



# THESE DE DOCTORAT LMD

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Génie Civil**

Présentée et soutenue publiquement par :

**Mr BELAOUT Fateh**

Le: 09/12/2021

## Thème

Valorisation des sédiments d'envasement du barrage DJORF-TORBA  
(wilaya de BECHAR).

Devant le jury composé de :

Mr. KHELAFI Hamid	Pr	Université d'Adrar	Président
Mr. MEKERTA Belkacem	Pr	Université d'Adrar	Directeur de Thèse
Mr. KALLOUM Slimane	Pr	Université d'Adrar	Co-Directeur de Thèse
Mr. ABOU-BEKR Nabil	Pr	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. SEMCHA Abdélaziz	Pr	Université d'Adrar	Examineur

# Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu et avant tout, **Allah**, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la santé, le Courage et la patience de mener à bien ce modeste travail dans les meilleures conditions.

Je souhaite remercier ici tous ceux qui, par leurs aides, leurs encouragements et leurs conseils, ils m'ont permis de réaliser cette thèse.

**Je me ferais un agréable devoir de remercier mon encadreur Pr. MEKERTIA Belkacem, Professeur à l'université d'Adrar.**

Je voudrais lui dire : « **Merci d'avoir été si patient avec moi et de m'avoir aidé dans les moments les plus difficiles. Vous êtes un excellent Professeur que beaucoup de doctorants aimeraient avoir** ».

Je tiens à exprimer mes plus vifs et sincères remerciements au Pr KALLOUM Slimane, Co-Directeur de Thèse pour les fructueux travaux que nous avons pu réaliser ensemble. Ses contributions ont été capitales à l'aboutissement de cette thèse.

Je tiens à remercier aussi :

- ☉ Pr. KHLEAFI Hamid, de l'université d'Adrar pour avoir accepté de présider le jury de ma thèse. Et en tant que responsable de la formation Doctoral LMD.
- ☉ Pr. ABOU-BEKR Nabil, de l'université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'examiner ce travail.
- ☉ Pr. SEMCHA Abdelaziz, de l'université d'Adrar, d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse en qualité d'Examineur et pour le suivi précieux qu'il m'a assuré dans la partie cartographie et valorisation.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des enseignants et le personnel administratif de l'université d'Adrar, pour leurs aides durant toute la période de notre formation doctorale. Mes remerciements les plus chaleureux vont à tous mes amis Doctorants du Génie Civil.

Un merci particulier à Mr. Abderrahmane Abdelkrimi (Ingénieur SONATRACH). Ainsi Mr. Rachid Zentar Professeur IMT Lille Douai. Aussi l'équipe du Laboratoire de Développement Durable et d'Informatique (L.D.D.I-Université d'Adrar)

à Mr. Abdelkader Harrouz et le directeur du laboratoire Pr. Hammouda Messaoud pour son aide.

Je n'oublie pas aussi de remercier : L'ANBT, INSID, LGG, LTPO, l'Office National de Météorologie-Béchar, Pour leurs soutiens. À toute l'équipe du Barrage Djorf-Torba, et Mr le Directeur,

Mr HOUGLAOUAN, ainsi que Mrs KHALIFA et AOUIA.

Enfin, je réserve mes plus intenses pensées à mes parents, ma femme et mon fils, aux membres de ma famille, mes frères et mes amis Moulay Ahmed, Felahi Abdelkrim pour le soutien moral. A toutes les personnes qui m'ont assisté de près ou de loin.

À toutes les personnes qui me sont chères ..... **BELAOUT Fateh**

## **Résumé**

Dans les zones arides ou semi-arides, le phénomène de l'envasement des retenues de barrages est largement répandu, car les conditions sont favorables pour le développement de la dynamique sédimentaire. Ce phénomène est plus critique sur les bassins versants situés près des barrages.

Le barrage Djorf-Torba est situé au sud-ouest de l'Algérie. Sous l'influence de l'érosion et le transport solide, la sédimentation de la retenue du barrage est en évolution constante, c'est ce qui entraîne son envasement. Vis-à-vis de cette situation, le dragage est devenu vital pour le développement social et économique. C'est dans ce contexte même, qu'on envisage d'utiliser ces sédiments d'envasement dans les terres agricoles de la plaine d'ABADLA, qui couvre une superficie de 5400 hectare, comme un amendement agricole afin d'augmenter la fertilisation, ainsi que la capacité de rétention de l'eau.

Le but de nos travaux de recherche est d'intégrer la gestion des sédiments de dragage dans une démarche de développement durable, mais cette valorisation doit être en accord avec le respect de l'environnement et les normes techniques d'application.

**Mots clés :** Barrage Djorf-Torba, Sédiments, Envasement, dragage, Valorisation, Plaine d'ABADLA, Amendement agricole.

## Abstract

In arid or semi-arid areas, the phenomenon of the silting up of dam reservoirs is widespread, because the conditions are favorable for the development of sediment dynamics. This phenomenon is more critical in watersheds located near dams.

The Djorf-Torba dam is located in the southwest of Algeria. Under the influence of erosion and solid transport, the sedimentation of the dam reservoir is constantly changing, which is what leads to its situation. Faced with this situation, dredging has become vital for social and economic development. It is in this very context that we are considering using these citation sediments in the agricultural lands of the ABADLA plain, which covers an area of 5400 hectare, as an agricultural amendment in order to increase fertilization, as well as the water holding capacity.

The aim of our research is to integrate the management of dredged sediments into a sustainable development approach, but this valuation must be in accordance with respect for the environment and the technical standards of application.

**Keywords:** Djorf-Torba dam, Sediments, Siltation, Dredging, Valuation, ABADLA plain, Agricultural amendment.

## ملخص

في المناطق القاحلة أو شبه القاحلة، تنتشر ظاهرة التوحد في السودان بشكل معتبر، حيث أن الظروف مواتية لحركة الرواسب. تعتبر هذه الظاهر أكثر خطورة في الاحواض الواقعة بالقرب من السودان.

يقع سد جرف التربة في جنوب غرب الجزائر. تحت تأثير عوامل التعرية ونقل الجزيئات الصلبة، فإن الرواسب في تراكم مستمر على مستوى السد، وهو ما يؤدي إلى ظاهرة التوحد. و بالنظر الى هذه الوضعية، أصبح نزع الاوحال أمراً حيوياً للتنمية الاجتماعية والاقتصادية. وفي هذا التوجه، نعمل على استخدام الرواسب المستخرجة خلال عمليات نزع الاوحال في الأراضي الزراعية لسهل العبادلة، و الذي يغطي مساحة 5400 هكتار، هذا الاخير يكون على شكل محسن زراعي يعمل على زيادة خصوبة الارض، وكذلك تحسين قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه.

ان الهدف من بحثنا هذا هو العمل على تثمين الرواسب المستخرجة خلال عملية نزع الاوحال و ذلك في اطار مفهوم التنمية المستدامة، مع الاخذ بعين الاعتبار المعايير التقنية و الفنية لتثمين الرواسب و ذلك حسب كل مجال دون اهمال الجانب البيئي.

**الكلمات المفتاحية:** سد جرف طربة، رواسب، التوحد، ازالة الاوحال، تثمين، سهل عبادلة، تعديل زراعي.

## Sommaire

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Abstract .....	III
ملخص.....	IV
Abréviations et notations .....	X
Liste des figures.....	XV
Liste des tableaux.....	XVI
Liste des photographies.....	VIII
Introduction générale .....	IX

### Chapitre I : Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde.

I.1	Introduction .....	01
I.2	Processus de l'envasement des barrages .....	02
I.2.1	Érosion des bassins versants.....	03
I.2.2	Évaluation de l'érosion.....	04
I.2.3	Transport solide. ....	05
I.2.4	La sédimentation des retenues. ....	07
I.3	État de l'envasement des barrages en chiffre. ....	08
I.4	Particularités de l'envasement dans les zones arides.....	11
I.5	Impact de l'envasement sur les barrages. ....	12
I.6	Techniques de lutte contre l'envasement. ....	15
I.7	Conclusion. ....	17
I.8		

### Chapitre II : Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

II.1	Introduction .....	18
II.2	Présentation du barrage Djorf-Torba.....	19
II.2.1	Situation géographique et objectif.....	19
II.2.2	Description de l'ouvrage.....	20
II.2.3	Historique du barrage.....	22
II.3	Bassin versant de l'Oued Guir.. ....	24
II.3.1	Localisation.....	24

II.3.2	La géomorphologie du bassin versant.....	25
II.3.3	L'Oued Guir. ....	27
II.4	Caractérisation climatologique.....	28
II.4.1	Précipitation.....	28
II.4.2	Température.....	29
II.4.3	Évaporation.....	30
II.4.4	Le vent.....	32
II.5	Contexte géologique.....	33
II.6	Données Hydrologiques.....	35
II.6.1	Système hydrologique.....	35
II.6.2	Apports liquides.....	35
II.6.3	Crues de l'Oued Guir.....	36
II.6.4	Exploitation des apports.....	38
II.7	Envasement du barrage Djorf-Torba.....	39
II.8	Conclusion.....	41

**Chapitre III : Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.**

III.1	Introduction .....	42
III.2	Aperçu sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG) .....	43
III.3	Présentation de l'approche méthodologique adoptée.....	44
III.4	Données et méthodes.....	45
III.4.1	Précipitations du bassin versant.....	46
III.4.2	La morphométrie du bassin versant.....	47
III.4.3	Données complémentaires.....	49
III.5	Quantification de l'érosion et le transport solide.....	52
III.5.1	Formule de FOURNIER (1960) .....	52
III.5.2	Formule de TIXERONT (1960) .....	55
III.5.3	Formule de SOGREAHA (1969) .....	56
III.5.4	Formule de SAIDI (1991) .....	57
III.5.5	Formule de GAVRILOVIC (1992) .....	58
III.5.6	Formule de KASSOUL et al (1997) .....	62
III.5.7	Synthèse des zones de production de sédiments.....	64
III.6	Prévision de l'envasement dans la retenue du barrage.....	67
III.7	Résultats et discussions.....	69

III.8	Conclusion.....	70
-------	-----------------	----

## **Chapitre IV : Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.**

IV.1	Introduction .....	71
IV.2	La stratégie d'échantillonnage.....	71
IV.3	Prélèvements des sédiments. ....	72
IV.4	Description des sédiments. ....	75
IV.5	Préparation des échantillons.....	76
IV.6	Caractérisation des sédiments.....	78
IV.6.1	Analyse granulométrique.....	80
IV.6.2	Poids volumique des grains solides (@s) .....	81
IV.6.3	Limites d'Atterberg.....	82
IV.6.4	Conductivité électrique (CE) .....	84
IV.6.5	Acidité du sol (pH) .....	85
IV.6.6	Teneur en matière organique (%MO) .....	85
IV.6.7	Valeur de bleu des sols (VBS) .....	86
IV.6.8	Identification physico-chimique.....	87
IV.7	Conclusion.....	89

## **Chapitre V : Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.**

V.1	Introduction .....	90
V.2	Les différentes approches de la valorisation des sédiments du Djorf-Torba.....	91
V.2.1	Etat des lieux sur les pratiques de valorisation en Algérie.....	91
V.2.2	Le devenir des sédiments du Djorf-Torba.....	92
V.3	Le choix de la filière de valorisation.....	97
V.4	Principe de la valorisation et les normes d'application.....	99
V.4.1	La méthodologie adoptée.....	99
V.4.2	Hypothèses et normes d'applications.....	100
V.5	Études expérimentales et techniques d'application.....	103
V.5.1	Caractérisations des sédiments désignées pour la valorisation.....	104
V.5.2	Interprétation des résultats selon la filière de valorisation (AASS)...	106
V.5.3	Caractérisations des sols agricoles de la plaine d'Abadla.....	107

V.6	Étude des formulations : sédiment - sol agricole.....	112
V.6.1	Protocole d'application.....	112
V.6.2	Evaluation des formulations étudiées.....	114
V.7	Conclusion.....	121
	Conclusion générale et perspectives .....	122
	Références bibliographiques .....	124
	Annexe. ....	

## Abréviations et Notations

### I. Entreprises, Organismes et Administrations.

- **ANBT** : Agence Nationale des Barrages et Transferts ;
- **AFNOR** : Association Française de Normalisation ;
- **A.N.R.H** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques ;
- **TECSULT** : TECSULT International Limited (Bureau d'études canadien) ;
- **LPC** : Laboratoire des Ponts et Chaussées ;
- **LDDI** : Laboratoire de Développement Durable et d'Informatique ;
- **INSID** : Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage ;
- **LTPS** : Laboratoire des Travaux Publics du Sud ;
- **LTPO** : Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest ;
- **LTPE** : Laboratoire des Travaux Publics de l'Est ;
- **CRSTRA** : Centre de Recherche Scientifique et Techniques sur les Régions Arides ;
- **DRE** : Direction des Ressources en Eau ;
- **GICA** : Groupe Industriel des Ciments d'Algérie ;
- **CFBR** : Comité Français des Barrages et Réservoirs ;
- **ISO** : Organisation Internationale de Normalisation ;
- **DSA** : la Direction des Services Agricoles ;
- **G.E.P.P.A** : Groupe d'Etudes des Problèmes de Pédologie Appliquée ;
- **ITMAS** : Institut De Technologie Moyen Agricole Spécialise ;
- **Hydro-Dragage** : Entreprise de Dragage des Barrages Algérie ;
- **CIGB** : Comité International des Grands Barrages.

### II. Liste des Abréviations

- **AEP** : Adduction en Eau Potable ;
- **MNT** : Modèles Numériques de Terrain ;
- **SIG** : Systèmes d'Information Géographiques ;
- **SBV** : sous bassins versants ;
- **NF** : Norme Française ;
- **GEODE** : Guide d'Etudes et Observation sur les Dragages et Environnement ;
- **UTM** : Unified Threat Management ;
- **USCS** : Unified Soil Classification System ;
- **GTR** : Guide des Travaux Routiers ;
- **AASS** : Amendement Agricole des Sols Saharien ;
- **CSD** : Centre de Stockage de Déchets ;
- **BTC** : Briques de Terre Crue ;
- **NEBT** : Noyau Etanche dans un Barrage en Terre ;
- **ASS** : Amélioration des Sols Sahariens.

### III. Liste des Notations

- **P<sub>m</sub>** : Précipitations mensuelles ;
- **P<sub>a</sub>** : Précipitations annuelles ;
- **D** : La dénivelée ;
- **H<sub>moy</sub>** : Altitude moyenne ;
- **T** : Nombre d'années d'exploitation ;
- **Le** : Lamme d'eau écoulée ;
- **Ce** : Coefficient d'écoulement ;

- $\alpha$  : perméabilité du bassin versant ;
- **Es** : Erosion spécifique moyenne annuelle ;
- **H** : Dénivelé moyenne ;
- **S** : Superficie du sous bassin versant
- **Es** : Erosion spécifique ;
- **As** : Transport solide ;
- **A** : apports solides ;
- **E** : Ecoulement annuel total ;
- **C<sub>rm</sub>** : Coefficient de rétention ;
- **T** : Coefficient thermique ;
- **t** : température moyenne annuelle ;
- **Z** : Coefficient d'érosion ;
- **L** : La longueur du thalweg ;
- **P** : Périmètre de sous bassin versant ;
- **CE** : Conductivité électrique ;
- **MO** : Matière Organique ;
- $\gamma_s$  : Poids volumique des grains solides ;
- **IP** : Indice de Plasticité ;
- **WL** : Limite de liquidité ;
- **W<sub>p</sub>** : Limite de plasticité ;
- **Ac** : Activité des argiles ;
- **VBS** : Valeur de bleu des sols ;
- **CEC** : Capacité d'Echange Cationique ;
- **K** : Coefficient de perméabilité.

Liste des figures

**Chapitre I : Étude de la problématique de l’envasement des barrages en Algérie et dans le monde.**

<b>Figure I.1</b>	Processus de l’envasement des barrages.....	02
<b>Figure I.2</b>	les différents types de l’érosion.....	03
<b>Figure I.3</b>	Organigramme de l’USLE [EL HAFID et al, 2018] .....	05
<b>Figure I.4</b>	Modes de transport solide [LEMZADMI et SAIDI, 2017] .....	06
<b>Figure I.5</b>	Diagramme des particules [HJULSTRÖM, 1935].....	06
<b>Figure I.6</b>	Mécanisme de la sédimentation des retenues .....	07
<b>Figure I.7</b>	État des barrages en Algérie (source A.N.B.T, 2004-2014) .....	09
<b>Figure I.8</b>	État d’envasement des barrages Fergoug et Bakhadda en 2008..	10
<b>Figure I.9</b>	Schéma des problèmes posés par l’envasement.....	12
<b>Figure I.10</b>	État d’envasement des barrages Algériens .....	13
<b>Figure I.11</b>	État de la qualité de l’eau du barrage Djorf-Torba (Béchar) .....	14
<b>Figure I.12</b>	Techniques de lutte contre l’envasement.....	15

**Chapitre II : Étude d’un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).**

<b>Figure II.1</b>	Situation géographique des barrages en zones arides.....	19
<b>Figure II.2</b>	Situation du barrage Djorf-Torba (Béchar).....	20
<b>Figure II.3</b>	Coupe sur déversoir.....	22
<b>Figure II.4</b>	Localisation du bassin versant de l’Oued Guir.....	24
<b>Figure II.5</b>	Bassin versant de l’Oued Guir sur MNT.....	25
<b>Figure II.6</b>	Courbe hypsométrique du bassin versant de l’oued Guir.....	26
<b>Figure II.7</b>	Croquis de l’Oued Guir et son profil longitudinale.....	27
<b>Figure II.8</b>	Précipitations moyennes annuelles de la station Djorf-Torba....	29
<b>Figure II.9</b>	Températures moyennes annuelles (station Djorf-Torba).....	30
<b>Figure II.10</b>	Évaporations moyennes annuelles (station Djorf-Torba).....	31
<b>Figure II.11</b>	Évolution de l’évaporation dans le barrage Djorf-Torba.....	31
<b>Figure II.12</b>	Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie.....	32
<b>Figure II.13</b>	Cartes géologiques du bassin versant de l’Oued Guir.....	33
<b>Figure II.14</b>	Système hydrologique du bassin versant de l’Oued Guir sur MNT.....	35

<b>Figure II.15</b>	Apport moyenne annuelle de l'Oued Guir.....	36
<b>Figure II.16</b>	Durées des crues de l'Oued Guir.....	37
<b>Figure II.17</b>	Désignation des apports du barrage Djorf-Torba.....	38

### Chapitre III : Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

<b>Figure III.1</b>	La notion de système d'information géographique.....	43
<b>Figure III.2</b>	Les différentes étapes de la démarche adoptée.....	45
<b>Figure III.3</b>	Les stations pluviométriques utilisées.....	46
<b>Figure III.4</b>	Les données de précipitations utilisés.....	47
<b>Figure III.5</b>	Implantation des sous bassins versants de l'Oued Guir .....	48
<b>Figure III.6</b>	Courbe de Brune [TECSULT et A.N.B.T, 2005].....	50
<b>Figure III.7</b>	Variation de la lame d'eau écoulée en fonction des précipitations moyennes annuelles.....	51
<b>Figure III.8</b>	Distribution de l'érosion spécifique Es sur le BV de l'Oued Guir.....	54
<b>Figure III.9</b>	Évolution de l'érosion spécifique (Es) en fonction de l'indice des précipitations ( $Pm^2/Pa$ ). .....	55
<b>Figure III.10</b>	Évolution de l'apport solide (qs) en fonction de la lame d'eau écoulée ( $L_e$ ).....	56
<b>Figure III.11</b>	Évolution de l'érosion (qs) en fonction des débits liquides (1997-2016). .....	57
<b>Figure III.12</b>	Évolution du taux de production annuelle des sédiments ( $q_{Sp}$ ) en fonction des précipitations annuelles ( $P_a$ ) [1985-2014]. .....	59
<b>Figure III.13</b>	Distribution de l'érosion qs selon la formule de Gavrilovic. ...	61
<b>Figure III.14</b>	Distribution de l'érosion qs Selon la formule de Kassoul et al..	64
<b>Figure III.15</b>	Variation de l'apport solide en fonction des SBV de l'Oued Guir. ....	66
<b>Figure III.16</b>	Prévision de l'envasement dans le barrage Djorf-Torba en fonction des diverses méthodes.....	68
<b>Figure III.17</b>	Évolution de l'envasement du barrage Djorf-Torba.....	69

### Chapitre IV : Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

<b>Figure IV.1</b>	Implantation des points de prélèvement au niveau du barrage Djorf-Torba.....	73
--------------------	------------------------------------------------------------------------------	----

<b>Figure IV.2</b>	Distribution granulométrique des sédiments du barrage Djorf-Torba.....	80
<b>Figure IV.3</b>	Classification des sédiments sur le diagramme de Casagrande..	83

**Chapitre V : Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.**

<b>Figure V.1</b>	Implantation du site 1(plaine d’Abadla) vis-à-vis du barrage Djorf-Torba.....	93
<b>Figure V.2</b>	Implantation du site 2 (Cimenterie de Béchar) vis-à-vis du barrage Djorf-Torba.....	94
<b>Figure V.3</b>	Le bassin versant du barrage Igli (ANBT, 2020) .....	95
<b>Figure V.4</b>	Implantation du site 3 (Igli) vis-à-vis du barrage Djorf-Torba...	96
<b>Figure V.5</b>	Implantation du site 4 (Bassin Versant de l’Oued Guir).....	97
<b>Figure V.6</b>	La méthodologie adoptée pour la valorisation des sédiments..	99
<b>Figure V.7</b>	Classification des engrais et amendements selon AFNOR.....	101
<b>Figure V.8</b>	Implantation des points de prélèvement au niveau de la plaine d’Abadla.....	108
<b>Figure V.9</b>	Les différents équilibres dans les sols agricoles.....	114
<b>Figure V.10</b>	Analyse granulométrique des différentes formulations.....	115
<b>Figure V.11</b>	La classe de texture des différentes formulations selon G.E.P.P.A.....	116
<b>Figure V.12</b>	Variation de coefficient de perméabilité pour les différentes formulations.....	117

Liste des tableaux

**Chapitre I : Étude de la problématique de l’envasement des barrages en Algérie et dans le monde.**

<b>Tableau I.1</b>	La situation des barrages dans les pays de l’Afrique du nord....	08
<b>Tableau I.2</b>	Évolution de la situation des barrages Algériens (Source : A.N.B.T).....	10
<b>Tableau I.3</b>	Taux d’érosion des bassins versants du Maghreb [TADRIST et al, 2016] .....	11

**Chapitre II : Étude d’un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).**

<b>Tableau II.1</b>	Situation des barrages en zones arides.....	18
<b>Tableau II.2</b>	Fiche technique du barrage Djorf-Torba.....	21
<b>Tableau II.3</b>	Caractéristiques géomorphologique du bassin versant.....	26
<b>Tableau II.4</b>	Principale caractéristique de l’Oued Guir.....	27
<b>Tableau II.5</b>	La répartition directionnelle et fréquentielle des vents .....	32
<b>Tableau II.6</b>	Géologie du bassin versant de l’Oued Guir.....	34
<b>Tableau II.7</b>	Estimations des débits et apports de l’Oued Guir.....	36
<b>Tableau II.8</b>	Les débits de l’Oued Guir en fonction de son hauteur.....	37

**Chapitre III : Cartographie de l’érosion dans la zone d’influence du barrage Djorf-Torba.**

<b>Tableau III.1</b>	Caractéristiques géomorphologiques des sous bassins versants.	49
<b>Tableau III.2</b>	Variation de valeurs de la perméabilité ( $\alpha$ ). .....	52
<b>Tableau III.3</b>	Résultats de la formule Fournier en fonction des sous bassins versants.....	53
<b>Tableau III.4</b>	Degré de l’érosion selon le coefficient d’érosion .....	59
<b>Tableau III.5</b>	Résultats de la formule Gavrilovic en fonction des sous bassins vers.....	60
<b>Tableau III.6</b>	Critères de choix des formules de Kassoul et al. ....	62
<b>Tableau III.7</b>	Résultats de la formule Kassoul et al. ....	63
<b>Tableau III.8</b>	Récapitulatif provisoire des apports solides estimés par les formules .....	64

<b>Tableau III.9</b>	Récapitulatif final des apports solides estimés par les diverses formules .....	65
<b>Tableau III.10</b>	Estimation de l'envasement en fonction des différentes méthodes. ....	67

**Chapitre IV : Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.**

<b>Tableau IV.1</b>	Les coordonnées UTM des différents points de prélèvements...	72
<b>Tableau IV.2</b>	Paramètres de caractérisation des sédiments étudiés.. ....	79
<b>Tableau IV.3</b>	Données granulométriques des sédiments étudiés.....	81
<b>Tableau IV.4</b>	Résultats du poids spécifique des sédiments étudiés.....	82
<b>Tableau IV.5</b>	Limites d'Atterberg des sédiments étudiés.....	82
<b>Tableau IV.6</b>	Activité des sédiments étudiés.. ....	84
<b>Tableau IV.7</b>	Résultats des mesures de la CE.. ....	84
<b>Tableau IV.8</b>	Classification de la salinité en fonction de CE .....	84
<b>Tableau IV.9</b>	Résultats du PH pour les sédiments du barrage Djorf-Torba....	85
<b>Tableau IV.10</b>	Teneurs en matières organiques des sédiments P3 et P4.....	86
<b>Tableau IV.11</b>	Valeurs au bleu des sédiments étudiés.....	87
<b>Tableau IV.12</b>	Classification de VBS du sol selon GTR.....	87
<b>Tableau IV.13</b>	Résultats des analyses physico-chimique. ....	88

**Chapitre V : Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.**

<b>Tableau V.1</b>	Classification des engrais et amendements selon ISO.....	102
<b>Tableau V.2</b>	Synthèse des paramètres de caractérisation agronomiques des sédiments.....	103
<b>Tableau V.3</b>	Synthèse des caractéristiques physico-chimiques et les propriétés des sédiments désignées à la valorisation.....	105
<b>Tableau V.4</b>	Les coordonnées UTM des prélèvements de la plaine d'Abadla.....	107
<b>Tableau V.5</b>	Classes d'appréciation de la profondeur du sol en cm en fonction du groupe cultural (INSID).....	108
<b>Tableau V.6</b>	Synthèse des caractéristiques des sols agricoles de la plaine d'Abadla.....	110
<b>Tableau V.7</b>	Les différentes formulations adoptées.....	113

<b>Tableau V.8</b>	Résultats d'analyse granulométrique des différentes formulations.....	115
<b>Tableau V.9</b>	classification de perméabilité selon la nature de sol.....	118
<b>Tableau V.10</b>	Propriétés physico-chimiques de la formule choisie (30P4)....	119
<b>Tableau V.11</b>	Normes d'interprétation de la matière organique (source : INSID).....	120

Liste des photographies

**Chapitre II : Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).**

<b>Photo II.1</b>	Vue d'ensemble du barrage Djorf-Torba (côté amont).....	21
<b>Photo II.2</b>	Barrage Djorf-Torba en 1967.....	23
<b>Photo II.3</b>	Barrage Djorf-Torba en 1983.....	23
<b>Photo II.4</b>	Barrage Djorf-Torba en 1986.....	23
<b>Photo II.5</b>	Barrage Djorf-Torba en 2004.....	23
<b>Photo II.6</b>	Situation du barrage Djorf-Torba et l'Oued Guir en 2020 .....	39
<b>Photo II.7</b>	Les travaux d'installation du projet dévasement du barrage Djorf-Torba (Janvier 2020) .....	40

**Chapitre IV : Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.**

<b>Photo IV.1</b>	Echantillons 1 et 2.....	73
<b>Photo IV.2</b>	Echantillons 3 et 4.....	74
<b>Photo IV.3</b>	Echantillon 5.....	74
<b>Photo IV.4</b>	La nature des sédiments (P1-P2 ; P3).....	75
<b>Photo IV.5</b>	La nature des sédiments (P4).....	76
<b>Photo IV.6</b>	Phase 1, séchage à l'air libre.....	77
<b>Photo IV.7</b>	Phase 2, tamisage des échantillons à travers un tamis 2 mm....	77
<b>Photo IV.8</b>	Phase 3, broyage des échantillons tamisés.....	78

**Chapitre V : Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.**

<b>Photo V.1</b>	Les sédiments extraits lors des opérations de dragage (2021)..	104
<b>Photo V.2</b>	La nature des sols agricoles prélevés au niveau de la plaine d'Abadla.....	109
<b>Photo V.3</b>	La nature des sols agricoles prélevés au niveau de la plaine d'Abadla.....	113
<b>Photo V.4</b>	Essais de perméabilité (Laboratoire : LTPE-Sétif, 2021).....	118

### Introduction générale.

L'envasement des retenues de barrages en Algérie est la conséquence la plus dramatique des phénomènes de l'érosion. Des opérations de maintenance de ces infrastructures ont été réalisées de façon épisodique, par la programmation de nouvelles opérations de dragage de façon à revenir aux conditions normales d'exploitation. A cet effet, l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (ANBT), à inscrit dans son plan d'action des études de protection des sols et de réduction de l'envasement des barrages en cours d'exploitation, ainsi ceux qui sont en voie de construction en Algérie. Il faut proposer des stratégies destinées à réduire l'érosion des sols afin de prolonger la durée de vie des barrages et de valoriser les produits dragués.

Ces travaux de recherche sont basés sur l'étude d'un cas réel de barrage envasé dans une région aride, il s'agit du barrage Djorf-Torba. Nous accordons une attention particulière au barrage de Djorf-Torba, qui est destiné à l'agriculture et à l'alimentation en eau potable. La zone d'étude est un cas réel d'une problématique de son envasement à un rythme rapide d'année en année, en raison de la forte érosion et la dynamique sédimentaire de l'Oued principal Guir. Selon le levé bathymétrique réalisé en 2020 par l'ANBT, le taux d'envasement a dépassé les 45 % pour une perte de capacité annuelle estimée à 3,92 hm<sup>3</sup>/an. Il s'agit d'estimer et quantifier les volumes des matières piégées, ensuite rechercher des voies de valorisation des vases provenant des opérations de dragage.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur la problématique de l'envasement des retenues de barrages en Algérie et dans le monde. Ainsi que les techniques de lutte contre l'envasement des retenues de barrages et les conséquences économiques, en particulier dans les zones arides.

Le second chapitre décrit en détail l'étude d'un cas réel de barrage envasé Djorf-Torba situé dans une région aride de la wilaya de Béchar. Cette partie traite en détail la description et l'historique de l'ouvrage, le bassin versant de l'oued Guir, la géomorphologie du bassin versant, le caractère climatologique, le contexte géologique, le système hydrologique, l'exploitation des apports liquides et la problématique de son envasement qui agit sur la capacité de la retenue.

Dans le troisième chapitre, une cartographie de l'érosion par l'application du SIG (Système d'Information Géographique). Le SIG (logiciel ArcGIS) nous permet une délimitation des sous bassins versants de l'Oued Guir et l'extraction des indices géomorphologiques. On pourrait par la suite définir les zones productrices des sédiments qui exigent une intervention prioritaire. On prendra en compte la variation des différents paramètres qui influent sur ce phénomène, soit la morphologie du bassin versant, les facteurs climatiques du site ou les conditions liées à la nature du terrain. Pratiquement, les résultats de la présente étude devront permettre de tracer des cartes thématiques qui représentent la distribution de l'érosion.

La caractérisation des sédiments d'envasement est une étape essentielle dans la démarche du projet de la valorisation, en conséquence la collecte des données complètes sur la nature du matériau utilisé est indispensable. Dans cet axe, la deuxième partie présente l'étude expérimentale, qui composée deux chapitres, en première lieu en analysant les prélèvements réalisés à différents points de la retenue du barrage, notamment celle du pied du barrage (zone de dragage). Dans une seconde étape, on complète l'étude par la détermination des propriétés physico-chimiques dans la zone de valorisation (la plaine d'ABADLA). Sachant que la valorisation des sédiments d'envasement du barrage DJORF-TORBA dans les terres agricoles de la plaine d'ABADLA doit être en accord avec le respect de l'environnement.

Enfin, la conclusion générale présente une synthèse des résultats de ce travail et des perspectives de recherche qu'il génère.

***CHAPITRE I :***  
***ÉTUDE DE LA***  
***PROBLÉMATIQUE DE***  
***L'ENVASEMENT DES***  
***BARRAGES EN ALGÉRIE***  
***ET DANS LE MONDE.***

# I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

---

## I-1 Introduction.

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter une étude bibliographique sur la problématique de l'envasement des barrages, soit à l'échelle nationale ou mondiale. En premier lieu, on définit l'ensemble des processus qui contribuent aux transports solides et la sédimentation dans les retenues de barrages (origine, cause et conséquence), en particulier les caractéristiques dans les zones arides qui influencent sur le taux d'envasement. En second lieu, l'objectif est de mettre en évidence les différents moyens nécessaires qui permettront d'assurer la diminution de cette problématique.

Bien que le phénomène de l'envasement ne soit pas une fatalité, mais il est considéré comme un inconvénient majeur contre la capacité de stockage des barrages. Actuellement le phénomène de l'envasement est menacé nombreux barrages, plusieurs auteurs ont montré les conséquences et les prévisions dramatiques de la sédimentation dans les retenues de barrages, qui sont fonction surtout du site, de l'importance et du mode d'exploitation de l'ouvrage, on peut citer : ENGEZ ; 1955, MURTHY ; 1970, SIMAIKA ; 1970, MUKAMEDOV ; 1981.

Chaque année, il y a une perte de capacité de la retenue due à la sédimentation rapide, ces pertes ont touché les barrages au niveau mondial, par exemple : barrage Bachental (Autriche) : 3%/an ; barrage Heisonglin (Chine) : 6,5%/an ; barrage Lauros (Grèce) : 4,3%/an ; barrage Neckor (Maroc) : 6,3%/an [MEKERTA, 1995]. Selon le bulletin publié par la Comité International des Grands Barrages en 2009, sur plus de 50000 grands barrages exploités dans divers objectifs, la perte annuelle mondiale en capacité des retenues est d'environ 0,8% par an, ce qui correspond une quantité de 30 à 70 km<sup>3</sup> par an [MEKERTA, 1995].

À l'échelle nationale, et selon l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T) en 2019, l'Algérie dispose de 81 grands barrages en exploitation d'une capacité de 8 milliards de m<sup>3</sup>. En prévision de la réception d'autres ouvrages d'ici 2030, l'Algérie disposera d'un patrimoine unique de 139 barrages, avec une capacité totale de 12 milliards de m<sup>3</sup> environ. Mais la stabilité de ces quantités dans ces retenues de barrages, se confronte à plusieurs problèmes, tels que le phénomène de l'envasement qui est devenue un enjeu économique crucial pour les gestionnaires. Plus de 30 millions m<sup>3</sup> de sédiments se déposent annuellement au niveau des 52 grandes retenues de barrages en Algérie [BOURABAH, 2012 ; BENASLA, 2015].

## I-2 Processus de l'envasement des barrages.

Généralement les cours d'eau qui alimentent les retenues des barrages circulent par les bassins versants, et sous l'influence de différents facteurs, la majorité de ces bassins sont constamment exposés à l'érosion (plus de 2000 tonnes/km<sup>2</sup>/an). En conséquence les apports liquides sont chargés de sédiments avec des taux différents d'une zone à l'autre. La dynamique sédimentaire ou le mouvement des particules solides est née sous l'effet de l'érosion, lié directement aux conditions climatiques, la nature du sol du bassin versant, la morphologie du terrain...etc. [KABIR et al, 2011].

