultats minéralogiques

Les diffractogrammes des rayons « X » de la boue de dragage naturelle et calcinée du barrage de K'sob sont représentés sur la figure 4.11.



**Figure 4.11.** Diffractogrammes des rayons X de la boue de dragage du barrage K'sob

Les deux échantillons sont essentiellement constitués de quartz, de la calcite, d'illite et de la muscovite. Trois types de phyllosilicates coexistent dans la boue de dragage. Le composant principal est l'illite et la muscovite (*environ 50%*), suivi par la kaolinite.

Le quartz est l'élément principal des fractions limon et argile (*Tableau 4.5*). Selon Chikouche [33, 54] et Bibi et al [41], les boues peuvent être activées après avoir été chauffées à différents taux à plus de 550°C, et la déshydroxylation serait assez complète à 600°C.

**Tableau 4.5.** Composition minéralogique de la boue de dragage du barrage de K'sob

Oxydes	Composition minéralogiques (%)	
	Boue naturelle tamisée	Boue calcinée
Quartz	16,2	18
Calcite	21,2	15
Kaolinite	6,1	/
Illite	26,3	32
Muscovite	24,2	28
Amesite	3	/
Merlinoite	1	4
Gobbinsite	1	/
Albite	1	3

#### 4.5.1.3 Résultats chimiques

Les analyses chimiques visent à quantifier la composition de la boue d'oxyde et à confirmer les résultats de l'analyse minéralogique (*Tableau 4.6*).

**Tableau 4.6.** Résultats de l'analyse chimique de la boue de dragage du barrage de K'sob

Oxydes	Formule chimique	Composition chimique (%)	
		Boue naturelle tamisée	Boue calcinée
Silice	SiO <sub>2</sub>	37,67	39,54
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,71	9,96
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,80	4,09
Chaux	CaO	20,83	22,77
Magnésie:	MgO	3,60	4,00
Trioxyde de soufre	SO <sub>3</sub>	0,07	0,09
Oxyde de potassium	K <sub>2</sub> O	1,24	1,31
Oxyde de sodium	Na <sub>2</sub> O	0,37	0,40
Chlorure	Cl	0,010	0,011
Perte au Feu	PAF	22,12	15,05
Sulfate	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Néant	Néant

Il est à noter que le traitement thermique a modifié la composition chimique de la boue : on a enregistré davantage de silice et de chaux libre, avec une diminution significative de la perte au feu. La silice et l'alumine représentent une grande partie de la boue.

La présence de ces deux oxydes confirme la minéralogie de la boue, et l'existence de kaolinite et d'illite, deux minéraux argileux composés principalement de feuillets d'alumine et de silice. Le taux de perte au feu est remarquable, comme en témoignent la teneur en matière organique de 22,12 à 15,05 %, et le pourcentage de chaux de 20,83 à 22,77 %.

L'activation thermique de la boue permet aux structures minérales, qui sont dans un état naturellement stable, de se transformer en structures amorphes par le réarrangement de la structure de l'hydroxyde. Elle permet également aux minéraux argileux de réagir avec l'eau, formant des composés qui durcissent à des températures ordinaires. Pour atteindre la température cible, la vitesse de traitement doit être ajustée afin d'améliorer l'activité chimique de l'alumine et de la silice.

## 4.5.2 Résultats des essais sur pâtes

### 4.5.2.1 Consistance

Le tableau 4.7 présente les résultats des tests de consistance de pâtes de ciment.

**Tableau 4.7.** Mesures de la consistance

Pâte	PB0		PB10		PB15		PB20		
Essai N °	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Eau (ml)	130	131	140	138	136	142	144	147	149
E/(C+B) (%)	0,26	0,262	0,28	0,276	0,272	0,284	0,288	0,294	0,298
d (mm)	9*	7	3,5*	7	12*	8	15*	9*	8

(\*) test échoué

Pour les distances de  $d > 8\text{mm}$ , il n'y a pas assez d'eau; Pour  $d < 4\text{mm}$  : il y a trop d'eau. Dans les deux cas, la pâte en question a été jetée, tandis que l'équipement était nettoyé et séché, et recommencé avec un nouveau volume d'eau. Ce processus a été répété jusqu'à l'obtention des valeurs dont la pâte est de consistance normale.

Comme le montre le tableau 4.7, le remplacement de 10 à 20 % de ciment par la boue de dragage calcinée a augmenté le volume d'eau essentiel pour avoir une consistance du liant normale. Cela est dû à la grande surface spécifique du mélange (*ciment-boue*). Par conséquent, il y a un fort besoin de molécules d'eau pour mouiller toute la surface.

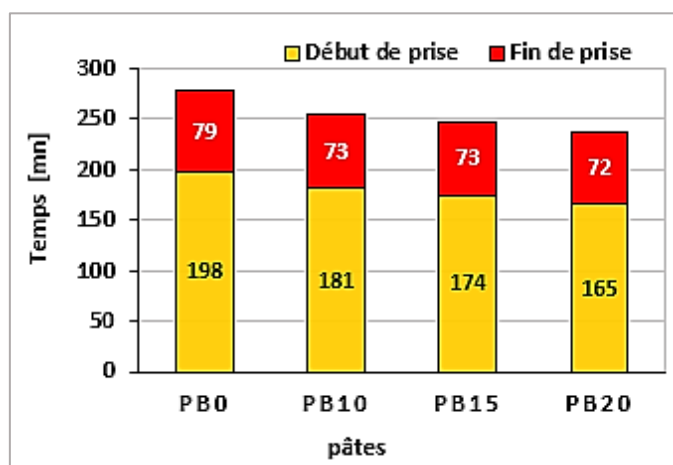
Le tableau 4.8 donne les résultats de surface spécifique de Blaine du mélange mixte (*ciment-boue*), mettant en évidence la surface spécifique potentiellement importante du mélange et son effet sur la teneur en eau.

**Tableau 4.8.** Surface spécifique Blaine des mélanges ciment-boue calcinée ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

Ciment + 10% Boue	Ciment + 15% Boue	Ciment+ 20% Boue
5058	5509	5776

#### 4.5.2.2 Temps de prise

Le temps de début et de fin de prise des pâtes de ciment est donné dans la figure 4.12



**Figure 4.12.** Influence de la teneur en boue sur le temps de prise des différents mélanges de pâtes.

Comme le montre la figure 4.12, le temps de prise a légèrement diminué lorsque le rapport « boue/ciment » a augmenté. Cela est dû au fait que la substitution du ciment par la boue affecte les minéraux du ciment, en particulier le  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$ , qui sont responsables de la précipitation du gel de silicate de calcium hydraté (*CSH*) ainsi que du début de la prise. La réduction du temps de prise est proportionnelle à l'augmentation de la finesse du mélange « ciment-boue » (*Tableau 4.8*). Cela signifie que la cinétique d'hydratation du liant s'accélère à mesure que la finesse augmente. Lorsque jusqu'à 20% du ciment a été remplacé par la boue, le temps de prise des pâtes n'a pas été significativement affecté. Cela souligne l'importance de valoriser et d'utiliser cette boue de dragage comme accélérateur de prise du béton par temps froid. Ces résultats d'essais ont été confirmés par une confrontation avec des travaux antérieurs qui donnent des résultats très cohérents [55, 56, 58].

### 4.5.3 Résultats des essais sur mortiers

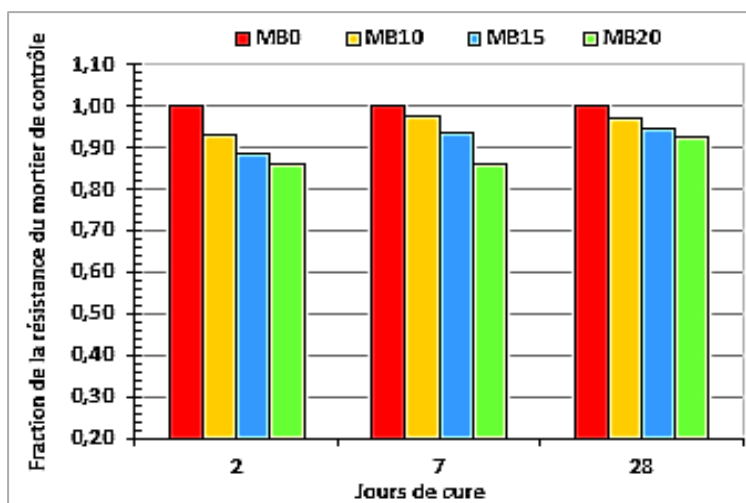
#### 4.5.3.1 Résistance à la flexion

Le tableau 4.9 présente les résistances à la flexion (MPa) des mortiers de contrôle MBO en fonction du temps.

**Tableau 4.9.** Résistance à la flexion du mortier de contrôle MBO (MPa)

2 jrs	7 jrs	28 jrs
$4,52^{\pm 0,04}$	$6,76^{\pm 0,05}$	$7,80^{\pm 0,06}$

Pour être plus précis, la figure 4.13 compare la résistance du mortier à base de boue avec la résistance du mortier témoin (0 % de boue) à différents âges.



**Figure 4.13.** Évolution de la fraction des résistances à la flexion des mortiers à base de boue par rapport au mortier témoin (MB0).

Pour les mortiers avec 10, 15 et 20% de ciment remplacé par la boue calcinée, la résistance évolue de la même manière que celle du mortier témoin. Par rapport au mortier témoin, la résistance à la flexion des différents mortiers a augmenté avec l'âge et n'a pas diminué. À 28 jours, la perte de résistance n'a pas dépassée 7 % à un taux de remplacement de 20 %, par rapport au mortier témoin. La résistance de MB20 est devenue perceptible et a pu vaincre la résistance du mortier témoin après 28 jours. Notons que l'essai de mortier à la flexion vise à caractériser les matériaux et à juger de leur qualité d'utilisation. Ces résultats sont en accords avec les observations faites par A. Semcha [22,57].

### 4.5.3.1 Résistance à la compression

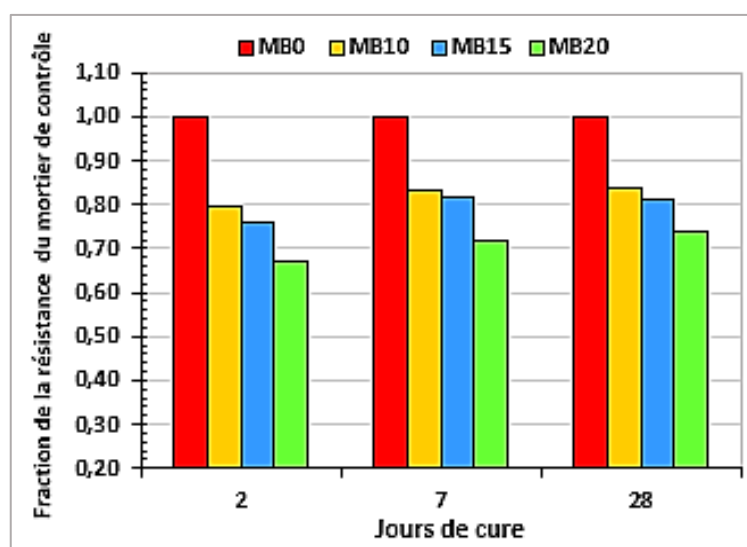
Le tableau 4.10 présente les « Rc » (MPa) des mortiers en fonction du temps.

**Tableau 4.10.** Résistance à la compression des mortiers (MPa)

Ages	MB0	MB10	MB15	MB20
à 2 jours	22,65 $\pm$ 0.18	18,09 $\pm$ 0.18	17,25 $\pm$ 0.13	15,25 $\pm$ 0.06
à 7 jours	48,96 $\pm$ 0.39	40,72 $\pm$ 0.42	39,91 $\pm$ 0.29	35,23 $\pm$ 0.15
à 28 jours	63,98 $\pm$ 0.51	53,76 $\pm$ 0.55	51,88 $\pm$ 0.38	47,36 $\pm$ 0.20

La « Rc » de tous les mortiers augmentait constamment avec l'âge, sans diminuer. Faible résistance à la compression sur de courtes périodes (2 et 7 jours), mais dépasse les exigences de la norme EN 1971 [40] qui préconise une résistance nominale à la compression de 42,5 MPa à 28 jours pour les mortiers.

La figure 4.14 compare la « Rc » d'un mortier à base de boue avec la « Rc » d'un mortier témoin (0% boue) à différents âges.



**Figure 4.14.** Évolution de la fraction des résistances à la compression des mortiers à base de boue par rapport au mortier témoin (MB0).

Comme le montre la figure 4.14, la « Rc » du mortier est réduite avec l'accroissement du taux de substitution. Des études antérieures ont également montré des résultats similaires [22, 57].

Les mortiers contenant 15 et 20 % de boue étaient susceptibles de perdre 18 à 28 % de leur résistance après 7 jours, et 19 à 26 % à 28 jours, par rapport aux mortiers témoins.

Durant les premiers jours, la résistance a évolué moins rapidement pour les mortiers avec la boue calcinée. Ainsi, la vitesse d'hydratation était plus faible que celle des ciments Portland. Cette réduction de la « Rc » est due au remplacement du ciment par la boue de dragage. Une autre raison est le manque de silice réactive. Parmi les phyllosilicates détectés (*illite*, *muscovite* et *kaolinite*), seul un très faible pourcentage (6%) de kaolinite se transforme en metakaolinite, ce qui empêche l'alimentation des mortiers en nouveaux sites de dissolution dans la solution. En conséquence, les silicates en solution interagissent avec la portlandite pour former des aluminates silico-hydratés, et l'alumine interagit même pour produire des aluminates de calcium hydratés appelés CASH.

Comme le montre le tableau 4.11, l'activité de résistance n'était pas mauvaise. Les indices d'activité de résistance à 28 jours des trois mélanges de mortier (10, 15 et 20% de ciment remplacé par la boue) variaient de 74 à 84%. Plusieurs normes, dont la norme ASTM C618 [81], conviennent qu'un matériau est actif lorsque l'indice à 28 jours est supérieur à 75 %.

**Tableau 4.11.** Résistance à la compression des mortiers (MPa) et indice d'activité de résistance à 28 jours

	<b>MB0</b>	<b>MB10</b>	<b>MB15</b>	<b>MB20</b>
<b>Rc</b>	63,98	53,76	51,88	47,36
<b>IAR</b>	/	0,84	0,81	0,74

Ces résultats expérimentaux ont été confirmés par une confrontation avec des travaux antérieurs qui ont donné des résultats très cohérents [55, 56, 57].