Le phénomène de l'érosion correspond à la phase où les particules de roches et/ou de sols sont arrachées sous l'effet de la pluie ou le vent (phase 1 : érosion des sols). Les particules ou les matériaux arrachés en première phase sont transportés dans les cours d'eau vers la retenue du barrage, par la force des courants de densité avec des taux différents d'un endroit à l'autre (phase 2 : transport solide). La dernière phase est caractérisée par l'accumulation et le dépôt des matériaux au fond des barrages, il est déposé graduellement selon leurs poids de l'amont vers l'aval (phase 3 : sédimentation des particules). Ces étapes qui ont été citées précédemment (érosion ; transport solide ; sédimentation des particules) sont les différents processus d'un phénomène qui est connu sous le nom : envasement des barrages (Figure I-1).

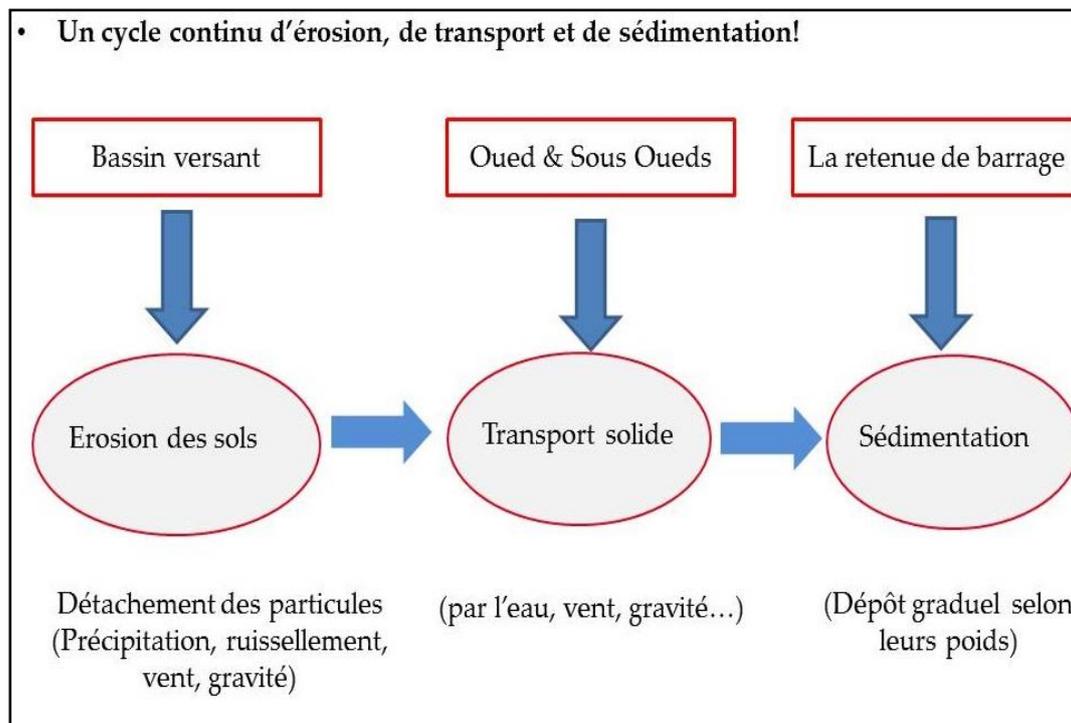


Fig. I-1 : Processus de l'envasement des barrages.

# I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

## I-2-1 Érosion des bassins versants.

L'érosion des sols est un phénomène naturel multidimensionnel, il représente le déplacement des matériaux à la surface des terres ou en nappe. Dans les bassins versants le processus implique le détachement des particules du sol sous l'action des agents atmosphériques, tels que la pluie (érosion hydrique) et/ou le vent (érosion éolienne) [ROOSE, 2004]. Ce phénomène est parmi les plus préoccupants pour l'aménagement des bassins versants, très répandu en zones arides et semi-arides, touchant particulièrement les pays du Maghreb, où le manque des ressources hydriques est accentué par l'érosion des sols qui peut atteindre les 5000 t/km<sup>2</sup>/an contre 30 à 50 t/km<sup>2</sup>/an en Europe [AMMARI, 2012].

Tous les matériaux érodés soit par l'érosion hydrique où par l'érosion éolienne sont transportés plus ou moins rapidement jusqu'aux cours d'eau (Figure I-2). On recense les particules fines en suspension et les sédiments grossiers charriés avec des taux variables d'un endroit à l'autre [OUIDIR, 2012].

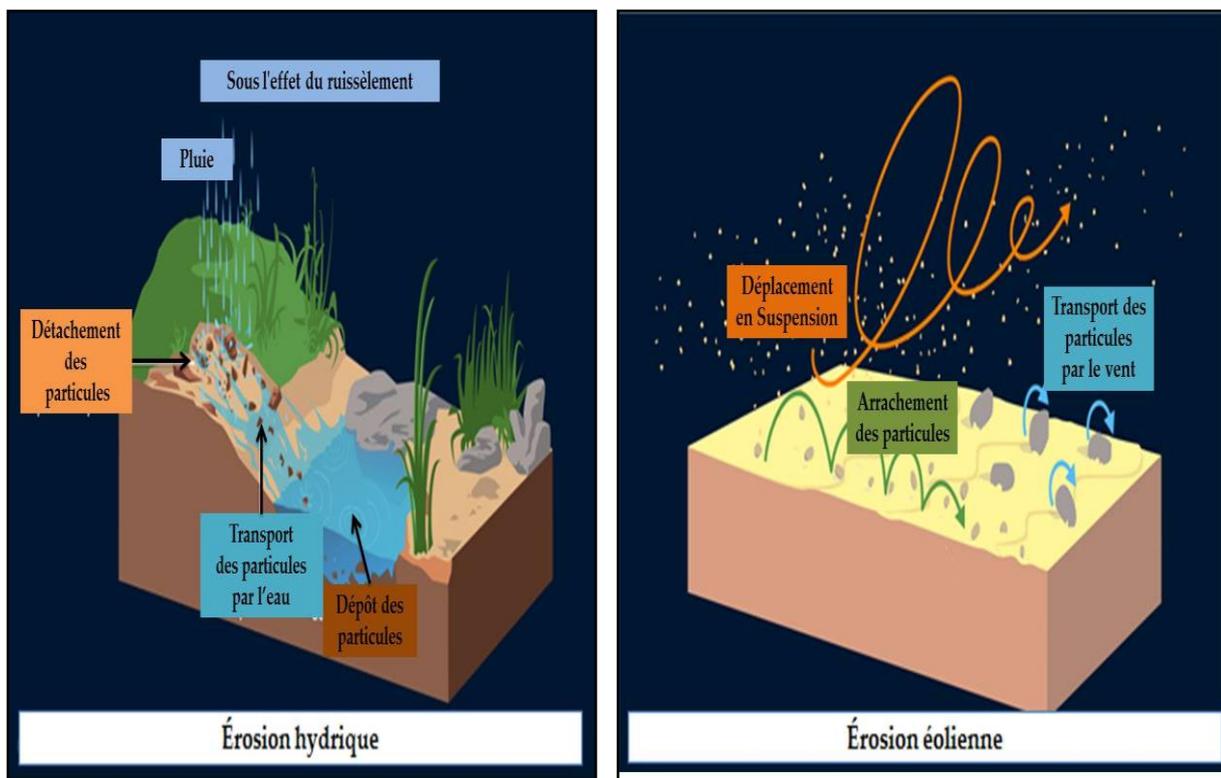


Fig. I-2 : les différents types de l'érosion.

# I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

---

## I-2-2 Évaluation de l'érosion

En matière de quantification, l'érosion est une fonction multiplicative de l'ensemble des actions physiques, des facteurs climatiques, des paramètres morphologiques et des caractéristiques liées à la nature du terrain. Le taux d'érosion est généralement important et les quantités transportées sont extrêmement variables suivant les dispositions du bassin, les pentes des rives, l'état de végétation, etc.

Selon les estimations empiriques faites sur une base annuelle, l'érosion entraîne en moyenne 5 à 10 tonnes de sol par hectare en Afrique, en Europe et en Australie, de 10 à 20 tonnes par hectare et ainsi sur tout le continent américain, et près de 30 tonnes par hectare en Asie [BROWN et al, 1996]. Les programmes de conservation des sols considèrent que la tolérance de perte de sol est comprise entre 5 à 12 tonnes/ha/an (chiffre variant selon la méthode d'estimation).

L'absence d'outils de mesure nous oblige à recourir aux méthodes empiriques (TIXERONT, 1960 ; FOURNIER, 1960 ; SOGRÉAH, 1969 ; GAVRILLOVIC, 1972 ; DEMMAK, 1982...). En 1978, WISCHMEIER et SMITH ont établi un modèle empirique de prévision de l'érosion, c'est l'équation universelle des pertes en terre (USLE). Ce modèle d'estimation regroupe les différents facteurs cités ci-dessus, chaque facteur est une appréciation numérique qui précise la gravité de l'érosion du sol. Les valeurs de l'érosion obtenues peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions [KOUSSA et al, 2018].

L'équation de la formule WISCHMEIER et SMITH est basé sur cinq (5) facteurs qui sont l'agressivité climatique (indice de pluie **R**), le facteur d'érodabilité du sol **K**, le facteur topographique **LS** (indice combinant l'effet de la longueur **L** de la parcelle et de la pente **S**), l'indice des pratiques culturales **C** et le paramètre d'aménagement antiérosif **P** [FAO, 1994]. Cette équation s'écrit :

$$A \text{ (t/ha/an)} = R * K * LS * C * P$$

- **A** (t/ha/an) : Perte en sol par unité de surface par an

L'application de l'organigramme de la formule WISCHMEIER et SMITH (Figure I-3), nous a permis de cartographier l'érosion à l'échelle des bassins versants, sous forme de cartes thématiques à l'aide du SIG (Système d'Information Géographique) [BRAHIM et al, 2018].

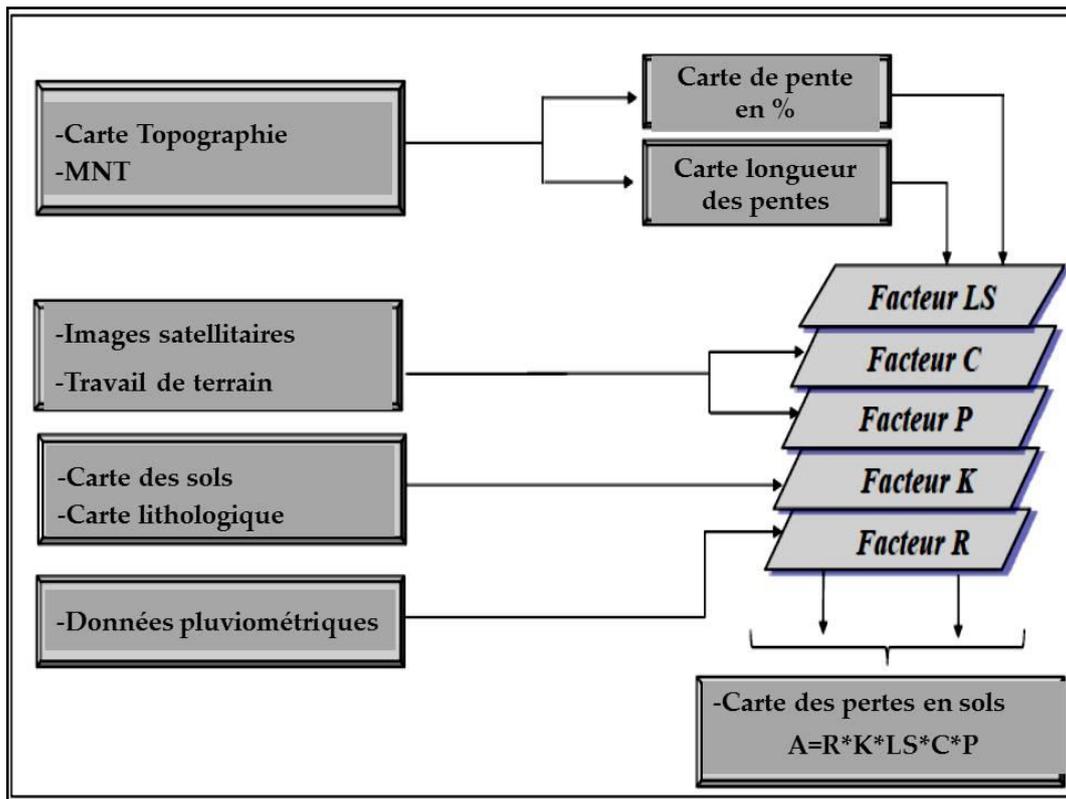


Fig. I-3 : Organigramme de l'USLE [EL HAFID et al, 2018].

## I-2-3 Transport solide.

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, la dynamique sédimentaire ou le mouvement des particules solides sont variables dans le temps et dans l'espace [RASSI, 2004]. Le transport solide dépend essentiellement d'un certain nombre de facteurs tels que la topographie du terrain (vitesse de l'écoulement), la nature géologique du bassin versant (granulométrie des particules et leurs vitesses de chute) et aussi le régime climatique (le temps entre l'érosion et la sédimentation) [DEGOUTTE, 2006].

Ce phénomène conduit à l'envasement des barrages, il fait le lien entre les sols du bassin versant et la retenue du barrage. Il est défini par deux phases, l'une liquide (eau) et l'autre solide (granulats, sol) dans les cours d'eau naturels. Les particules solides vont être transportées en deux (2) processus généraux de transport solide qui sont : (Figure I-4).

- **Transport solide par mode charriage :** Les grains (sables, graviers et galets) se déplacent sur le fond en roulant, avec une vitesse nettement inférieure à celle de l'eau.

# I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

- **Transport solide par mode suspension** : Les matériaux prélevés sur le fond (sables fins, limon et argiles) sont emportés par le courant, les grains se déplacent à la vitesse de l'eau.

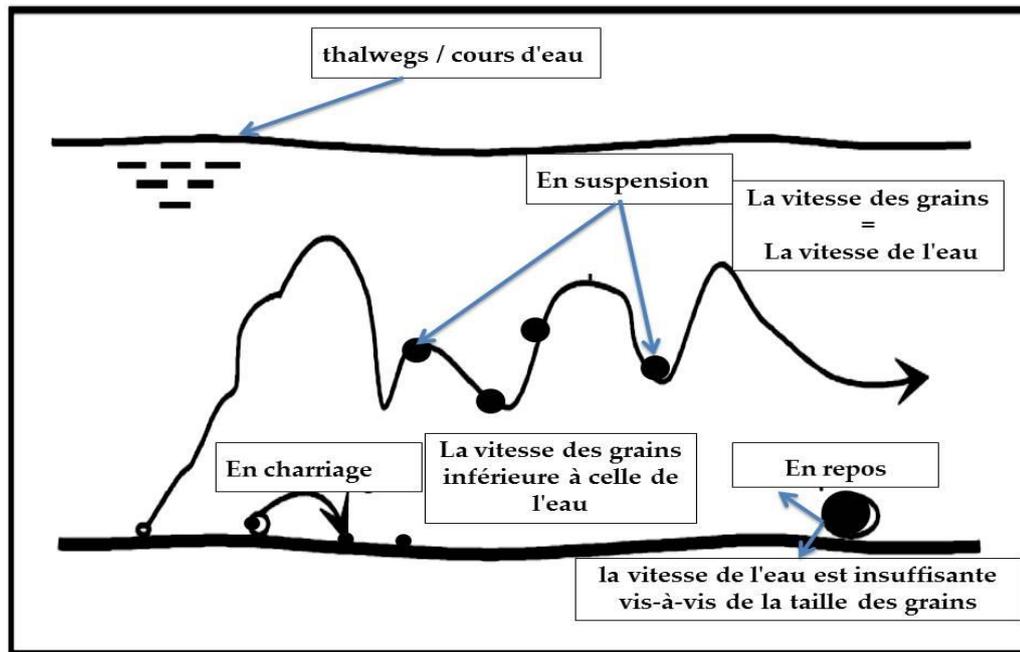


Fig. I-4 : Modes de transport solide [LEMZADMI et SAIDI, 2017].

La distinction entre charriage et suspension pour un même écoulement liquide dépend de la taille, de la densité des particules et de la structure d'écoulement. Le diagramme de HJULSTRÖM (1935) illustre le comportement des particules en fonction de leur taille et de la vitesse du courant (Figure I-5).

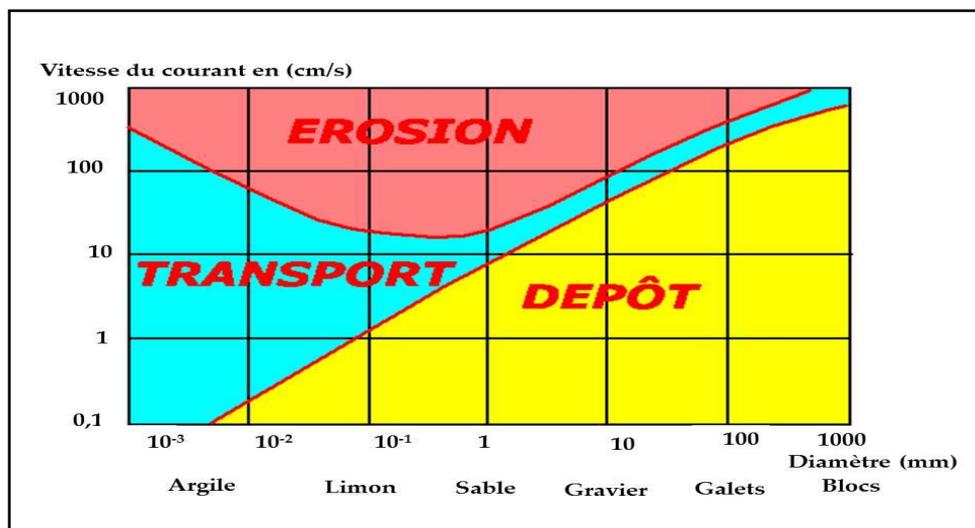


Fig. I-5 : Diagramme des particules [HJULSTRÖM, 1935].

# I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

## I-2-4 La sédimentation des retenues.

Tous les barrages du monde sont exposés au phénomène de la sédimentation, mais avec des vitesses qui diffèrent d'une région à l'autre. Ce phénomène est dû aux quantités considérables des apports solides qui sont piégées dans les retenues de barrages [REMINI et HALLOUCHE, 2003]. En général cet apport solide s'accumule dans les réserves suivant un mécanisme de répartition graduellement croissant de l'amont vers l'aval [FRÉMION et al, 2016] (Figure I-6). Une fois que les eaux des crues chargées arrivent à l'entrée de la retenue, les matériaux grossiers se déposent, de l'autre côté les particules fines sont tributaires de leurs poids, se décantent dans l'ensemble de la retenue.

La nature et le volume des dépôts va dépendre d'un certain nombre de facteurs tels que la source des sédiments (géologie des sols), la densité de précipitations (paramètre climatique), le profil longitudinale du cours d'eau (la topographie de site), la couverture végétale du bassin versant (la présence des matières organiques dans la composition des sédiments). Il y a donc de multiples typologies de sédiments qui sont présentes dans les retenues [ANGER, 2014].

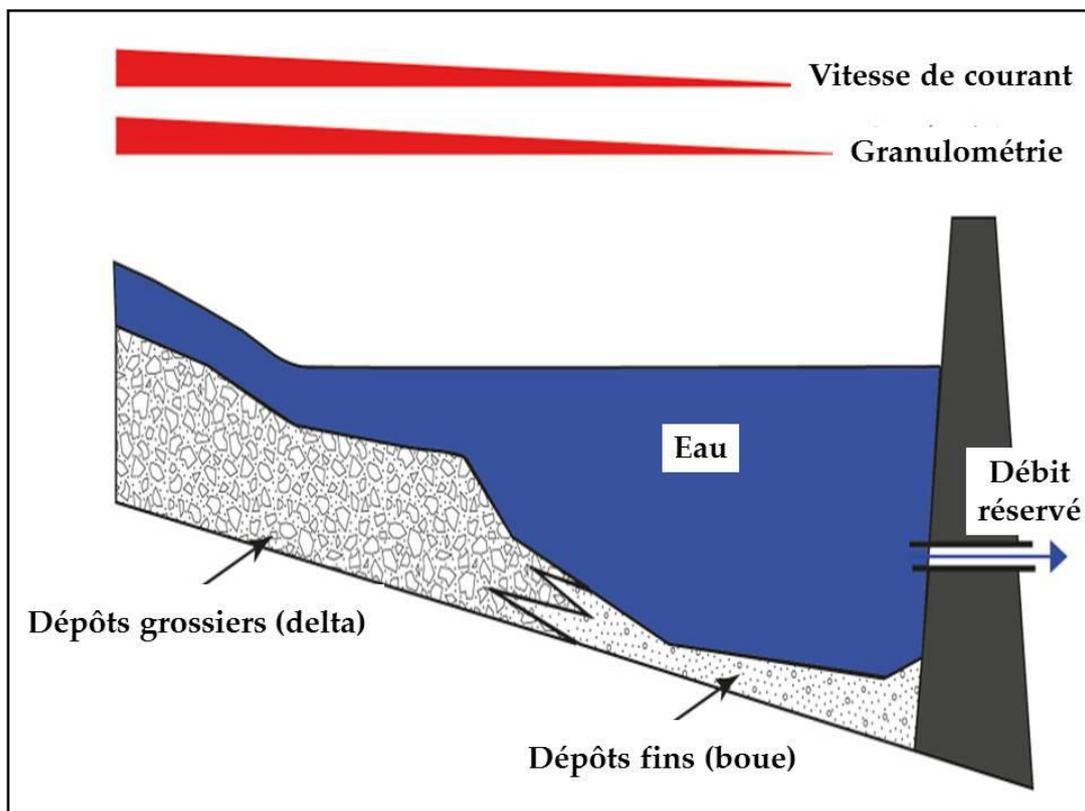


Fig. I-6 : Mécanisme de la sédimentation des retenues [FRÉMION et al, 2016].

## I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

---

L'envasement des barrages constitue sans doute la conséquence la plus dramatique de la sédimentation des retenues, l'Algérie perd annuellement une capacité estimée à 20 Millions de mètres cube [NAIB, 2014], d'autant plus que dans nos régions où l'eau constitue un facteur limitant du développement économique, soit par son insuffisance ou soit par sa mauvaise répartition.

L'alluvionnement des retenues est une menace réelle, il pose des problèmes majeurs qui entravent la gestion rentable et le fonctionnement durable des réservoirs. Ces entraves exigent aux exploitants des opérations d'interventions en urgence, non seulement au niveau de la retenue mais aussi au niveau des bassins versants, par la mise en place de systèmes de lutte contre l'érosion, etc.

### I-3 État de l'envasement des barrages en chiffre.

Le phénomène de l'envasement se situe dans de nombreux barrages, que ce soit à l'échelle mondiale ou au niveau continental et même au plan national. La principale raison de ce problème est le phénomène de la sédimentation des retenues des barrages, en particulier on remarque que le transport sédimentaire mondial varie entre 24 à 30 milliards de tonnes.

La sédimentation des barrages dans les pays de l'Afrique du nord est très élevée. Sur plus de 230 barrages d'une capacité totale de stockage estimée à 23 milliards m<sup>3</sup>, l'envasement annuel est près de 125 millions de m<sup>3</sup>, avec par ordre d'importance décroissante, le Maroc, l'Algérie et la Tunisie (Tableau I-1) [REMINI et HALLOUCHE, 2004].

*Tableau I-1 : La situation des barrages dans les pays de l'Afrique du nord.*

Pays	Capacité de stockage (milliards m <sup>3</sup> )	Envasement annuel (millions m <sup>3</sup> )
Algérie	5.2	32
Maroc	14	65
Tunisie	3.5	25
Total	22.7	122

## I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

À l'échelle nationale, le problème est largement répandu. Le premier barrage construit en Algérie est celui de Sig (Mascara) en 1846, il a été abandonné faute de son envasement rapide. En 1890, il existait en Algérie neuf barrages d'une capacité de 61 Millions de m<sup>3</sup> avec un volume de vase de 2,7 Millions m<sup>3</sup> [DIAB, 2013].

Aujourd'hui, l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T), estime que sur 65 grands barrages en exploitation d'une capacité de stockage de 7.69 milliards m<sup>3</sup>, l'envasement est d'environ 1.11 milliards m<sup>3</sup> (Figure I-7). La première cause est l'érosion des bassins versants (plus de 1000 t/km<sup>2</sup>/an), ce qui correspond à un taux d'envasement annuel près de 14.43 %, avec une perte annuelle de 2 à 3% de la capacité de stockage (Tableau I-2). À titre d'exemple, la capacité initiale du barrage Djorf Torba (Béchar) était de 350 hm<sup>3</sup> en 1969, elle n'était plus que de 260 hm<sup>3</sup> en 2004. Une projection a été faite pour l'an 2010, d'où il ressort que certains barrages comme par exemple ceux de Fergoug (Mascara) et de Bakhadda (Tiaret) finiront par périr si des dispositions radicales ne sont pas prises (Figure I-8).

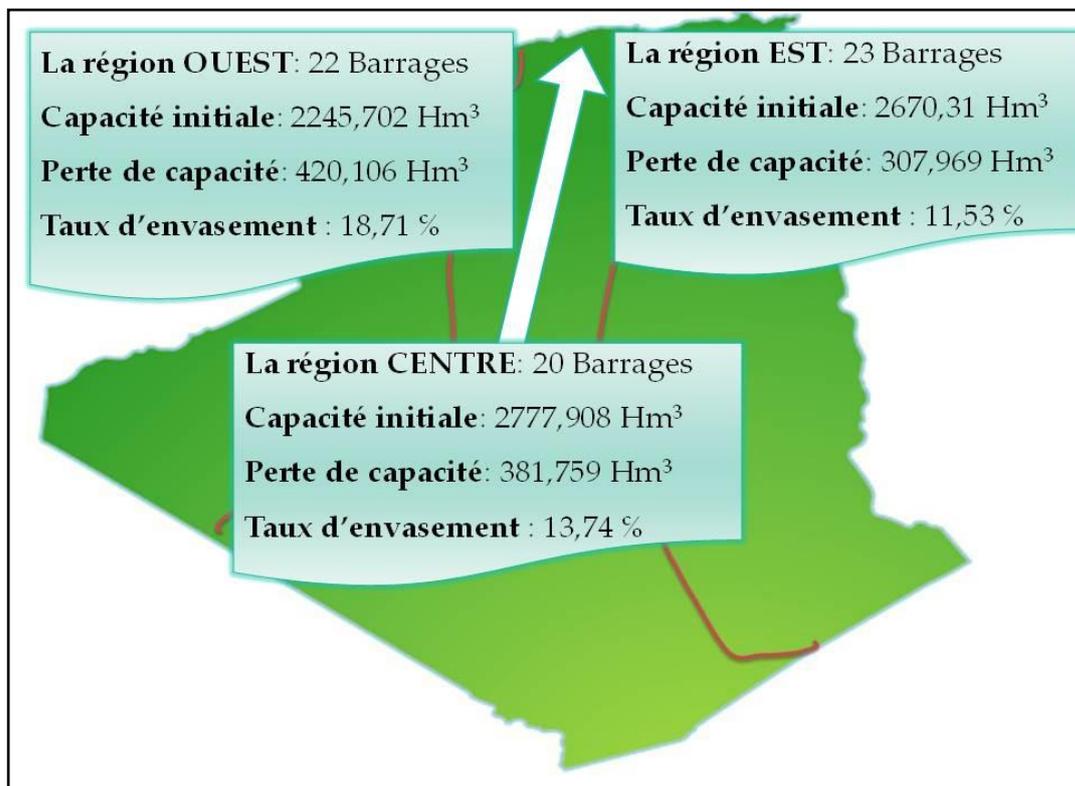


Fig. I-7 : État des barrages en Algérie (source A.N.B.T, 2004-2014).

## I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

Tableau I-2 : Évolution de la situation des barrages Algériens (Source : A.N.B.T)

En 1962				
Nombre	Capacité initiale (Hm <sup>3</sup> )	Capacité en 2004 (Hm <sup>3</sup> )	Volume vase (Hm <sup>3</sup> )	Envasement (%)
14	826	530	296	35,8

En 2000				
Nombre	Capacité initiale (Hm <sup>3</sup> )	Capacité en 2004 (Hm <sup>3</sup> )	Volume vase (Hm <sup>3</sup> )	Envasement (%)
45	3.939,00	3 452,00	487,00	12,3

En 2014				
Nombre	Capacité initiale (Hm <sup>3</sup> )	Capacité en 2004 (Hm <sup>3</sup> )	Volume vase (Hm <sup>3</sup> )	Envasement (%)
68	7 751,00	6736,00	1015,00	13%



Fig. I-8 : État d'envasement des barrages Fergoug et Bakhadda en 2008.

# I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

## I-4 Particularités de l'envasement des retenues en zones arides.

Les barrages dans les régions arides et semi arides sont confrontés à trois problèmes hydrauliques très sérieux qui sont l'évaporation intense, l'envasement et les fuites d'eau [BENFETTA et al, 2019]. Le phénomène de l'envasement des barrages est la conséquence d'un processus naturel d'érosion des bassins versants et le transport solide des cours d'eau, ce phénomène enregistre les valeurs les plus élevées dans les régions arides et semi arides tel que le Maghreb et plus particulièrement l'Algérie, qui perd annuellement une capacité de 1 à 3%.

Les zones arides et semi-arides présentent des conditions naturelles rudes caractérisées par un climat très agressif avec des précipitations intenses et très irrégulières pouvant dépassant les 45 mm/h [TADRIST et al, 2016]. Ces facteurs climatiques ont une influence considérable sur le mécanisme et le processus du comblement. C'est ainsi que les fortes concentrations en particules fines enregistrées dans les oueds en périodes de crues, des concentrations en particules fines dépassant les 100 g/l et pouvant atteindre parfois 500 g/l [REMINI et BENSALIA, 2016].

Le climat aride et semi-aride est un facteur prépondérant dans la gravité du phénomène de l'érosion. Les recherches effectuées dans le domaine de l'érosion et du transport solide, montrent que les dégradations spécifiques des bassins versants maghrébins varient de 1000 à 5000 t/km<sup>2</sup>/an (Tableau I-3) [TADRIST et al, 2016]. Les barrages des régions arides s'ensavent en périodes de crues, lesquelles surviennent après une longue sécheresse (6 à 7 mois) où le sol devient très favorable à l'érosion par des ruissellements.

Tableau I-3 : Taux d'érosion des bassins versants du Maghreb [TADRIST et al, 2016]

Bassin versant (région)	Érosion spécifique (t/km <sup>2</sup> /an)	Référence
Ebda (Algérie)	1 875	MEDDI, 1999
L'Isser (Algérie)	2 300	BOUROUBA, 1997
Nekor (Maroc)	5 900	LAHLOU, 1988
Tebaga (Tunisie)	336	BERGAOUI et al., 1998
Maghreb	397	Probst et al., 1992

## I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

L'envasement des retenues dans les zones aride est très accéléré d'une année à l'autre. La comparaison des valeurs de 1986 et 2006 montrent un doublement des taux d'envasement pour les barrages de Djorf- Torba et K'sob, qui passent de 1,3 à 2,6 Millions de m<sup>3</sup>/an et de 0,3 à 0,6 Million de m<sup>3</sup>/an respectivement [LEDJILLOT et MAZARI, 2018].

### I-5 Impact de l'envasement sur les barrages.

L'envasement des barrages est considéré comme étant l'accumulation des dépôts de vase au fond des retenues. Cette sédimentation pose d'énormes problèmes au barrage et à son environnement, et peut présenter un risque considérable sur la stabilité de l'ouvrage et ses équipements hydrauliques. Le tassement et la consolidation de la boue bloque les pertuis de vidange d'un barrage. Un barrage envasé destiner à l'irrigation provoque le comblement des canaux d'irrigation et affecte fortement la qualité des eaux [BENSAFIA, 2016]. En principe il y a cinq conséquences majeures (Figure I-9), qui sont :

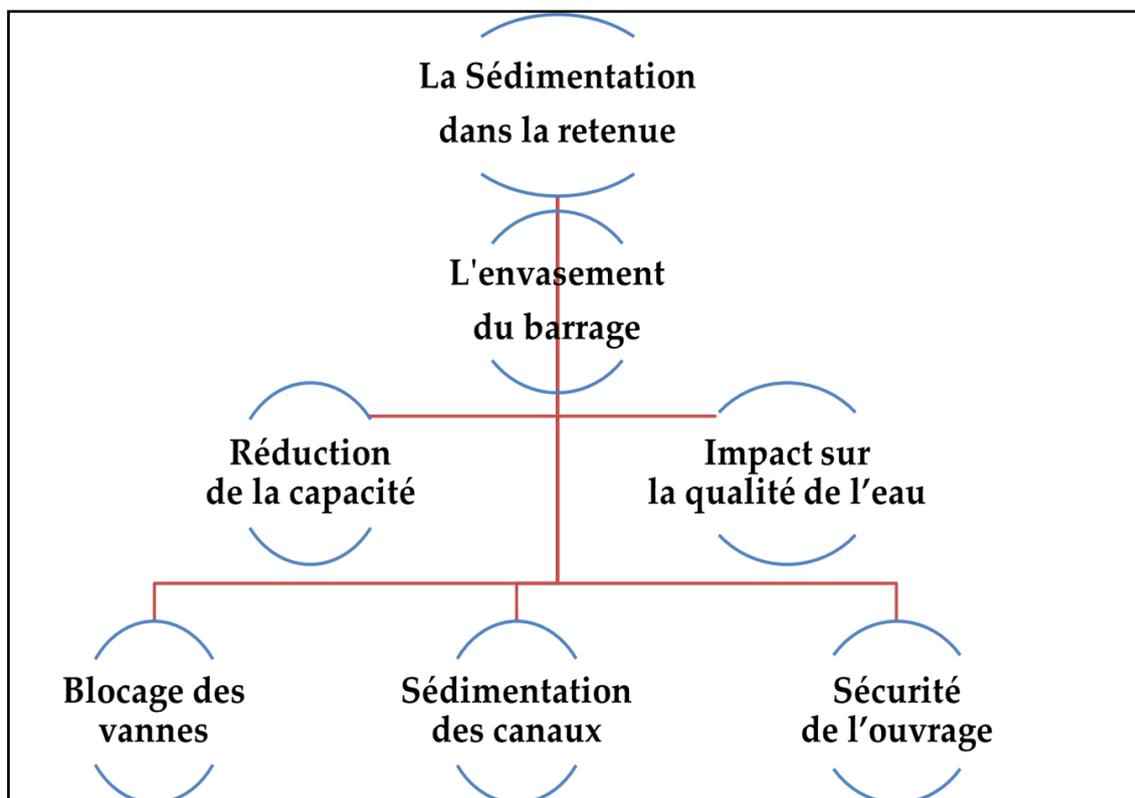


Fig. I-9 : Schéma des problèmes posés par l'envasement.

## I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

- **Réduction de la capacité :**

Le barrage est considéré comme un corps étranger au cours d'eau, il perturbe l'écoulement des eaux. La boue se déposant petit à petit au fond d'un barrage réduit la capacité utile d'un barrage, et par suite sa durée de vie. La figure I-10 représente l'état des barrages algériens vis-à-vis de l'envasement.

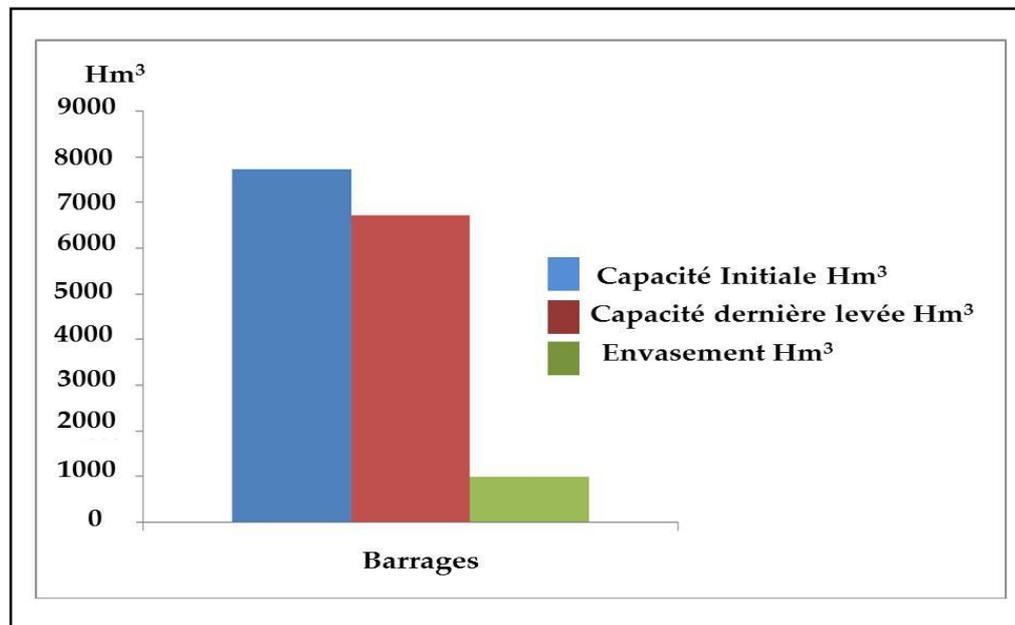


Fig. I-10 : État d'envasement des barrages Algériens (source A.N.B.T ; 2014).

- **Blocage des organes de vidange :**

La présence des courants de densité dans une retenue accélère la sédimentation, et peut avoir comme impact l'obturation des organes de vidange. À cet effet, plusieurs barrages algériens ont connu un tel problème. À titre d'exemple la vanne de fond du barrage d'Oued El Fodda (Algérie) est bloquée depuis 1948 et se trouve actuellement sous plus de 40 m de vase, obligeant les services hydrauliques à équiper en 1961 l'ouvrage de cinq vannettes de dévasement [REMINI et HALLOUCHE, 2004].

- **Sécurité de l'ouvrage :**

La sédimentation des retenues peut mettre un risque sur la stabilité de l'ouvrage. La forte densité de la vase engendre une augmentation de la poussée hydrostatique. À titre d'exemple, les services concernés du barrage des Zardezas (Skikda), ont diminué le volume de l'eau claire de 9.10 m en 1990, uniquement pour assurer la sécurité de l'ouvrage [BENHADDAD, 2015].

## I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

---

- **Sédimentation des canaux d'irrigation :**

Généralement le dépôt des sédiments dans les retenues de barrages destinés à l'irrigation, pose d'énormes problèmes pour les gestionnaires, d'une part l'irrigation des terres agricoles se fait par l'eau chargée en sédiments, et d'autre part l'eau chargée provoque le comblement des canaux qui se trouvent à l'aval du barrage.

- **Impact sur la qualité de l'eau :**

La présence de micropolluants métalliques et organiques, de phosphore et/ou de matières organiques dans les sédiments de la retenue contribue à une dégradation de la qualité des eaux (Figure I-11). Ces effets seront d'autant moins importants que le taux de renouvellement des eaux de la retenue du barrage sera élevé [OUIDIR, 2012].

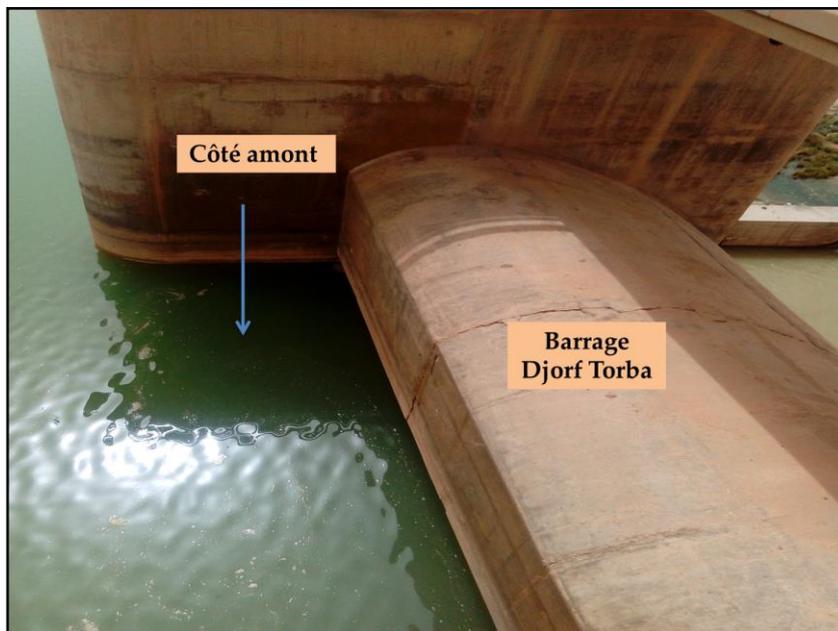


Fig. I-11 : État de la qualité de l'eau du barrage Djorf-Torba (Béchar)

Les conséquences la sédimentation des barrages sont extrêmement gênantes, elle a un impact au niveau du réservoir lui-même, mais aussi en amont et en aval du barrage. Les impacts liés aux sédiments dans les retenues peuvent être de plusieurs types, selon la nature de l'ouvrage, les conditions d'exploitation, la quantité des sédiments et leur nature. Les accumulations peuvent affecter directement ou indirectement l'exploitation de l'aménagement, l'occupation du territoire, les différents usages présents ou à proximité de la retenue, mais aussi les effets biologiques ou physiques [ANGER, 2014].

## I-6 Techniques de lutte contre l'envasement.

L'Algérie compte un nombre important de barrages de toutes catégories et de toutes dimensions, destinés à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable ou industrielle. Malheureusement, ce potentiel de richesse se dégrade de jour en jour par l'envasement des barrages. Il s'agit d'un problème qui n'est pas propre à l'Algérie, mais qui se pose partout. Face à ce problème, les services hydrauliques ont déployés d'énormes efforts depuis plusieurs années. Ainsi, différents moyens techniques de lutte ont été expérimentés en Algérie, ce qui a donné comme résultats le prolongement de la durée de vie de plusieurs barrages. On divise les techniques de lutte contre l'envasement en deux (2) grandes phases, l'un indirecte pendant la phase d'élaboration du projet par les méthodes préventives, et l'autre directe pendant la phase d'exploitation par les méthodes curatives (Figure I-12).

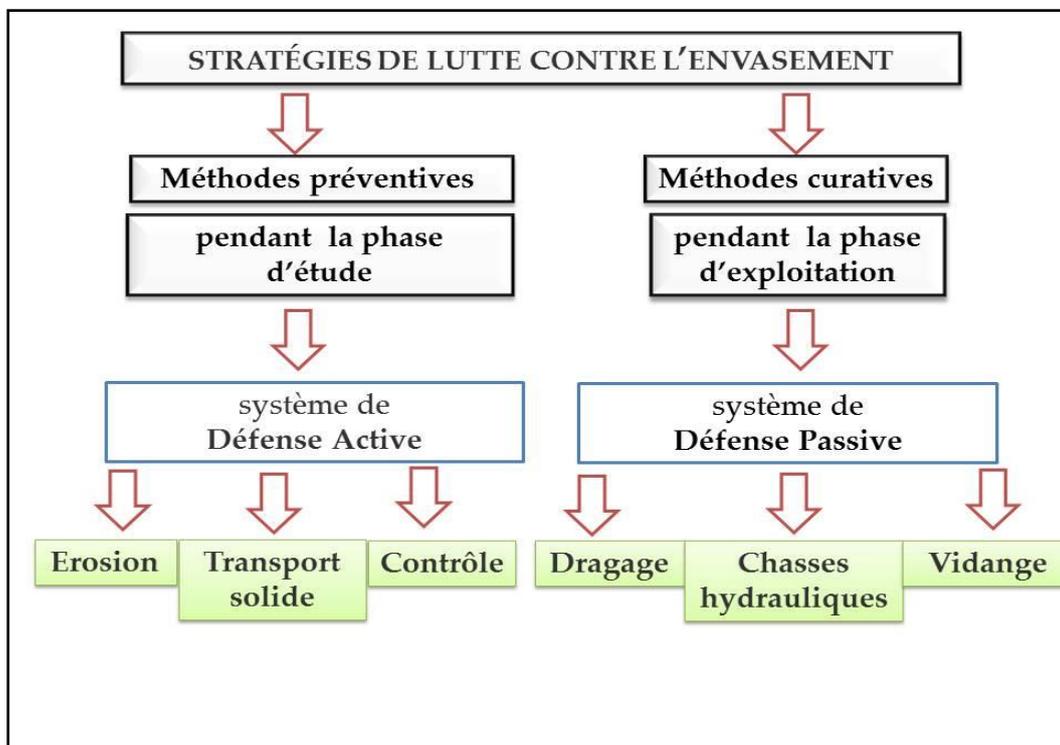


Fig. I-12 : Techniques de lutte contre l'envasement.

### Méthodes préventives :

La première idée qui vient à l'esprit pour réduire l'envasement, est celle qui consiste à empêcher la formation des sédiments produits par l'érosion. Cette solution doit prendre en considération l'aménagement des bassins versants.

## I / Étude de la problématique de l'envasement des barrages en Algérie et dans le monde

---

À titre d'exemple, on peut citer quelques méthodes utilisées en Algérie ; le reboisement, la formation des banquettes pour freiner l'écoulement torrentiel, la création de petits barrages en gabions dans les petits thalwegs, la plantation des cultures suivant les courbes de niveau et la plantation de végétation à longues tiges dans les oueds. Dans ce cadre de la protection des bassins versants des barrages, et selon l'ANBT, un programme spécial a été lancé par la Direction Générale des forêts. Il s'agira de traiter une superficie de 1,5 Millions d'hectares entre 2014 et 2020.

### Méthodes curatives :

- Les chasses de dévasement par les vidanges de fond à barrage plein et au moment de l'entrée d'un excédent d'eau dans la retenue. Cette méthode est utilisée sur la plupart des barrages Algériens, leurs efficacités se limitent à éviter le blocage des vannes.
- Le dévasement par dragage est devenu aujourd'hui une option inévitable pour prolonger leur durée de vie. Deux modes peuvent être opérés au niveau d'un barrage. Il s'agit d'un dévasement périodique (évacuation de la vase par la vanne de fond) et d'un dévasement occasionnel (dragage d'un barrage). Actuellement et selon l'ANBT, huit barrages sont en cours de dévasement par dragage. Il s'agit du barrage Fom El Kherza (Biskra), K'sob (M'sila), Zardezas (Skikda), Sidi Abdelli (Relizane), Bouhanifia et Fergoug (Mascara), BenKhedda (Tiaret) et Djorf- Torba (Béchar). Le coût de ces opérations est de l'ordre de 9 milliards de DA.

Toutefois la technique de dragage la plus appropriée nécessite au préalable la résolution des problèmes suivants :

- L'extraction et le transport des vases en utilisant un volume d'eau minimum (rapport vase/eau).
- Définition des zones de rejet.
- Exploitation en continu de la retenue d'eau en même temps que le dévasement.

Le dévasement par dragage est une opération très coûteuse et qui pose un problème complexe relatif au rejet de la vase draguée. Néanmoins, cette opération s'impose en Algérie, car il y a de moins en moins de sites pour la réalisation de nouveaux barrages.

### I-7 Conclusion.

L'envasement des retenues est lié directement aux phénomènes de l'érosion et la dynamique sédimentaire. Les conditions physiques, géomorphologiques, hydro-climatiques et socioéconomiques sont tous des facteurs qui favorisent le déclenchement et l'accélération de ce phénomène. L'envasement des retenues est classé parmi les facteurs les plus importants de la perte en capacité. Chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec une occupation d'un volume considérable dans la retenue, cette situation pose des problèmes épineux aux gestionnaires.

En terme économique, cette perte dans les capacités de stockage est équivalente à la construction de plusieurs grands barrages. Dans cet axe, l'ANBT a intégré les études des apports solides aux études hydrologiques. Les résultats de l'étude des apports solides définiront le volume de l'envasement de la retenue au cas où des mesures ne sont pas prises et conduiront à la prise des décisions concernant l'évaluation de différentes solutions de prévention et de gestion de l'alluvionnement.

Une sous-estimation de l'envasement de la retenue résultera une réduction du volume utile et par conséquent à un abrégement de la vie utile du barrage. Par contre, une surestimation de l'envasement attendu aura comme résultat l'augmentation du coût du projet. Donc, le dragage est devenu vital pour le développement social et économique et même à la maintenance de bon nombre d'infrastructures. En parallèle il est important de trouver des méthodes et des techniques de traitement pour valoriser ces sédiments qui sont récupérés à travers le dragage.

La maîtrise du phénomène de l'envasement exige un diagnostic qui permet de décrire et de quantifier les différents paramètres qui peuvent intervenir au phénomène de l'envasement. La majorité des auteurs s'accordent pour la lutte contre l'envasement par l'élaboration d'un plan national d'aménagement des mesures préventives en amont du bassin versant. Mais d'un autre côté, l'aménagement des bassins versants est devenu très complexe et nécessite une banque de données, des séries d'observations, une analyse minutieuse du terrain... etc.

***CHAPITRE II :***  
***ÉTUDE D'UN CAS RÉEL***  
***DE BARRAGE ENVASÉ***  
***EN RÉGION ARIDE***  
***(BARRAGE DJORF-TORBA,***  
***WILAYA DE BÉCHAR).***

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

### II-1 Introduction.

Dans ce deuxième chapitre, nous allons mettre en évidence l'importance des barrages pour les régions arides ou semi-arides, d'une part, par la connaissance de l'ouvrage, sa conception, ses apports liquides et l'impact de l'apport solide, et d'autre part, par la connaissance de la région à travers les données climatiques, la situation du bassin versant, la nature géologique des formations soumises à l'érosion... etc. Ces dernières qui sont la cause des éléments sédimentaires, peuvent caractériser les matériaux à valoriser, en matière d'ordre de grandeur des volumes à traiter et des moyens à mettre en œuvre [SEMCHA, 2006].

En Algérie et selon l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T ; 2004, 2014), nous enregistrons quatre barrages situés dans les zones arides, tels que : Barrage Brézina (El-Bayadh) ; Barrage Djorf-Torba (Béchar) ; Barrage Foum-El-Gherza (Biskra) ; Barrage Fontaine des Gazelles (Biskra), (Figure II-1). La capacité de stockage global de ces barrages est de l'ordre de 600 hm<sup>3</sup> (Tableau II-1).

Les problèmes majeurs affectant ces barrages sont bien l'envasement et les pertes des volumes, soit par fuites ou soit par évaporation. Le taux d'envasement est très variable d'un endroit à l'autre, de 2 % à 65%, avec une perte annuelle moyenne estimée à 1 hm<sup>3</sup>.

Dans cette thématique, nous accordons une attention particulière au barrage de Djorf-Torba, qui est destiné à l'agriculture et à l'alimentation en eau potable. Notre zone d'étude est un cas réel d'une problématique de son envasement à un rythme rapide d'année en année, en raison de la forte érosion et la dynamique sédimentaire.

Tableau II-1 : Situation des barrages en zones arides (A.N.B.T ; 2004-2014).

Barrages	Capacité initiale (Hm <sup>3</sup> )	Taux d'envasement en %
Brézina	123	12
Djorf-Torba	350	25
Foum-El-Gherza	47	65
Fontaine des Gazelles	55	2

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

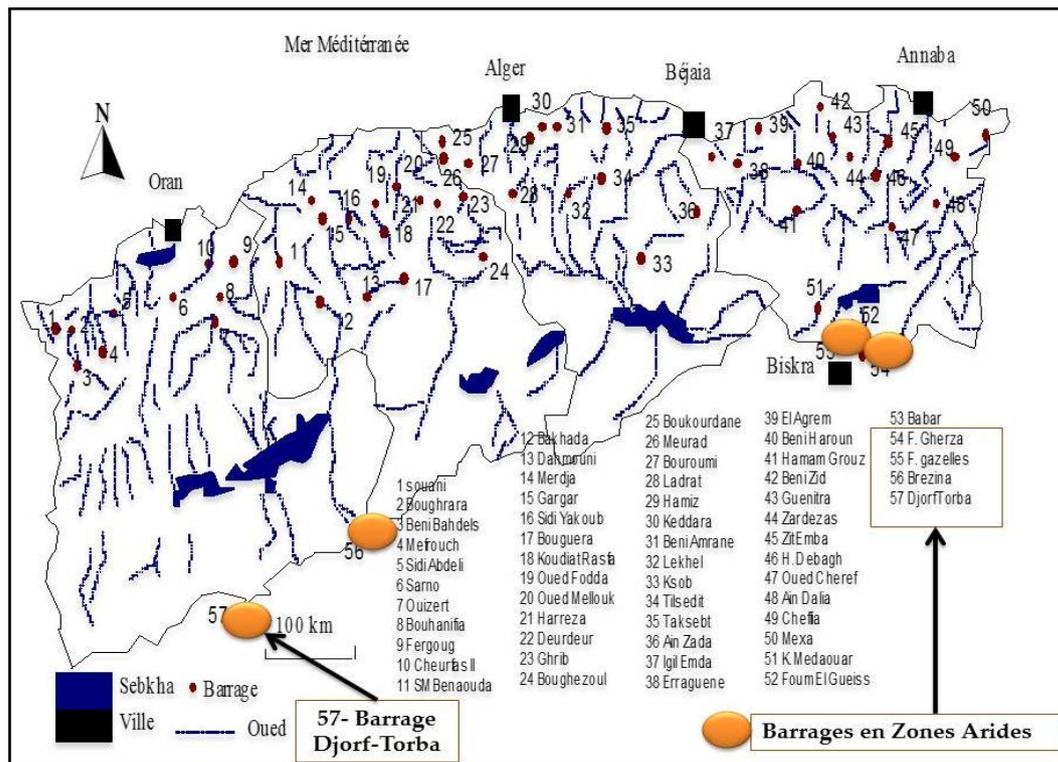


Fig. II-1 : Situation géographique des barrages en zones arides (A.N.B.T ; 2014).

### II-2 Présentation du barrage Djorf-Torba.

#### II-2-1 Situation géographique et objectif.

Le barrage de Djorf-Torba est situé à 60 km à l'ouest de Béchar, localisé entre la ville de Kénadsa et la ville de Meridja. Il a été implanté en 1969 sur l'Oued Guir, il contrôle un vaste bassin versant subsaharien d'une superficie de plus 22000 km<sup>2</sup> (Figure II-2). Selon l'ANBT, le barrage est destiné à l'amortissement des crues de l'Oued Guir et à l'irrigation des périmètres agricoles de la plaine d'Abadla (5400 hectares). En 1985, il est détourné principalement vers l'alimentation en eau potable de la ville de Béchar et la localité de Kénadsa, par un débit moyen annuel de 15 hm<sup>3</sup>/an.

La retenue du barrage occupe le quatrième rang en Algérie avec une capacité initiale estimée à 350 hm<sup>3</sup> (année de mise en eau en 1969). Au bout de trente-cinq années, un levé bathymétrique a été réalisé en 2020, sa capacité a chuté à 193 millions de m<sup>3</sup>, soit un taux d'envasement dépassant les 45%. L'envasement annuel estimé est d'environ 3,92 hm<sup>3</sup>/an pour un apport moyen en eau de 200 hm<sup>3</sup> [A.N.B.T, 2020].

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

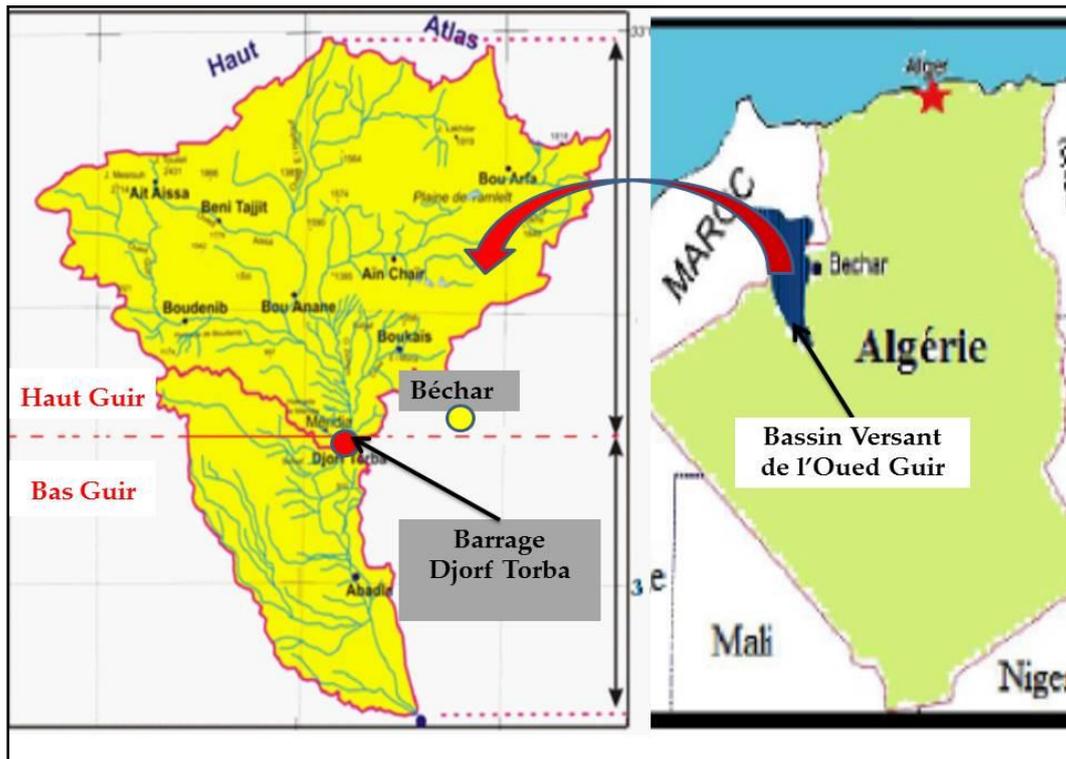


Fig. II-2 : Situation du barrage Djorf-Torba (Béchar).

### II-2-2 Description de l'ouvrage.

Dans son état actuel, le barrage Djorf-Torba est un ouvrage poids en béton, avec un profil classique. Le barrage est l'une des plus grandes retenues d'Algérie, avec une hauteur de 38 m, il atteint sa plus grande hauteur à la partie centrale déversant, sa grande longueur est de 949 m avec une implantation légèrement courbe ( $R = 490\text{m}$ ). La côte de la retenue normale est fixée à 699 m et celle de la retenue maximale correspondant au niveau des plus hautes eaux exceptionnelles est de 705 m (Tableau II-2).

Le barrage contient sept (7) pertuis de vidanges de fond, avec une section de  $1,79\text{ m} \times 1,25\text{ m}$ , chacun pouvant débiter  $30\text{ m}^3/\text{s}$ . Ces pertuis sont installés dans l'axe des piles qui portent le pont routier au-dessus du déversoir. La partie centrale de ce long barrage est équipée de seuils déversant, pouvant lâcher jusqu'à  $3500\text{ m}^3/\text{s}$  sur un tapis déflecteur large de 100 mètres (Photo II-1). L'évacuateur de crues comporte deux passes centrales de 15 m de large chacune, calées à la côte 699, c'est-à-dire à 6 m sous la crête du barrage. Les débits déversés sont restitués sur un radier horizontal, calé à la côte 673 (26 m sous le seuil déversant) (Figure II-3).

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

Tableau II-2 : Fiche technique du barrage Djorf-Torba (Source A.N.B.T).

Capacité initiale :	350 hm <sup>3</sup>
Capacité dernier levé (2020)	193,46 hm <sup>3</sup>
Apport moyen annuel	200,00 hm <sup>3</sup>
Perte de capacité annuelle	3,92 hm <sup>3</sup> /an
Surface du bassin versant	22000 km <sup>2</sup>
Hauteur	38 m
Longueur	949 m
Largeur	6,20 m
Niveau de la crête	707 m NGA
Côte retenue Normale (R.N)	699 m
Côte Plus Hautes Eaux (P.H.E)	705 m
Déversoir à SEUIL LIBRE	3000 m <sup>3</sup> /s
Vidange de Fond	7 x 28 m <sup>3</sup> /s

\*N.G.A : Nivellement Géodésique Algérien.

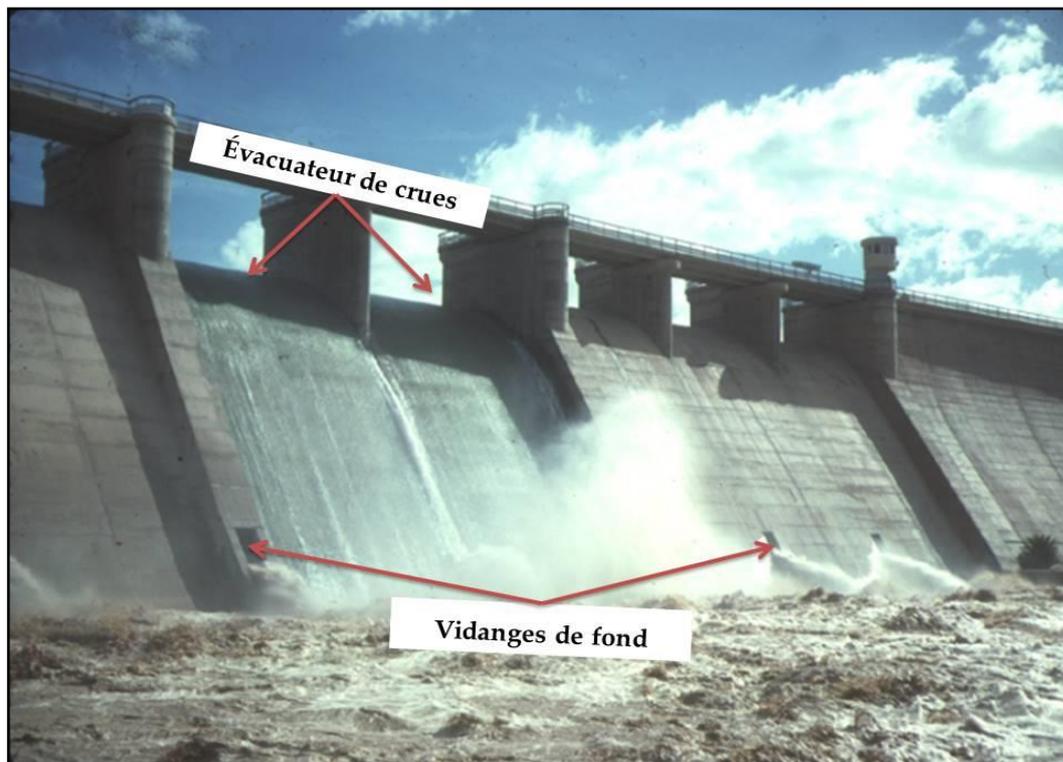


Photo II-1 : Vue d'ensemble du barrage Djorf-Torba (côté amont).

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

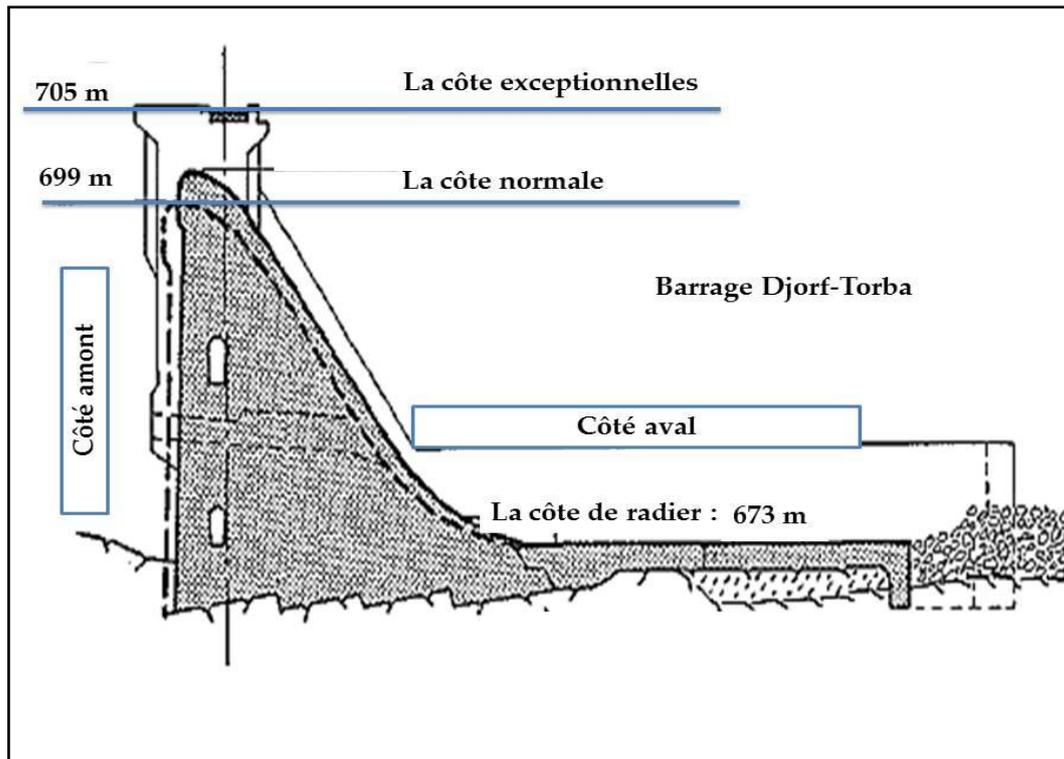


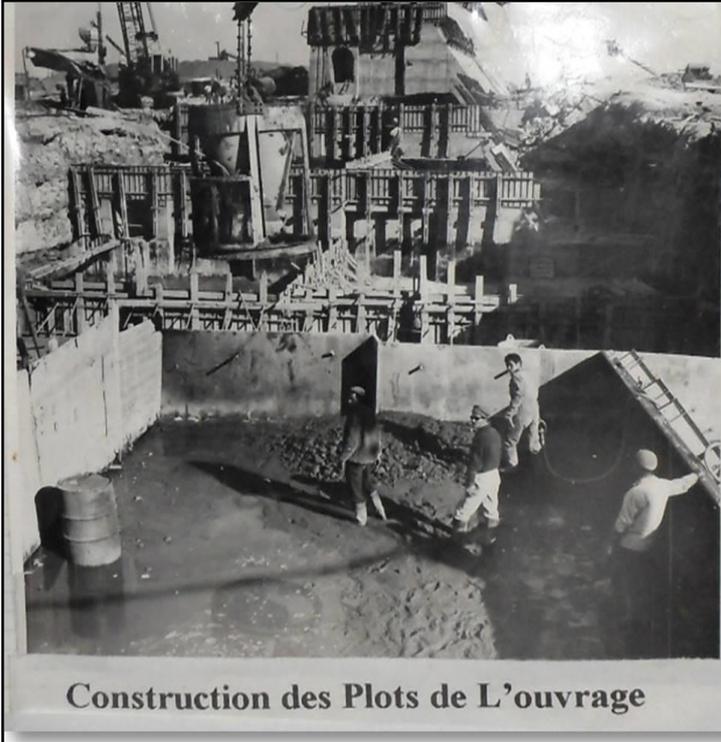
Fig. II-3 : Coupe sur déversoir.

### II-2-3 Historique du barrage.

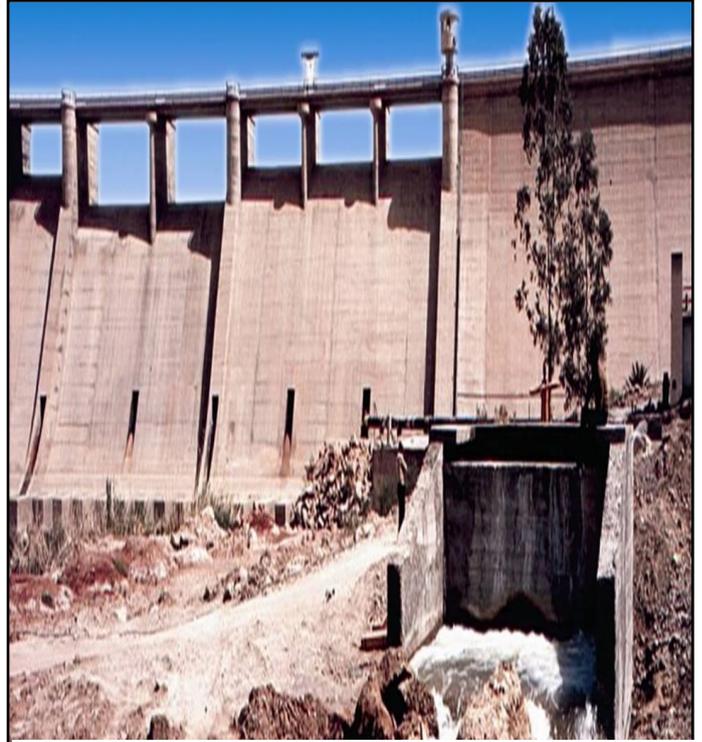
Un bref aperçu sur l'historique du barrage Djorf-Torba est désigné par les points ci-après : (Photos II.2 à II.5, source A.N.B.T).

- 1966-1968 : les travaux de construction ;
- 1969 : mise en eau ;
- 1975 : deux premiers déversements successifs en avril et mai ;
- 1978-1979, puis 1982-1983 : réfection du réseau de drainage et de piézométrie ;
- 1980 : mise en place d'un remblai stabilisateur (rive gauche) ;
- 1983 : travaux de consolidation du déversoir ;
- 1986 : adduction en eau potable vers la ville de Béchar ;
- 1986 ; 2004 ; 2020 : levé bathymétrique du barrage.