#### 4.5.4 Résultats des essais sur bétons

##### 4.5.4.1 Mesure de l'affaissement

L'essai d'affaissement du béton est effectué dans le but de vérifier la consistance du béton avec la maniabilité spécifiée dans le béton plastique avec un affaissement au cône de 6 à 9 cm. Les résultats sont repris dans le tableau 4.12.

Pour obtenir la consistance souhaitée du béton plastique (6 à 9 cm), nous avons ajouté de l'eau de gâchage à différents volumes en fonction du pourcentage de boue calcinée remplaçant le ciment.

**Tableau 4.12.** Affaissement en fonction du volume d'eau de gâchage et du pourcentage de boue calcinée pour un béton ordinaire.

Béton	BB0	BB10	BB15	BB20
Volume Eau (kg/m <sup>3</sup> )	205	205	210	205
Affaissement du cône (cm)	6	4*	8	3.5*
		(*) test échoué		

Grâce à sa capacité d'absorption, la boue traitée et à différents mélanges détournera une partie de l'eau employée pour hydrater le ciment. Cette eau ne contribue pas à la fluidité qui affecte la maniabilité du béton et les réactions d'hydratation.

#### 4.5.4.2 Résultats des essais destructifs et non destructifs

Le tableau 4.13 présente les valeurs moyennes des paramètres de calcul de la « Rc » des échantillons à différents âges.

**Tableau 4.13.** Valeurs moyennes des paramètres de calcul des résistances à la compression des échantillons.

Age (Jours)	Béton	Paramètres de calcul				
		P (kg)	$\gamma$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Vu (km/s)	Ed (kg/cm <sup>2</sup> )	Is
7	BB0	15,08	2,34	4,42	389 411,93	27
	BB10	14,84	2,31	4,28	359 377,27	26
	BB15	15,08	2,34	4,21	352 881,43	26
	BB20	15,03	2,33	4,13	339 080,19	25
14	BB0	15,31	2,38	4,62	430 862,74	29
	BB10	15,17	2,36	4,42	391 323,17	27
	BB15	14,93	2,32	4,41	383 039,61	27
	BB20	15,18	2,36	4,28	366 831,86	26
28	BB0	15,47	2,40	4,78	464 804,81	31
	BB10	15,11	2,35	4,48	400 069,09	29
	BB15	15,04	2,33	4,54	409 360,41	28
	BB20	14,94	2,32	4,44	388 938,25	28
60	BB0	15,16	2,35	4,86	508 556,29	32
	BB10	15,11	2,35	4,42	420 044,47	30
	BB15	15,13	2,35	4,50	436 983,10	29
	BB20	15,10	2,35	4,54	443 630,19	30
90	BB0	15,31	2,38	4,86	515 138,44	33
	BB10	15,21	2,36	4,62	463 453,90	31
	BB15	15,29	2,37	4,63	467 659,98	31
	BB20	15,15	2,35	4,69	474 973,87	32

---

Ces paramètres ont été mesurés lors des essais destructifs et non destructifs. Les paramètres spécifiques sont définis comme suit :

- **P** : poids de l'échantillon ;  $\gamma$  : masse volumique du béton ; **Vu** : vitesse ultrasonique ; **Ed** : module d'élasticité dynamique donné par la formule du paragraphe 4.4 ; **Is** : indice sclérométrique.

A noter que:

- La vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le béton dépend du module d'élasticité et de la masse volumique du béton;
- La vitesse sonique évolue en fonction du module d'élasticité dynamique et de la résistance à la compression. Cette relation est la base logique de l'estimation de la résistance à la compression du béton à partir des mesures de la vitesse des ondes;
- La vitesse des ondes ultrasonores à travers le béton est le résultat du temps de propagation de l'onde à travers le liant dur (*ciment-boue*) et le granulat.

Comme le montre le tableau 4.13, les masses volumiques de béton diminuent généralement avec l'augmentation du pourcentage de boue, par rapport au béton témoin. La raison possible réside dans le caractère légèrement expansif des particules, qui gonflent en compactant les particules de ciment, provoquant une augmentation du volume. Bibi et al. [41] sont arrivés aux mêmes conclusions (*les particules ont un caractère légèrement expansif*), lorsqu'ils ont étudié des argiles boueuses et des argiles gréseuses de la région de M'sila.

Encore, il ressort du tableau 4.13 que la vitesse des ondes ultrasonores traversant le béton augmente avec l'âge de tous les types de béton. La vitesse à 7 et 14 jours de cure a diminué avec le pourcentage croissant de boues traitées dans tous les types de béton. Les bétons BB10 et BB15 ont connu une légère diminution de la vitesse à 60 jours, et une augmentation rapide à 90 jours. Ce phénomène peut être expliqué par le fait suivant : pendant le processus de durcissement, la structure du béton devient plus dense en raison de la réaction d'hydratation.

Pour le béton BB10, la croissance rapide des vitesses ultrasonores au cours des premiers jours résulte du remplissage des pores par les produits d'hydratation et de la modification du rapport « vide/solide ». Pendant ce temps, les bétons de ciment et boue de dragage (*BB10, BB15, BB20*) développent dans les premiers jours une autre propriété compensant la perte de production de l'hydrate : l'effet de remplissage de la boue de dragage [54].

On peut donc conclure que la vitesse de propagation des ondes peut dépendre des changements de comportement de la pâte de liant durcie. Dans le ciment CEM I, la proximité entre les particules de ciment facilite l'hydratation, et accélère la réduction des vides. Dans les ciments mélangés à des sédiments de dragage (*boue*), les particules sont plus éloignées, ce qui oblige les produits d'hydratation à remplir davantage les pores. En d'autres termes, ces ciments ont tendance à avoir un rapport « vide/solide » élevé. Les vides sont responsables de l'accélération du mouvement des ondes. Par conséquent, la réduction des vitesses ultrasonores est proportionnelle au taux de substitution.

L'indice sclérométrique « **Is** » met en évidence la dureté de la surface du béton. La hauteur de rebond d'une masse projetée à une certaine vitesse sur la surface du béton augmente la résistance de la surface du béton. Plus la dureté est élevée, plus le béton est résistant. Les valeurs de dureté enregistrées pour les différents mélanges de béton étaient proches dans chaque période de cure.

Le tableau 4.14 présente les résistances moyennes à la compression mesurées par l'essai de compression, l'essai ultrasonique et l'essai au scléromètre.

**Tableau 4.14.** Résistance moyenne à la compression des bétons (MPa)

Ages	Bétons					
	BB0			BB10		
	Rcé	Rcu	Rcs	Rcé	Rcu	Rcs
à 7 jours	18,30	19,53	22,84	17,75	18,02	21,13
à 14 jours	21,30	21,62	26,13	19,90	19,63	23,63
à 28 jours	25,90	23,37	29,71	22,70	20,06	26,28
à 60 jours	28,55	25,66	31,56	23,15	21,07	28,12
à 90 jours	30,10	25,84	34,03	26,40	23,24	31,01
Ages	Bétons					
	BB15			BB20		
	Rcé	Rcu	Rcs	Rcé	Rcu	Rcs
à 7 jours	17,10	17,70	20,95	15,15	17,01	19,79
à 14 jours	19,60	19,21	22,50	17,80	18,40	21,67
à 28 jours	21,13	20,47	25,48	19,20	19,51	23,92
à 60 jours	22,84	21,93	27,19	22,70	22,25	28,57
à 90 jours	25,20	23,45	30,25	24,98	23,82	32,00

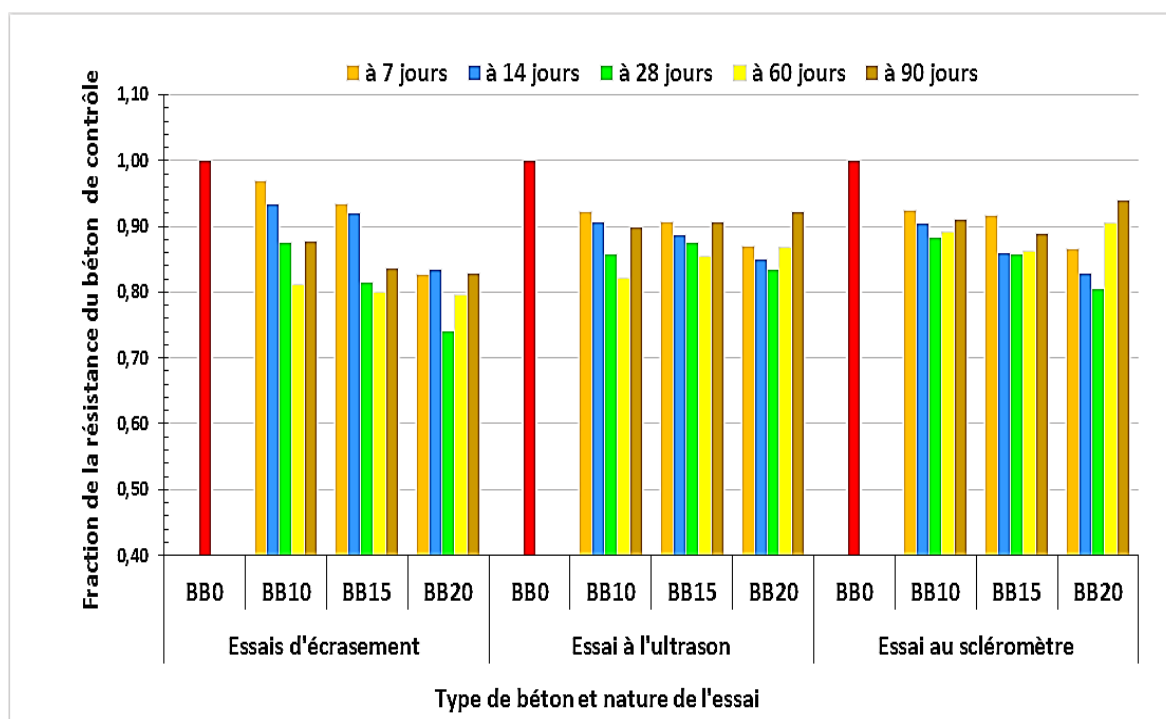
Rcé : « Rc » par écrasement ; Rcu : « Rc » par ultrason ; Rcs : « Rc » au scléromètre

Comme le montre le tableau 4.14, les résistances mécaniques de tous les bétons soumis à des essais destructifs et non destructifs ont augmenté régulièrement avec l'âge, sans aucune diminution. Des « Rc » à 28 jours sont généralement admises, toutes supérieures à la valeur caractéristique minimale (21 MPa) du béton sur site [46].

À 90 jours, le béton témoin a atteint une bonne performance en compression comme un béton ordinaire : sa « Rc » n'est jamais tombée en dessous de 25 MPa. Dans certains cas, la résistance a même dépassé 30 MPa. La résistance mécanique du béton avec un taux de substitution de 10% était évidemment la meilleure de tous les bétons à base de boue. Ce béton a atteint une « Rc » allant jusqu'à 30 MPa à 90 jours. Les autres bétons avec des teneurs en boue de 15, et 20% ont également donné des résultats satisfaisants.

Ces résultats expérimentaux ont été confirmés par une confrontation aux travaux antérieurs qui donne des résultats très concordants [55, 56].

Pour mieux visualiser l'évolution de la « Rc », la résistance du béton à base de boue a été comparée à la résistance du béton témoin (0% de boues) à différents âges (Figure 4.15).



**Figure 4.15.** Évolution de la résistance à la compression du béton à base de boue par rapport au béton témoin BB0.

En effet, les bétons contenant 15 et 20% de boues ont atteint des performances mécaniques moyennes respectivement supérieures à 92 et 86% à 7 jours, et supérieures à 89 et 84% à 14 jours, par rapport au béton témoin. Il a également été noté que la résistance se développe généralement moins rapidement pour les bétons à base de boue calcinée dans les premiers jours, ce qui signifie que l'hydratation est plus lente dans ces bétons que dans les ciments Portland.

L'effet de la boue est devenu perceptible au-delà de 28 jours pour le BB20, et de 60 jours pour le BB10 et le BB15, car les résistances des bétons de boue calcinée se sont rapprochées de celles du béton témoin. A 90 jours, les bétons BB20 ont atteint des résistances d'environ 90% par rapport au béton témoin. Si l'âge de maturation dépasse 90 jours, il est très probable que la résistance des bétons préparés dépasse celle du béton témoin.

L'évolution de la résistance à la compression décrite ci-dessus s'explique par le pouvoir d'action de la boue calcinée, ainsi que par le fait suivant : les propriétés hydrauliques ne sont sensibles qu'aux âges les plus avancés; il est alors facile de fixer la chaux libérée par l'hydratation du ciment, en formant de nouveaux silicates de calcium hydratés qui contribuent à la résistance à la compression. Ces propriétés hydrauliques consistent en la création de composés hydratés stables, peu solubles dans l'eau, ayant une forte adhérence entre eux et avec les granulats. Ces composés augmentent progressivement la cohésion des mortiers et des pâtes à béton. De plus, les particules de boue calcinée, plus fines que les particules de ciment, favorisent l'hydratation du ciment et de boue, principalement par un processus physique, et produisent une matrice cohésive à structure dense.

#### 4.6 CONCLUSION DU CHAPITRE

Les objectifs de ce chapitre étaient de caractériser chimiquement, physiquement et minéralogiquement une boue extraite du barrage K'sob et à l'utiliser dans la fabrication de béton et de mortier ordinaires. L'effet d'une incorporation de 10, 15 et 20 % de boues comme substituts du ciment sur le développement de la résistance mécanique du béton et des mortiers ordinaires est bien documenté.

Une meilleure préparation et maîtrise des propriétés des particules de la boue sont essentielles à la progression de la filière « **béton-mortier** » à valeur ajoutée pour la valorisation de cette boue. Plusieurs essais ont été effectués.

Sur le comportement des matériaux cimentaires sous l'effet de l'éco-ciment proposé à base de sédiments de dragage, on a pu avoir les analyses et les conclusions suivantes :

- L'incorporation de la boue traitée augmente la demande en eau, assurant la consistance normale de la pâte;
- L'ajout de la boue calcinée au mélange de béton accélère la prise, facilitant le bétonnage par temps froid;
- Les résistances à la flexion des mortiers MB20 (*20 % de boue calcinée*) à 28 jours étaient notables, car elles se rapprochaient des résistances du mortier témoin. La substitution du ciment par la boue calcinée peut être utilisée pour produire des éléments fragiles. La « Rc » du mortier à 28 jours et avec la boue calcinée à 10, 15 et 20% dépasse les exigences de la norme applicable.
- Pendant l'hydratation, les boues calcinées ont bien réagi avec le ciment, et ont atteint certaines performances mécaniques dans le béton et le mortier. La boue est donc un matériau réactif et non un matériau inerte, d'autant plus que son indice d'activité de résistance dépasse 75% à 28 jours.
- Aucun changement remarquable n'a été observé dans les résistances mécaniques des échantillons de béton avec 10 et 15% de boue calcinée par rapport au béton témoin qu'elles soient données par des essais destructifs ou non destructifs. Par contre, les « Rc » ont augmenté à moyen terme pour le béton contenant 20 % de boue calcinée, dépassant ainsi 83 % du béton témoin. Les performances à long terme des bétons préparés sont prometteuses.