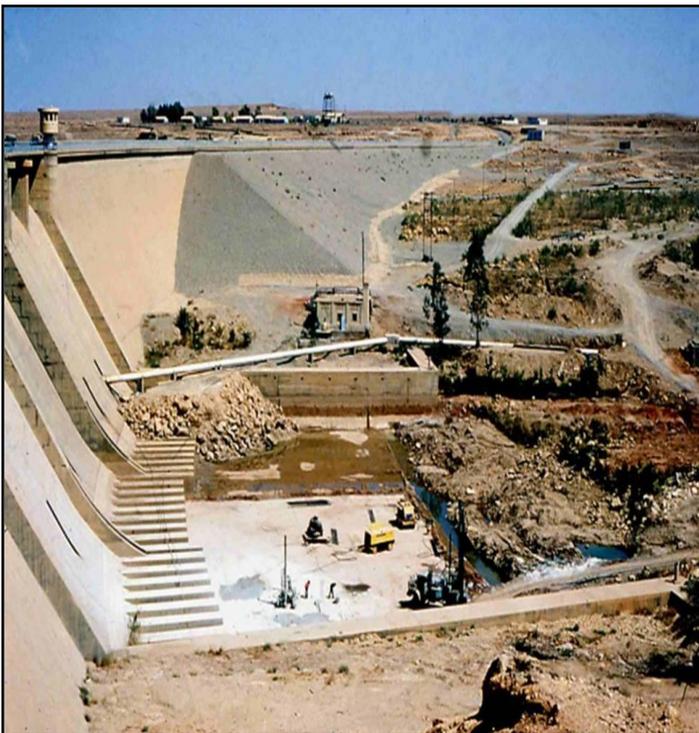
## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).



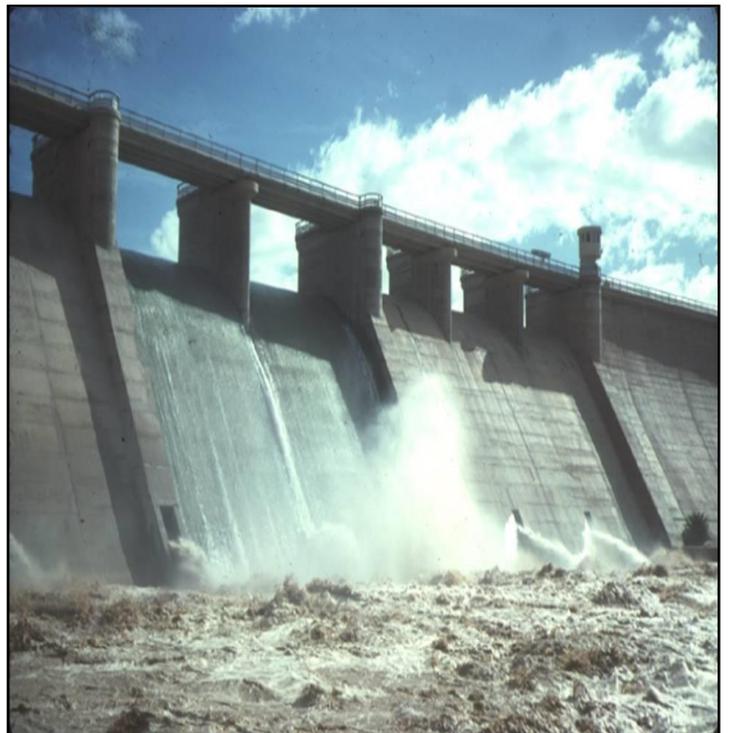
*Photo II-2 : Barrage Djorf-Torba en 1967*



*Photo II-3 : Barrage Djorf-Torba en 1983*



*Photo II-4 : Barrage Djorf-Torba en 1986*



*Photo II-5 : Barrage Djorf-Torba en 2004*

❖ Source : A.N.B.T (Archives).

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

### II-3 Bassin versant de l'Oued Guir.

#### II-3-1 Localisation.

Le bassin versant de l'Oued Guir qui alimente le barrage Djorf-Torba est situé dans la région de Béchar au sud-ouest de l'Algérie, avec une partie du haut Atlas Marocain, limité au Nord par la plaine de Tamalal et le haut Atlas, à l'Est par le bassin versant de l'Oued Béchar, à l'Ouest par la Hamada de Guir et au Sud par Chebket Mennouna [KABOUR et al, 2016], (Figure II-4). Il s'agit d'un bassin versant commun entre le Maroc et l'Algérie, avec une superficie estimée à 22.000 km<sup>2</sup> (plus de 90% sont en territoire marocain). Le bassin versant présente une forme allongée et un environnement qui sont pratiquement plans.

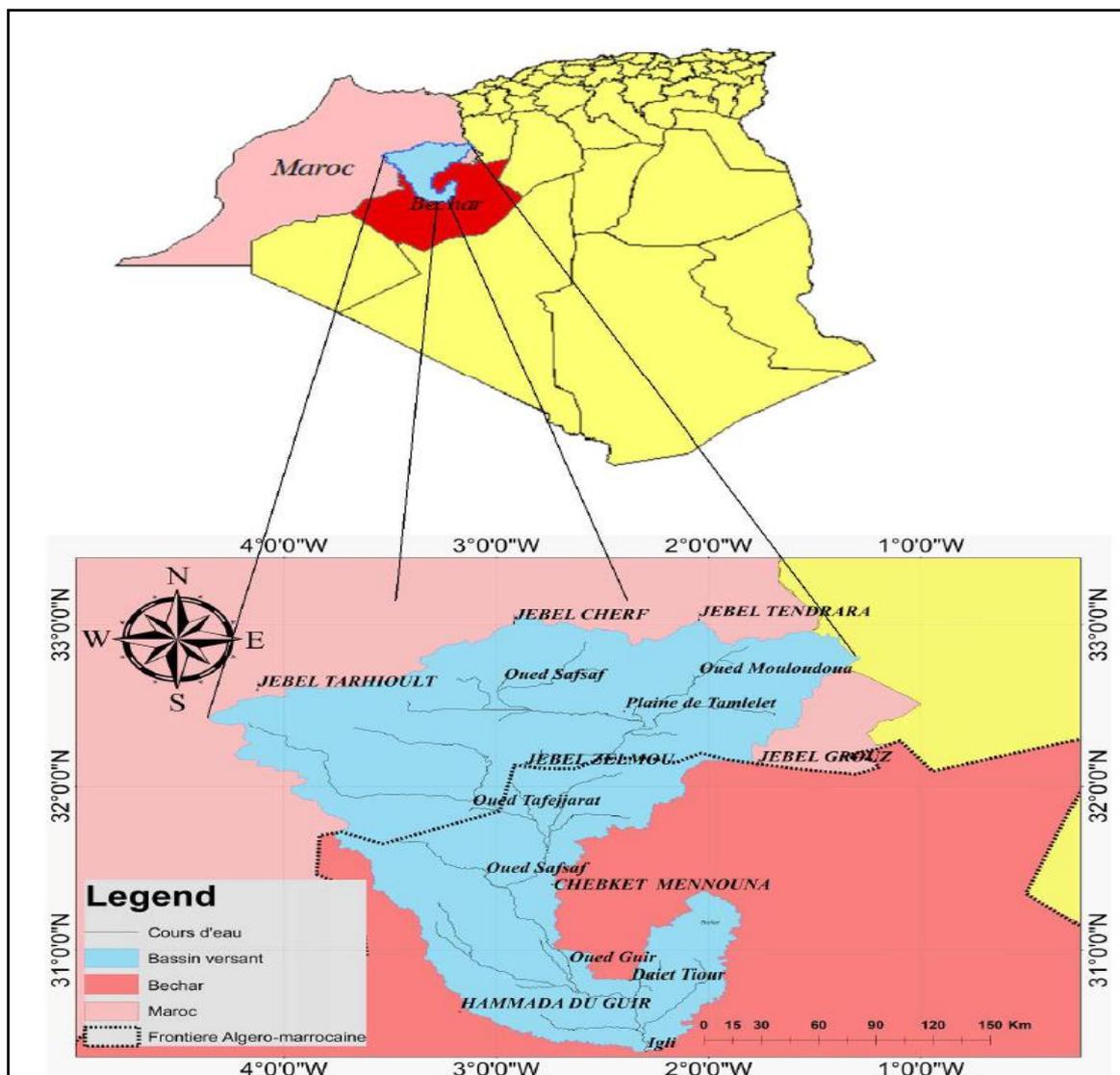


Fig. II-4 : Localisation du bassin versant de l'Oued Guir [BELKENDIL, 2014].

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

Le bassin versant est situé dans une région saharienne, avec précipitations faibles et rares surtout en hiver, la végétation est désertique, sauf pour les talwegs et les dépressions. Cette particularité nous donne un paysage saharien. Le bassin versant de l'Oued Guir est un immense plateau légèrement incliné du Nord vers le Sud, aux environs de 2000 m d'altitude jusqu'à la retenue du barrage, avec une altitude d'environ 700 m (Figure II-5).

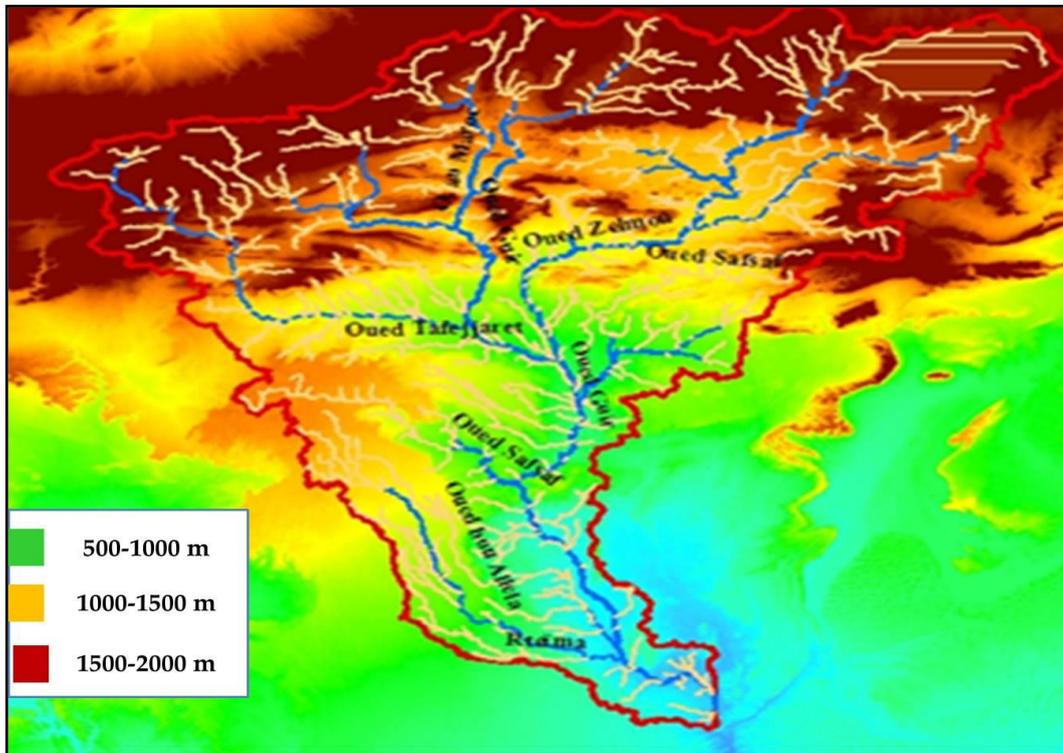


Fig. II-5 : Bassin versant de l'Oued Guir sur MNT (Modèle Numérique de Terrain).

### II-3-2 La géomorphologie du bassin versant.

Le bassin versant de l'Oued Guir est l'un des plus grands bassins de la région aride et semi-aride, avec une superficie d'environ  $S=22000 \text{ km}^2$  et un périmètre estimé à  $P=4000 \text{ km}$ . Le bassin versant est caractérisé par une forme amortie très allongé (indice de compacité  $Kc=0.28 \times P/\sqrt{S}=7,50$ ), ce paramètre permet de se faire une idée sur l'hydrogramme de crue. Le bassin versant peut être assimilé à une surface rectangulaire de même superficie, ses dimensions équivalentes sont la longueur (L) et la largeur (l) :

- $L = ((Kc\sqrt{S})/1,12) * [1 + \sqrt{1 - (1,12/Kc)^2}] = 1962 \text{ km}$  ;  $l = (S/L) = 19 \text{ km}$
- Le rectangle équivalent permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue leur l'écoulement.

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

Les caractéristiques topographiques du bassin versant sont obtenues directement à partir du MNT, tel que l'altitude maximale et minimale, ensuite nous calculerons l'altitude moyenne, la dénivelée et la pente [BRAHIMI, 2018]. Les altitudes du bassin versant varient de 690 m à 2700 m, avec une pente moyenne de 14%. La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude (Figure II-6).

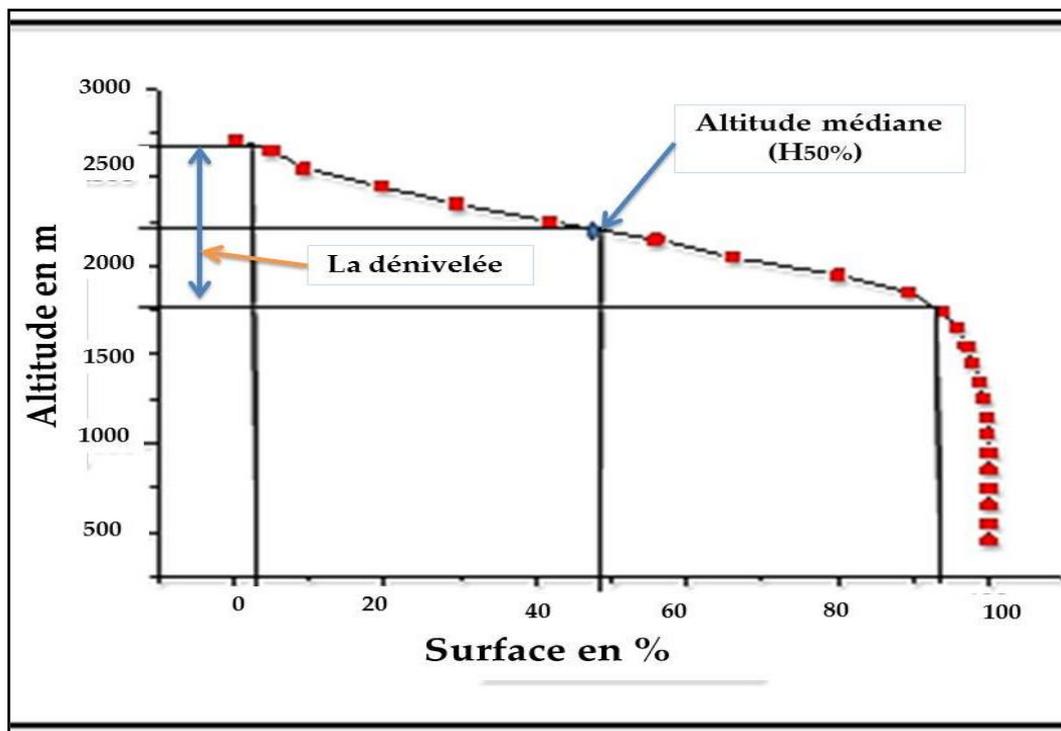


Fig. II-6 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Guir [BRAHIMI, 2018].

La courbe hypsométrique permet de déterminer l'altitude médiane qui correspond à celle lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin. Il est également possible de définir la dénivelée (D), qui est la différence entre les côtes correspondant aux surfaces des fréquences 5% et de 95% (Tableau II-3).

Tableau II-3 : Caractéristiques géomorphologique du bassin versant.

Désignation	Valeur (m)
Altitude maximale	2700
Altitude minimale	690
Altitude médiane	2240
Dénivelée	950
Pente moyenne	14%

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

### II-3-3 L'Oued Guir.

L'Oued Guir est le plus important cours d'eau dans la région Saoura, avec un linéaire de 300 km. Selon l'ANBT, les altitudes varient de 683 m à 1430 m avec une pente moyenne de 0.25% (Tableau II-4 ; Figure II-7). L'Oued Guir prend sa source dans la chaîne du Djebel Aichi (versant méridionale de l'Atlas Marocain), il recueille les eaux du versant Sud de l'Atlas Marocain puis il suit son cours en Algérie jusqu'au barrage Djorf-Torba. Le confluent des deux oueds Guir et Zousfana donnent la naissance à l'oued Saoura.

Tableau II-4 : Principale caractéristique de l'Oued Guir (Source A.N.B.T).

Désignation	Valeur
Longueur (km)	300
Altitude minimum (m)	683
Altitude maximum (m)	1430
Pente moyenne (%)	0.25

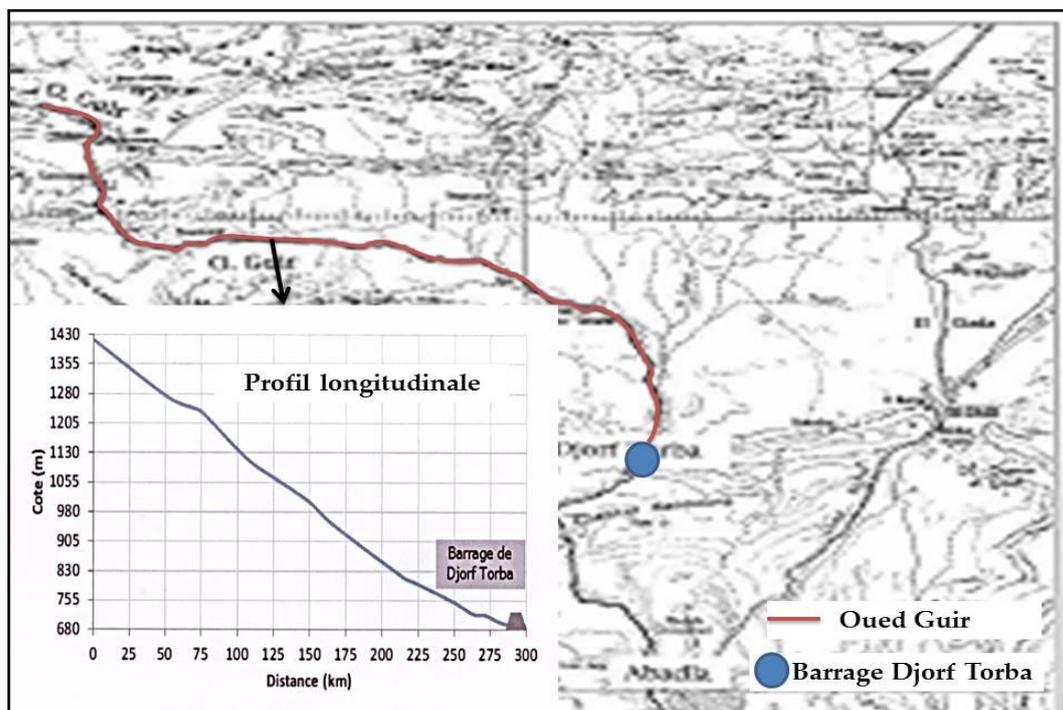


Fig. II-7 : Croquis de l'Oued Guir et son profil longitudinal (Source A.N.B.T).

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

---

Comme pour tous les oueds sahariens, le régime du Guir est mal connu et les renseignements sont inexacts au vue d'absences des stations d'observation, nous pouvons conclure que le régime de l'Oued est celui de ses crues. Selon le bulletin économique et social du Maroc (B.E.S.M) publié en 1953, le volume écoulé annuellement par l'Oued Guir est de quelques centaines de millions de mètres cubes. Il n'a jamais été observé d'années hydrologiques où ce volume aurait été inférieur à 100 millions de mètres cubes [GUITTONNEAU, 1953 in B.E.S.M, 1953]. Selon l'ANBT, la partie algérienne de l'Oued Guir enregistre un apport annuel liquide d'environ de 200 hm<sup>3</sup>, soit un débit moyen interannuel de 6,32 m<sup>3</sup>/s.

### II-4 Caractérisation climatologique.

La région aride et semi-aride a un climat désertique caractérisé par une faible pluviosité et une sécheresse excessive. En particulier le Sud-Ouest de l'Algérie qui reste principalement influencé par une irrégularité annuelle et une variabilité interannuelle des précipitations très marquées, ainsi qu'une hétérogénéité de leurs distributions dans l'espace [KABOUR et al, 2016]. Les données climatiques de la zone d'étude recueillies à la station Djorf-Torba (Latitude : 31°30'19"N, Longitude 02°46'10"W et Z : 729m), ont été fournies par la météorologie Sud-Ouest de Béchar, les données s'étalent sur une période de 16 ans (1994 à 2009).

#### II-4-1 Précipitation.

Notre zone d'étude du barrage Djorf-Torba est située dans une région aride, l'aspect climatologique du bassin hydrographique est caractérisé par un régime à deux périodes pluvieuses, l'une en hiver (de septembre à décembre), l'autre au printemps (mars à début mai) séparées par deux périodes sèches en été (juin à août), avec les mois de juillet, janvier et février pratiquement sans précipitations (source : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, A.N.R.H-Béchar).

Les précipitations relevées à la station Djorf-Torba sur une période de 16 ans (1994-2009), montre que la région a subi des précipitations très irrégulières, sachant que la quantité annuelle est enregistrée un seul mois, ce qui provoque parfois des inondations. La valeur moyenne annuelle est de l'ordre de 105,66 mm/an, alors que la valeur maximale annuelle des précipitations était 245,55 mm, enregistrée en 2009. D'un autre côté, l'année la plus sèche est celle de 1999, avec une valeur minimale des précipitations étaient 8,13 mm (Figure II-8).

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

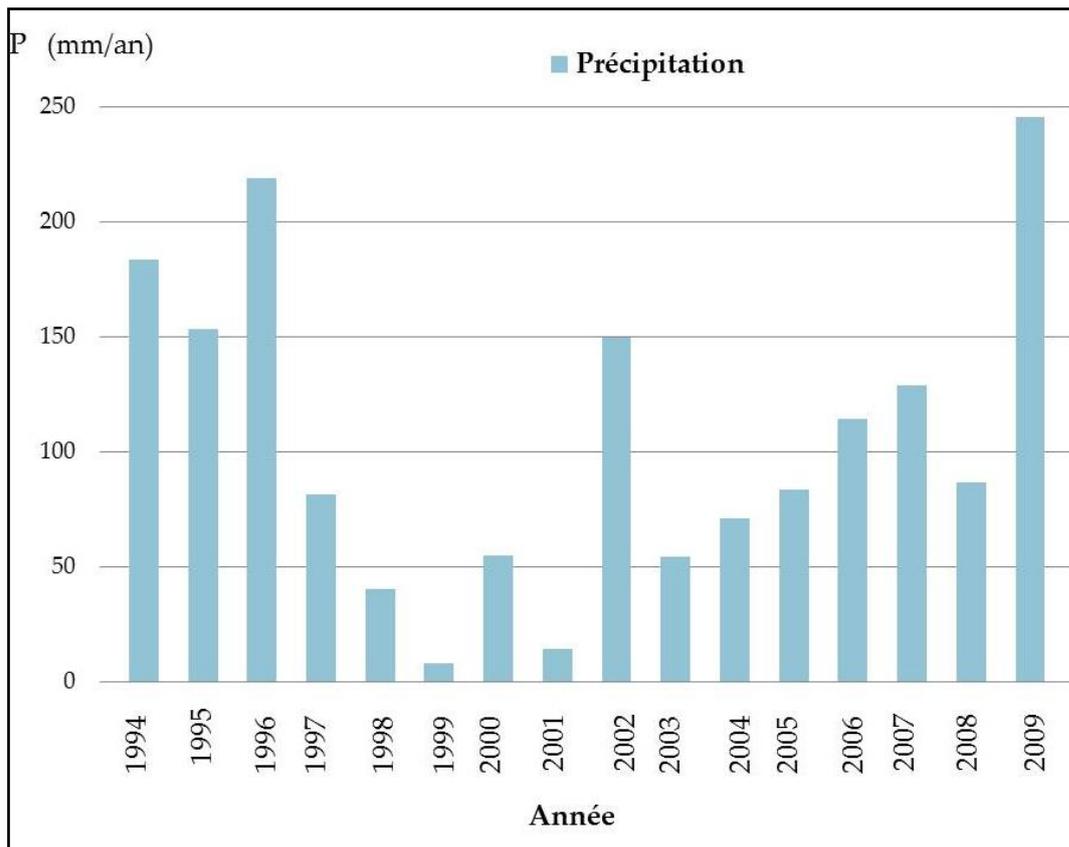


Fig. II-8 : Précipitations moyennes annuelles de la station Djorf-Torba (La météorologie Sud-Ouest de Béchar).

D'une façon générale, au niveau du bassin versant du barrage, la pluviométrie décroît du Nord-ouest (environ 200 mm) au sud (environ 30 mm), en raison de la diminution de l'altitude [MEKIDECHE et al, 1995].

### II-4-2 Température.

La région de Bechar est caractérisée par de fortes températures, la figure II-9 ci-dessous présente la répartition des températures moyennes annuelles ( $T^{\circ}\text{C}$ ) pour une série de 16 ans d'observation. Nous remarquons que les résultats interannuels sont très proches. La température moyenne annuelle pour la station de Djorf-Torba est d'environ  $22^{\circ}\text{C}$ .

Selon le bulletin constaté par le service de la météorologie Sud-Ouest de Béchar, on vérifie que le mois le plus chaud est celui d'août ( $43.03^{\circ}\text{C}$ ) et le plus froid celui de janvier ( $4.42^{\circ}\text{C}$ ) [HAMED et al, 2012].

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

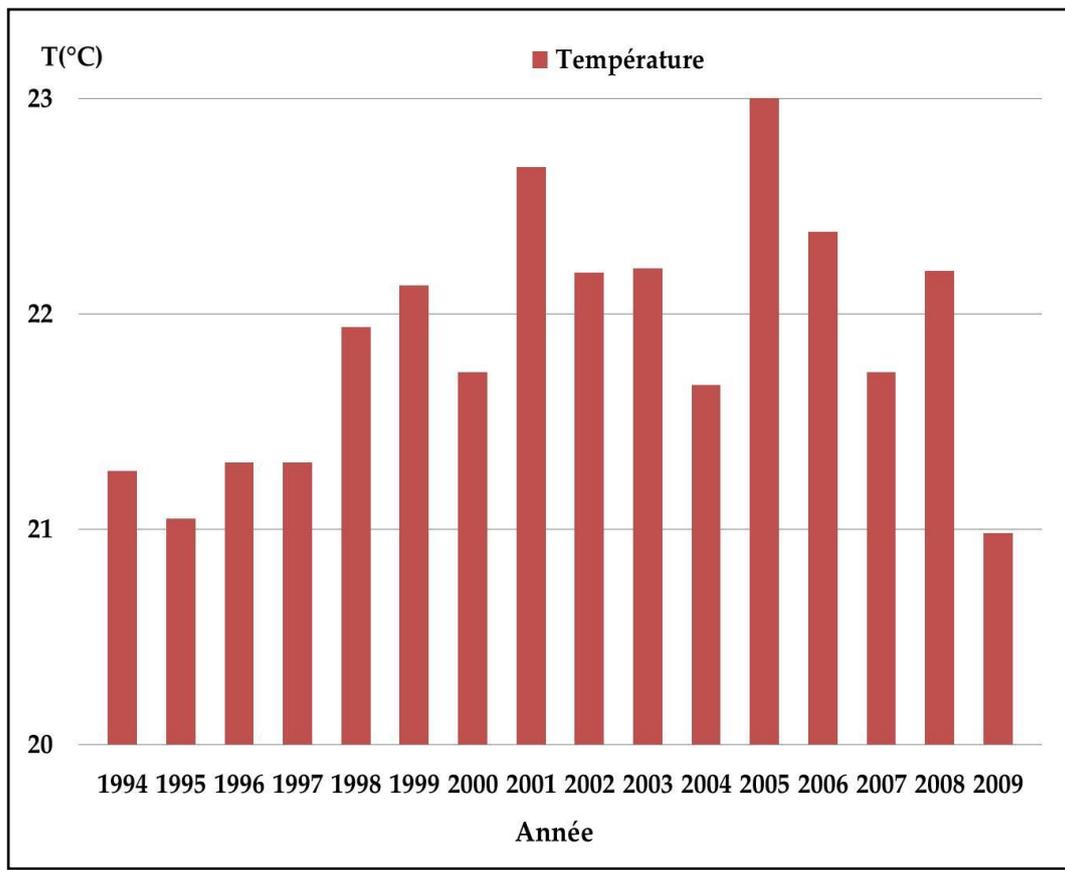


Fig. II-9 : Températures moyennes annuelles relevée à la station Djorf-Torba (La Direction de météorologie Sud-Ouest de Béchar).

### II-4-3 Évaporation.

Dans les zones arides et semi-arides, le phénomène d'évaporation est considérable, il est dû principalement à la forte amplitude thermique pendant les saisons sèches, une forte insolation presque continue durant toute l'année et une présence considérable de vents secs avec une grande vitesse [REMINI, 2005]. D'une façon générale, l'évaporation croît légèrement du Nord vers le sud du Sahara.

Les données d'évaporation du barrage Djorf-Torba présentées par la direction de météorologie Sud-Ouest de Béchar, permettent d'évaluer l'évaporation annuelle moyenne qui est d'environ 2500 mm/an. La figure II-10 représente l'évaporation moyenne interannuelle, telle que la valeur maximale annuelle de l'évaporation reste celle qui a enregistré en 1998, avec une valeur de 2830 mm/an.

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

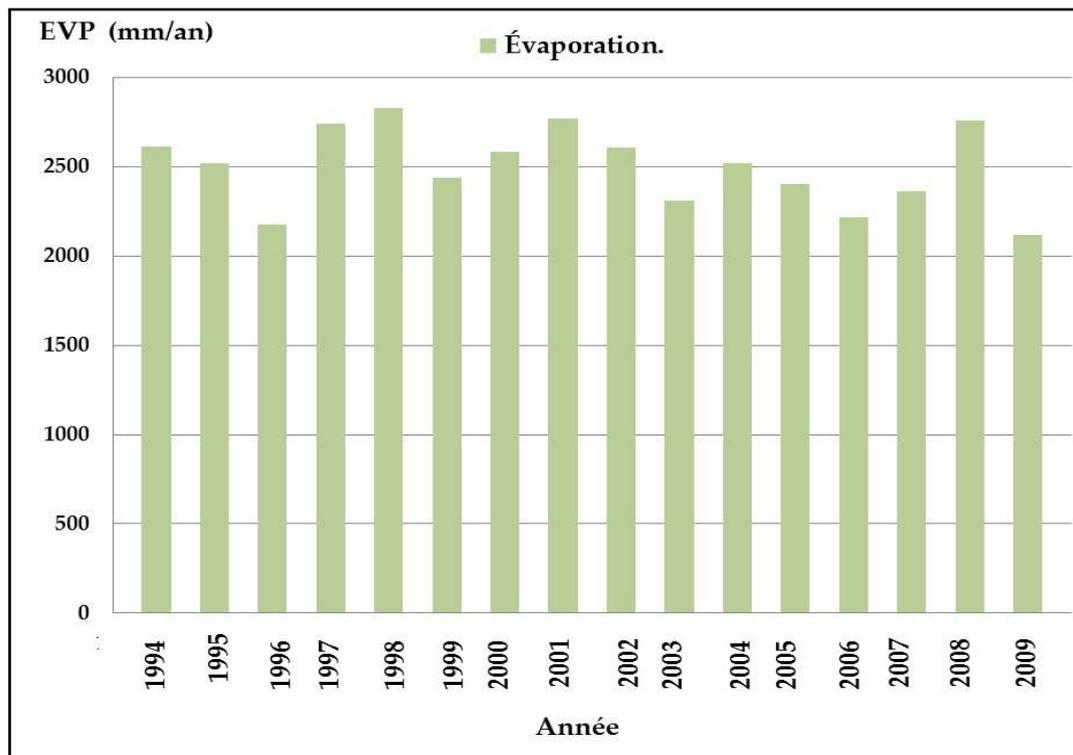


Fig. II-10 : Évaporations moyennes annuelles relevée à la station Djorf-Torba (La météorologie Sud-Ouest de Béchar).

Compte tenu de la situation géographique du barrage Djorf-Torba (zone saharienne), les valeurs de l'évaporation de l'ouvrage sont les plus élevées en Algérie [REMINI et al, 2009]. Le volume évaporé dépasse même la quantité d'eau destinée à l'Adduction en Eau Potable (AEP) et à l'irrigation durant la période 1992-2001 (Figure II-11). L'évaporation sur la retenue du barrage atteint des valeurs de 35 à plus de 40% des apports de l'Oued Guir [KABOUR et al, 2016].

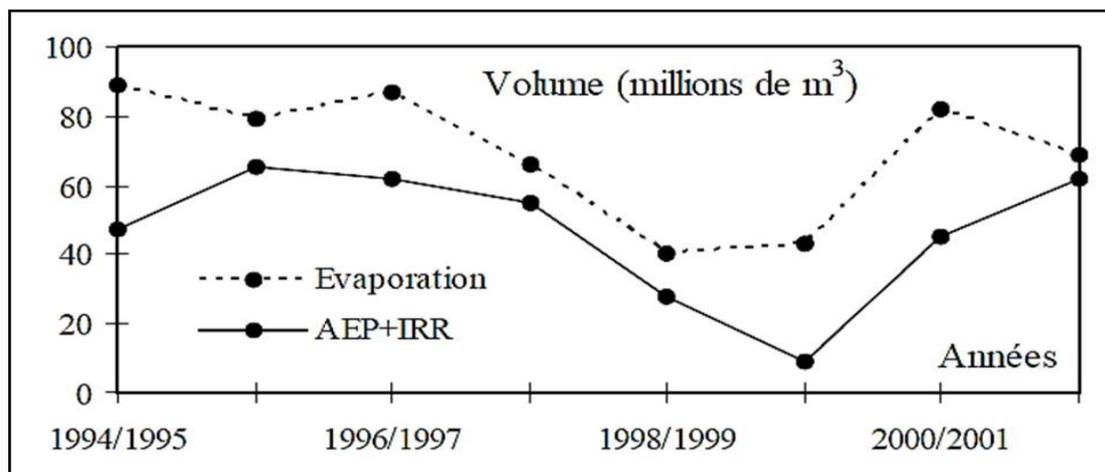


Fig. II-11 : Évolution de l'évaporation dans le barrage Djorf-Torba [REMINI et al, 2009].

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

### II-4-4 Le vent.

Le vent joue un rôle essentiel sur l'évaporation, l'érosion et le transport solide. Environ 78% de la superficie de l'Algérie, est caractérisée par des vents avec des vitesses dépassant 3m/s. On estime que 40% de ces vitesses sont supérieures à 5m/s. Au niveau de la zone sud-ouest (Béchar), la vitesse moyenne du vent est d'environ 4m/s (Figure II-12), [CHELLALI et al, 2011]. Notre zone d'étude est l'une des régions les plus exposées au vent dans l'Ouest du Sahara algérien. Ces vents sont violents et fréquents, particulièrement aux mois de Mars (3.85m/s) et Avril (4.95 m/s) [HAMED et al, 2012].

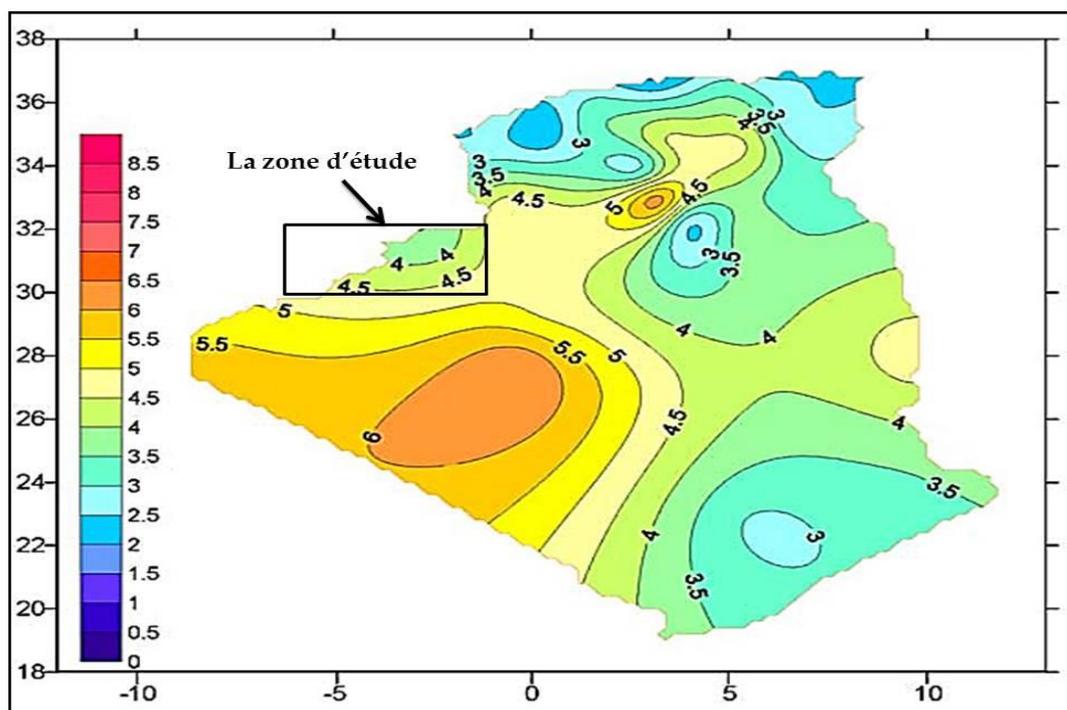


Fig. II-12 : Cartes annuelles de la vitesse du vent en Algérie [CHELLALI et al, 2011].

Les vents sahariens sont principalement sous forme de tempêtes de sable. Le vent souffle d'une part du Nord et du Nord-Est, et d'autre part, du Nord-Ouest et du Sud-Ouest, cette répartition fréquentielle des vents est selon huit directions (Tableau II-5) [KABOUR et al, 2016]. Celui du Nord-Est est le vent dominant, en été les vents les plus fréquents sont ceux du Sud.

Tableau II-5 : La répartition directionnelle et fréquentielle des vents.

Direction	Nord	Nord- Est	Est	Sud	Sud- Est	Sud - Ouest	Ouest	Nord- Ouest
Fréquence (%)	10.15	9.44	9.93	5.56	8.92	10.61	7.95	4.56

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

### II-5 Contexte géologique.

Le principal objet de la géologie est l'origine de la terre, de son histoire, et plus particulièrement les roches et les matériaux dérivés qui composent les couches externes du globe terrestre. Vue l'importance du bassin versant de l'Oued Guir et son impact sur de nombreux phénomènes (érosion, transport solide, crues ...), il est primordial d'aborder l'aspect géologique. Notre zone d'étude se rattache aux montagnes de Hauts Atlas, constitués d'une gamme de terrains très variés, il s'étend du Précambrien Milliard année [FORTAS, 2016], (Figure II-13 ; Tableau II-6). Le Précambrien est la première ère géologique de l'histoire de la terre, elle commence à la création du globe, il y a 4,55 milliards d'années. Le Précambrien représente à lui seul près de 90 % de l'histoire de la Terre. Il voit la mise en place des continents, des océans, de la tectonique des plaques et de la vie ; Source : [www.futurasciences.com](http://www.futurasciences.com).

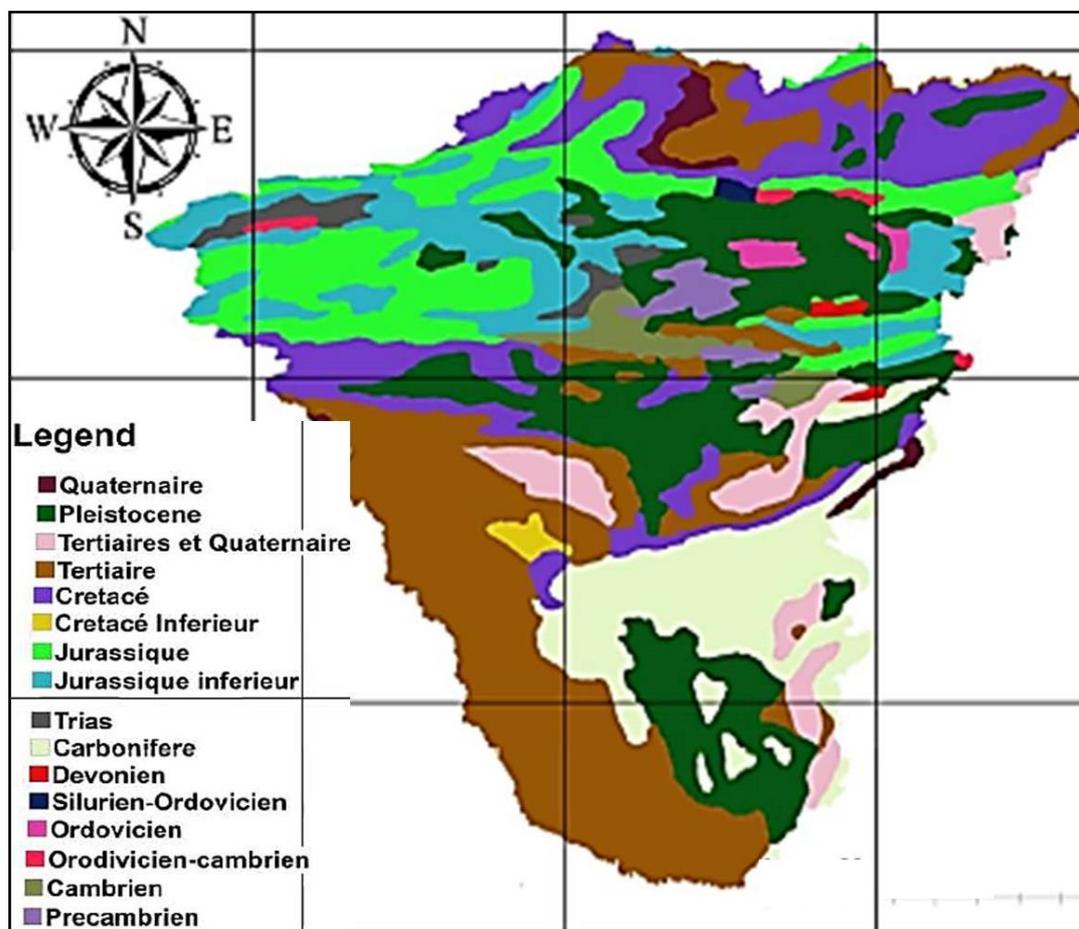


Fig. II-13 : Cartes géologiques du bassin versant de l'Oued Guir [BELKENDIL, 2014].

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

Tableau II-6 : Géologie du bassin versant de l'Oued Guir [FORTAS, 2016].

Désignation	Caractéristiques
Quaternaire	argiles rougeâtres gypsifères ; sableuses ; alluvions ; calcaires et des limons sableux.
Tertiaires	argilo-sableuses rouges avec quelques bancs calcaires
Crétacé	de grès ; d'argile et de calcaire
Carbonifère	des grès ; des argiles et des calcaires rougeâtres
Dévonien	argilo gréseuse ; des calcaires ; argilo-gréseuses
Silurien	schistes noirs armés de bancs calcaires
Ordovicien	des schistes et des calcaires ; argilo conglomératique.
Cambrien	grès arkosiques ; grès quartzeux ; grès argileux

Principalement la géologie de notre site est connue grâce aux campagnes de reconnaissances de 1952-1953 et de 1961 [COYNIE et BELLIER, 1985]. Le substratum est constitué de différentes formations géologiques, mais la nature géologique prédominante est :

- La formation correspond à des séries d'argiles rouges et de calcaires marneux. Les essais d'eau pratiqués dans cette couche ont montré une parfaite imperméabilité, sauf pour les pressions d'injection supérieures à 8 bars.
- La formation correspond à des roches sédimentaires calcaires qui se forment à la sortie de certaines sources, ou dans des étendues d'eau peu profondes.
- Une partie constituée par le toit des calcaires crayeux, limité par les calcaires marneux se trouvant sous les argiles rouges à gypse. Cette couche présente une forte karstification.

Il faut aussi noter l'hétérogénéité des couches et la présence de calcaire dolomitique avec de très nombreuses fissures, ainsi que le terrain naturel est constitué d'une épaisse couche d'alluvions fines à grossières [BRAHIMI, 2016]. La variation des faciès géologiques montre la complexité des formations géologiques et les dépôts sédimentaires, qui correspondent au phénomène de l'érosion et le transport solide.

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

### II-6 Données Hydrologiques

#### II-6-1 Système hydrologique.

Le barrage Djorf-Torba, avec une capacité initiale de 350 millions de mètres cube, contrôle un vaste bassin versant subsaharien d'une superficie avoisinant 22000 km<sup>2</sup>, en tête de vallée de la Saoura. Il est destiné à amortir les crues violentes de l'oued Guir, qui constitue le plus important cours d'eau du Sahara Algérien avec une longueur de plus de 300 Km (Figure II-14).

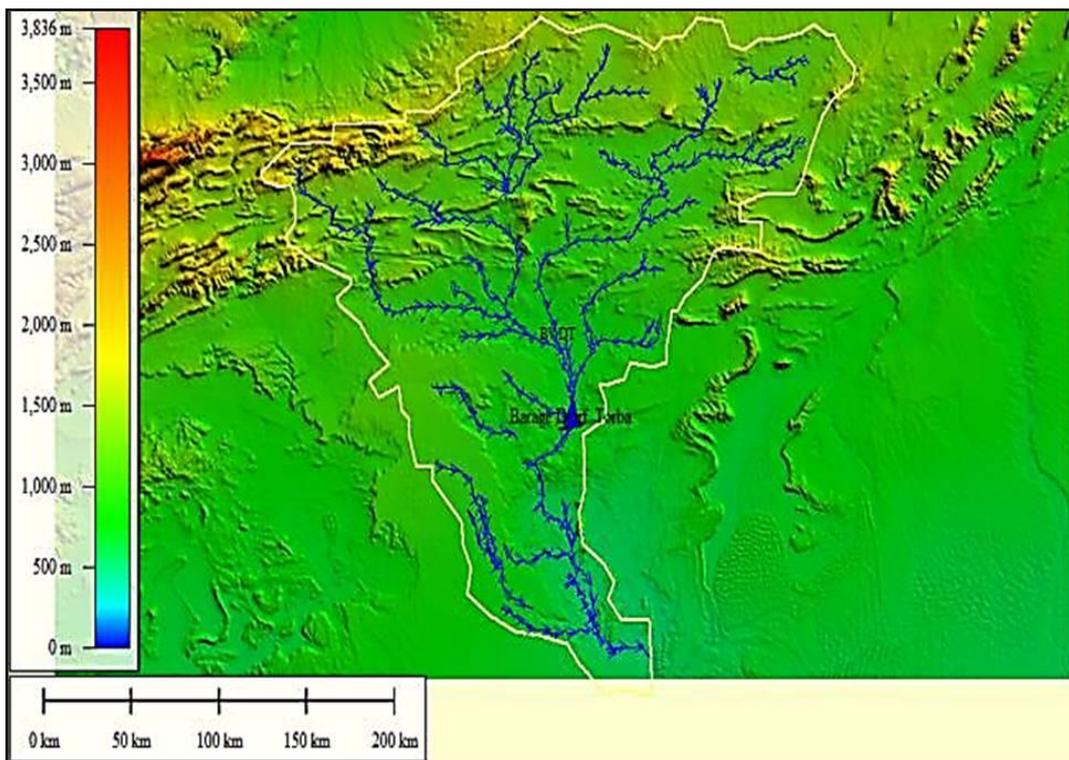


Fig. II-14 : Système hydrologique du bassin versant de l'Oued Guir sur MNT.

#### II-6-2 Apports liquides.

Les apports liquides du bassin versant peuvent être estimés avec les données hydrométriques, l'apport du Guir est très variable selon les années. D'après une cinquantaine d'années d'exploitation et selon un bilan dressé par les archives de l'ANBT, au terme de la période d'exploitation de 20 ans (1997-2016), il est montré que l'apport moyen annuel avoisine 220 hm<sup>3</sup>/an, sachant que l'apport maximale annuel est de l'ordre de 912 hm<sup>3</sup>, a été observé en 2008 (Figure II-15). On remarque des différences au niveau des premières évaluations qui avaient précédé la construction du barrage.

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

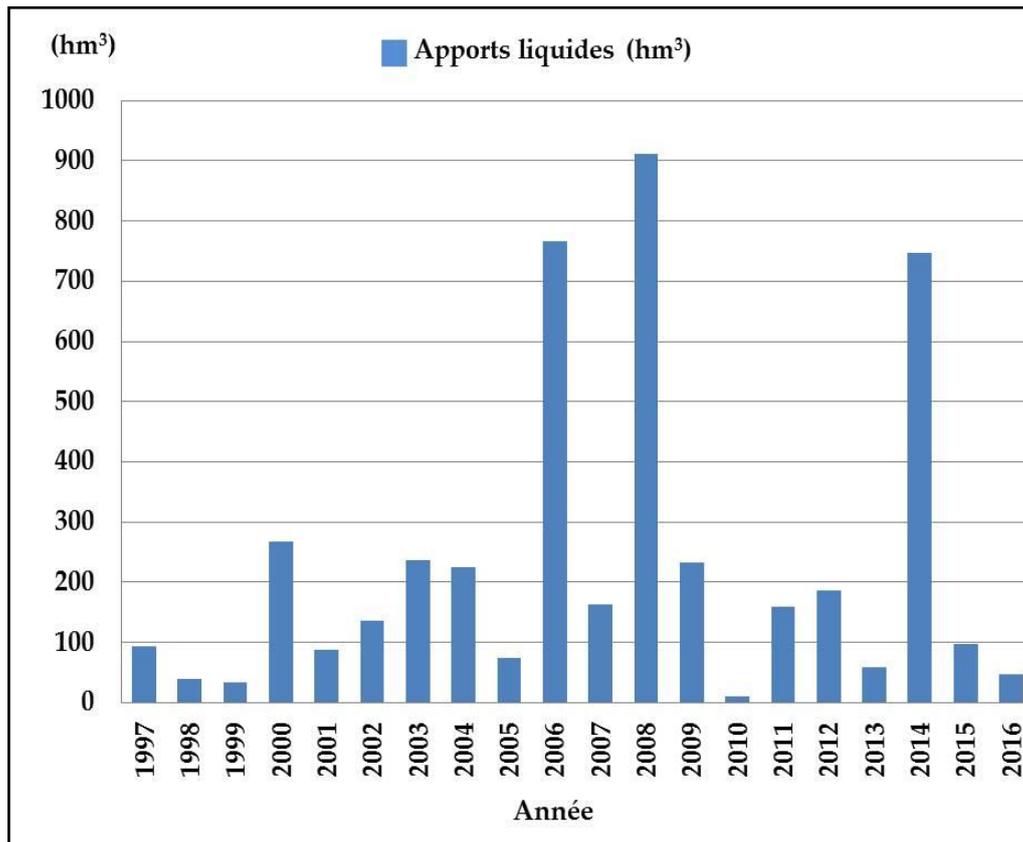


Fig. II-15 : Apport moyenne annuelle de l'Oued Guir (Source A.N.B.T.).

### II-6-3 Crues de l'Oued Guir.

D'après l'étude hydrologique [COYNIE et BELLIER, 1985], la crue exceptionnelle est caractérisée par un apport liquide annuel de l'ordre du milliard de m<sup>3</sup>. Depuis 1952 et sur 22 années, on a enregistré 1 ou 2 fois des crues de plus de 300 hm<sup>3</sup>, presque 4 fois de plus de 200 hm<sup>3</sup>, 11 fois de plus de 110 hm<sup>3</sup>, avec des pointes de 15 à 20.000 m<sup>3</sup>/s (Tableau II-7). Ces valeurs représentent la somme des sous Oueds et de l'Oued principal du système hydrologique qui alimente la retenue.

Tableau II-7 : Estimations des débits et apports de l'Oued Guir (Source A.N.B.T.).

Période de retour (années)	Débits (m <sup>3</sup> /s)	Apports (hm <sup>3</sup> )
10	4400	240
100	8800	485
1000	15000	820

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

En ce qui concerne la statistique des crues et durant vingt ans d'observations directes sur les débits et les apports, on a relevé les points suivants ; la crue dite décennale est devenue biennale ; le volume de la crue décennale a plus que doublé ; la crue 1/100 est devenue 1/33 (Source A.N.B.T).

La durée des crues peut parfois être longue et se répartit sur plusieurs mois, c'est ainsi qu'on a noté plus de 22 jours d'écoulement continu dans le mois de décembre et janvier (Figure II-16), [COYNIE et BELLIER, 1985].

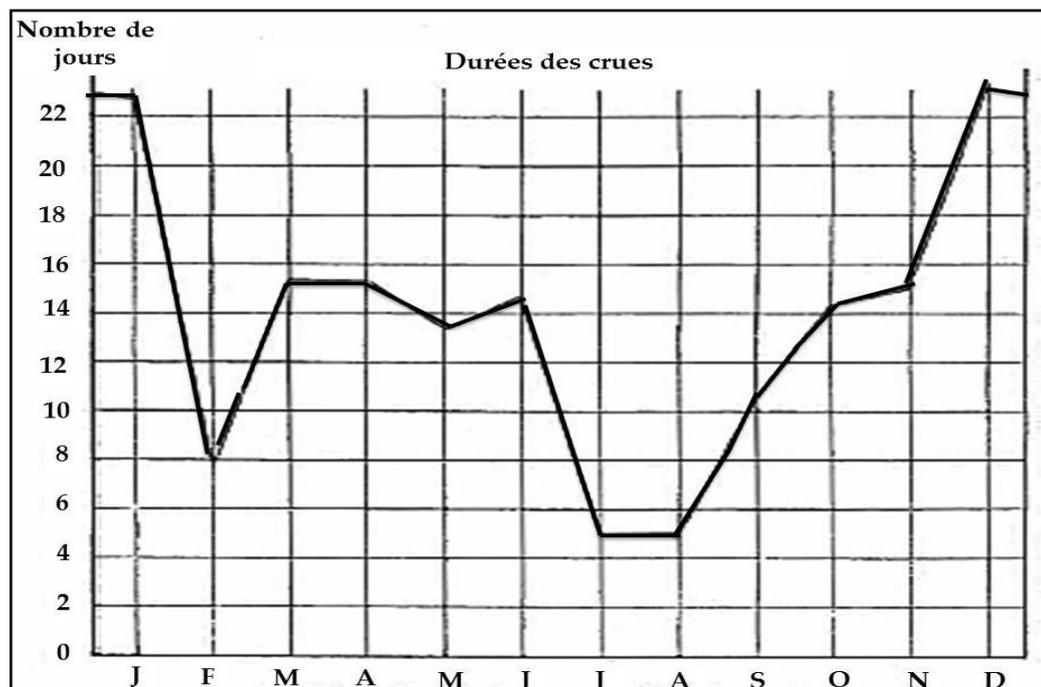


Fig. II-16 : Durées des crues de l'Oued Guir [COYNIE et BELLIER, 1985].

La maîtrise des crues est suivie d'une façon rigoureuse par les gestionnaires du barrage, en particulier pour le suivi des risques de déversement. L'évaluation de la hauteur de crue permet d'estimer le débit. La hauteur maximum de crue enregistrée à l'Oued Guir est de 2 m environ (Tableau II-8), [RISER, 2019].

Tableau II-8 : Les débits de l'Oued Guir en fonction de sa hauteur. [RISER, 2019].

Hauteur en m	Débit en m <sup>3</sup> /s
0.40	1
0.70	5
1	25
2	1500-2000

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

### II-6-4 Exploitation des apports.

Selon les observations périodiques des équipes de l'ANBT, il a été question d'étudier la période d'exploitation entre 1997 et 2016. Les 200 hm<sup>3</sup> d'apport moyen annuel se sont répartis presque entre quatre destinations :

- Malheureusement plus de 50% s'évaporent, à raison de 110 hm<sup>3</sup>/an.
- Environ 3% des pertes par fuites.
- 35% a été lâché dans l'Oued pour permettre l'irrigation la plaine d'Abadla.
- Depuis 1985, une quantité a été destinée à l'alimentation en eau potable de la ville de Béchar, pour un débit moyen annuel de 12 hm<sup>3</sup>/an.

Les volumes d'eau entrant et sortant du barrage Djorf-Torba sont évalués et comparés en quantité de prélèvement, pour l'AEP, l'irrigation du périmètre d'Abadla et les pertes soit par évaporation ou par fuites. Les données de la Figure II-15 ont permis d'observer que les valeurs de l'évaporation sont plus élevées que celles destinées à l'AEP et l'irrigation, ceci met en évidence un volume des pertes enregistrées important.

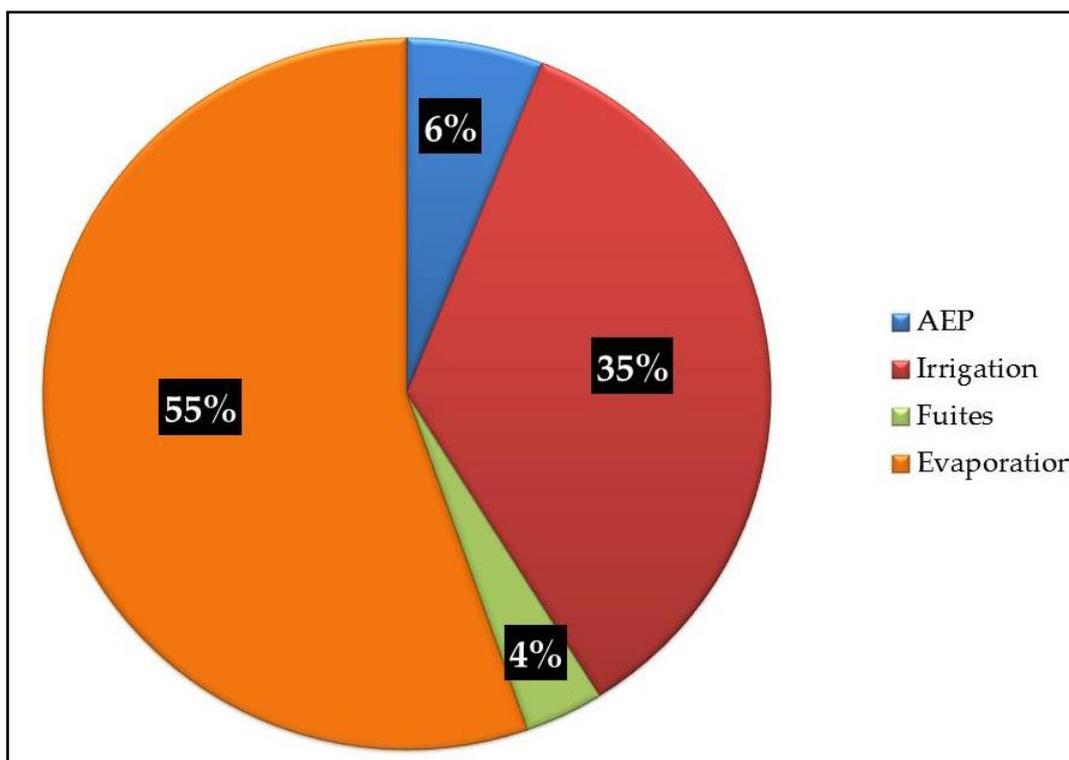


Fig. II-17 : Désignation des apports du barrage Djorf-Torba.

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

### II-7 Envasement du barrage Djorf-Torba.

L'envasement de la retenue est lié directement aux phénomènes du transport solide et l'érosion des sols du bassin versant. La construction d'un barrage modifie les conditions de transport solide du cours d'eau où il s'insère, ce qui engendre dans certains cas l'envasement de la retenue. Les sols dans la zone de l'étude sont fragiles avec une couverture végétale très faible. Cet état accélère le processus d'érosion et en parallèle le taux d'envasement (Photo II-6).

Plusieurs études et mesures des sédiments ont été effectuées pour le barrage de Djorf-Torba, notamment : Arrondissement Études ; 1964, le volume de sédiments annuels a été estimé en  $1,11 \text{ hm}^3$ . Les mesures faites de 1953 à 1956 évaluent l'apport solide moyen sur une période de trois ans à  $1 \text{ kg/m}^3$ , l'apport solide du bassin versant a été estimé en  $20,45 \text{ t/km}^2/\text{an}$  [COYNIE et BELLIER, 1985]. Un levé bathymétrique du barrage Djorf-Torba a été effectuée en 2004, la capacité de la retenue a été réduite en environ 25%, c'est-à-dire que la capacité de la retenue dans l'année de mise en service du barrage en 1969 a été de  $350 \text{ hm}^3$ , et après ce levé la capacité a été d'environ  $260 \text{ hm}^3$  (volume de sédiments de  $90 \text{ hm}^3$ ), cette valeur de volume de sédiments correspond à un envasement annuel de  $1.3 \text{ hm}^3/\text{an}$ , [A.N.B.T, 2004].



Photo II-6 : Situation du barrage Djorf-Torba et l'Oued Guir en 2020.

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

En 2018, l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T) a lancé une opération de dévasement du barrage Djorf-Torba, afin d'extraire une quantité de 5 hm<sup>3</sup> de la vase (Photo II-7). En parallèle, une autre opération a été décidée pour faire le levé bathymétrique. L'enveloppe budgétaire utilisée dans cette opération de dévasement (environ de 1 milliard DA), permettra de récupérer un volume important de la capacité de stockage. Le barrage Djorf-Torba est un cas réel d'une problématique de son envasement à un rythme rapide d'année en année. La comparaison des nivellements de 1986 et 2006 montre un doublement du taux d'envasement pour le barrage Djorf-Torba, passant de 1,3 à 2,6 hm<sup>3</sup>/an [REMINI et al, 2009].



*Photo II-7 : Les photos prises pendant les travaux d'installation pour l'opération de dragage au niveau barrage Djorf-Torba (Janvier 2020).*

## II / Étude d'un cas réel de barrage envasé en région aride (barrage Djorf-Torba, wilaya de Béchar).

---

### II-8 Conclusion.

Le barrage Djorf-Torba alimente les villes de Bechar et Kenadsa en eau potable et assure l'irrigation de la plaine d'Abadla. Cet ouvrage est très intéressant dans son environnement, cette importance réside d'une part, dans la maîtrise de l'eau, et d'autre part, d'assurer une sécurité en évitant ou en réduisant le danger des crues qui pourraient provoquer des inondations, impliquant des dégâts matériels et un nombre important de victimes. Le barrage a également un rôle dans le développement de cette zone du sud d'Algérie.

Le régime hydrologique de la zone d'étude est également caractérisé par une irrégularité annuelle et une variabilité interannuelle des précipitations, aussi bien qu'une hétérogénéité de la distribution des précipitations dans l'espace de à la grande dimension du bassin versant (plus de 22000 km<sup>2</sup>). La forme d'un bassin versant est influencée directement sur le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent elle influence la nature de la crue.

La réduction de la réserve de stockage des ouvrages hydrauliques se voit croître sans cesse au fil de ces derniers temps et ce pour divers raisons essentielles suivantes. D'une part, les conditions naturelles qui sont favorisées par l'agressivité du climat, l'alternance des périodes sèches et humides, et d'autre part, la fragilité des formations géologiques et l'absence du couvert végétal suffisant.

Le barrage Djorf-Torba est soumis à de nombreuses contraintes, qu'il faut prendre en considération en toute urgence. Sans aucun doute, le problème crucial est l'envasement et l'évaporation. L'envasement agit sur la capacité de la retenue du barrage, où on note une moyenne annuelle des apports solides de 1,58 millions m<sup>3</sup>. Si des mesures urgentes ne sont pas prises, la durée de vie du barrage diminue avec le temps et il ne pourrait remplir ses fonctions initiales.

Les sédiments qui comblent la retenue du barrage en question, pourront être perçus comme matières premières et leurs valorisations en cas de dragage de la retenue seront une perspective à mettre en valeur. En conséquence, la valorisation des sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba doit être en accord avec le respect de l'environnement. On se propose aussi d'utiliser ces sédiments comme sources de matières premières. La suite de nos travaux de recherche dans les prochains chapitres, permettra d'élucider cette problématique.

**CHAPITRE III :**

**CARTOGRAPHIE DE**

**L'ÉROSION DANS LA ZONE**

**D'INFLUENCE DU BARRAGE**

**DJORF-TORBA.**

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

---

#### III-1 Introduction.

Ce troisième chapitre, s'inscrit dans le cadre de l'étude de la dynamique sédimentaire au niveau de la zone du barrage, avec des objectifs divers. Il s'agit tout d'abord de cartographier l'érosion, d'estimer et quantifier les volumes des matières piégées et d'évaluer la capacité de stockage dans la retenue à long terme. On prendra en compte la variation des différents paramètres qui influent sur ce phénomène, telle que : la morphologie du bassin versant ; les facteurs climatiques du site ; les conditions liées à la nature du terrain [LUBKER, 2011 ; ROLLET, 2007]. Il s'agira par la suite d'avoir des éléments précis qui assureront une meilleure conservation des sols sur le bassin versant dominant de la retenue, et aussi la réduction éventuelle du taux de transport des sédiments vers la retenue, afin d'assurer une bonne gestion de l'ouvrage [TECSULT et A.N.B.T, 2005].

La dynamique sédimentaire dans les zones situées près des barrages est un risque sérieux pour la durée de vie de ceux-ci [TOUMI et al, 2013]. Selon les statistiques de l'ANBT en 2016, on recense approximativement un volume important de sédiments au niveau des retenues des barrages. Ce comblement est estimé à 403 millions de m<sup>3</sup> à l'ouest, 230 millions de m<sup>3</sup> à l'est, 428 millions de m<sup>3</sup> au centre et 87 millions de m<sup>3</sup> au sud de l'Algérie. Cette problématique de la dynamique sédimentaire est plus critique au niveau des bassins versants situés dans une région à climat aride ou semi-aride [REMINI et al, 2009].

La quantification de l'érosion et l'évaluation du taux d'envasement dans les retenues de barrages, a fait l'objet de plusieurs études dans différents domaines (TECSULT, 2005 ; KABIR et al, 2010 ; DAS, 2014 ; KACI et al, 2017). En principe, il n'existe pas une méthode fiable représentant la réalité de ce phénomène, mais actuellement ce domaine d'estimation est basé sur la combinaison entre les formules empiriques et les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) [NANGIA et al, 2010].

Pratiquement, les résultats de la présente étude devront permettre d'élaborer des cartes qui représentent la distribution de l'érosion sur l'ensemble de bassin versant, par l'application des systèmes d'information géographiques. Le SIG (logiciel ArcGIS) nous permet une délimitation des sous bassins versants de l'Oued Guir et l'extraction des indices géomorphologiques. On pourrait par la suite définir les zones productrices des sédiments qui exigent une intervention prioritaire.

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

#### III-2 Aperçu sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG).

Dans tous les domaines scientifiques, les bases de données occupent une place de plus en plus importante, vis-à-vis de la compréhension des différents phénomènes et l'acquisition des connaissances rapides et exactes. Dans l'étude des phénomènes spatialisés, on a recours à l'utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), qui s'avèrent rentables. Le SIG offre une plateforme qui résout des problèmes complexes dans tous les types des connaissances « spatialisées ». Ils sont spécialement conçus pour le traitement de données géo-localisées. La principale plateforme de développement utilisée actuellement au monde est l'utilisation des SIG appelés ArcGIS. L'ArcGIS est un système complet qui permet d'intégrer et/ou créer des cartes ; collecter ; organiser et gérer des données d'origines variées [<https://resources.arcgis.com/>].

Les Systèmes d'Information Géographique sont apparus dans les années soixante, exactement en 1963 par R.F.TOMLINSON, quand il a installé un système d'informations, se référant à un espace, pour le compte du Canada [KOEHL, 2004]. Un SIG peut être caractérisé par quatre composants : matériel, logiciels, données et le personnel (Figure III-1) [REIX, 2005 in SERBAH, 2018].

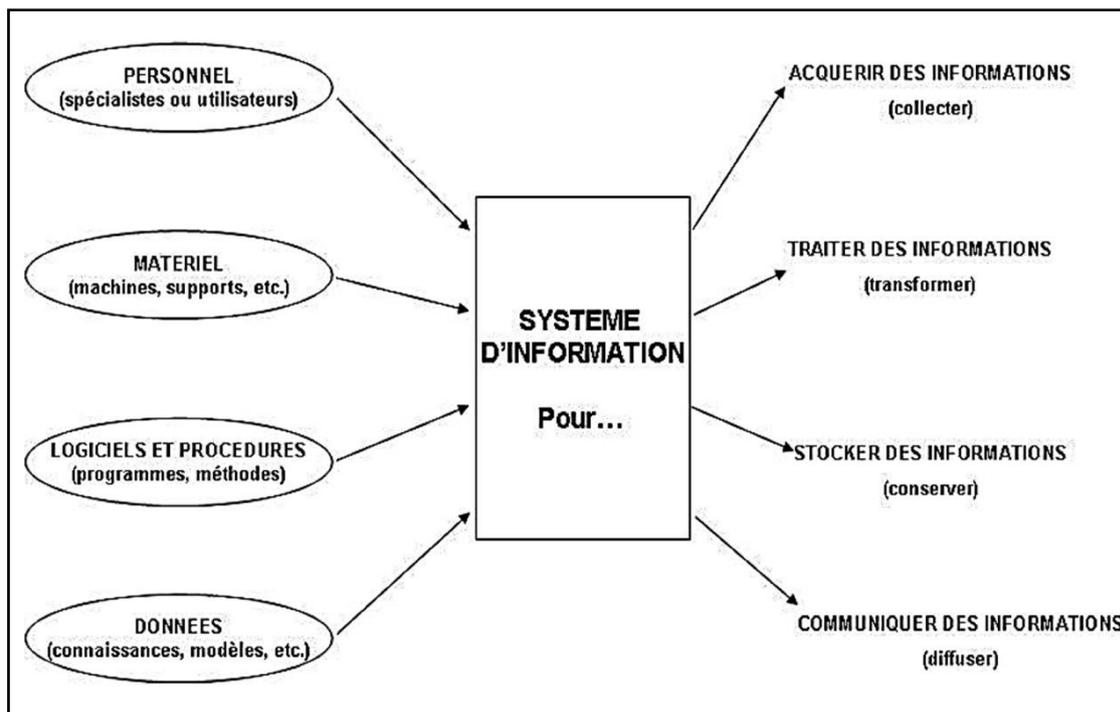


Fig. III-1 : La notion de système d'information géographique.