# Chapitre 5.

## Etude de Durabilité

*L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les indicateurs de durabilité des mortiers et des bétons à base de boue de dragage traitée du barrage K'sob en remplacement partiel du ciment. Les tests ont concerné des mortiers et des bétons dont les matériaux et les formulations sont identiques à ceux présentés dans le chapitre précédent. Les indicateurs de durabilité ont été étudiés en termes de capacité d'absorption d'eau par remontée capillaire et d'attaque externe aux acides (HCl : acide chlorhydrique et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : acide sulfurique). Un soin particulier est apporté à la description des méthodes utilisées pour déterminer les indicateurs de durabilité dits généraux*

### **Plan du chapitre**

---

5.1 INTRODUCTION.....	118
5.2 NOTION DE DURABILITE DES BETONS.....	118
5.3 METHODES DE MESURE.....	121
5.4 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....	126
5.5 CONCLUSION DU CHAPITRE.....	136

## 5.1 INTRODUCTION

Pendant longtemps, les critères de durabilité du béton ont été liés aux performances mécaniques requises à 28 jours, sans tenir compte de l'impact de l'environnement dans lequel se trouvait l'ouvrage. En effet, de nombreux phénomènes peuvent affecter la durabilité du béton. La majorité des problèmes de durabilité sont causés par la pénétration d'eau et d'agents agressifs dans le béton.

En effet, la durabilité du béton est souvent liée à sa capacité à empêcher les agents agressifs de pénétrer à travers sa porosité. Certains milieux sont agressifs pour le béton, ils peuvent provoquer des attaques acides importantes.

Bien que nous ayons présenté dans le chapitre précédent les propriétés mécaniques choisies comme critère d'équivalence entre les différents mortiers et bétons à base de ciment et de boue de dragage, les propriétés de durabilité du mortier et du béton sont également très importantes.

Cette étude consiste à estimer la durabilité des mortiers et des bétons ordinaires. Il s'agit d'une évaluation des indicateurs de durabilité des mortiers et des bétons à partir d'une boue traitée issue de l'opération de dragage du barrage K'sob, en remplacement partiel du ciment. Des indicateurs de durabilité ont été étudiés pour l'absorption d'eau par remontée capillaire et d'attaque externe aux acides ( $HCl$  : acide chlorhydrique et  $H_2SO_4$  : acide sulfurique).

## 5.2 NOTION DE DURABILITE DES BETONS

La durabilité désigne un objectif de qualité qui oriente à la fois la conception de la structure et du matériau ainsi que sa mise en œuvre. Il faut donc tenir compte de la durabilité du matériau et de la structure. Quant au matériau, nous dirions qu'il sera durable s'il est conservé le plus longtemps possible, tant dans son intégrité que dans les propriétés requises. Cependant, ces objectifs doivent être atteints au moindre coût [82].

Le béton est un matériau poreux multiphasique, composé d'un squelette granulaire, d'un liant hydraté (*silicate, alumine*) et d'une phase liquide basique interstitielle. Vu sa porosité, il est le siège permanent des échanges internes entre la phase solide hydratée et la phase liquide, ainsi que des échanges avec le milieu extérieur. Le béton durable est un béton solide (à *faible porosité*) dont les ingrédients de qualité ont été bien sélectionnés selon la norme.

### 5.2.1 Facteurs influençant la durabilité

La durabilité peut être affectée par un certain nombre d'actions physiques ou chimiques néfastes liées à l'écoulement d'un fluide (*liquide ou gaz*) à travers le béton.

Le processus de dégradation chimique du béton consiste à une décalcification progressive du béton au fil du temps lorsqu'il est exposé à des environnements agressifs. En général lorsqu'une attaque chimique de la pâte de ciment hydrate survient, la décalcification de la matrice se produit. Les mécanismes de décalcification induisent la dissolution des cristaux d'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et la dissolution partielle des C-S-H (*la phase liante*).

La majorité des problèmes de durabilité sont causés par la pénétration d'eau et d'agents agressifs dans le béton. Cette pénétration est rendue possible par trois modes de transport distincts opérant de manière combinée. Ces trois modes de transport sont la perméabilité, l'absorption et la diffusion. Par conséquent, la durabilité du béton est liée à sa capacité de résister à la pénétration d'eau et d'agents agressifs à l'intérieur du matériau par trois mécanismes d'écoulement possibles.

#### 5.2.1.1 Absorption du béton

L'absorption d'eau peut être décrite comme la capacité des matériaux poreux (*comme le béton*) à absorber et à transmettre l'eau par capillarité [83]. En pénétrant dans le béton, l'eau transporte des agents agressifs (*tels que le chlorure*) qui peuvent affecter la durabilité de la structure. Cette mesure est utilisée pour caractériser la tendance des matériaux poreux à absorber et transmettre l'eau selon la capillarité. Le contrôle de cet aspect de « porosité » est généralement examiné sur béton durci en mesurant l'absorption d'eau par capillarité.

#### 5.2.1.2 Les attaques chimiques des bétons

Les agressions chimiques que peuvent rencontrer les substrats à base de ciment sont très diverses. Du fait de leur porosité et de la composition chimique de la solution interstitielle, des échanges de matière peuvent se produire et sont à l'origine du développement des composants solides de la pâte de ciment. Ces phénomènes de transport et de réaction ont lieu à l'échelle de la microstructure de la pâte de ciment [84]. Les causes de dégradation des matériaux cimentaires sont multiples, parmi lesquelles, les attaques par le dioxyde de carbone, par les sulfates et par les acides.

Nous nous intéressons qu'aux attaques par les acides qui ont trait à notre étude.

---

- **Conséquence de l'attaque acide** : elle conduit à la dissolution des phases hydratées de la pâte de ciment et induit la formation de sels solubles de Ca, Al et Fe ainsi que la dissolution de silice. Le degré d'agressivité dépend de la concentration de l'acide mais surtout de la valeur du pH. L'attaque affecte principalement la pâte de ciment, mais lorsqu'elle est attaquée par un acide fort, l'agrégat dissous dans l'acide est également dissous. Les phases hydratées de la pâte de ciment sont dissoutes au contact des acides et une zone de lessivage se forme, à partir de laquelle les produits de dissolution (*sels dissous de Ca, Al et Fe*) sont lessivés et emportés.

Les conséquences de l'attaque du béton par les solutions acides peuvent conduire à une augmentation de la porosité due au lessivage des hydrates de la pâte de ciment, éventuellement liée au développement de microfissures, le cas échéant, avec des composés à extension de forme comme l'ettringite secondaire. De ce fait, la modification de la microstructure du béton entraîne une modification des performances mécaniques dans la zone d'interaction entre le milieu agressif et le béton, par rapport aux propriétés d'origine du matériau : diminution de la résistance du béton à la compression et à la traction, réduire le module d'Young et augmenter le fluage [85].

- **Sources des acides** : Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (*la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé*). Par conséquent, il peut y avoir une certaine réaction avec des solutions acides telles que les pluies acides, l'eau naturelle contenant du dioxyde de carbone, les eaux usées, l'eau des industries alimentaires ou des industries contenant des acides organiques, l'eau contenant des acides minéraux, mais aussi l'eau pure.

- **Mécanisme d'attaque des acides**

En général, on constate qu'un acide est plus nocif car les sels de calcium formés sont plus solubles. De nombreux acides inorganiques (*par exemple, l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique*) forment des composés facilement solubles avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (*hydroxyde de calcium*) présents dans les pâtes de ciment dur.

En effet, les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium. Ils attaquent également d'autres composants de la pâte de ciment qui durcit, formant des sels de calcium, d'aluminium ou de fer, ainsi que de l'acide silicique colloïdal (*gel de silice*). [86].

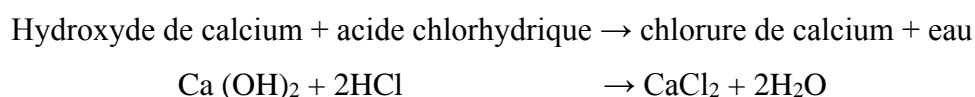
Le choix se porte sur deux acides, sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) et chlorhydrique ( $\text{HCl}$ ) qui sont connus comme les menaces naturelles les plus agressives.

Ces acides, qui peuvent provenir aussi bien des sites industriels que des activités urbaines, sont les dégradants les plus sérieux du béton [87].

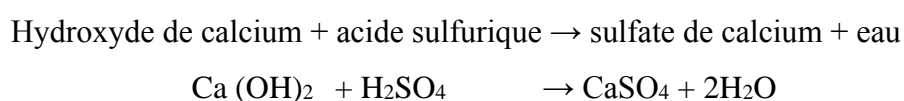
L'acide sulfurique «  $\text{H}_2\text{SO}_4$  » est majoritairement trouvé dans les pluies acides [88].

Pour l'acide chlorhydrique «  $\text{HCl}$  », les ions chlorures sont contenus dans l'eau de mer et dans les sels de déverglaçage.

- Le  $\text{HCl}$  est très agressif, car le sel correspondant est aisément soluble dans l'eau, la réaction entre l'acide chlorhydrique et la portlandite est décrite comme suit :



- Le  $\text{H}_2\text{SO}_4$  proportionnellement inoffensif, et dont le sulfate de calcium est pratiquement insoluble dans l'eau. Mais les ions sulfates jouent dans ce cas un rôle néfaste pour le béton (*gonflement dû aux sulfates*) :



Ainsi, le  $\text{H}_2\text{SO}_4$  réagit avec la chaux libre du béton en formant du gypse. Cette réaction est associée à un accroissement du volume du béton. L'action la plus nuisible est la réaction entre l'aluminate de calcium et les cristaux formés à partir de gypse.

### 5.3 METHODES DE MESURE

Huit formules entre mortiers et bétons ont été étudiées pour caractériser la durabilité (*absorption d'eau et attaques acides*). Nous avons adopté les mêmes matériaux et les mêmes formulations des mortiers et des bétons du chapitre précédent.

#### 5.3.1 Méthode de mesure de l'absorption d'eau

Nous avons conduit nos essais, conformément à la méthode proposée dans le guide AFPC-AFREM « **Durabilité des bétons** » [89]. À chaque échéance de mesure ( $t$ ), le coefficient d'absorption capillaire est donné par la formule ci-après :

$$C_t = \frac{M_t - M_0}{A}$$

Où :

$C_t$  : Coefficient d'absorption à l'échéance  $t$  ( $kg/m^2$ ),

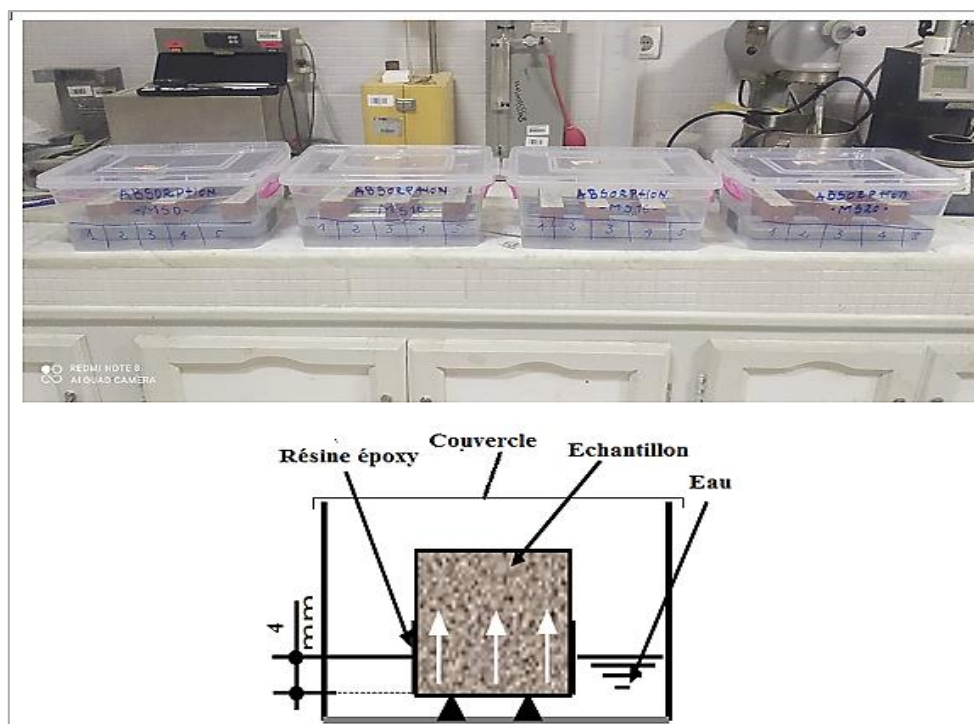
$A$  et  $M$  : Section ( $m^2$ ) et Masse initiale ( $kg$ ) de l'éprouvette,

$M_t$  : Masse à une échéance  $t$  ( $kg$ ),

### 5.3.1.1 Mesure de l'absorption dans les mortiers

Des éprouvettes (*prismatiques 4x4x16 cm*) sont confectionnées et démoulées après 24 heures. Par la suite une partie est conservée dans l'eau à 20° C pendant 28 jours pour un premier essai et l'autre à 90 jours pour un deuxième essai. Sécher l'échantillon à 105° pendant 3 jours au point de la masse sèche constante (*variation masse < à 0.1%*). Avant le test, une période de maintien de 15 jours à 23°C, pendant laquelle l'échantillon a été placé dans un récipient hermétique, a permis à l'humidité de s'équilibrer dans l'échantillon. Les surfaces latérales de chaque éprouvette sont enduites par deux couches de résine époxy pendant la phase de refroidissement ce qui oblige l'eau à suivre un chemin uniaxial et évite l'évaporation par ces surfaces identiques. L'essai consiste à déposer la face non induite des éprouvettes sur deux appuis collés sur le fond d'un bac rempli d'eau à une hauteur de  $4 \pm 1$  mm de la base de l'éprouvette. Durant toute la période de l'essai, le niveau d'eau est maintenu constant. Un couvercle est placé sur le bac pendant l'essai pour empêcher le mouvement de l'air autour du corps d'épreuve (*Figure 5.1*). La masse d'eau absorbée est mesurée en pesant de suite l'échantillon

La surveillance a été effectuée périodiquement pendant 24 heures aux intervalles recommandés dans le guide. La masse à l'échéance «  $t$  » est mesurée après 15 mn, 30 mn, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, et 24 h d'absorption sur 3 échantillons. La seule précaution à prendre est d'enlever tout film d'eau restant sur la partie inférieure de l'échantillon avant chaque pesée avec une éponge humide. La quantité d'eau absorbée après 1 heure par unité de surface est retenue comme approximation.