### **III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.**

---

Généralement pour définir les caractéristiques des bassins versants, on utilise des Modèles Numériques de Terrain (MNT) comme des données d'entrée dans un SIG, sachant que la précision de ces données est déterminée essentiellement par la résolution (distance entre les points d'échantillonnage). En principe les données MNT sont brutes, en conséquence le traitement de ces données brutes est nécessaire pour être un produit utilisable dans un SIG. Ceci consiste à représenter les données d'élévation dans un système de projection adapté pour la région d'étude. Cette étape consiste à ré-échantillonner le MNT brute par une technique de ré-échantillonnage la plus répondue.

#### **III-3 Présentation de l'approche méthodologique adoptée.**

L'application des SIG pour traiter les données spatiales est devenue un moyen inévitable, notamment ceux qui sont liés au phénomène de l'érosion et le transport solide. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les zones le plus touchées par ces phénomènes. De façon générale, plus les facteurs utilisés sont actuels, plus les résultats sont précis. La principale problématique dans l'établissement des cartes thématiques est le choix d'une méthode qui assure une détermination réaliste de ces zones à partir d'un minimum d'informations [EL GAROUANI et MERZOUK, 2006].

La présente étude décrit une méthode d'exploitation des données MNT sous forme SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), qui permet une délimitation des sous bassins versants et l'extraction des indices géomorphologiques [KACI et al, 2017]. Ceci nous a permis d'estimer l'érosion en fonction des caractéristiques du site, et aussi l'élaboration de cartes thématiques qui contribuent à la distribution de l'érosion à travers le bassin versant (BESKRI et al, 2009 ; MARKHI et al, 2015).

L'approche utilisée dans notre cas est base sur l'application d'un SIG. Nous avons utilisé le logiciel ArcGIS (programme Spatial Analyst Tools – Hydrologie sous ArcGIS 10.6) pour identifier et cartographier l'érosion. Pour l'extraction des informations géomorphologiques du bassin versant, nous avons adopté un modèle numérique de terrain (MNT) sous la forme SRTM avec une résolution de 90m, couvrant la totalité de la zone d'étude de l'oued Guir. Ces données ont été importées dans le logiciel ArcGIS sous la forme d'une couche raster. Les altitudes sont données par le WGS 1984 (World Geodetic System). Les étapes proposées dans le cadre de la cartographie de l'érosion, sont accomplies en quatre étapes principales (Figure III-2).

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

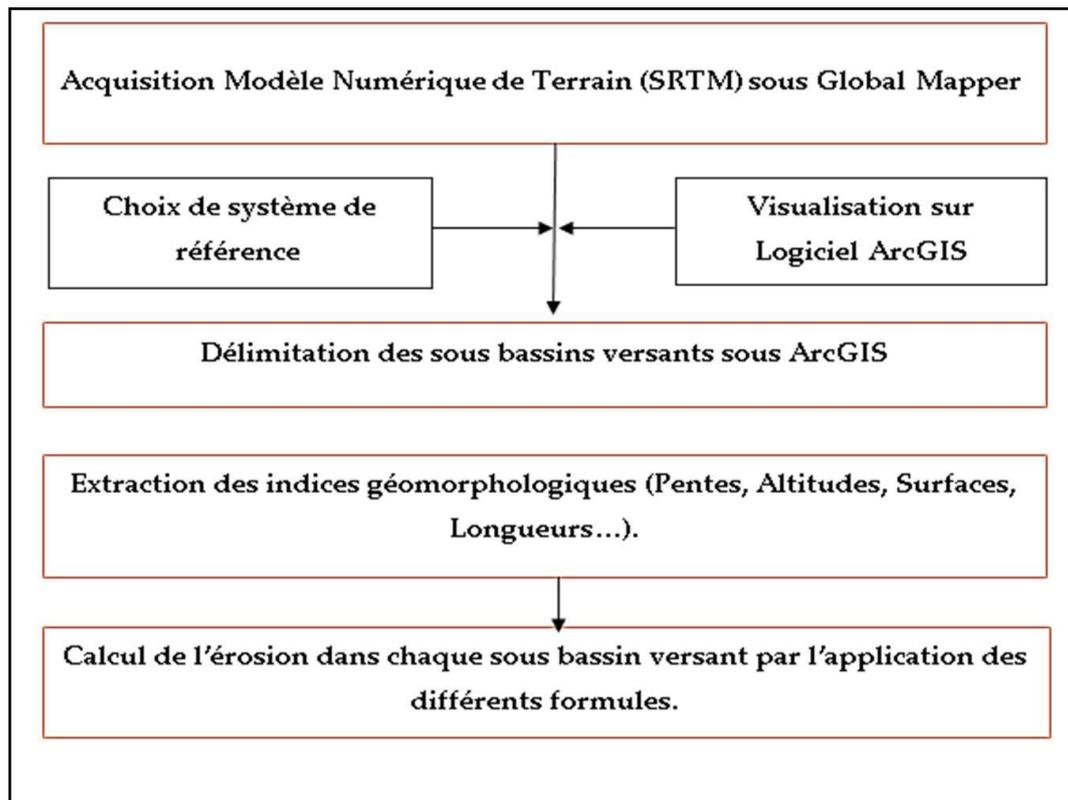


Fig. III-2 : Les différentes étapes de la démarche adoptée.

#### III-4 Données et méthodes.

Notre étude se limitera au bassin versant de l'Oued Guir qui alimente le barrage Djorf-Torba. Cet ouvrage d'une capacité de rétention de 360 hm<sup>3</sup>, fait partie des 25 barrages algériens ayant une capacité supérieure à 100 millions de m<sup>3</sup>.

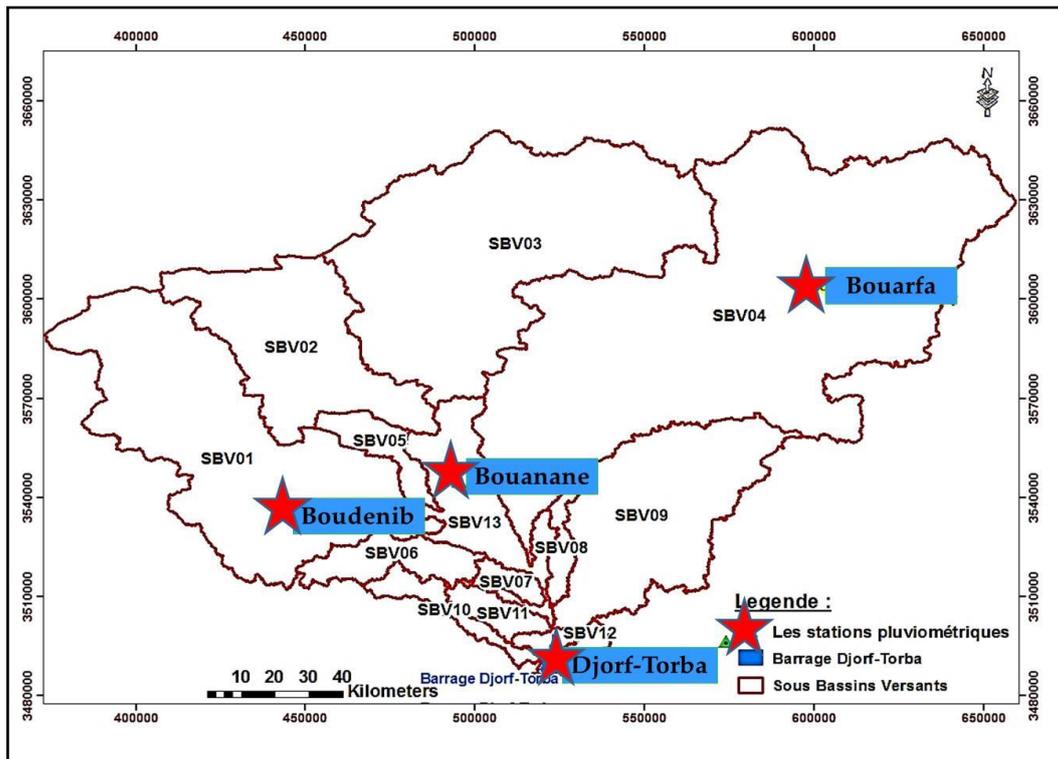
Malgré cette importance stratégique, le barrage de Djorf-Torba est un cas réel d'une problématique de son envasement à un rythme rapide d'année en année, en raison de la forte dynamique sédimentaire des particules solides. Les apports solides spécifiques au barrage sont estimés à environ 400 tonnes/km<sup>2</sup>/an [KABOUR et al, 2015].

Des quantités considérables de sédiments sont drainées directement dans la retenue du barrage, l'envasement annuel varie de 1,30 à 2,56 hm<sup>3</sup>/an pour un apport moyen annuel de 200 hm<sup>3</sup> [KASSOUL et al, 1997 ; A.N.B.T, 2004]. Au vu de cette situation critique, la cartographie de l'érosion dans la région est le meilleur moyen pour maîtriser cette problématique.

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

#### III-4-1 Précipitations dans le bassin versant.

La caractérisation pluviométrique du bassin versant de l'Oued Guir a été effectuée selon les données des précipitations mensuelles disponibles sur les stations Algériennes de Djorf-Torba et ainsi que les stations Marocaines de Bouanane, Boudenib, Bouarfa. La Figure III-3 présente les stations pluviométriques considérées pour l'analyse des précipitations du bassin versant. On a délimité le bassin versant de l'oued Guir en 13 sous bassins versants de 1 à 13 (voir III-4-2).



Les données pluviométriques recueillies pour l'exploitation dans les formules d'estimation de l'érosion, ont été fournies par l'Agence National des Barrages et Transfert (A.N.B.T), ils s'étalent sur une période de 30 ans (1985-2014). Les valeurs des précipitations mensuelles (Pm) et annuelles (Pa) du bassin versant sont présentées sur la Figure III-4. On note que 154,16 mm est la valeur annuelle maximale durant la période citée ci-dessus, mais par contre la pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux est égale à 114,96 mm. Concernant la température de la région d'étude, les données ont été fournies par la météorologie Sud-Ouest de Béchar, ils s'étalent sur une période de 15 ans (1994 à 2008). Les valeurs moyennes annuelles varient de 21,00 °C à 22,70 °C.

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

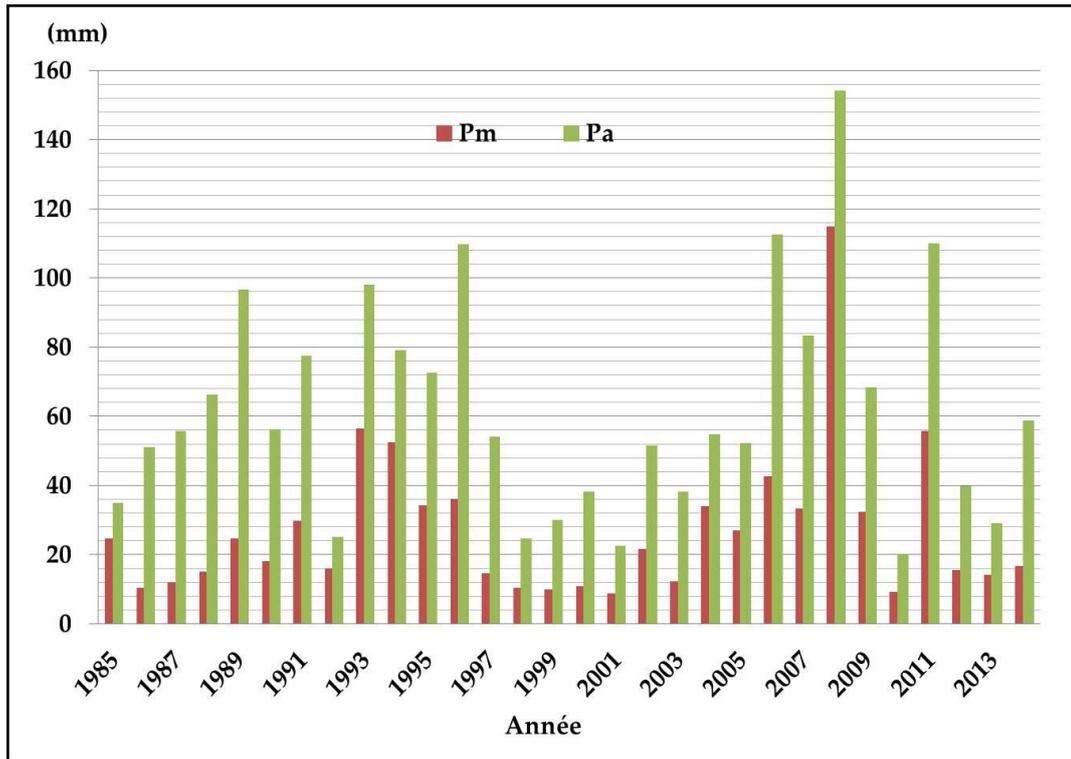


Fig. III-4 : Les données de précipitations utilisés (A.N.B.T ; 1985-2014).

#### III-4-2 La morphométrie du bassin versant.

Dans le but de connaître le comportement de l'érosion ainsi que sa distribution, il est indispensable de déterminer les valeurs correspondant aux différents paramètres géomorphologiques du bassin versant [DESHMUKH et al, 2014]. Sachant que, la description morphologique du terrain est réalisée par la morphométrie. On définit la morphométrie, comme étant la science de la mesure quantitative et de l'analyse des caractéristiques géométriques et topologiques de la surface terrestre [ZAOUI, 2015].

Les caractéristiques morphologiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des apports solides en période de crue. Dans cet axe, la méthode de l'estimation de l'apport solide est basée sur l'évaluation des divers paramètres liés au risque de l'érosion. En premier lieu, on doit regrouper tous les indices géomorphologiques des différents sous bassins versants, par l'application du logiciel ArcGIS. En second, on doit prendre en considération les paramètres climatiques, tels que les précipitations mensuelles et annuelles [TECSULT et A.N.B.T, 2005].

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

Selon les résultats obtenus par l'application du logiciel ArcGIS sur le MNT de la zone d'étude, le bassin versant de l'Oued Guir est composé de 13 sous bassins versants (SBV) de forme allongée (Figure III-5). Les 13 SBV couvrent une superficie (S) estimée à 23720,84 km<sup>2</sup> et un périmètre (P) de 4009,26 km, avec plus de 90% de la surface est implanté sur le territoire marocain.

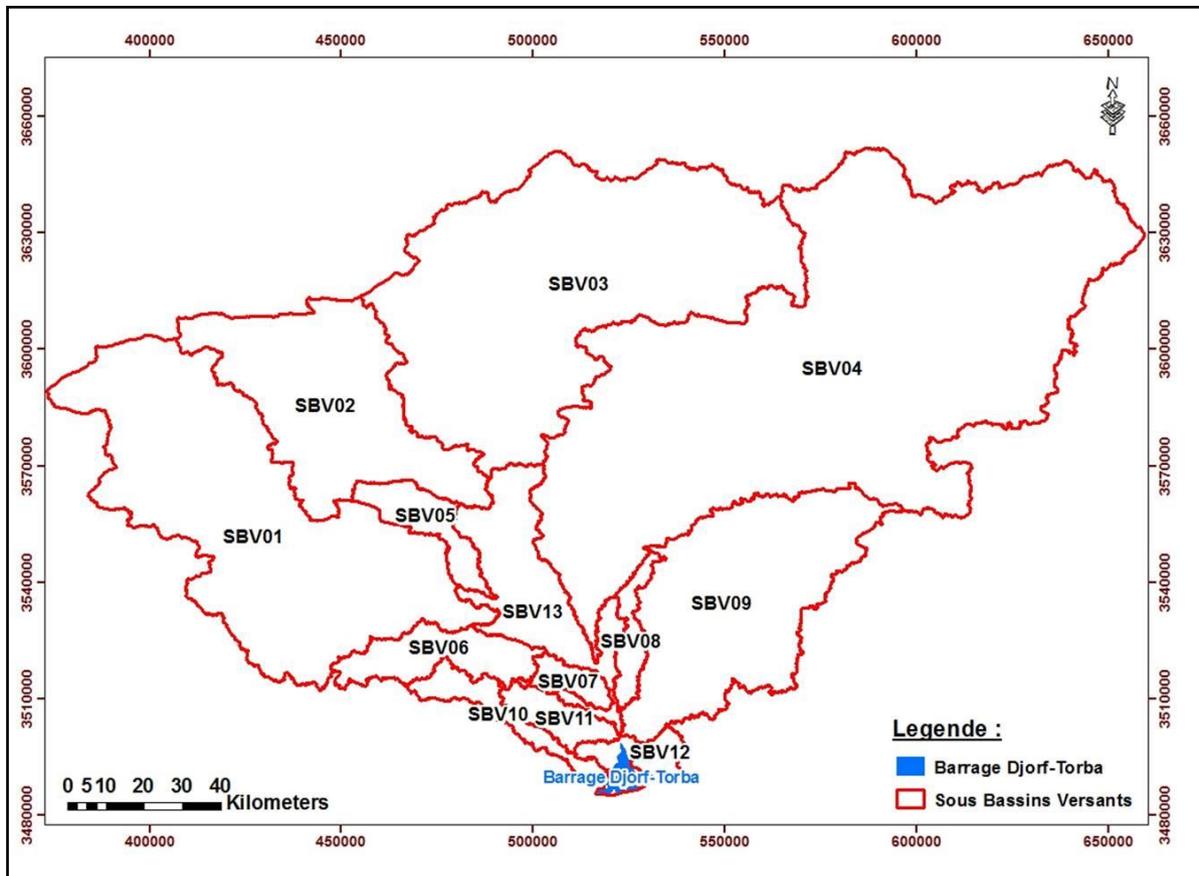


Fig. III-5 : Implantation des sous bassins versants de l'Oued Guir (Partie amont du barrage).

D'après le découpage, la zone concernée présente des surfaces très variables, de 118,98 km<sup>2</sup> comme une valeur minimale pour le SBV-12, jusqu'à 8126,6 km<sup>2</sup> comme une valeur maximale pour le SBV-04.

La dénivelée (D) des sous bassins versants varie de 85 m pour le SBV-7 jusqu'à 860 m pour le SBV-1, par contre l'altitude moyenne (Hmoy) atteint 1800 m. Plus de 75 % de la surface totale contient des pentes inférieures à 6%, le reste de la surface aux environs de 25%, présente des pentes entre 1,15 et 5,25% (Tableau III-1).

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

*Tableau III-1 : Caractéristiques géomorphologiques des sous bassins versants.*

SBV	P (km)	S (km <sup>2</sup> )	H <sub>moy</sub> (m)	D (m)	Pente (%)
SBV-01	492,52	3 477,30	1758	860	7,19
SBV-02	334,18	2 286,60	1800	765	9,01
SBV-03	499,99	4 347,70	1554	543	5,18
SBV-04	795,21	8 126,60	1411	603	4,52
SBV-05	138,50	368,00	1285	422	5,25
SBV-06	200,22	554,59	963	176	3,63
SBV-07	88,24	165,68	806	85	1,78
SBV-08	134,21	218,11	926	191	1,50
SBV-09	358,22	2 211,90	1286	531	3,20
SBV-10	189,01	297,91	900	184	1,40
SBV-11	112,59	261,57	811	101	1,15
SBV-12	66,51	118,98	786	89	3,45
SBV-13	599,86	1 285,90	1129	411	5,06
<b>La superficie totale du bassin versant</b>				<b>23 720,84 km<sup>2</sup></b>	

#### III-4-3 Données complémentaires.

En plus des données fournies précédemment, la cartographie de l'érosion et l'estimation du transport solide nécessite des données complémentaires. Selon les documents analysés en notre possession, les différents facteurs peuvent varier significativement. Dans notre cas, nous considérons les paragraphes suivants :

- **Paragraphe 1 :**

La méthodologie utilisée est basée sur plusieurs formules (Fournier 1960 ; Tixeront 1960 ; Saidi 1991 ; Gavrilovic 1992 ; Kassoul et al 1997)/ Ces formules sont agréées par le premier organisme chargé de la gestion des barrages (l'ANBT). Ces formules ont été utilisées dans de nombreuses études techniques à l'échelle nationale. A titre d'exemple en 2005 et 2008, dans le cadre des études de la protection des bassins versants de quelques barrages (Bureau d'études canadien, TECSULT).

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

- **Paragraphe 2 :**

Dans le but d'une bonne présentation des résultats obtenus par l'application des différentes formules, nous devons connaître la valeur du pourcentage de capture des sédiments par la retenue du barrage Djorf-Torba. Diverses techniques d'estimation ont été développées, parmi elles il y'a des méthodes graphiques simples. Dans cet axe, la méthode de Brune convient bien aux besoins de la présente étude. Cette méthode donne le pourcentage de capture des sédiments par la retenue en fonction du rapport entre la capacité de la retenue et l'apport liquide annuel (Figure III-6).

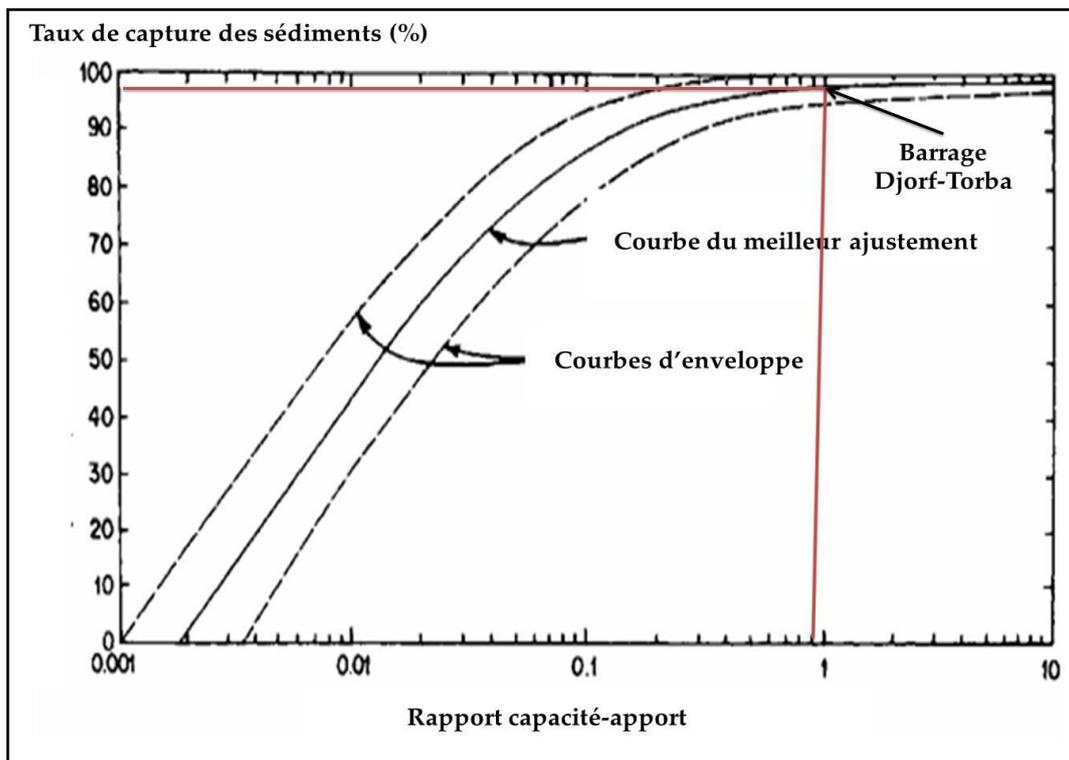


Fig. III-6 : Courbe de Brune [TECSULT et A.N.B.T, 2005].

Le barrage de Djorf-Torba a des apports liquides de 200 hm<sup>3</sup>/an, sa capacité actuelle est de 179 hm<sup>3</sup>. Donc le rapport capacité-apport de Brune s'évalue à presque 0.90, correspondant un taux de capture de 98%.

La valeur de la capacité de stockage actuelle au niveau du barrage peut être estimée selon des travaux antérieurs, dans lesquels nous avons utilisé la formule de REMINI et HALLOUCHE., 2005 ( $T_{env} \% = 1,6228 t^{0,8707}$ ).

Avec t : Nombre d'années d'exploitation.

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

- **Paragraphe 3 :**

L'application de l'approche méthodologique citée ci-dessus (voir III-3), a nécessité des données relatives à la nature des écoulements, c'est la lame d'eau écoulée (Le). Pour cela, on se base sur deux facteurs principaux ; le coefficient d'écoulement (Ce), qui varie de 6% à 15 % [AÏT HSSAINE, 2014 ; KASSOUL et al, 1997], et les précipitations moyennes annuelles (Pa). En conséquence (Le) est égale à une valeur moyen de 7,46 mm. Ces résultats sont obtenus à partir d'une base de données de 30 ans (Figure III-7).

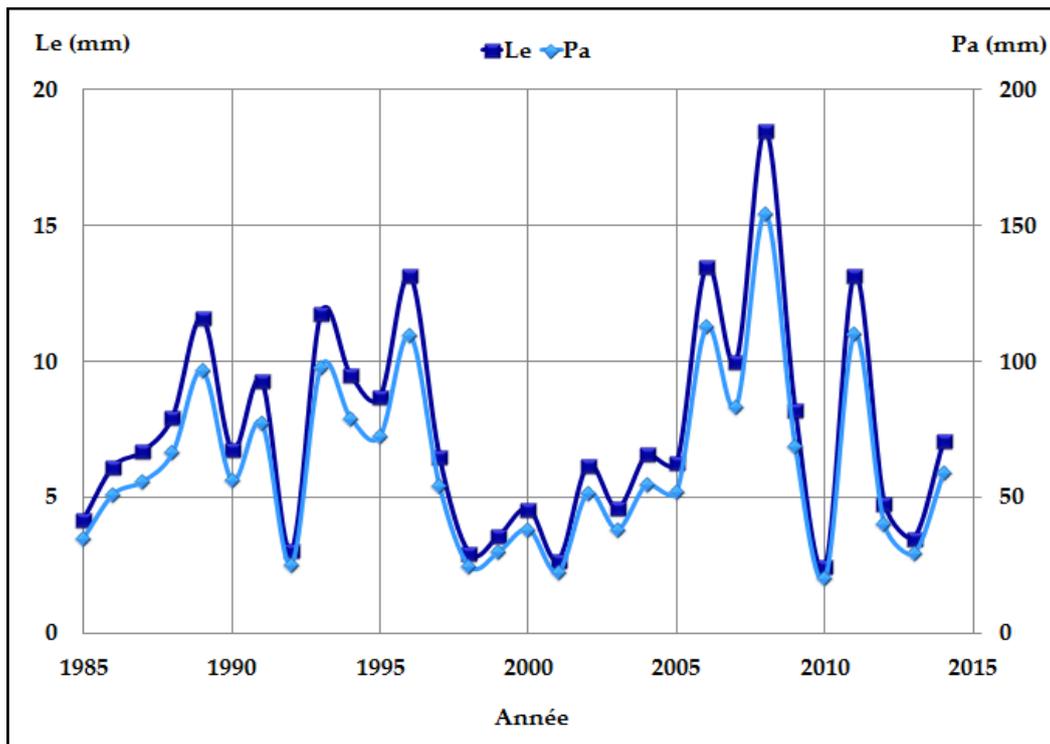


Fig. III-7 : Variation de la lame d'eau écoulée en fonction des précipitations moyennes annuelles.

- **Paragraphe 4 :**

La perméabilité du bassin versant ( $\alpha$ ) varie de 8,5 à 3200, plus la valeur est importante plus la perméabilité est faible (Tableau III-2). La monographie du barrage montre qu'il y a une variation en termes de formations géologiques distinctes [COYNIE et BELLIER, 1985]. Cette variation géologique est caractérisée par une perméabilité faible-moyenne à moyenne. En conséquence et selon les recommandations de l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T), la valeur moyenne de la perméabilité dans le bassin versant est estimée à  $\alpha \approx 200$ .

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

Tableau III-2 : Variation de valeurs de la perméabilité ( $\alpha$ ).

Variation de la perméabilité	$\alpha$
Élevée	8.5
Moyenne	75
Faible à moyenne	350
Faible	1400
Imperméable	3200

- **Paragraphe 5 :**

Certaines formules expriment les résultats en t/km<sup>2</sup>/an, elles ne prennent pas en considération le transport solide en charriage et l'érosion éolienne. Dans ces cas, nous considérons qu'un poids volumique des sédiments est d'environ 2,86 t/m<sup>3</sup> (selon les résultats des essais menés sur les échantillons prélevés, voir chapitre IV) ; avec un taux de charriage de 20 % des sédiments en suspensions [TECSULT et A.N.B.T, 2008]. Notre zone d'étude est l'une des régions les plus exposées au vent dans l'Ouest du Sahara Algérien. Ces vents sont violents, chauds et secs ; d'après les études menées dans les régions arides et semi-arides, le pourcentage de l'érosion éolienne est estimé à 10% [ZAOUI, 2019].

#### III-5 Quantification de l'érosion et évaluation du transport solide.

##### III-5-1 Formule de FOURNIER (1960).

Fournier en 1960 a développé une formule qui permet d'estimer l'érosion spécifique annuelle d'un bassin versant, quel que soit son emplacement géographique. On prend en compte les conditions climatiques, telles que les précipitations et les caractéristiques morphologiques du bassin versant étudié (équation III-1) [MEKERTA et al, 2008]. Cette formule a été proposée par l'utilisation des données de 104 bassins versants provenant de différentes régions.

$$Es = (1/36). (Pm^2/ Pa)^{2.65}.(H^2/S)^{0.46} \dots\dots\dots (III-1).$$

**Es** : L'érosion spécifique moyenne annuelle (t/km<sup>2</sup>/an).

**Pm** : Pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux (mm).

**Pa** : Pluie moyenne annuelle (mm).

**H** : Dénivelé moyen (m).

**S** : Superficie du sous bassin versant (Km<sup>2</sup>).

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

Le Tableau III-3 présente les valeurs de l'érosion spécifique ( $E_s$ ) et le transport solide ( $A_s$ ) pour chaque sous bassin versant. L'érosion ( $E_s$ ) varie de 881,91 à 2810,98 t/km<sup>2</sup>/an, avec une valeur moyenne de 1471,06 t/km<sup>2</sup>/an. La valeur la plus faible se situe au SBV-11, alors que le maximum est atteint au SBV-5. Plus de 65% du bassin versant est caractérisé par une érosion élevée à très élevée, avec un taux supérieur à 1000 t/km<sup>2</sup>/an. Par contre, environ 25% du bassin a une érosion modérée. Le calcul de ( $A_s$ ) prend en considération la densité moyenne des grains solides et la superficie des SBV, la valeur moyenne est estimée à 11,32 hm<sup>3</sup>/an. En principe, cette valeur est très élevée par rapport aux données climatiques.

Tableau III-3 : Résultats de la formule Fournier en fonction des sous bassins versants.

N°-SBV	$E_s$ (t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )	$A_s$ (hm <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup> )
SBV-01	1 925,80	2,34
SBV-02	2 097,60	1,68
SBV-03	1 137,15	1,73
SBV-04	940,81	2,67
SBV-05	2 810,98	0,36
SBV-06	1 038,98	0,20
SBV-07	929,36	0,05
SBV-08	1 724,55	0,13
SBV-09	1 521,66	1,18
SBV-10	1 443,12	0,15
SBV-11	881,91	0,08
SBV-12	1 128,97	0,05
SBV-13	1542,93	0,69
<b>BV-Oued Guir</b>	<b>1471,06</b>	<b>11,32</b>

Les caractéristiques géomorphologiques influencent sur le taux d'érosion enregistré dans un bassin versant, ceci est confirmé par l'application de la formule Fournier. Pour une base de données climatiques, le rapport entre la dénivelée au carrée et la superficie ( $D^2/S$ ), nous guident vers le sous bassin versant le plus exposé à l'érosion. Plus la valeur du rapport est élevée, plus le taux d'érosion est important.

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

La Figure III-8 montre la distribution spatiale de l'érosion spécifique ( $E_s$ ) sur les différents sous bassins versants. Cette distribution comporte des zones de concentration près de la retenue du barrage. En effet, un regroupement de valeurs faible à moyen est observé au Nord du bassin versant, dans la partie haute qui est située entre l'Algérie et le Maroc. Le gradient entre les deux régions est irrégulier, car la zone du bassin versant comporte des valeurs variables de faibles à très élevées.

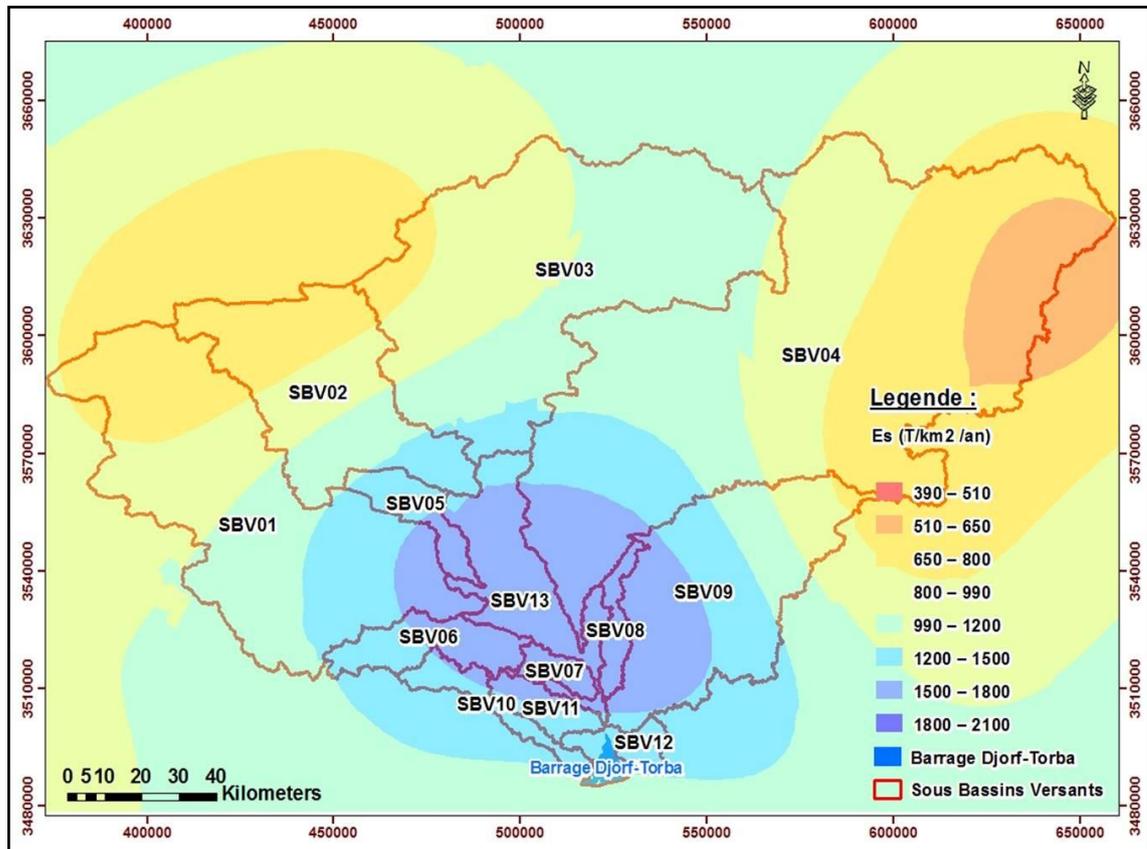


Fig. III-8. Distribution de l'érosion spécifique  $E_s$  sur le BV de l'Oued Guir.