**Figure 5.1.** Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire sur mortier

### 5.3.1.2 Mesure de l'absorption dans les bétons

La méthode d'essai permet la mesure du taux d'absorption d'eau par aspiration capillaire à l'intérieur de l'échantillon en béton. Les échantillons utilisés sont des éprouvettes cylindriques de 11 cm de diamètre et 5 cm de hauteur obtenues par sciage d'échantillons cylindriques de 11x22 cm (*Figure 5.2*). Ils ont été conservés dans l'eau à 20 °C durant 28 jours pour chaque type de béton. Le préconditionnement consiste à les sécher à 80°C jusqu'à ce que leur masse soit stable (*changement de masse inférieur à 0,1% à température ambiante*).

Période d'attente de 15 jours à 23°C dans un récipient hermétique pour équilibrer l'humidité de l'échantillon. L'évaporation de l'eau sur la surface latérale de l'échantillon est empêchée par l'application d'une résine pendant le refroidissement. Après, les éprouvettes sont posées sur leurs faces sciées sur une couche en gravier saturée d'eau, permettant la perméabilité. Ensuite, on pèse les spécimens à 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h et 24 h d'absorption sur trois éprouvettes.



**Figure 5.2.** Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire sur béton

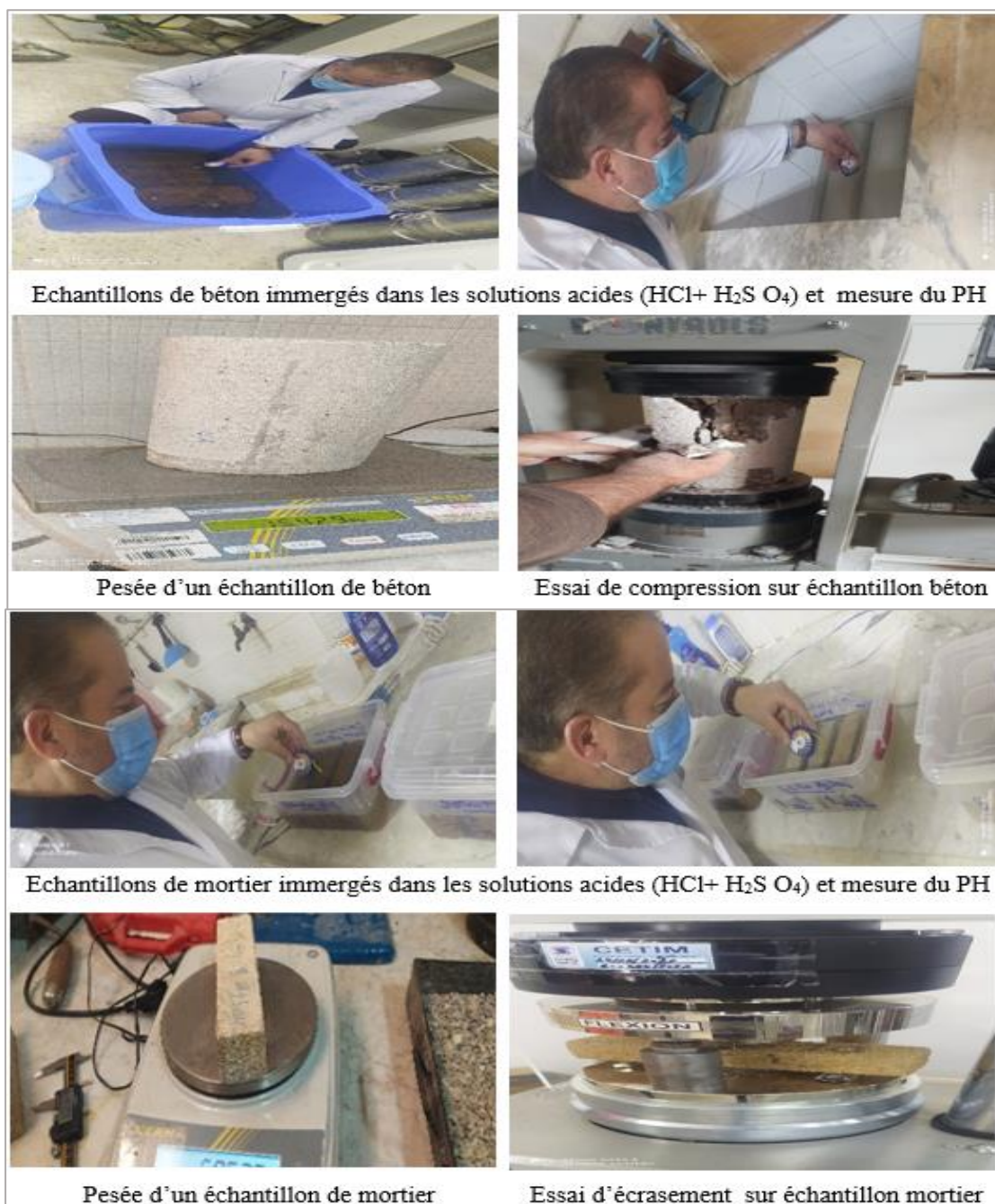
### 5.3.2 Méthode de mesure de la résistance aux attaques acides

Les tests de résistance aux attaques acides comprennent le suivi de la croissance de masse et de la résistance mécanique et chimique des échantillons immergés dans une solution saturée d'acide (5% *en volume*). Les solutions acides utilisées sont fabriquées par la société Bactchim M.Z.K avec une pureté de 95-97% pour le  $H_2SO_4$  et 37% pour le HCl.

L'immersion dans des solutions acides ( $HCl$ ,  $H_2SO_4$ ) est réalisé pour évaluer la résistance de différentes formulations de mortier et de béton. Les échantillons testés sont de forme prismatiques 4x4x16 cm pour les mortiers et cylindriques 16x32 cm pour les bétons. Deux échantillons de trois éprouvettes pour chaque mélange (*mortier et béton*) sont utilisés par formulation. Après 24 h, on démoulé les éprouvettes confectionnées pour les conserver à l'eau saturée en chaux durant 28 jours à  $20 \pm 2^\circ C$ , Cela avant l'épreuve d'essai.

Au moment souhaité pour s'assurer de l'élimination de tout excès d'eau sur la surface de l'échantillon, ce dernier est retiré de l'eau et laissé durant 30 mn dans une atmosphère de  $23^\circ C$ . Avant immersion dans la solution acide, on détermine la masse initiale ( $M_0$ ) de l'échantillon [90]. Deux solutions séparées d'acides (*chlorhydrique et sulfurique*) de concentration initiale 5 % en volume sont préparées dans un contenant résistant aux acides et arrangées dans un endroit de  $23^\circ C$ . Ensuite, les specimens ont été placées avec un espacement de 2 cm entre eux et recouverts de la solution acide d'environ 2 cm (ASTM C 267) [91]. Le contrôle du pH de la solution acide est fait grâce à une lecture sur un papier pH, tous les deux jours pendant la durée d'immersion des échantillons.

La date où l'on a enregistré que le pH devienne basique, on procède à la correction de la solution acide. Les solutions devront avoir un pH toujours inférieur à 7. Le pH maximal enregistré était de 3 et 5 respectivement pour le  $H_2SO_4$  et le  $HCl$ . La résistance des spécimens immergés dans une solution acide est estimée physiquement par la mesure de la perte de masse du spécimen (*changement de masse*), la résistance en compression et enfin par un examen visuelle. La figure 5.3 illustre certaines étapes de la méthode de mesure.



**Figure 5.3.** Etapes de l'essai de mesure de la résistance aux attaques acides

- **Variation de masse**

L'échantillon a été nettoyé 3 fois à l'eau douce en enlevant la couche altérée, ensuite laissé à l'air durant 30 minutes puis pesé. Ceci se fait subséquentement chaque semaine d'immersion durant 12 semaines pour le béton et 6 semaines pour le mortier.

La variation de masse de chaque specimen est déterminée par la formule :

$$V_M(\%) = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \times 100$$

Où :  $V_M$  : variation de la masse (%),

$M_0$  : masse du specimen avant attaque acide (g),

$M_i$  : masse à l'échéance (i) du specimen nettoyée et séchée après immersion (g).

- **Examen visuelle**

L'inspection visuelle d'échantillons de mortier et de béton ayant subi des attaques chimiques lors d'une exposition aux acides sulfurique et chlorhydrique sert à évaluer la détérioration des propriétés physiques et la dégradation de l'aspect externe de l'éprouvette, et de confirmer et comparer les résultats obtenus.

- **Essai de compression**

Les essais de compression par l'application d'une force axiale sont réalisés, conformément à la NF EN 206-1 [46], sur les éprouvettes de béton et de mortiers âgées de « j » jours moyennant une presse de béton et ce jusqu'à la rupture.

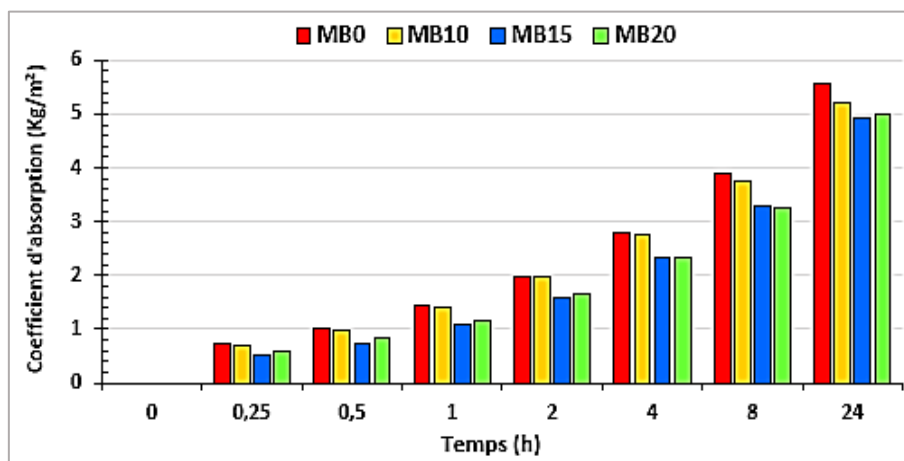
## 5.4 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

### 5.4.1 Résultats de mesure de l'absorption d'eau

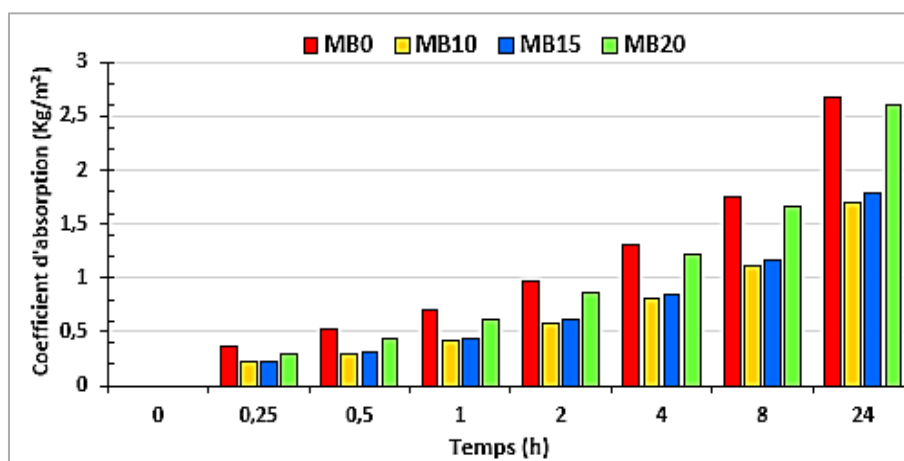
#### 5.4.1.1 Résultats de mesure de l'absorption dans les mortiers

L'évaluation de l'effet de la boue de dragage traitée sur l'absorption capillaire des mortiers effectuée après 28 jours et 90 jours de cure est représentée sous forme d'histogramme pour les quatre formulations de mortiers respectivement dans les figures 5.4 et 5.5.

Les résultats montrent l'effet positif jusqu'à 20% de boue dans la matrice cimentaire puisqu'ils enregistrent des coefficients d'absorption d'eau ( $Ab_{24h}$ ) faible en présence de boue de dragage par rapport au mélange témoin. Les mortiers contenant 10, 15 et 20 % de boue en substitution massive au ciment portland présentent des taux d'absorption faibles à plus faibles que les mortiers témoins et cela durant tout le temps de l'essai et pour les deux échéances de cure (28 et 90 jours).



**Figure 5.4.** Evolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction du temps, des différents mortiers après 28 jours de conservation.



**Figure 5.5.** Evolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction du temps, des différents mortiers après 90 jours de conservation.

Par exemple pour le mortier MB20, l'effet de l'incorporation de la boue sur cette réduction du taux d'absorption d'eau ( $Ab_{24h}$ ) est clairement observé. Il est d'environ 10 % et 3 % du mortier de référence pour un temps de cure de 28 et 90 jours, respectivement.

En effet, ces résultats permettent également d'apprécier l'effet bénéfique de la cure sur la détérioration de l'absorption d'eau et l'avancement du front d'imbibition capillaire du mortier. Effectivement, le traitement agit en augmentant les réactions d'hydratation qui conduisent à l'obstruction des capillaires existants [92].

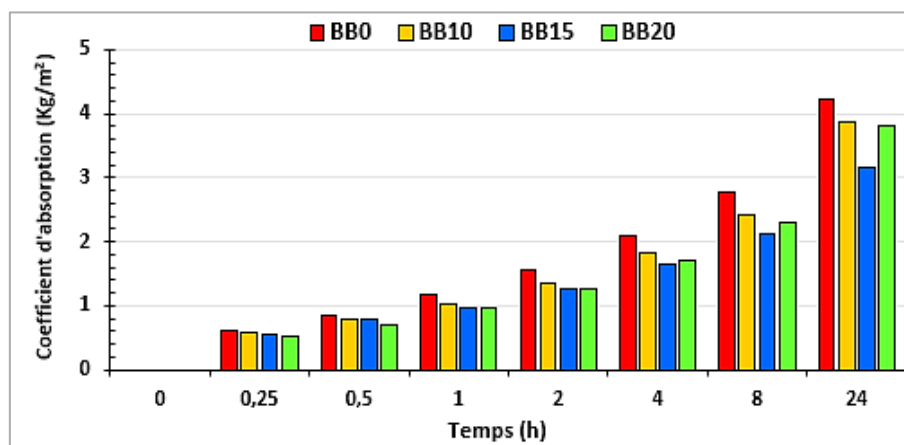
Le prolongement du temps de cure de 28 à 90 jours réduit le taux d'absorption du mortier MB20 d'environ 52 % et celui du MB15 d'environ 36 %.