La Figure III-9 nous renseigne sur l'évolution de l'érosion spécifique en fonction de rapport  $P_m^2/P_a$ , pour une période d'observations de 30 ans (1985-2014). Les valeurs de l'érosion ont une variation importante, avec une valeur qui ne dépasse pas 2 t/km<sup>2</sup>/an en 1986 à plus de 30000 t/km<sup>2</sup>/an en 2008. Cette particularité est justifiée par le rapport entre les précipitations mensuelles moyennes du mois le plus pluvieux ( $P_m$ ) et annuelles ( $P_a$ ), tel que  $P_m^2/P_a$  (1986) = 3,09 m, par contre le  $P_m^2/P_a$ (2008) = 42,52 m.

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

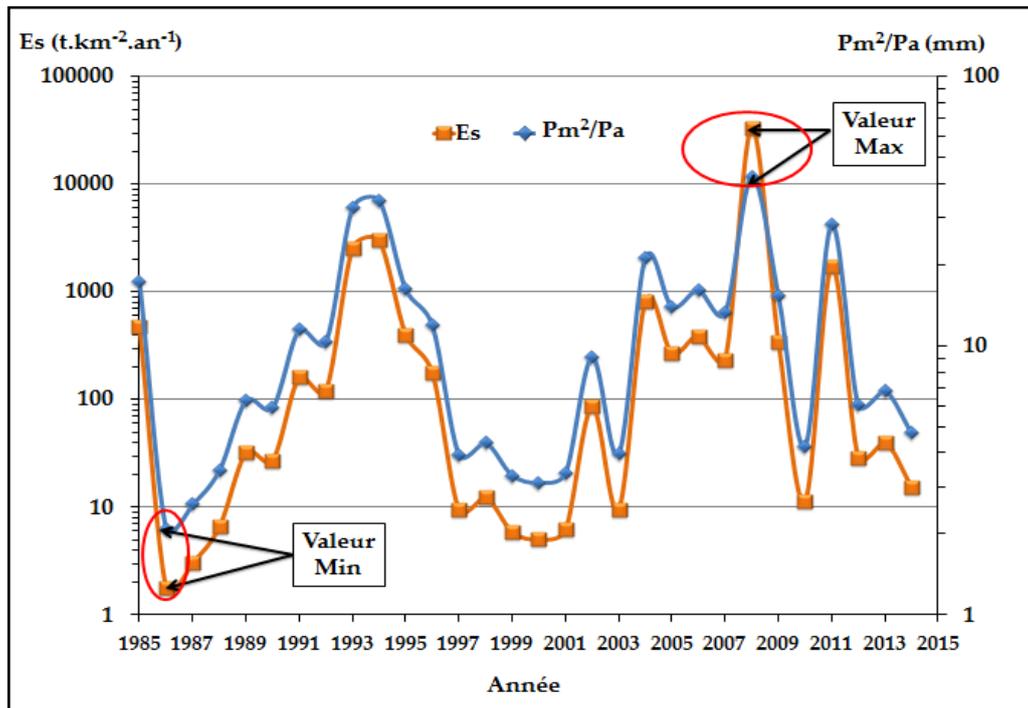


Fig. III-9. Évolution de l'érosion spécifique ( $Es$ ) en fonction de l'indice des précipitations ( $Pm^2/Pa$ ).

Il faut également prendre en considération les inondations enregistrées en 2008 au niveau de l'Oued Guir, exactement le 10 octobre 2008. Le débit de pointe de la crue a atteint  $2260 m^3/s$ , les crues de l'Oued Guir se caractérisent par des montées de crue rapides, avec des vitesses d'écoulement très élevées, un écoulement turbulent et des transports solides abondants [AÏT HSSAINE, 2014]. Selon le bulletin de l'ANBT, le rapport annuelle enregistré dans la même année a dépassé les 900 millions de mètres cubes (c'est la plus grande valeur des cinquante dernières années).

#### III-5-2 Formule de TIXERONT (1960) :

La formule de Tixeront est basée sur les données recueillies dans 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de Tunisie, sur une durée d'observations comprise entre 2 à 22 ans. Ce modèle regroupe deux équations reliant les apports solides ( $A$ ) en  $t.km^{-2}.an^{-1}$  à l'écoulement annuel total ( $E$ ) en mm, selon la position géographique du bassin versant [TECSULT et A.N.B.T, 2005]. Les équations sont :

- Est du pays  $A = 92 * E^{0,21}$  ..... (III-2-1).
- Centre du pays  $A = 200 * E$  ..... (III-2-2).

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

- Puisque le bassin versant de l'Oued Guir se trouve dans la partie Sud-Ouest de l'Algérie, il n'existe aucune équation pour estimer les apports solides.

#### III-5-3 Formule de SOGREAH (1969) :

La formule de Sogreah a été calculée sur la base des données recueillies dans 27 bassins versants d'Algérie, dont 16 alimentant des retenues de barrages. Ce modèle relie les apports solides ( $q_s$ ) en  $t/km^2/an$  en fonction la lame d'eau écoulée ( $Le$ ) et la perméabilité ( $\alpha$ ), selon l'équation III-3 [TECSULT et A.N.B.T, 2008].

$$q_s = \alpha * Le^{0.15} \dots\dots\dots (III-3).$$

- Nous n'avons pas utilisé les indices de découpages pour les différents SBV, car la formule est basée juste sur des facteurs liés aux conditions climatiques ( $Le$ ) et à la nature du terrain ( $\alpha$ ).
- Les valeurs de ( $Le$ ) sont calculées sur la base des données climatiques de 30 ans (1985-2014). Les résultats de la formule Sogreah sont présentés sur la figure III.10.

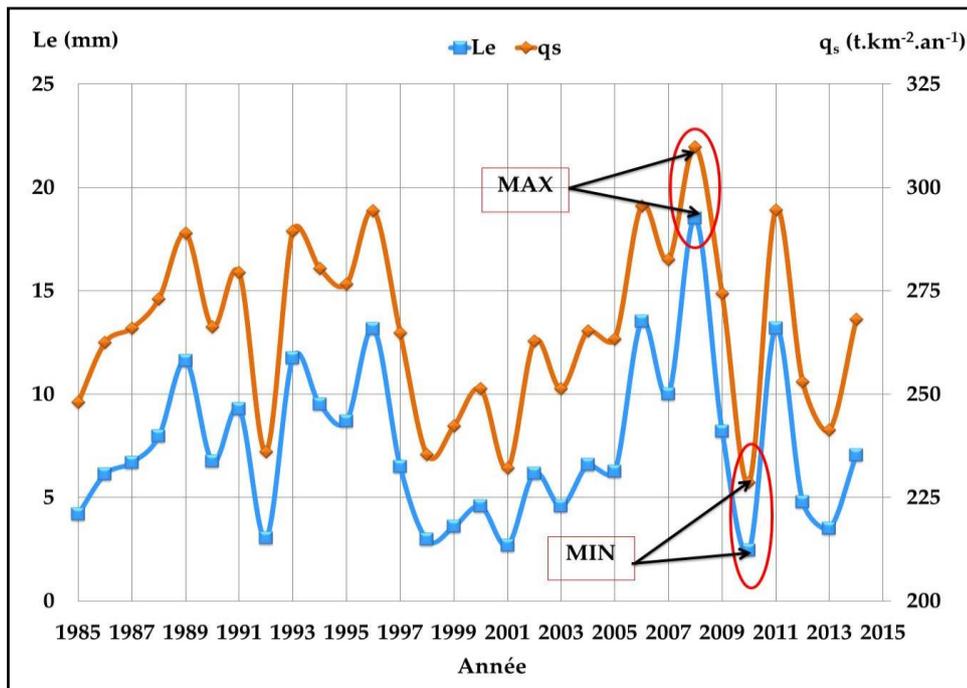


Fig. III-10. Évolution de l'apport solide ( $q_s$ ) en fonction de la lame d'eau écoulée ( $Le$ ).

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

Selon les résultats de la formule Sogreah, le bassin versant est caractérisé par des valeurs très proches, ils s'échelonnent de 229 à 310 t/km<sup>2</sup>/an. L'apport solide moyen annuel obtenu par cette formule est d'environ 265,92 t/km<sup>2</sup>/an soit 2,21 hm<sup>3</sup>/an. La Figure III. 10 montre qu'il y a une uniformité dans la cadence du changement entre ( $q_s$ ) et ( $M_o$ ), cette particularité est justifiée par la relation liée entre les deux paramètres (équation III-3).

#### III-5-4 Formule de SAIDI (1991).

Saidi en 1991, a étudié l'envasement de 18 barrages algériens en exploitation [TECSULT et A.N.B.T, 2008]. Il a proposé l'équation III-4 pour estimer les apports solides ( $q_s$ ) en m<sup>3</sup> /km<sup>2</sup>/an :

$$q_s = 19 M_o^{1,246} * C e^{-0,885} \dots\dots\dots (III-4).$$

$M_o$  : module spécifique en l/s/km<sup>2</sup> (le débit moyen d'un cours d'eau)

$C_e$  : est le coefficient d'écoulement.

- Les différents résultats sont montrés sur la figure III.11.

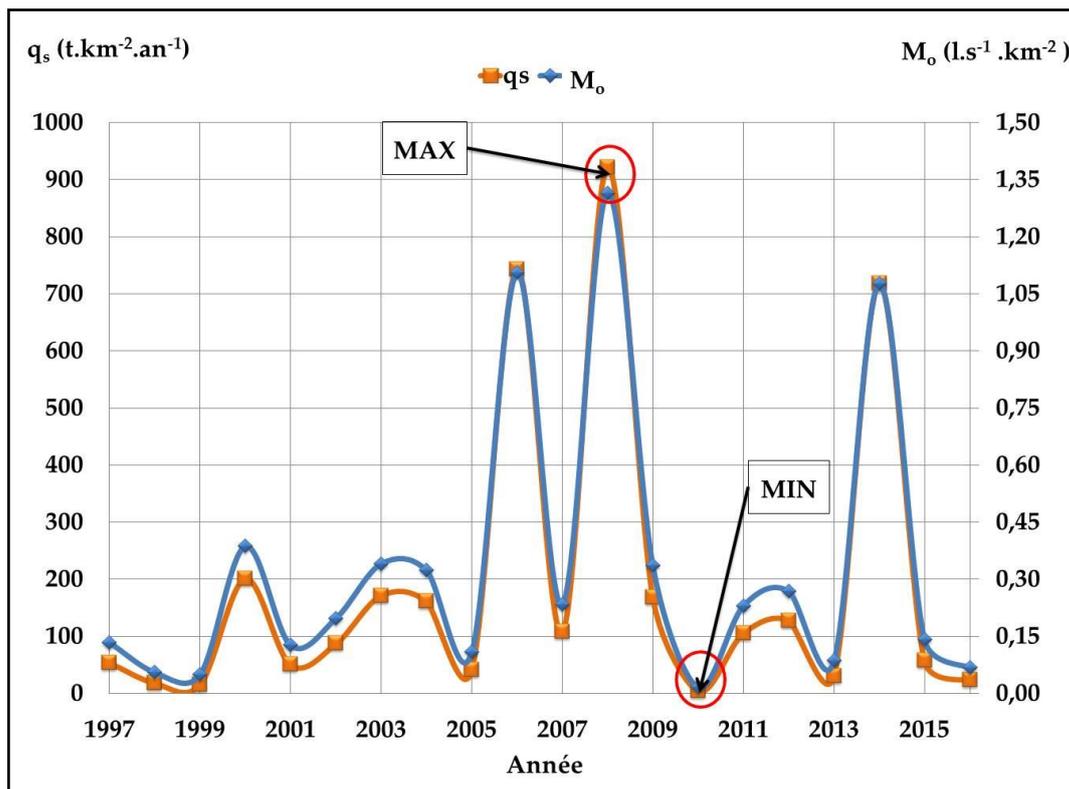


Fig. III-11. Évolution de l'érosion ( $q_s$ ) en fonction des débits liquides (1997-2016).

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

Le débit moyen ( $M_0$ ) est calculé en fonction des apports liquides, pour une période d'observation de 20 ans (1997-2016). Les valeurs des apports solides ( $q_s$ ) se caractérisent par une variation assez importante, ils passent de 3,52 (en 2010) à plus de 921 t/km<sup>2</sup>/an (en 2008). Cette variation est justifiée par l'évolution importante dans les données des débits liquides. Finalement, la valeur de l'apport solide moyen est d'environ 190 t/km<sup>2</sup>/an soit un taux annuel de 1,57 hm<sup>3</sup>.

#### III-5-5 Formule de GAVRILOVIC (1992).

La formule de Gavrilovic est largement utilisée en Algérie. L'équation III-5 prédit le taux des apports annuels des sédiments ( $q_s$ ) en m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/an, [TECSULT et A.N.B.T, 2005]. La formule intègre les caractéristiques physiques, les indices climatiques et un facteur qui est lié à la nature du terrain, appelé coefficient d'érodabilité ( $Z$ ).

$$q_s = q_{sp} * C_{rm} \dots \dots \dots (III-5).$$

$q_{sp}$ : Taux de "production" annuelle des matériaux en m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/an (y compris le transport par charriage). Ce paramètre est calculé selon équation III-5-1.

$C_{rm}$ : Coefficient de rétention, tenant compte des discontinuités spatio-temporelles dans le flux des matériaux arrachés aux versants (équation III-5-3).

- Les équations suivantes montrent le calcul des différents paramètres :

$$q_{sp} = T.P.a.\pi .Z^{(3/2)} \dots \dots \dots (III-5-1).$$

Avec :  $T$  : Coefficient thermique

$$T = (t/10)^{1/2} + 0,1 \dots \dots \dots (III-5-2).$$

$t$  : température moyenne annuelle en °C, dans notre zone d'étude  $t = 22$  °C, d'où  $T$  est égale à 1,58.

$Z$  : coefficient d'érosion, selon les documents analysés, notre zone d'étude est caractérisée par une érosion faible-moderée à modérée. Le coefficient d'érosion varie entre 0,20 à 0,70 (Tableau III-4), pour une valeur moyenne estimée égale à  $Z = 0,45$ .

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

Tableau III-4 : Degré de l'érosion selon le coefficient d'érosion [TECSULT et A.N.B.T, 2005].

Érosion	Z
Excessive	1,00 à 1,50
Intense	0,70 à 1,00
Moyenne	0,40 à 0,70
Faible	0,20 à 0,40
Très Faible	0,10 à 0,20

- D'après les données précédentes, l'équation III-5-1 devient :  $q_{sp}=1,26*Pa$
- La détermination du taux de production annuelle des sédiments ( $q_{sp}$ ), se fait en fonction des précipitations annuelles ( $Pa$ ), qui sont obtenues à partir des données climatologiques présentées dans la section III-4-1.
- La Figure III-12 présente l'évolution du taux de production annuelle des sédiments ( $q_{sp}$ ) par-rapport aux précipitations annuelles ( $Pa$ ).

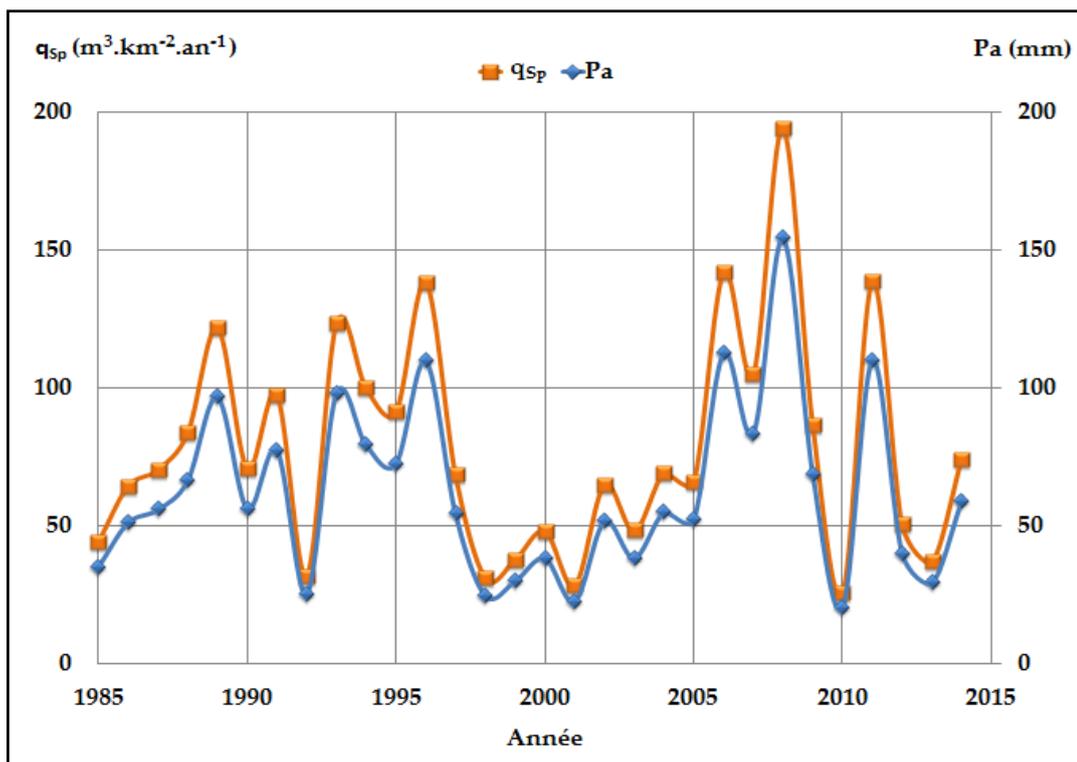


Fig. III-12. Évolution du taux de production annuelle des sédiments ( $q_{sp}$ ) en fonction des précipitations annuelles ( $Pa$ ) [1985-2014].

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

- Le coefficient de rétention des sédiments produits dans un bassin versant ( $C_{rm}$ ) a été ajouté à l'équation de Gavrilovic selon l'équation suivante :

$$C_{rm} = (P \cdot H)^{1/2} / (0,20 \cdot (L+10)) \dots\dots\dots (III-5-3).$$

**P** : Périmètre de sous bassin versant en km.

**H** : Altitude moyenne des SBV exprimée en km.

**L** : la longueur du thalweg pour les différents SBV en km.

Le Tableau III-5 présente les résultats de la formule Gavrilovic en fonction des différents sous bassins versants, les apports annuels de sédiments ( $q_s$ ) en t/km<sup>2</sup>/an et le transport solide ( $As$ ) en hm<sup>3</sup>/an. L'apport annuel ( $q_s$ ) admet des valeurs relativement proches, variant de 204 à 453 t/km<sup>2</sup>/an ; la valeur la plus faible se trouve dans le SBV-12, alors que le maximum est atteint au SBV-13. Le gradient entre les différentes sous bassins versants est très régulier. L'apport solide moyen annuel obtenu par cette formule est d'environ 336,16 t/km<sup>2</sup>/an soit 2,79 hm<sup>3</sup>/an.

*Tableau III-5 : Résultats de la formule Gavrilovic en fonction des sous bassins versants.*

N°-SBV	Thalweg (km)	$C_{rm}$	$q_s$ (t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )	$As$ (hm <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup> )
SBV-01	68,91	1,86	407,22	0,50
SBV-02	68,10	1,57	351,91	0,28
SBV-03	88,67	1,41	316,04	0,48
SBV-04	88,56	1,70	381,05	1,08
SBV-05	56,73	1,00	224,15	0,03
SBV-06	38,96	1,42	318,29	0,06
SBV-07	21,98	1,32	295,87	0,02
SBV-08	34,94	1,24	277,94	0,02
SBV-09	54,84	1,65	369,84	0,29
SBV-10	23,48	1,95	437,08	0,05
SBV-11	21,99	1,49	333,98	0,03
SBV-12	29,56	0,91	203,97	0,01
SBV-13	54,30	2,02	452,77	0,20
<b>BV-Oued Guir</b>			<b>336,16</b>	<b>2,79</b>

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

Selon le modèle de la formule Gavrilovic, on montre sur la Figure III.13, la distribution spatiale des apports annuels des sédiments ( $q_s$ ) sur le bassin versant. Cette distribution identifie trois niveaux différents de gravité de l'érosion (faible ; modérée ; élevée).

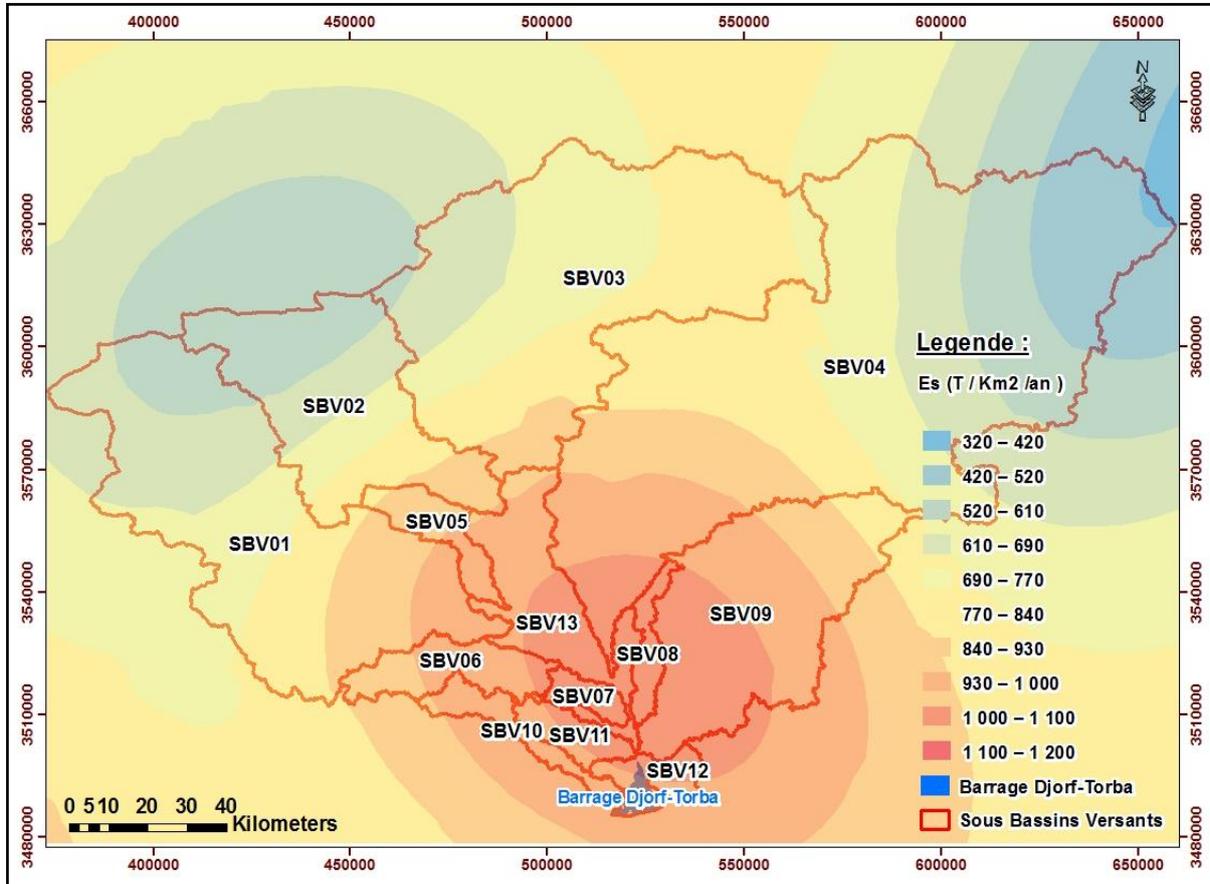


Fig. III-13. Distribution de l'érosion  $q_s$  selon la formule de Gavrilovic.

Les taux d'érosion faibles sont d'environ 7 %, ils couvrent une superficie estimée à 1687 km<sup>2</sup> (de SBV-5 à SBV-8 ; SBV-11 et SBV-12). Les sous bassins versants cités englobent des zones qui sont concentrées dans le massif intérieur du bassin et distribuées en différents points proches. Le second niveau dominant l'ensemble du bassin versant, on estime environ 86% de la superficie totale qui sont sujettes à un taux d'érosion modéré (de SBV-1 à SBV-4 et SBV-9). Ces SBV sont situés au Nord et au Sud-Est. Le troisième niveau comporte des valeurs relativement élevées, il couvre environ 7 % du bassin versant, ces valeurs sont concentrées en deux (2) SBV séparés (SBV-10 ; SBV-13). Pratiquement ces deux SBV sont près à la retenue du barrage, exactement dans l'extrême Sud-Ouest pour SBV-10 et dans la partie intérieur pour le SBV-13. Finalement, les résultats de la formule Gavrilovic montre que la majorité du

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

bassin versant se caractérise par une érosion modérée qui varie suivant les paramètres géomorphologiques de chaque sous bassin versant.

#### III-5-6 Formule de KASSOUL et al (1997).

En 1997, Kassoul et al, ont examiné l'envasement de dix-neuf (19) barrages algériens situés dans des bassins versants répartis sur l'ensemble du territoire, parmi un de ces barrages on retrouve celui de Djorf Torba. Cette étude a proposé trois (3) équations pour estimer le taux d'érosion ( $T_a$ ) en  $m^3/km^2/an$  [TECSULT et A.N.B.T, 2005]. Ces trois équations prennent en considération le transport en charriage.

Le Tableau III-6 montre comment choisir l'équation. Ce choix s'effectue principalement en fonction de la superficie du bassin versant et l'indice d'altitude ( $I_A$ ). Sachant que les bassins versants possédant une superficie inférieure à  $1000 km^2$ , l'indice d'altitude est utilisé comme deuxième critère de la sélection de l'équation.

- $I_A$  = dénivelée / altitude moyenne.

*Tableau III-6 : Critères de choix des formules de Kassoul et al.*

Superficie ( $km^2$ )	Indice d'altitude ( $I_A$ )	Équation
$S < 1000$	$I_A < 1$	$T_{a1} = 1433 * S^{-0,43} - 15,24$
$S > 1000$	$1 < I_A < 2$	$T_{a2} = 1846 * S^{-0,15} - 360$
$S < 1000$	$1,5 < I_A < 2$	$T_{a3} = 0,463 * S + 2026$

- D'après la définition ci-dessus, l'équation de l'indice d'altitude ( $I_A$ ) se fait de la manière suivante (Tableau III-7) :
- de SBV-5 à SBV-8 et de SBV-10 à SBV-12 (équation  $T_{a1}$ ) ;
- de SBV-1 à SBV-4, SBV-9 et SBV-13 (équation  $T_{a2}$ ).

Les résultats de calcul pour les différents sous bassins versants sont présentés dans le Tableau III-7. Les valeurs passent de 227 à 774  $t/km^2/an$  avec un taux d'érosion moyen ( $T_a$ ) estimé à 443,86  $t/km^2/an$ , soit un apport solide de 3,68  $hm^3/an$ . La valeur la plus faible se trouve dans le SBV-6, alors que le maximum est atteint au SBV-13. Plus de 55% du bassin versant est dominé par une érosion élevée, supérieur à 450  $t/km^2/an$ , les autres sous bassins versants se caractérisent par une érosion de faible à modérée. Selon l'approche de Kassoul et al, le taux d'érosion varie

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

inversement avec la surface du bassin versant ; plus la surface est importante et plus la valeur de l'érosion est faible.

Tableau III-7 : Résultats de la formule Kassoul et al.

N° -SBV	I <sub>A</sub>	Ta (t.km <sup>2</sup> .an <sup>-1</sup> )	As (hm <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup> )
SBV-01	0,46	524,26	0,64
SBV-02	0,84	625,10	0,50
SBV-03	0,61	473,05	0,72
SBV-04	0,53	338,48	0,96
SBV-05	0,64	279,48	0,04
SBV-06	0,80	227,25	0,04
SBV-07	0,89	411,74	0,02
SBV-08	0,77	360,97	0,03
SBV-09	0,55	633,36	0,49
SBV-10	0,78	310,21	0,03
SBV-11	0,87	330,57	0,03
SBV-12	0,88	481,41	0,02
SBV-13	0,69	774,32	0,35
<b>BV-Oued Guir</b>		<b>443,86</b>	<b>3,68</b>

La distribution spatiale de l'approche Kassoul et al comporte deux catégories distincts (Figure III-14). Le premier niveau domine l'ensemble du bassin versant, il est caractérisé par un taux d'érosion élevé à très élevé, il correspond à la partie Nord-Ouest (SBV-1 ; SBV-2 ; SBV-3), la zone Sud et Sud-Est (SBV-9 ; SBV-12 ; SBV-13). La seconde catégorie se caractérise par des valeurs modérées, ils sont localisés principalement dans la région Nord-Est (SBV-4), la partie Sud et l'extrême Sud-Ouest, et celle qui est proche à la retenue du barrage (de SBV-4 à SBV-8 ; SBV-10 et SBV-11).

Il faut noter que les points d'érosions très élevées occupent une superficie d'environ 25%, en particulier les SBV-2 ; SBV-9 et SBV13. Ces zones sont centrées au milieu du bassin versant, en parallèle avec le profil longitudinal de la vallée

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

principale qui alimente la retenue du barrage. Cette particularité explique les taux d'envasement importants enregistrés annuellement dans la zone d'étude.

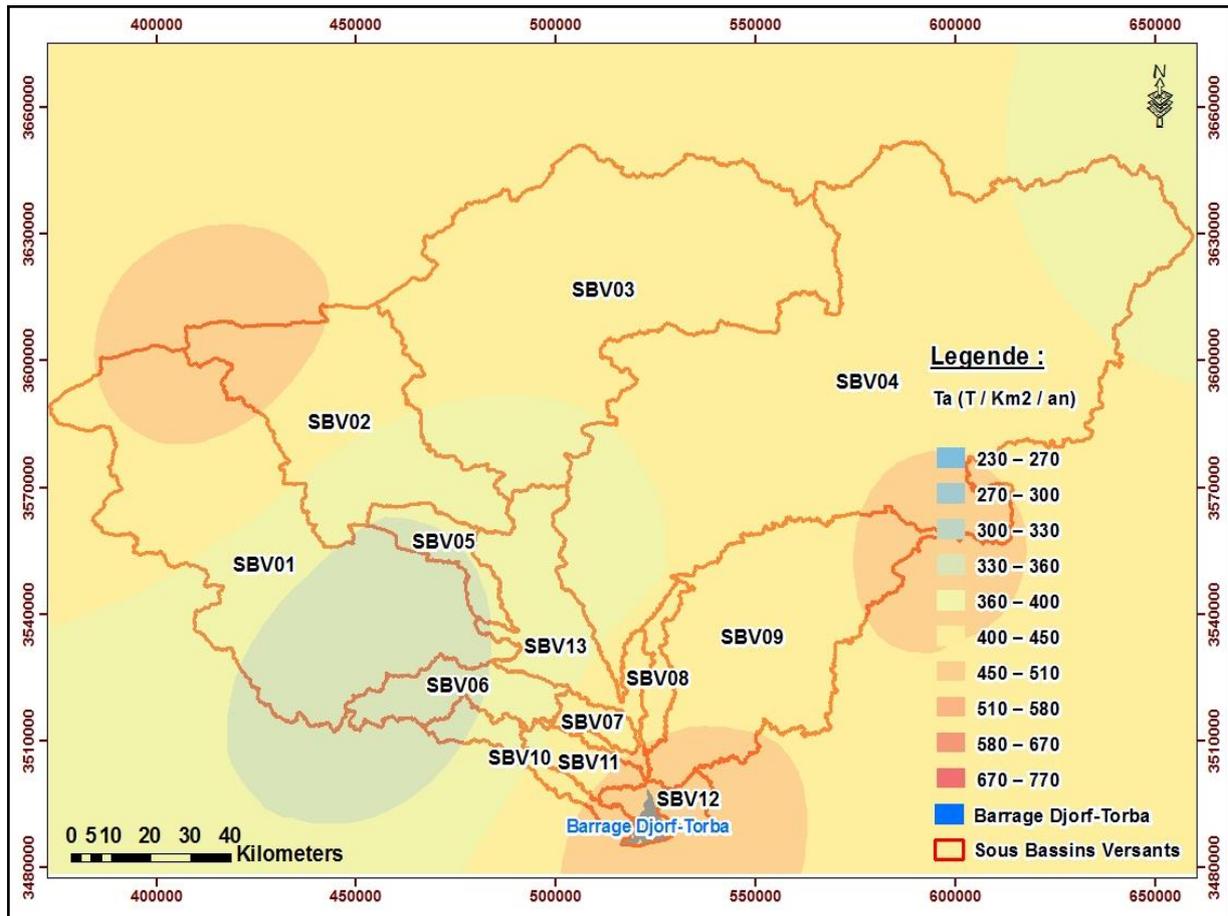


Fig. III-14. Distribution de l'érosion  $q_s$  Selon la formule de Kassoul et al.

#### III-5-7 Synthèse des zones de production des sédiments.

Cette étape présente la finalité de la cartographie de l'érosion et l'évaluation du transport solide. Le Tableau III-8 synthétise les informations qui ont été obtenues par l'application des différentes citées précédemment. L'analyse globale permettra de préciser quels sont les sous bassins versants prioritaires en termes de lutte contre l'érosion. Le Tableau III-8 résume les valeurs moyennes de l'érosion et les apports solides estimés par les diverses formules.

Tableau III-8 : Récapitulatif préliminaire des apports solides estimés par les formules

Désignation	Fournier	Sogreah	Saidi	Gavrilovic	Kassoul et al
$q_s$ (t/km <sup>2</sup> /an)	1471,06	265,92	189,81	336,16	443,86
As (hm <sup>3</sup> /an)	11,32	2,21	1,57	2,79	3,68

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

- À partir des résultats du Tableau III-8, on recense les points suivants :
  - a) L'équation de la formule de Fournier présente une valeur très élevée par rapport aux autres formules. Ceci ne signifie pas que le bassin versant de l'Oued Guir transporte vraiment ces quantités. Ceci est confirmé par une simple comparaison avec différentes études et les mesures des sédiments effectuées pour le barrage de Djorf Torba. À titre d'exemple, KABOUR et al, en 2015, estime que les apports solides au barrage de Djorf Torba sont de 400 t/km<sup>2</sup>/an ; la levée bathymétrique effectuée en 1986, donne un envasement annuel à 2,49 hm<sup>3</sup>/an et la perte en capacité 12,11% ; levée bathymétrique effectuée en 2004 (envasement moyen annuelle 2,50 hm<sup>3</sup>/an et la perte en capacité 25%).
  - b) Les données complémentaires mentionnées dans le titre III-4-3, en particulier les paragraphes suivants : paragraphe 2 (taux de capture des sédiments par la retenue : 98%) ; paragraphe 5 (taux du transport solide par charriage : 20% ; le pourcentage de l'érosion éolienne : 10%). Selon aussi les définitions de chaque formule, en particulier les hypothèses liées à l'équation de la formule Sogreah et Saidi, elles n'ont pas pris en compte le transport par charriage.
- Dans cette optique, on prend en considération les résultats finaux suivants intéressants dans le Tableau III-9.

Tableau III-9 : Récapitulatif final des apports solides estimés par les diverses formules.