Le mortier MB10 a présenté une diminution du taux d'absorption à 90 jours de cure de 33 % par rapport à celui de 28 jours. À 90 jours, les mortiers MB10 et MB15 enregistrent des coefficients d'absorption d'eau ( $Ab_{24h}$ ) plus faibles par rapport au mélange témoin et celui du MB20. La nature spécifique de la boue traitée, qui présente une bonne réactivité, a un rôle considérable dans les propriétés des chemins de percolation du matériau (*traversée lente par un liquide*) [93].

Donc, généralement le mortier témoin sans incorporation de boue calcinée a une absorption capillaire élevée que celle des mortiers à base de boue calcinée. Cela signifie que la réaction pouzzolanique qui en créant de nouveaux produits rend le réseau capillaire plus complexe et donc la pénétration d'eau plus lente et difficile [94].

#### 5.4.1.2 Résultats de mesure de l'absorption dans les bétons

L'essai d'absorption capillaire effectué à 28 jours de cure (*Figure 5.6*) révèle que les bétons des différents mélanges présentent des taux d'absorption inférieurs à ceux des mortiers pour la même durée de cure. Cependant, il est relevé la même cinétique d'évolution des taux d'absorption que les mortiers.



**Figure 5.6.** Evolution du coefficient d'absorption d'eau en fonction du temps, des différents bétons après 28 jours de conservation.

Le béton témoin présente le taux d'absorption d'eau ( $Ab_{24h}$ ) le plus élevé par rapport aux autres bétons à base de boue traitée. Par exemple, BB20 et BB15 ont des coefficients d'absorption de 3,80 et 3,16 respectivement, BB10 a un coefficient d'absorption de 3,87. Le béton de référence BBO a un coefficient d'absorption plus au moins grand que celui du béton contenant la boue traitée de l'ordre de 4,21.

Donc par rapport au BB20, c'est une diminution d'environ 10%. Le BB10 a une diminution de l'ordre de 8%.

Le même résultat est obtenu par O. Safer [95] qui a mené son étude sur la vase prélevée du barrage Chorfa. Il a remarqué que l'incorporation de 20% de vase dans le béton diminue le coefficient d'absorption de 22%.

Ce résultat est confirmé aussi par A. Aboutair [96] montrant que le mélange à base de 20% de vase du barrage de HAMIZ dans un béton a le coefficient d'absorption le plus petit par rapport aux autres mélanges et notamment le béton témoin sans ajouts. D'où il a conclu que plus la compacité est élevée plus l'absorption capillaire est faible donc la finesse des ajouts minéraux à une influence directe sur ce paramètre.

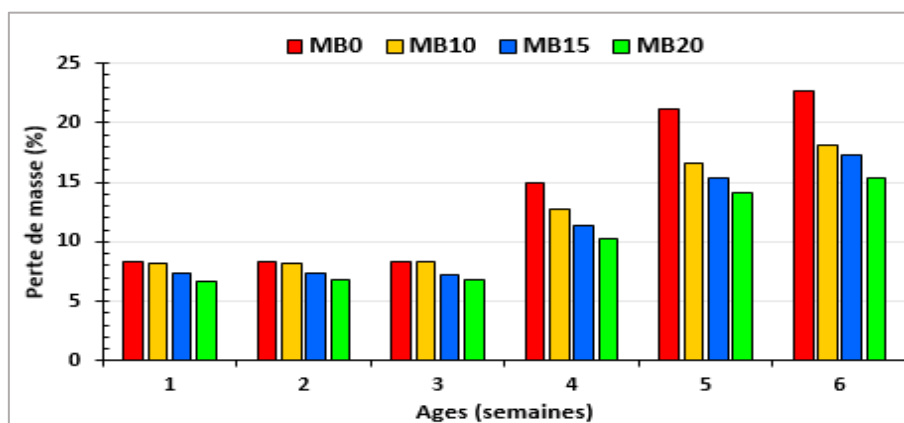
## 5.4.2 Résultats de mesure de la résistance aux attaques acides

### 5.4.2.1 Résultats de mesure des attaques acides dans les mortiers et les bétons

#### ▪ Variation de masse dans les mortiers

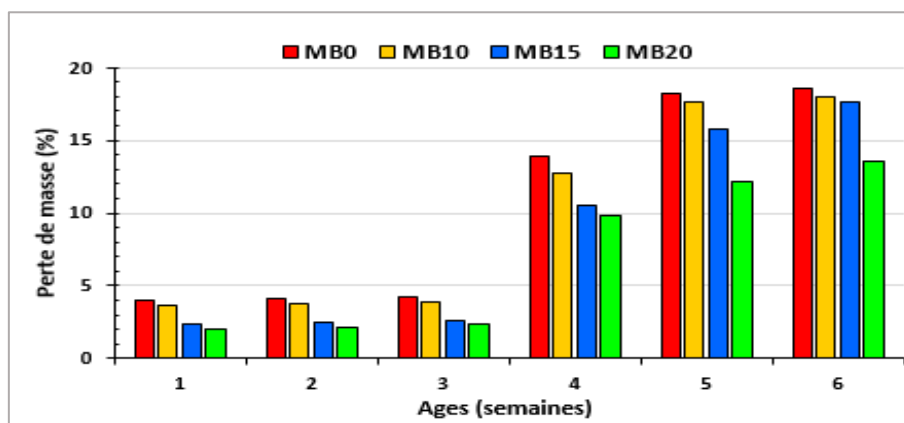
La Figures 5.7 et 5.8 montrent le suivi de la perte de masse dans le temps des échantillons de mortier immergés dans les solutions HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pendant six semaines.

Selon ces mêmes figures, nous constatons une perte de masse permanente des mortiers dans les deux solutions d'acides dont la sévérité augmente avec le temps.



**Figure 5.7.** Variation de perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion en 5% HCl.

Selon I. Mouallif et al. [97] cette perte de masse est due à un phénomène de lixiviation qui s'accroît avec le temps. Ce phénomène de lixiviation peut conduire à un accroissement de la porosité due à la lixiviation des hydrates de la pâte de ciment [85].



**Figure 5.8.** Variation de perte de masse des mortiers en fonction de la période d'immersion en 5%  $H_2SO_4$ .

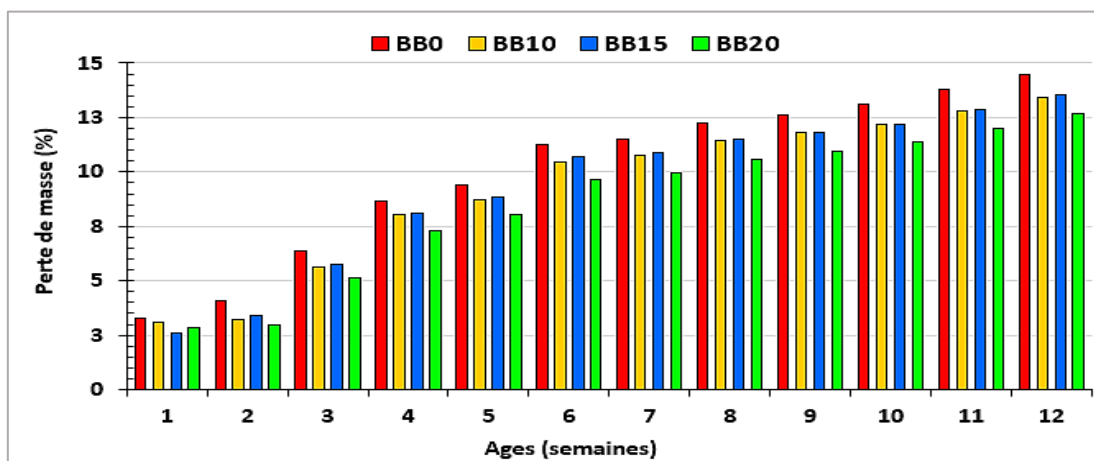
Effectivement, la perte de masse est faible aux jeunes âges d'immersion par rapport à ceux plus avancés. A titre d'exemple le mortier témoin MB0 après 3 semaines dans la solution d'acide chloridrique a une perte de masse de 8,36 % et qui passe à 22,73 % durant la sixième semaine d'immersion. Pour l'acide sulfurique elle passe de 4,22 % à 18,54 %. On constate aussi que le mortier MB20 résiste mieux à l'attaque des deux acides par rapport aux autres mortiers MB10 et MB15, en effet il perd de son poids à la sixième semaine 15,41 % dans la solution HCl et 13,53 % dans la solution  $H_2SO_4$ . Toutefois, les mortiers contenant de la boue traitée ont une meilleure résistance aux acides que le mortier témoin.

M. Benkaddour et al. [57], par une synthèse des résultats de leur étude menée sur la vase calcinée de barrage Ferrgoug (*Mascara*) recensent : l'incorporation des additions minérales (20 à 30 %) augmente la résistance chimique des mortiers dans les milieux agressifs (*acide de même concentration 5% HCl et 5%  $H_2SO_4$* ) et la perte de masse s'explique par : le Ciment CPA ,après hydratation, a libéré une grande partie d'hydroxyde de calcium libre qui lorsqu'elle est soumise à l'acide, elle peut être lixiviée à l'extérieur.

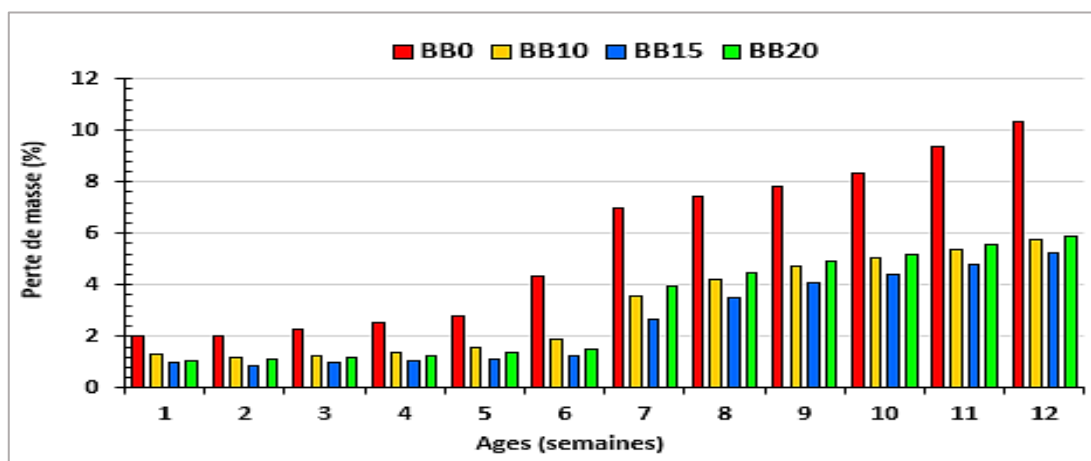
M. Mouli et al. [98] en conclusion, de leurs étude ont passé en revue : l'incorporation des additions minérales augmente la résistance des mortiers aux acides, comme il a été mis en évidence dans plusieurs recherches [99, 100]. La perte de masse est causée par le ciment CPA qui, après hydratation, libère une partie importante de l'hydroxyde de calcium libre qui peut être lessivée sous l'action des acides. Pour le mortier exposé au  $H_2SO_4$ , l'hydroxyde de calcium réagit avec l'acide sulfurique pour former du sulfate de calcium, en se déposant sous forme de gypse.

### ▪ Variation de masse dans les bétons

La variation de la perte de masse des bétons immergés dans 5% de HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pendant 12 semaines est montrée par les figures 5.9 et 5.10. Tous les bétons avec et sans ajout de la boue de dragage enregistrent des pertes permanentes en poids durant toutes les périodes. Les bétons à base de boue de dragage enregistrent des pertes en masse inférieures à celle du béton témoin et durant toutes les échéances de la période d'immersion.



**Figure 5.9.** Variation de perte de masse des bétons en fonction de la période d'immersion en 5% HCl.



**Figure 5.10.** Variation de perte de masse des bétons en fonction de la période d'immersion en 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

On peut affirmer que les bétons à base de boue de dragage du barrage K'sob résistent mieux à l'agression de l'acide chloridrique et sulfurique. De même que pour les mortiers, les résultats des mesures sur les bétons révèlent aussi que la sévérité de l'attaque de l'acide chloridrique est plus élevée que celle de l'acide sulfurique.

On remarque que le BBO de la solution HCL subit une légère dégradation par rapport aux autres bétons de la même solution, il perd 14,47% de son poids après 12 semaines d'immersion. La réduction de perte de masse par rapport à BBO est de 13,44%, 13,53% et 12,67% pour les bétons BB10, BB15 et BB20 respectivement à l'échéance de 12 semaines. Par contre le BBO de la solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> subit une forte dégradation par rapport aux autres bétons de la même solution. Il perd 10,34 % de son poids après 12 semaines d'immersion. Les BB10, BB15 et BB20 ont enregistré respectivement une perte de 5,75%, 5,26% et 5,89 % (*presque le double*). Donc plus le pourcentage de la boue de dragage est élevé plus la résistance du béton est grande à l'agression des deux acides.

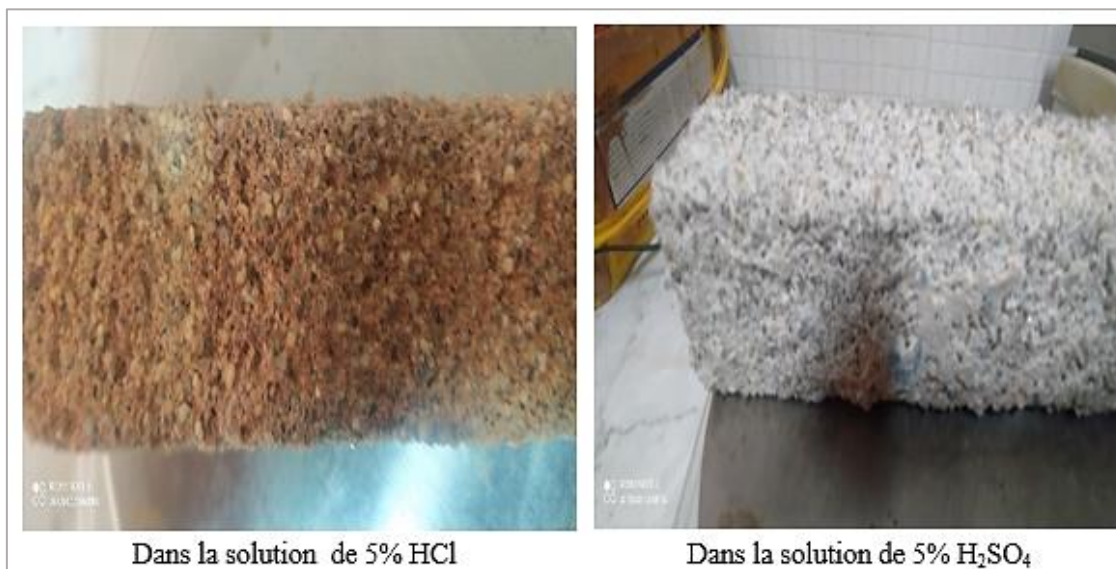
Il s'agit encore, d'un lessivage du béton sous l'action d'un milieu liquide aux propriétés « acides », conduisant à la dissolution progressive des composants de la pâte de ciment.

La portlandite Ca (OH)<sub>2</sub> est préférentiellement mise en solution car, parmi les différents constituants hydrates de la pâte de ciment, c'est elle qui présente la solubilité la plus importante pour des températures ordinaires. Après dissolution de la portlandite, d'autres hydrates tels que l'aluminate de calcium, le monosulfo-aluminate de calcium hydrate, l'ettringite et le silicate de calcium hydrate (CSH) sont progressivement dissous à leur tour. Il en est résulté la formation de régions à minéraux continus délimités par des fronts de dissolution [85].

O. Belaribi [58] qui a étudié les vases des barrages Chorfa et Fergoug a trouvé que la vase était bénéfique pour résister à l'attaque acide mais à des taux de vases distincts. Ceci est principalement dû à l'influence du type de ciment, de la finesse de la vase, de la durée de conservation de l'échantillon dans la solution acide et de la concentration de la solution. Il a découvert que l'incorporation des additions minérales augmentait la résistance chimique du béton dans des environnements agressifs (acides).

#### ▪ Examen visuel

L'inspection visuelle d'échantillons de mortier et de béton ayant subi des attaques chimiques lors d'une exposition aux acides chlorhydrique et sulfurique permet d'apprécier la détérioration des propriétés physiques et la détérioration de l'aspect externe des échantillons, de confirmer et de comparer les résultats obtenus. L'état de tous les échantillons avec et sans boue de dragage, après conservation en solution acide se caractérise à première vue par une diminution de volume par rapport aux échantillons précédemment conservés en eau normale. (*Figure 5.11 et 5.12*).



**Figure 5.11.** Etat des éprouvettes de mortier après 6 semaines d'immersion dans les solutions acides (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).



**Figure 5.12.** Etat des éprouvettes de béton après 12 semaines d'immersion dans les solutions acides (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Les échantillons exposés au H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ont une couche blanche sur la surface externe qui est un dépôt de gypse, résultant d'une réaction entre la portlandite et la solution d'attaque [5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>].

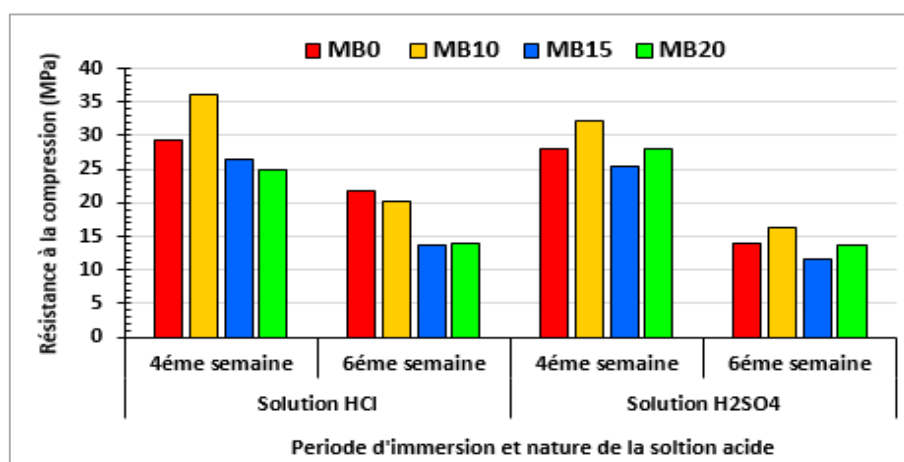
En plus de réagir avec la portlandite, l'acide sulfurique dégrade également la matrice cimentaire par la décalcification du silicate de calcium hydraté ( $C-S-H$ ), contribuant ainsi à la perte de masse des échantillons immergés dans cet acide et on observe ainsi une réduction de forme. Cette couche blanche est facilement emportée par l'eau utilisée pour le nettoyage.

Ces résultats sont cohérents avec les observations de L. Laoufi1 et al. [101].

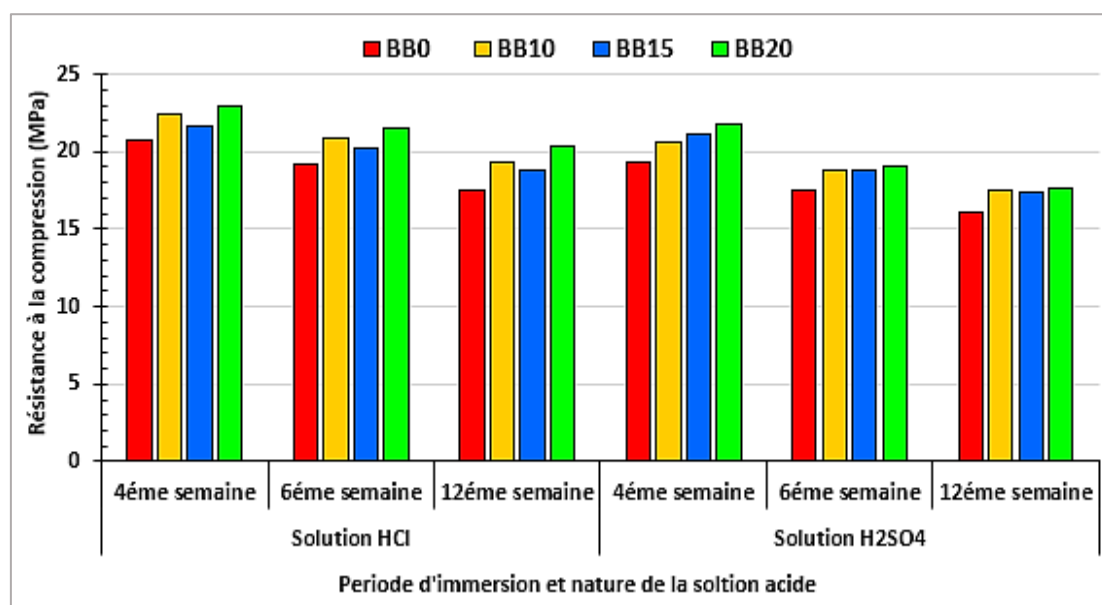
A partir de ces deux figures (5.11 et 5.12), nous pouvons constater la dégradation des échantillons des mortiers et des bétons d'essai. L'altération des échantillons est présentée par l'écaillage qui est un mode de détérioration de surface qui se produit en présence des acides. Des fragments de pâte cimentaire se désolidarisent de la surface du béton exposé. Ce phénomène est localisé. Une fois amorcé, il se propage en surface et en profondeur. L'épaisseur de la détérioration peut atteindre quelques centimètres, conduisant ainsi au déchaussement de granulats. Cette dégradation présente surtout dans un premier temps un impact esthétique. Elle conduit cependant à terme à la réduction du volume de l'élément exposé.

#### ▪ Résistance à la compression

Les échantillons dégradés durant 4 et 6 semaines d'émersion dans les solutions d'acides pour les mortiers et 4,6 et 12 semaines pour les bétons ont subis des essais en compression. Il est clairement observé, l'effet de l'attaque des acides sur la diminution de la « Rc » pour les différents mortiers et bétons. Ceci par rapport aux résistances initiales (évoquées dans le chapitre précédent) avant immersion dans les solutions acides (Figure 5.13 et 5.14).



**Figure 5.13.** Evolution de la résistance à la compression des mortiers immergés dans les solutions acides (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).



**Figure 5.14.** Evolution de la résistance à la compression des bétons immergés dans les solutions acides (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Selon ces figures, nous constatons une diminution permanente des « Rc » des éprouvettes de mortier et de béton dans le temps pour les deux solutions d'acide.

Pour les deux durées d'immersion choisies, les mortiers MB15 et MB20 à base de boue de dragage, de résistance équivalente, présentent la résistance la plus faible tandis que le mortier MB10 présente la résistance la plus élevée. Réellement, les résistances des MB10 atteignent pratiquement durant la 6ème semaine d'immersion dans les solutions HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> des résistances respectives de 20,34 et 16,35 MPa.

Cependant, les mortiers MB15 sont ceux le moins affectés en termes de résistance à la compression lorsqu'ils ont été trempés pendant 6 semaines dans l'acide HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Les mesures de la « Rc » sur le mortier ont montré que la sévérité d'attaque de l'acide sulfurique était supérieure à celle de l'acide chlorhydrique

Après 12 semaines d'immersion dans les deux acides, la « Rc » de l'échantillon béton a diminué (*Figure 5.14*) mais dans une moindre mesure selon le type de béton. Par exemple, pour le BB20, de la semaine 4 à la semaine 12 trempé dans une solution HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, la résistance a diminué de 11 % et 18 %, respectivement.

Pour les différentes durées d'immersion choisies, le béton de référence BBO avec ciment normal avait la résistance la plus faible alors que le BB20 de ciment et de 20% de boue calcinée avait la résistance la plus élevée (à la semaine 12 : 20,37 MPa en solution HCl et 17,7 MPa en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Cependant, le béton BB20 était le béton de « Rc » la moins affectée par une immersion dans les deux acides pendant 12 semaines.

Les résultats des résistances à la compression sur les bétons montrent que les deux attaques d'acide sulfurique et d'acide chloridrique ont presque le même effet.

Comme analyse à faire, la « Rc » du béton durci dépend principalement de la porosité de sa matrice [102].

Les mortiers et les bétons fabriqués à partir de boue de dragage ont la plus grande résistance. Il est possible que la porosité raffinée et la réactivité des boues à un stade précoce aient contribué à l'amélioration de « Rc ».

A la fin du processus de trempage, les mortiers et les bétons témoins se dégradent en entraînant une diminution de « Rc ». Ces dégradations sont principalement dues à la sensibilité de la matrice cimentaire en milieu acide, les auréoles de transition ne font pas l'objet d'une dégradation supplémentaire [103]. De même, les « Rc » des mortiers et bétons à base de boue de dragage chutent, mais en revanche, il est constaté l'importance de ces échantillons en termes de paramètre de durabilité en milieu acide en perdant pas assez de leur résistance mécanique.

## 5.5 CONCLUSION DU CHAPITRE

Les résultats de l'évaluation de la capacité d'absorption capillaire des mortiers et des bétons ont montré un effet positif jusqu'à 20 % de boue dans la matrice cimentaire car ils ont enregistré un faible coefficient d'absorption d'eau ( $Ab_{24h}$ ) en présence de boue de dragage par rapport au mélange témoin sans boue dragage

Les résultats expliquant le phénomène de dégradation ainsi que la perte de masse dans le mortier et le béton donnent des valeurs similaires en termes de critères de durabilité.

L'ordre croissant de durabilité en ces deux termes montre que la boue de dragage du barrage K'sob s'avère la plus performante. Les mortiers et les bétons à base de cette boue de dragage en substitution partielle du ciment présentent les profondeurs dégradées et les pertes de masses les plus faibles par rapport aux autres mortiers et bétons à base de ciment.

L'une des propriétés de base du béton durci est la « Rc ». Néanmoins, l'évaluation de la « Rc » du mortier et du béton dégradés en solution acide ( $HCl$  et  $H_2SO_4$ ) à base de boue de dragage a montré des améliorations par rapport au mortier et au béton témoin en termes de « Rc ».

Le mortier et le béton à base de boue de dragage ont montré une diminution de la résistance mécanique entre les échantillons sains (*du chapitre précédent*) et les échantillons dégradés en solution acide. De plus, l'aspect morphologique des mortiers et bétons dégradés apparaît plus compact pour les échantillons de béton et de mortier de boues de dragage traitées.

# **Conclusion Générale et Perspectives**

## **1. CONCLUSION GENERALE**

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre général de la lutte contre l'envasement des barrages en Algérie. Notre contribution porte principalement sur les possibilités potentielles de valorisation pour les sédiments dragués du barrage K'sob dans la fabrication de mortier et de béton. Dans cette étude, ces déchets naturels ont été considérés comme des matières premières minérales potentielles.

Certes, les effets du premier dragage du barrage de K'sob ont eu un impact négatif sur l'économie et l'environnement de la région qui faisait auparavant preuve de richesse et de prospérité.

Avant de se lancer dans une étude expérimentale mettant en évidence les possibilités de valorisation in situ des boues de dragage, nous avons estimé utile et nécessaire de passer en revue, pour une meilleure compréhension, les notions globales des sédiments de barrages, les modalités de dragage et les difficultés rencontrées dans la gestion des sédiments extraits lors des opérations de dragage. Nous avons aussi absorbé la gravité de l'envasement dans des barrages Algériens et les problèmes posés par ce phénomène ainsi que les solutions de dévasement adoptées à partir d'exemples Algériens. Nous avons présenté notre site d'étude en montrant son importance pour la région, en insistant sur sa particularité de par la présentation du barrage, son histoire et son bassin versant, que ses effets, résultat de l'envasement et des mesures qui permettent de préserver l'ouvrage dans ses fonctions initiales.

Dans une deuxième étape nous avons décrit les différentes voies et filières fondamentales de valorisation présumées parmi de multiples utilisations possibles des sédiments provenant des opérations de dragage. Nous avons présenté les spécifications et les propriétés types des matières premières couramment utilisées pour rapporter à la fin les travaux et les études de recherche menées sur les sédiments de dragage.

L'étude expérimentale a consisté en une série d'essais en laboratoire réalisés sur des boues issues de l'opération de dragage du barrage de K'sob ainsi que sur des mortiers et bétons à base d'un liant hybride ciment-boue. Ces essais permettent de connaître les caractéristiques de la boue et d'estimer sa capacité à l'emploi dans le domaine des bétons et mortiers étudiés. L'étude est enchaînée par une évaluation de la durabilité des mortiers et bétons standards, vis-à-vis de l'absorption d'eau et l'attaque acide, mais aussi à l'égard de l'équivalence des performances.

### 1.1 Caractéristiques de la boue de dragage

La boue de dragage a été soumise à des essais de caractérisation physique, géotechnique, minéralogique et chimique en vue d'une valorisation. Il en découlant de ces essais ce qui suit :

- la boue a pu être activée à 600°C après avoir été entièrement déshydroxylée par traitement thermique. La boue de dragage contient des minéraux bruts essentiels des liants hydrauliques courants ;
- plus de 50% des éléments en poids sont inférieurs à 80µm. Les courbes granulométriques montrent que la boue draguée est un sol fin;
- L'indice de plasticité varie de 18,17 à 18,67%, ce paramètre est fortement influencé par la nature et la quantité de minéraux argileux et de matière organique;
- les principaux minéraux qui constituent la boue draguée sont le quartz (18%), la calcite (15%), l'illite (32%) et la muscovite (28%). Trois types de phyllosilicates coexistent dans la boue de dragage, (*essentiellement des minéraux argileux*);
- les compositions chimiques en éléments essentiels sont liées à la minéralogie. La silice (SiO<sub>2</sub>) était la plus abondante dans la boue étudiée (37,67 à 39,54 %). L'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et l'oxyde de calcium (CaO) étaient présents dans la plage de 9,71 à 9,96 % et de 20,83 à 22,77 %, respectivement ;
- Teneur en matière organique de 15,05 à 22,12 %.

### 1.2 Résultats des essais de valorisation

Une implémentation à l'échelle du laboratoire a été réalisée pour la filière béton-mortier. La boue de dragage du barrage K'sob a été employée comme composants dans des mélanges avec d'autres matériaux fréquemment employés comme substituant partielle du ciment dans des bétons et mortiers ordinaires.

Sur le comportement des matériaux cimentaires sous l'effet de l'éco-ciment proposé à base de sédiments de dragage, les différentes analyses et les conclusions suivantes sont recensées :

- L'incorporation de la boue traitée augmente la demande en eau, assurant la consistance normale de la pâte;
- Le temps de prise des pâtes n'était pas fortement touché, tant que moins de 20% du ciment était remplacé par la boue. L'ajout de la boue calcinée au mélange de béton accélère la prise, facilitant le bétonnage par temps froid;
- Tous les mortiers ont montré des résistances aussi bien à la flexion qu'à la compression augmentant régulièrement avec l'âge et ne diminuent pas. Par rapport au mortier témoin, la diminution de la résistance à la flexion à l'âge de 28 jours du mortier MB20 (*après la substitution de 20% du ciment par la boue calcinée*) n'a pas dépassé 7%. Le remplacement du ciment par la boue calcinée peut être utilisé pour produire des éléments fragiles. La résistance « Rc » à la compression à 28 jours des mortiers préparés (10, 15 et 20% de boue calcinée) a dépassé la valeur normative de 42.5MPa;
- Pendant l'hydratation, les boues calcinées ont bien réagi avec le ciment, et ont atteint certaines performances mécaniques dans le béton et le mortier. La boue est donc un matériau réactif et non un matériau inerte, d'autant plus que son indice d'activité de résistance dépasse 75% à 28 jours;
- Aucun changement remarquable n'a été observé dans les résistances mécaniques des échantillons de béton avec 10 et 15% de boue calcinée par rapport au béton témoin qu'elles soient données par des essais destructifs ou non destructifs. Par contre, les « Rc » ont augmenté à moyen terme pour le béton contenant 20 % de boue calcinée, dépassant ainsi 83 % de celles du béton témoin. Les performances à long terme des bétons préparés sont prometteuses.

### 1.3 Résultats de l'étude de durabilité

Les essais de durabilité ont révélé des performances très comparables de la résistance des mortiers et bétons devant l'absorption d'eau et l'attaque des acides à savoir :

- l'effet positif jusqu'à 20 % de boue dans la matrice cimentaire. Les coefficients d'absorption d'eau ( $Ab_{24h}$ ) enregistrés sont faibles en présence de boue de dragage par rapport au mélange témoin sans cette boue;
-

- En termes d'indicateurs de durabilité, les résultats sont les mêmes pour les mortiers et les bétons concernant le phénomène de dégradations la perte de masse;
- les mortiers et les bétons à base de boue de dragage en substitution partielle du ciment ont les plus faibles profondeurs dégradées et perte de masse par rapports aux autres à base de ciment seule. L'ordre croissant de durabilité pour ces deux termes montre que la boue de dragage du barrage K'sob s'avère la plus performante ;
- l'évaluation de la « Rc » des mortiers et des bétons dégradés en solutions acides ( $HCl$  et  $H_2SO_4$ ) à base de boue de dragage montre des améliorations par rapport aux mortiers et bétons témoins en termes de résistance en compression;
- l'aspect morphologique des mortiers et des bétons dégradés semblent plus compacte pour les échantillons à base de boue de dragage traitée.

Cette recherche permet la possibilité d'obtenir des matériaux cimentaires (*béton/mortier*) à moindre coût, apportant une solution au coût élevé du ciment et au stockage des boues de dragage. Ainsi, les résultats de la recherche contribuent au développement écologique et économique. Dans le domaine de la construction, le liant hybride à base de ciment et de boue de dragage proposé peut être utilisé pour produire du béton des éléments structurels à charges modérées, ainsi que du béton autoplaçant et des éléments de maçonnerie, de décorations et de revêtements. En outre, le matériau mortier proposé peut être utilisé pour la réalisation de maçonnerie de blocs de béton, d'enduits traditionnels intérieurs ou extérieurs, de chape, de joints de maçonnerie, dans la maçonnerie et le bardage comme élément de liaison pour le scellement, ou le revêtement. Il peut servir aussi à réaliser une chape, à ragréer, à rejointoyer, à colmater des fissures, à coller, à sceller ou à enduire (lissage, parement, imperméabilisation).

## 2. PERSPECTIVES

Le travail effectué peut être considéré comme préliminaire, de nombreux axes de recherche et développement peuvent être révélés en ouvrant la voie vers différents points à explorer, nous recommandons de :

- Effectuer des essais par microscopie électronique à balayage sur les pâtes, les mortiers et les bétons considérés dans cette étude. Cela permettra d'établir une relation entre la rhéologie et la densification de la microstructure du matériau;

- Etudier la possibilité d'utiliser des boues de dragage traitées à un pourcentage plus élevé pour remplacer partiellement le ciment, par exemple 40 % ou 50 %. Cela sera particulièrement intéressant pour le béton architectural. Ils ne nécessitent pas, de préférence, une grande résistance mécanique, mais sont plus durables face aux influences extérieures s'ils sont utilisés en milieu urbain. Cela permet également d'étudier les taux de remplacement optimaux et/ou maximaux et leur influence sur les paramètres mécaniques et de durabilité.
- Envisager des recherches à plus long terme sur les propriétés microstructurales et la durabilité du mortier et du béton. En effet, le comportement avant attaque acide nécessite un suivi permanent de la composition minéralogique avant et après conservation en milieu agressif et ceci par analyse par microscopie électronique à balayage et analyse minéralogique par diffraction des rayons « X ».
- Enfin, il serait utile de faire des recherches pour pouvoir extraire les boues de dragage du barrage de K'sob à l'échelle industrielle et de faire des études coût/performance des mortiers et bétons avec des boues de dragage. Ce supplément alternatif sera commercialisé 10% à 20% moins cher que le ciment. Il serait intéressant de donner des chiffres réels sur le coût du béton ou du mortier.

Ces pistes proposées peuvent permettre une meilleure compréhension du comportement du béton et du mortier vis-à-vis des paramètres mécaniques et de durabilité des matériaux utilisés dans les structures de « construction » conventionnelles.

## Références Bibliographiques

- [1] Pardos, M., Houriet, J.P., Dominik, J. (2003). *Micropolluants dans les sédiments*. Documents environnement no 353, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 58p.
- [2] Bellair, P., Pomerol, C. (1977). *Eléments de géologie*. Editions Armand Colin, Paris, 528 p.
- [3] Burton, GA. (1992). *Sediment toxicity assessment*. Lewis Publishers, London, 211 p. doi <https://doi.org/10.1201/9781351076555>
- [4] Bonnet, C. (2000). *Développement de bio-essais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés*. Thèse de doctorat en Toxicologie de l'Environnement, Université Paul Verlaine, Metz, 309 p.
- [5] Power, E.A., Chapman, P.M. (1992). *Assessing sediment quality*. In: *Sediment toxicity assessment*, (G. A. J. Burton, ed), Chelsea, MI, USA: Lewis Publishers, 1-18.
- [6] Förstner, U. (1987). *Ecological effects of in-situ sediment contaminants*. Editions Thomas, R.L. et al. Éditeur Dr Junk W, Dordrecht, Pays-Bas, pp 221-246.
- [7] Campy M., Meybeck, M. (1995). *Les sédiments lacustres*. in *Limnologie générale*, Edition, Masson, Paris, pp. 185-226.
- [8] Geffard, O. (2001). *Toxicité potentielle des sédiments marins et estuariens contaminés : évaluation chimique et biologique, biodisponibilité des contaminants sédimentaires*. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 376 p.
- [9] Berthier, A., Cabanne, J., Douillet, G., Lambert, A., Raud, J. (1970). *Quelques problèmes posés par la création de barrages sur une rivière transportant des débits solides*. Xème Congrès International des Grands Barrages, Montréal, pp. 489- 506.
- [10] Parzonka, W. (1984). Analyse du processus de tassement et de l'érosion des vases aux réservoirs d'eau en Algérie occidentale. Séminaire "Transport and Sédimentation of Solid Particles", Wroclaw, Pologne, paper D2.
- [11] Keller, P., BOUCHARD, J.P. (1986). *Etude bibliographique de l'alluvionnement des retenues par les Sediment fins. Mécanismes physiques et moyens de lutte*. Electricité de France, Bulletin de la Direction des Etudes et des recherches. Série 'Nucléaire, Hydraulique, Thermique', n° 1, pp. 25-57.
- [12] Remini, B. (1990). *Etude hydrodynamique du mécanisme d'envasement*. Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 100p.
- [13] Manap, N., Voulvoulis, N. (2015). *Environmental management for dredging sediments*. The requirement of developing nations, *Journal of Environmental Management* 147:338-348. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.09.024

- [14] GEODE (2012). *Suivis environnementaux des opérations de dragage et d'immersion*. Guide méthodologique, egis eau –COPRAMEX, 133 p. [https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/02/Guide\\_methodologique\\_Suivi\\_Dragage\\_Immersion\\_cle51f711.pdf](https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/02/Guide_methodologique_Suivi_Dragage_Immersion_cle51f711.pdf)
- [15] GEODE (2012). *Guide méthodologique sur le dragage par injection d'eau*, ARTELIA Queen Mary University of London, 67 p. [http://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/02/Guide\\_Dragage\\_Injection\\_d\\_Eau\\_cle0f4556%281%29.pdf](http://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/02/Guide_Dragage_Injection_d_Eau_cle0f4556%281%29.pdf)
- [16] RECORD (2017). *Impacts écologiques de sédiments pollués extraits et déposés en milieux terrestres*. Etude RECORD n°14-1023/1B, 134 p. [https://record-net.org/storage/etudes/14-1023-1B/rapport/Rapport\\_record14-1023\\_1B.pdf](https://record-net.org/storage/etudes/14-1023-1B/rapport/Rapport_record14-1023_1B.pdf)
- [17] Zentar, R., Abriak, NE., Dubois, V., Miraoui, M. (2009). *Beneficial use of dredged sediments in public works*. Environmental Technology, 30(8):841-847. doi: 10.1080/09593330902990139
- [18] Foucault, A., Raoult, J.F. (1988). *Dictionnaire de géologie*. 3<sup>e</sup> édition, Masson
- [19] BRGM (2017). *Valorisation à terre des sédiments de dragage : retour d'expérience en France et à l'international*. Etude BRGM, Rapport final BRGM/RP-67329-FR, 113 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67329-FR.pdf>
- [20] Remini, B. (2002). *Qualification du transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser, Application à l'envasement du barrage de Beni Amrane*. 2<sup>e</sup> CMME Alger
- [21] Algerian National Agency for Dams and Transfers, ANBT [on-line]. Appropriate technology, water saving, surface planning, basin management. <https://www.soudoud-dzair.com/>, accessed on Jan. 8, 2021.
- [22] Semcha, A. (2006). *Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug*. Thèse de doctorat, Université de Reims, Champagne-Ardenne, France, 167 p. <http://theses.univ-reims.fr/exl-doc/GED00000521.pdf/>, accessed on Nov. 19, 2021.
- [23] Remini, B., Leduc, C., Hallouche, W. (2009). *Evolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens*. Sécheresse, 20 (1) : 96-103. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers15-07/010046444.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-07/010046444.pdf)
- [24] Remini, B., Kettab, A., Hihat, H. (1995). *Envasement du barrage Ighil Emda (Algérie)*. la houille blanche n° 2/3. <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1995008>
- [25] Benfetta, H., Ouadja, A., Achour, B., Remini, B. (2016). *Perte de capacité dans les barrages situés dans les zones arides et semi arides. cas des barrages de Gargar, Bouhanifia, Ouizert et Foug El Gherza*. Larhyss Journal, 25: 183-201. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/55318>
- [26] Remini, B., Bouabibsa, R., Moudjed, K. (2019). *Beni Haroun Et Koudiat Acerdoune (Algérie) : deux grands barrages algériens menacés par le phénomène de l'envasement*. Larhyss Journal, 38: 131-151. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/97715>
- [27] Remini, B., Benfetta, H. (2015). *Le barrage réservoir de Gargar est-il menacé par l'envasement ?* Larhyss Journal, 24: 175-192. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/55298>
- [28] Remini, B., Bensafia, D. (2016). *Envasement des barrages dans les régions arides exemples Algériens*. Larhyss Journal, 27 : 63-90. <http://www.larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/viewFile/450/444>

- [29] Remini, B. (2019). *L'Algérie : de la boue au fond des barrages, que faire ?* Larhyss Journal, 40: 213-247. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/109658>
- [30] Remini, W. Remini, B. (2003). *La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord*. Larhyss Journal, 02 : 45-54. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/77926>
- [31] Remini, B. (2008). *La surélévation des barrages : une technique de lutte contre l'envasement - exemples algériens*. La houille blanche / n° 5. doi 10.1051/lhb:2008063.
- [32] Remini, B., Hallouche, W., Achour, B. (2009). L'Algérie plus d'un siècle de desenvasement des barrages. GEB-Environnement, UNESCO : Etat des ressources en eau au Maghreb, pp 130. <https://rabat.unesco.org/>.
- [33] Chikouche, M.A. (2016). *Optimisation des ajouts à base d'argiles vaseuses et leurs effets sur les propriétés des matériaux cimentaires*. Thèse de doctorat, Université de M'sila, 124 p.
- [34] Bouchedja, A. (2012). *La politique nationale de l'eau en Algérie*. Euro-RIOB : 10ème Conférence Internationale, Istanbul, Turquie. [https://www.riob.org/fr/file/272212/download?token=HBxHg\\_HN](https://www.riob.org/fr/file/272212/download?token=HBxHg_HN)
- [35] Mustapha, K. (1994). *Le bassin versant du Hodna (Algérie) : Ressources en eau et possibilités d'aménagement*. Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, 85-86 : 25-34. doi: 10.3406/tigr.1994.1298
- [36] Hasbaia, M., Hedjazi, A., Benayada, L. (2012). *Variabilité de l'érosion hydrique dans le bassin du Hodna: cas du sous bassin versant de l'oued elham*. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 1: 28-32. [http://www.agrimaroc.org/index.php/Actes\\_IAVH2/article/view/280](http://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAVH2/article/view/280)
- [37] Despois, J. (1953). *Le Hodna (Algérie)*. Publication de la faculté des lettres d'Alger, p 46-49, 75-76. <https://excerpts.numilog.com/books/9782705926045.pdf>
- [38] Zerrouki, A., Lazib, N. (2013). *Contribution des images Alsat-2A à l'étude géologique de la région de M'Sila (monts du Hodna)*. Agence spatiale algérienne Consulter le 11/04/2022 sur le site <http://www.asal.dz/asal-geolog-msila.php>. <https://asal.dz/?p=422>
- [39] Griesser, A. (2002). *Cement-Superplastizer Interactions at ambient temperatures. Rheology, Phase Composition, Pore Water and Heat of Hydration of cementitious systems*. Thèse de Doctorat, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 147 p.
- [40] Norme NF EN 197-1. (2012). *Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*.
- [41] Bibi, M., Belouahri, B., Chikouche, M.A., Hattab, M. (2009). *Etude des propriétés mécaniques et physico-chimiques de l'argile vaseuse et de l'argile gréseuse provenant de la région de M'sila*. 19th French Congress of Mechanics. <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/36523/548.pdf>.
- [42] Chikouche, M.A., Ghorbel, E., Bibi, M. (2016). *The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: Optimization of heat treatment cycle and ratio replacement*. Construction and Building Materials 106: 330-341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.128>
- [43] Mazouzi W., Kacimi L., Cyr M., Clastres P. (2011). *Fabrication d'un ciment bélitique réactif par un procédé hydrothermal en utilisant une vase de barrage hydraulique*. INVACO2, Rabat, Maroc, n°: 10-049, pp 7. <https://www.asmatec.org/pdf/10-049-mazouzi.pdf>

- 
- [44] Rodriguez, O., Kacimi, L., López-Delgado, A., Frías, M., Guerrero, A. (2013). *Characterization of Algerian reservoir sludges for use as active additions in cement: New pozzolans for eco-cement manufacture*. Construction and Building Materials, 40: 275-279. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.10.016.
- [45] Pliskin, L. (1992). *Le béton*. Culture Technique, 26 : 58-64.
- [46] Norme NF EN 206+A1. (2016). *Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité*.
- [47] Norme NF EN 196-3. (2017). *Méthodes d'essai des ciments - Partie 3: détermination du temps de prise et de la stabilité*.
- [48] Norme NF P 18-508. (2012). *Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité*.
- [49] Norme NF P 18-509. (2012). *Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses - Spécifications et critères de conformité*.
- [50] Norme NF EN 450-1. (2012). *Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité*.
- [51] Norme NF EN 15671-1. (2006). *Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité*.
- [52] Norme NF EN 13263-1+A1. (2009). *Fumée de silice pour béton - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité*.
- [53] Norme NF P 18-513. (2012). *Addition pour béton hydraulique - Métakaolins - Spécifications et critères de conformité*.
- [54] Chikouche, M.A. (2021). *Valorization of heat treated dredged sludge in the cementmatrix of ordinary concrete*. Annales de Chimie - Science des Matériaux, 45(3): 251-257. <https://doi.org/10.18280/acsm.450309>
- [55] Belas, N., Belaribi, O., Mebrouki, A., Bouhamou, N. (2011). *Valorisation des sédiments de dragage dans les bétons*. INVACO2, Rabat, Maroc, Document 1P.176
- [56] Bouhamou, N., Mebrouki, A., Belas, N., Aggoun, S., Benaïssa, A., Kheirbek, A. (2011). *Valorisation des déchets naturels dans l'élaboration des nouveaux bétons et matériaux de construction*. 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon, France, 6p.
- [57] Benkaddour, M., Kazi Aoual, F., Semcha, A. (2009). *Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle*. Revue Nature et Technologie, pp 63-73. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/41190>
- [58] Belaribi, O. (2015). *Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane*. Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, Algérie, 147 p.
- [59] SETRA-LCPC. (1992). *Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) - Guide technique - Fascicules I : principes généraux - Fascicules II : annexes techniques*. Référence D9233.
- [60] Serbah, B. (2011). *Étude et valorisation des sédiments de dragage du barrage Bakhadda Tiaret*. Thèse de Docorat, Université de Tlemcen, Algérie, 115P.
- [61] SETRA-LCPC (2000). *Guide Technique - Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques : application à la réalisation des remblais et des couches de forme*. 240 p.
- [62] Seklaoui-Oukid, O. (2016). *valorisation des sédiments du barrage D'el Merdja Sidi Abed : étude technico-économique*. . Thèse de Docorat, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 119p.
-

- [63] Bourabah, M.A. (2012). *Comportement mécanique des sols fins - Application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 236p.
- [64] Javey, C. (1970). *Principales matières premières utilisées dans l'industrie céramique*. Cours de perfectionnement, Bureau de recherches Géologiques et Minières, Paris, France, 71 SGN 028 BGA, 25p
- [65] Benasla, M. (2015). *Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction*. Thèse de Doctorat, Université d'Oran, Algérie, 113p.
- [66] Benkadja, R., Benhadouga, M., Benkadja, A. (2013). *Quantification des matières en suspension et valorisation des sédiments de dragage à l'échelle d'un bassin semi-aride : Cas du barrage du K'sob (Algérie)*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 72: 523-531. doi: 10.1007/s10064-013-0516-1.
- [67] Remini, B. (2006). *Valorisation de la vase des barrages quelques exemples algériens*. Larhyss Journal, 5: 75-89. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1040/>, accessed on Nov. 19, 2021.
- [68] Norme NF EN 13791. (2019). *Évaluation de la résistance à la compression in situ des structures et des éléments préfabriqués en béton*.
- [69] Norme NF EN ISO 17892-4. (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4: Détermination de la distribution granulométrie des particules*.
- [70] Norme NF EN ISO 17892-12. (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12: Détermination des limites de liquidité et de plasticité*.
- [71] Norme EN ISO 17892-3. (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de sol en laboratoire - Partie 3 : Détermination de la densité des particules*.
- [72] Norme NF EN 196-6 (2018). *Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse*.
- [73] Norme NF EN 196-1. (2016). *Méthodes d'essais des ciments - Partie 1: détermination des résistances*.
- [74] Norme NF EN 12 350-2. (2019). *Essais pour béton frais - Partie 2: essai d'affaissement*.
- [75] Norme NF EN 12 504-4. (2021). *Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation des ultrasons*.
- [76] Redjel, B., Khelifi, W., Jaubertie, R. (2014). *Mesure de la résistance à la compression du béton, influence des méthodes destructives (écrasement) et non destructives (ultrason) et des géométries des corps d'épreuves*. ENSTP, Algérie équipement 53: 8. <http://www.entp.edu.dz/revue/files/article/53/article/8.pdf>, accessed on August 02, 2021.
- [77] Norme NF EN 12 504-2. (2013). *Essais du béton dans les structures - Partie 2: Essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebond*.
- [78] Norme NF EN 12 390-3. (2019). *Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes*.
- [79] Magnan, J.P. (2015). *Description, identification et classification des sols*. Techniques de l'ingénieur, référence Ti541, C208 (3), pp. 17-20. <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- [80] Norme NF P 11-300. (1992). *Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières*

- [81] Norme ASTM C618. (2003). *Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete.*
- [82] AFGC. (2004). *Conception des bétons en vue d'une durée de vie donnée des ouvrages - Indicateurs de durabilité, Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité.* 252 p. <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2007/10/Indicateurs-durabilite.pdf>
- [83] Hall, C. (1989). Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of Concrete Research*, 41(147), 51-61.
- [84] Guillon, E. (2004). *Durabilité des matériaux cimentaires : modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles.* Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, France. 154p
- [85] Amouri, C (2009). *Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité).* Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 168p.
- [86] Guemmadi, Z., Escadeillas, G., Toumi, B., Houari, H., Clastres, P. (2004). *Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciments.* 1<sup>er</sup> congrès international sur la technologie et la durabilité du béton, CITEDUB 1, Université Houari Boumediene d'Alger, Algérie.
- [87] Ait Medjber, F., Saidi, M. (2019). *Evaluation de degré de dégradation des BFUP dans deux milieux agressifs d'acides chlorhydrique et nitrique.* Alg. *J Mat Chem*, 2 (2) : 44–48. <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/637/2/2/126956>
- [88] Meng-Cheng, C., Kai, W., Li, X. (2013). *Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack.* *Engineering Failure Analysis*, 27: 272-285.
- [89] AFPC-AFREM. (1997). *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité.* Compte rendu des Journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », Toulouse, pp. 153-158
- [90] Bassuoni, M.T, Nehdi, M.L. (2007). *Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction.* *Cement and Concrete Research*, 37(7): 1070–1084.
- [91] ASTM C267-20. (2020). *Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes.*
- [92] Rabehi, M. (2014). *Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage par l'utilisation des tests d'absorption capillaire.* Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 131p.
- [93] Allahyari, I. (2016). *Approche performantielle des bétons : Vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité.* Thèse de Doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 244p.
- [94] Savadogo, N., Messan, A., Hannawi, K., Tsobnang, F., Agbodjan, W.P. (2015). *Durabilité d'un ciment composé à base de mâchefer de Tefereyre (Niger): absorption capillaire, porosité accessible à l'eau et attaque acide.* *Journal of Materials and Engineering Structures*, 2: 213–223. <https://oaji.net/articles/2016/980-1462042001.pdf>
- [95] Safer, O. (2017). *Optimisation de la formulation d'un éco-béton à base de sédiments de dragage et étude de sa résistance aux attaques chimiques.* Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, Algérie, 218p.

- [96] Aboutair, A. (2019). *Caractérisation Physico-mécanique et Microstructurale des Bétons Fibrés à Matrices Ultra Haute Performance*. Thèse de Doctorat, Université de Boumerdes, Algérie, 97p.
- [97] Mouallif, I., Asfar, S., Latrach, A., Chergui, M., Barbe, N. (2013). *Influence du vieillissement sulfatique sur la résistance mécanique et la microstructure du béton*. 21<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, France, 6p.
- [98] Mouli, M., Senhadji, Y., Benosman, A.S., Khelafi, H. (2010). *Résistance aux acides et à la pénétration des ions chlorures des mortiers avec pouzzolane et fine calcaire*. Communication Science & technologie, 8 : 57-63.
- [99] JANOTKA, I. (1999). *The influence of zeolitic cement and sand on resistance of mortar subjected to hydrochloric acid solution attack*. Ceramics-Silikaty, 43(2): 61-66.
- [100] Rossignolo, J.A., Agnesini Marcos, V.C. (2004). *Durability of polymer-modified lightweight" aggregate concrete*. Cement and Concrete Composites, 26(4): 375-380.
- [101] Laoufi, L., Senhadji, Y., Benazzouk, A., Langlet, T., Mouli, M., Laoufi, I., Benosman, A.S. (2016). *Evaluation de la durabilité de mortiers pouzzolaniques exposés à une attaque chimique*. J. Mater. Environ. Sci. 7 (5) : 1835-1845.
- [102] De Larrard, F., Tondat, P. (1993). *Contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton*, Materials and Structures, 26(163) : 505-516.
- [103] Bourdette, B. (1994). *Durabilité des matériaux cimentaires soumis aux acides organiques résistances chimiques, mécanique et de corrosion* Thèse de Doctorat, Laval, France, 203p.

Nom et Prénom : **Riad ALI HALASSA**  
Titre : **Valorisation d'une boue de dragage dans la matrice cimentaire  
d'un mortier et béton ordinaires**  
Thèse en vue de l'Obtention du Diplôme de **Doctorat**  
Filière : **Génie Civil / Spécialité : Matériaux**



## Résumé

Ce travail expose la volonté de contribuer à l'utilisation de matériaux écologiques et respectueux de l'environnement issus du phénomène d'envasement et de donner une certaine résilience aux barrages algériens affectés par des périodes de sécheresse et de précipitations irrégulières dues au changement climatique durant une grande partie de l'année. Cette menace écologique, affecte la durabilité et le potentiel des barrages, ainsi le dragage devient une nécessité même s'il implique des volumes considérables de boues qui peuvent altérer l'environnement. L'étude présentée met en évidence et propose une alternative intéressante pour la valorisation des boues de dragage dans le domaine de la construction en les intégrant dans la composition du mortier et du béton ordinaires. Plus précisément, les boues extraites du barrage K'sob ont été caractérisées chimiquement, physiquement, minéralogiquement et mécaniquement et ont été introduites à la fois comme substitut de ciment et comme composant dans le mélange d'un béton et d'un mortier ordinaires. Les boues ont d'abord été activées par calcination et ajoutées au ciment aux doses de masse de 10 %, 15 % et 20 % séparément. Le comportement mécanique, notamment sous compression, des matériaux cimentaires (béton/mortier) à base de boues traitées a été étudié par des tests en laboratoire. Les résultats des tests montrent que cette innovation technique confère au produit fini trois propriétés majeures, à savoir une haute résistance, une économie et un impact écologique bénéfique. Les résultats obtenus sont encourageants et promettent une exploitation optimale des boues provenant de barrages similaires. Outre le comportement mécanique, les différents bétons et mortiers de l'étude ont présenté des résultats des essais à l'absorption d'eau et à l'attaque des acides (HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), satisfaisants indiquant que la boue de dragage calcinée a une influence sensiblement meilleure sur la durabilité des mortiers et des bétons dans lesquels elle est incorporée.

**Mots clés** : Envasement, Barrage, Boue de dragage, Mortier, Béton,  
Comportement mécanique, Absorption d'eau, Attaque des acides, Durabilité.

**Directeur de thèse** : Mekki BIBI -Université de M'sila

Année Universitaire : 2021-2022