Formule	qs (t/km <sup>2</sup> /an)	As (hm <sup>3</sup> /an)
Sogreah	338,78	2,81
Saidi	241,82	2,00
Gavrilovic	362,38	3,00
Kassoul et al	478,48	3,97

Les quatre (4) formules ont résulté une fourchette de valeurs relativement proche, avec des écarts de 40%, 7% et 32% respectivement pour les formules de (Saidi - Sogreah), (Sogreah - Gavrilovic), et (Gavrilovic - Kassoul et al). L'écart entre la valeur la plus faible (formule de Saidi) et la valeur la plus élevée (formule de Kassoul et al) est d'environ 95%. Les apports solides spécifiques du barrage de Djorf Torba peuvent varier significativement selon les documents analysés et aussi selon les apports solides spécifiques (de 20 t/km<sup>2</sup>/an à plus de 200 t/km<sup>2</sup>/an).

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

La Figure III-15 montre la variation des apports solides pour les formules Gavrilovic, Kassoul et al, en fonction des différents sous bassins versants de l'Oued Guir. Les formules de Sogreah et Saidi utilisent des facteurs indépendants de l'approche méthodologique appliquée dans cette étude (estimation de l'érosion en fonction des indices géomorphologiques), ce qui justifie l'absence de ces deux (2) formules dans la figure ci-dessous.

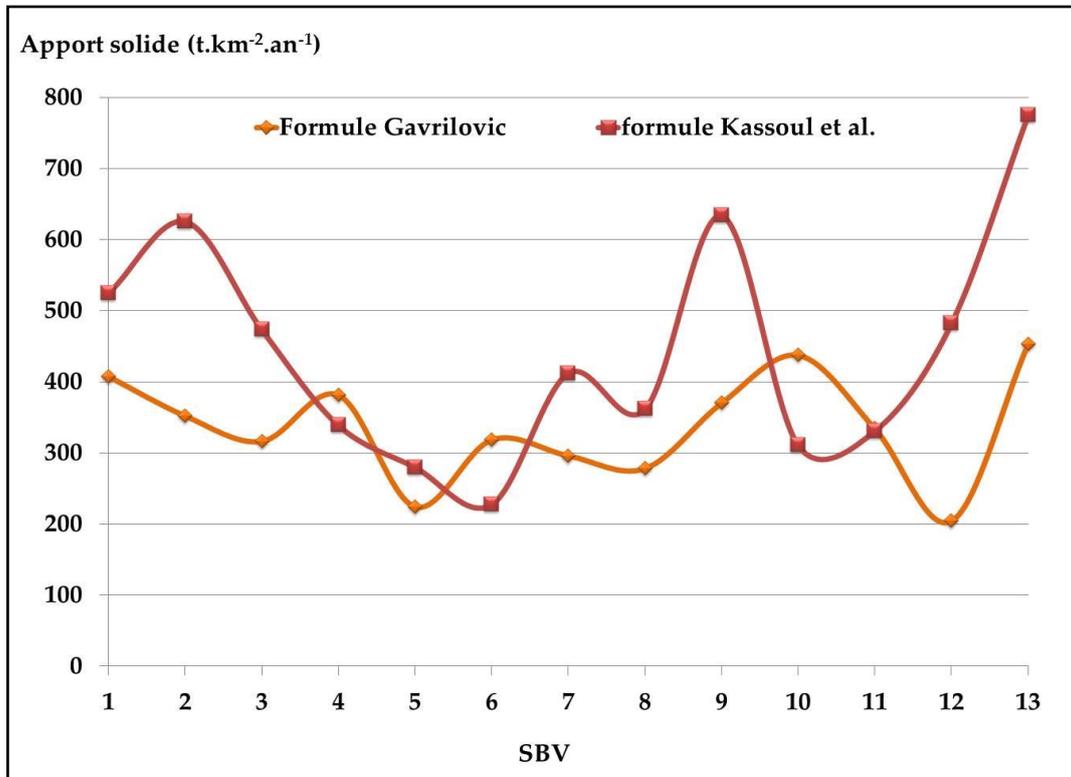


Fig. III-15. Variation de l'apport solide en fonction des SBV de l'Oued Guir.

D'après les résultats obtenus par l'application des différentes formules dans la zone d'étude, on constate que le bassin versant de l'Oued Guir qui alimente la retenue du barrage Djorf-Torba, est exposé à une érosion modérée à élevée, variable d'un sous bassin à l'autre et d'une formule à l'autre, de 242 environ à plus de 478 t/km<sup>2</sup>/an.

La variation des valeurs de l'érosion spécifique (Es) et le transport solide (As) sont justifiées par le changement des paramètres géomorphologies qui caractérisent chaque SBV et la modification des facteurs climatiques en fonction de temps. Finalement, le régime du transport solide de l'Oued Guir est important vis-à-vis de l'évolution de l'envasement annuel.

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

#### III-6 Prévision de l'envasement dans la retenue du barrage.

La prévision de l'envasement est indispensable dans notre étude, en premier lieu elle permet la prédétermination du volume mort dans la retenue et en conséquence l'espérance de vie utile du barrage. En second lieu, ceci permet d'assurer la gestion et l'exploitation de l'ouvrage dans les bonnes conditions.

L'envasement de la retenue a été estimé en fonction des résultats de diverses formules utilisées précédemment (Tableau III-9). Le principe suivant consiste à un processus basé sur l'application des apports solides (As) dans la relation de prévision d'ORTH (1934), selon l'Equation III-6. Le choix de cette formule est justifié par le fait qu'elle est la relation la plus utilisée en Algérie [REMINI et HALLOUCHE, 2005].

$$Z_t = V_0 * [1 - (1 - Z_1 / V_0)^t] \dots\dots\dots(III-6).$$

Avec :

$Z_t$ : volume des sédiments dans la retenue après "t" ans d'exploitation en hm<sup>3</sup>.

$V_0$ : Capacité initiale du réservoir en hm<sup>3</sup>.

$Z_1$ : Envasement moyen annuel obtenu par les différentes formules en hm<sup>3</sup>.

$t$ : Nombre d'années d'exploitation.

Le Tableau III-10 représente l'évolution du volume des sédiments dans la retenue en fonction des différentes méthodes.

*Tableau III-10. Estimation de l'envasement en fonction des différentes méthodes.*

Année		1986	2004	2020	2030	2050
Méthode	As (hm <sup>3</sup> /an)	volume des sédiments en hm <sup>3</sup>				
<b>Sogreah</b>	2,81	44,82	86,04	117,98	135,95	167,82
<b>Saidi</b>	2,00	32,49	63,61	88,70	103,25	129,97
<b>Gavrilovic</b>	3,00	47,65	91,05	124,37	142,98	175,72
<b>Kassoul et al</b>	3,97	61,70	115,22	154,39	175,48	211,08
<b>Levée bathymétrique</b>	1,30-3,92	36,96	89,74	156,54	-	-

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

La Figure III-16 montre le pourcentage d'envasement en fonction de temps. Nous avons jugé utile de faire une étude comparative entre les résultats obtenus par la relation de prévision d'ORTH et les mesures des levés bathymétriques (1986, 2004 et en 2020).

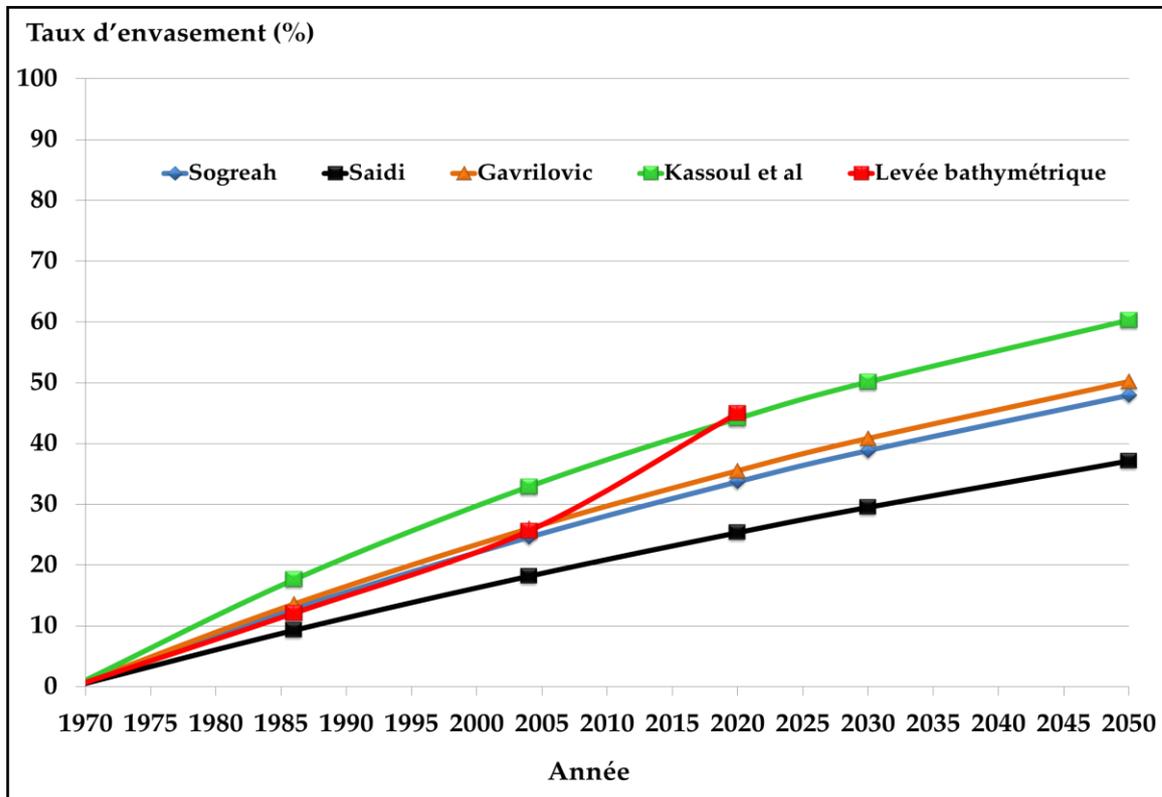


Fig. III-16. Evolution de l'envasement dans le barrage Djorf-Torba en fonction des diverses méthodes.

Les méthodes appliquées donnent des valeurs représentatives et acceptables vis-à-vis des levées bathymétriques réalisées en 1986, 2004 et en 2020. Les formules de Sogreah et Gavrilovic restent l'estimation la plus proche à celle des levées bathymétriques, par conséquent, ces des deux équations peuvent être considérées comme les plus proches de la réalité, avec un apport moyen annuel estimé à 2,91 hm<sup>3</sup>/an. Par contre, la valeur de la formule Saidi sous-estime et celle de Kassoul et al, surestime.

Sur la base de l'étude comparative effectuée entre les résultats des diverses méthodes et les mesures des levés bathymétriques, nous avons estimé la vie utile de la retenue par un taux d'envasement moyen annuel égale 2,91 hm<sup>3</sup>/an, comme le montre la Figure III-17. Les résultats obtenus permettent d'anticiper les moyens de luttés nécessaires curatives et préventives à prendre en considération contre l'envasement de la retenue du barrage.

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

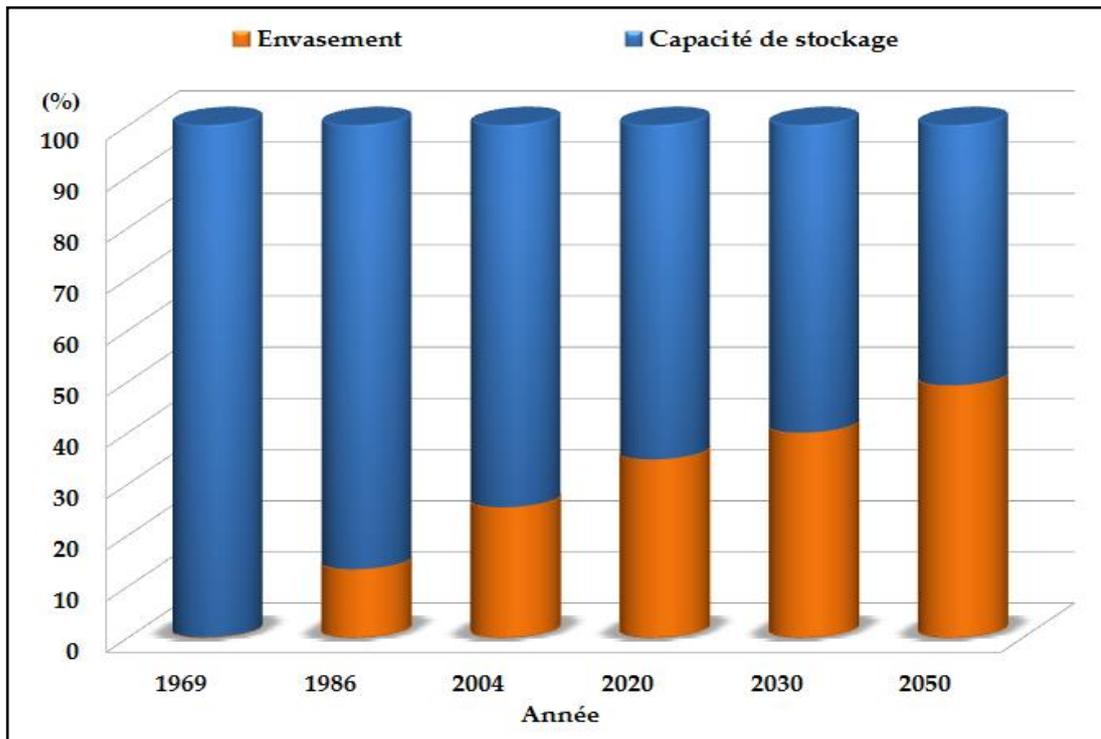


Fig. III-17. Évolution de l'envasement du barrage Djorf-Torba.

#### III-7 Résultats et discussions.

À l'échelle du bassin versant, l'estimation de l'érosion et du transport solide à travers les cinq (5) formules, donne des valeurs proches avec une fourchette admissible vis-à-vis des hypothèses et les paramètres pris en considération pour chaque formule, sauf pour la formule de Fournier, où la valeur est relativement éloignée. Les autres valeurs varient de 241,82 à 478,48 t/km<sup>2</sup>/an, avec une valeur moyenne estimée à 350,58 t/km<sup>2</sup>/an.

Il est important de souligner que la formule de Fournier est inapplicable dans les zones arides, en raison de son indice de Fournier ( $IF = Pm^2/Pa$ ). Les régions arides se caractérisent par des irrégularités pluvieuses, limitées à un ou deux mois au maximum. En conséquence la différence entre (Pm) et (Pa) est faible, ce qui est considéré dans l'approche de Fournier comme une inondation.

Les modèles de Fournier, Gavrilovic et Kassoul et al, sont des méthodes basées sur les paramètres géomorphologiques des SBV. Cette particularité permet de cartographier le degré de l'érosion sur des cartes thématiques. En conséquence on peut préciser quels sont les bassins versants prioritaires en termes de lutte contre l'érosion.

### III / Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba.

---

L'envasement du barrage Djorf-Torba est le cumul des apports solides de l'ensemble des sous-bassins versants. L'estimation des apports solides par les différentes méthodes a résulté des valeurs représentatives vis-à-vis des valeurs des levées bathymétriques, qui sont de 2,81 à 3,97 hm<sup>3</sup>/an avec un taux moyen annuel de 2,91 hm<sup>3</sup>/an. Le volume des sédiments calculé dans la retenue du barrage en 2020 est estimé à 121 hm<sup>3</sup> correspondant à un taux d'envasement de 35 %, par contre le taux d'envasement constaté par l'ANBT est de l'ordre de 44,73%. Vu cette situation critique, si des mesures urgentes ne sont pas prises, la durée de vie du barrage diminue avec le temps et il ne peut remplir ses fonctions initiales.

On constate que le bassin versant est exposée à une érosion modérée à élevée, sachant que les zones caractérisées par une forte érosion sont situées près de l'Oued principale qui alimente la retenue du barrage, en conséquence le régime des apports solides dans l'Oued Guir est fort.

#### III-8 Conclusion.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la protection du bassin versant de l'Oued Guir. L'approche utilisée consiste à combiner les formules empiriques avec le logiciel ArcGIS. Cette méthodologie permet d'une part de montrer l'influence des différents paramètres climatiques et géomorphologiques sur le phénomène de l'érosion et du transport solide ; et d'autre part, l'application du logiciel ArcGIS a permis l'élaboration des cartes thématiques qui représentent la distribution de l'érosion.

Plus spécifiquement, les résultats obtenus dans la présente étude devront permettre d'établir un système de protection pour protéger notre ouvrage, par la détermination des zones productrices des sédiments au niveau des différents sous bassins versants et de classer par importances relatives le degré d'érosion.

D'après les résultats de cette étude, le réservoir du barrage Djorf-Torba diminue d'environ 2,91 hm<sup>3</sup> chaque année. Au vu de l'importance stratégique du barrage sur le plan économique et à l'échelle sociale, il est primordial de remédier à cette problématique de son envasement qui croît d'année en année, de prendre les mesures nécessaires pour assurer une meilleure exploitation et de trouver des solutions efficace en mettant tous les moyens. Soit par la protection des berges et l'analyse morphologique des cours d'eau, ou par des opérations de curage qui doivent être effectuées de façon cyclique. Cette dernière génère des volumes considérables de vases qui sont ainsi récupérés et qui peuvent être exploités.

***CHAPITRE IV:***  
***IDENTIFICATIONS ET***  
***CARACTÉRISATIONS DES***  
***SÉDIMENTS D'ENVASEMENT.***

## **IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.**

---

### **IV.1 Introduction.**

La caractérisation des sédiments d'envasement est une étape essentielle dans la démarche du projet de la valorisation, en conséquence la collecte complète des données sur la nature des matériaux utilisés est indispensable. Dans cette optique, le prélèvement des échantillons est l'une des techniques les plus connues, sachant que cette opération doit être réalisée conformément aux normes en vigueur.

Sur le plan qualitatif, les travaux effectués et regroupés dans ce chapitre sont regroupés au niveau de la caractérisation chimique (Teneur en calcaire  $\text{CaCO}_3$  ; Teneur en sulfates  $\text{SO}_4^{2-}$  ; % Gypses ; Bases échangeables  $\text{Ca}^{++}$  ;  $\text{Mg}^{++}$  ;  $\text{K}^+$  ;  $\text{Na}^+$  ; Phosphore ; ...etc) ; physico-chimique (Conductivité électrique CE ; mesure du pH ; Matière Organique %MO ; VBS ; ...etc) ; et l'analyse physique (poids volumique des grains solides ; la granulométrie des sédiments ; les limites d'Atterberg). Après avoir détaillé le plan d'échantillonnage et le protocole adopté pour la préparation des échantillons, nous nous intéressons dans un premier temps à la distribution granulométrique des sédiments dans la retenue, en analysant les prélèvements réalisés à différents points de la retenue du barrage. Dans une seconde étape, on complète l'étude par la détermination des propriétés physico-chimiques des sédiments [SERHAL, 2017]. L'objectif principal de ce chapitre est l'établissement des fiches d'identités des différents matériaux utilisés dans cette étude.

### **IV.2 La stratégie d'échantillonnage.**

Les échantillons prélevés représentent en masse, un infime pourcentage de la zone à caractériser, ils doivent donc être prélevés dans les zones les plus sensibles et représentatives du site [GEODE, 2016]. Au niveau du barrage Djorf-Torba, le plan d'échantillonnage et la méthode de prélèvement des sédiments sont effectués en collaboration avec l'encadreur et l'équipe technique de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (A.N.B.T) représentée par sa direction du barrage.

La stratégie d'échantillonnage est basée sur la connaissance idéale des distributions sédimentaires, sur le point de vue de leurs caractéristiques granulométriques, ainsi que les enjeux techniques relatifs à la méthode de dragage (pratiquement au pied du barrage). De ce fait, le plan d'échantillonnage adopté au niveau de notre zone d'étude de la retenue du barrage a été choisi en divisant la zone d'influence d'une manière régulière et équidistante [GEODE, 2016].

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

### IV.3 Prélèvements des sédiments.

Dans le barrage Djorf-Torba, nous avons rencontré des contraintes sur le terrain, soit en termes de la morphologie du site où l'accès à la retenue est très difficile, ou en raison de l'absence de moyens nécessaires pour le prélèvement des échantillons. Tous ces inconvénients, ne nous ont pas permis de prendre suffisamment d'échantillons pour atteindre le plus grand nombre d'endroits au niveau de la retenue du barrage. Les prélèvements des échantillons ont été réalisés manuellement.

Les propriétés physico-chimiques des sédiments peuvent être fortement influencées par les techniques de conservation des échantillons. Dans cette optique, les échantillons des sédiments prélevés ont été conditionnés dans des sachets en plastique fermés et bien conservés.

La série de prélèvement des échantillons a été réalisée en novembre 2017 (identification préliminaire des sédiments) et en janvier 2020 (essais complémentaires pour désigner l'axe de la valorisation). Cinq échantillons ont été prélevés à différents endroits de l'amont du barrage à l'aval. Le Tableau III-1 montre les coordonnées UTM des différents points de prélèvements (P1, P2, P3, P4 et P5).

Tableau III-1 : Les coordonnées UTM des différents points de prélèvements.

N° Point	X	Y
P1	521915.34	3486077.55
P2	521625.83	3486411.91
P3	521663.27	3486290.69
P4	521577.73	3486199.69
P5	521613.17	3486157.27

La figure IV.1 montre le prélèvement des échantillons étudiés dans trois sites différents au niveau du barrage Djorf-Torba. Les premiers échantillons du site 01 ont été enlevés en deux points (P1 et P2) répartis en amont de la retenue du barrage avec une distance moyenne de 450 m (Photo IV -1). Le deuxième échantillon du site 02 a été réalisé au point (P3) situé au niveau de la galerie du barrage, à une profondeur correspondant à 30 m à l'intérieur de la galerie (Photo IV -2). Le troisième échantillon du site 03 a été prélevé en deux points (P4 et P5) répartis en aval de la retenue à une

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

distance de 55 m, sachant que l'échantillon n° 4 se situe dans la zone de vidange de fond et l'échantillon n° 5 provient d'une source d'eau naturelle (Photo IV -3).

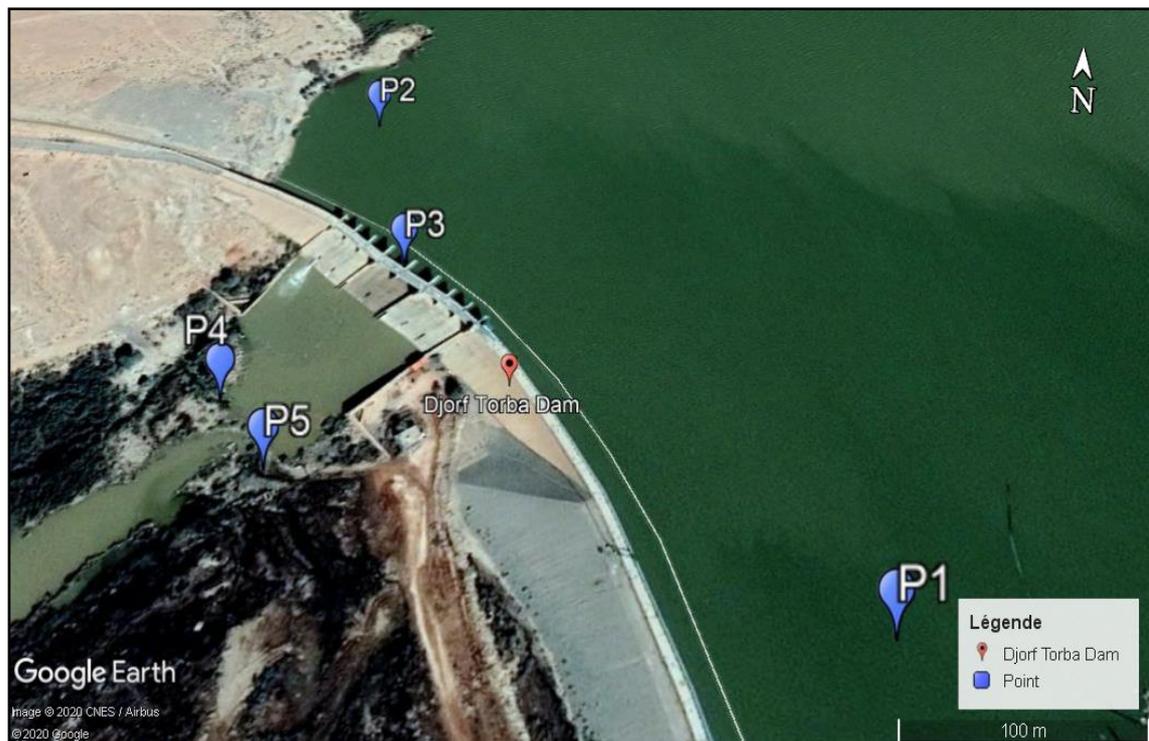


Fig. IV -1 : Implantation des points de prélèvement au niveau du barrage Djorf-Torba.



Photo IV -1 : Echantillons 1 et 2.

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.



*Photo IV -2 : Echantillons 3 et 4.*



*Photo IV -3 : Echantillon 5.*

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

### IV.4 Description des sédiments.

Les sédiments sont des éléments fins, pouvant atteindre des teneurs en eau importantes. Ils contiennent une phase minérale dont la granulométrie s'étend des sables, aux limons et argiles, avec une phase plus au moins organique et une phase liquide [BENASLA, 2015]. Les sédiments contiennent plus de 90% de particules inférieures à 2 mm.

Au niveau de notre zone d'étude du barrage de Djorf-Torba, les sédiments ont été extraits à une profondeur comprise entre 0.30 m et 1.50 m sous la surface du plan d'eau. Sauf pour l'échantillon P3, il a été prélevé à l'intérieur de la galerie à une profondeur d'environ 30 m.

L'aspect visuel des sédiments des trois sites d'échantillonnage a montré une grande homogénéité entre les points de prélèvement du site 1 (P1 et P2 de l'amont de la retenue), qui sont principalement constitués de sables variant entre grossiers et fins avec présence d'un certain pourcentage de contaminants. L'échantillon du site 2 (P3 de la galerie), est constitué de la boue avec une couleur gris/brun (Photo IV -4). Par contre, le point P4 du site 3 est entièrement constitué d'argile rouge avec présence d'un certain pourcentage de limon et de sable (Photo IV -5), le dernier échantillon P5 a été prélevé sur une source d'eau en aval de la retenue, il s'agit des alluvions contenant des formations d'origine argileuse marneuse.



Photo IV -4 : La nature des sédiments (P1-P2 ; P3).



Photo IV -5 : La nature des sédiments (P4).

### IV.5 Préparation des échantillons.

L'objectif principal de la campagne d'échantillonnage est d'obtenir des échantillons adéquats pour la caractérisation. Dans cette approche, les sédiments ont été mélangés pour constituer un échantillon moyen représentatif du sol en place. Par la suite, ils sont stockés dans des sacs en plastique afin d'assurer l'absence de toutes possibilités de contamination. Le protocole adopté dans la phase préparation des échantillons, doit être conforme aux normes en vigueur de chaque essai. Nous excluons les échantillons désignés à la caractérisation chimique, qui sont soumises au protocole suivant. Les échantillons sont séchés à l'air ou dans une étuve dont la température ne dépasse pas 40°C, ensuite ils sont tamisés dans la partie inférieure à 2 mm et séparés en portions permettant un sous-échantillonnage représentatif pour les analyses. Dans le but d'obtenir des sous-échantillons plus petits, il faut réduire encore la granulométrie par un broyage à une dimension inférieure à 0.25 mm. Ce protocole expérimental peut se résumer en trois étapes :

- Phase 1 : Séchage à une température inférieure à 40°C (Photo IV-6).
- Phase 2 : L'échantillon moyen séché passe à travers un tamis < 2 mm (Photo IV-7).
- Phase 3 : Un broyage doit être assuré pour obtenir une granulométrie < 250µm (Photo IV-8).

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.



*Photo IV -6 : Phase 1, séchage à l'air libre.*



*Photo IV -7 : Phase 2, tamissage des échantillons à travers un tamis 2 mm.*



Photo IV -8 : Phase 3, broyage des échantillons tamisés.

### IV.6 Caractérisation des sédiments.

Afin d'apprécier les caractéristiques des sédiments du barrage Djorf-Torba, les échantillons prélevés à travers les cinq points ont été soumis aux essais d'identification physique ; physico-chimique et aussi à des analyses chimiques. Les résultats des essais d'identification serviront de base aux divers systèmes de classification des sols, à savoir :

- Diagramme Triangulaire ; LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées) ; LPC modifié (afin de mieux décrire les sols contenant des matières organiques) ; USCS (Unified Soil Classification System) ; Diagramme de Plasticité de Casagrande (Sols Fins) ; GTR (Guide des Travaux Routiers) ; GTR modifié ; Classification Internationale des Sols (Word Reference Base) ; Association Internationale de la Science du Sol (Carte Mondiale des Sols).

Différents laboratoires ont été désignés en fonction des disponibilités des analyses et selon la susceptibilité de chaque laboratoire à recevoir les échantillons. Il s'agit du :

Laboratoire de Développement Durable et d'Informatique (LDDI) ; Laboratoire de génie civil, Université Ahmed DRAIA d'Adrar ; Laboratoire de Géologie et Géotechnique (L.G.G-Sétif) ; Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage (INSID-Adrar) ; Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS-Adrar) ; Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (LTPO-Adrar).

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

Dans cette phase de caractérisation, certains paramètres sont recherchés pour l'ensemble des échantillons et d'autres sont limités pour seulement deux points, telle que P3 de la galerie ; P4 de la vidange de fond (voir IV.3 Prélèvements des sédiments). Le choix de ces deux derniers points (P3 et P4) est vue que le scénario le plus proche pour l'opération de dragage est sera au pied du barrage. Cette zone représente réellement l'envasement du barrage, elle est la source des sédiments accumulés au niveau de la vidange de fond (P4) et aussi dans la galerie (P3).

La sélection des paramètres de caractérisation a été réalisée en fonction des objectifs de nos travaux de recherche, notamment pour l'orientation du choix d'un axe de valorisation en relation avec les enjeux de la région aride et semi-aride. Le Tableau III-2 résume les paramètres de caractérisation des sédiments étudiés.

Tableau III-2 : Paramètres de caractérisation des sédiments étudiés.

Paramètres et essais	P1	P2	P3	P4	P5
Poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ )	-	-	⊗	⊗	-
Granulométrie	⊗	⊗	⊗	⊗	-
Limites d'Atterberg	-	-	⊗	⊗	-
Conductivité électrique CE	-	-	⊗	⊗	-
Mesure du pH	-	-	⊗	⊗	-
Teneur en matière organique (%MO)	-	-	⊗	⊗	-
Valeur de bleu des sols (VBS)	-	-	⊗	⊗	-
Sédimentemétrie	-	-	⊗	⊗	-
Teneur en Calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ).	⊗	⊗	⊗	⊗	-
Teneur en Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).	⊗	⊗	⊗	⊗	-
% Gypses	⊗	⊗	⊗	⊗	-
% Insolubles ( $\text{SiO}_2$ ).	⊗	⊗	⊗	⊗	-
Bases échangeables ( $\text{Ca}^{++}$ ; $\text{Mg}^{++}$ ; $\text{K}^+$ ; $\text{Na}^+$ )	-	-	⊗	⊗	-
Phosphore assimilable	-	-	⊗	⊗	-
Potassium assimilable ( $\text{K}_2\text{O}$ )	-	-	⊗	⊗	-

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

### IV-6-1 Analyse granulométrique

#### ➤ Définition et principe.

La classification est en premier lieu basée sur la distribution granulométrique. En effet, la taille des particules a une influence sur de nombreuses caractéristiques du sol (surface spécifique, perméabilité...) et sur le comportement des sédiments.

La technique de la granulométrie adaptée est fonction de la taille des particules, dans notre cas le procédé utilisé est celui de la diffraction laser en voie sec, selon la Norme NFP94-056. Pour les particules de taille inférieure à 80 micromètres, l'analyse granulométrique est réalisée par la méthode appelée la sédimentométrie (norme NF P 94-057), c'est le cas des échantillons P3 et P4. Cette procédure est basée sur la loi de Navier Stokes qui exprime la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule.

#### ➤ Résultats et interprétations.

La Figure IV-2 représente les courbes de chaque sédiment et le Tableau III-3 récapitule les valeurs des caractérisations obtenues.

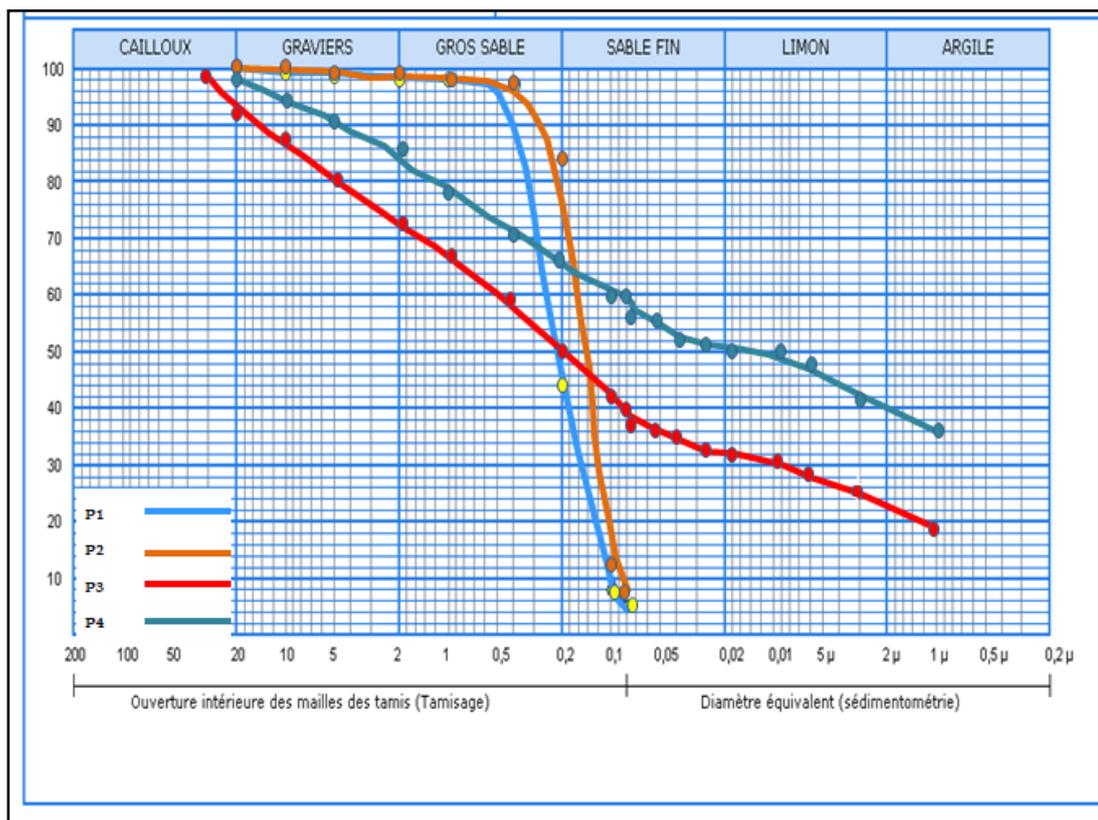


Fig. IV -2 : Distribution granulométrique des sédiments du barrage Djorf-Torba.

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

Tableau III-3 : Données granulométriques des sédiments étudiés.

Désignation	P1 (%)	P2 (%)	P3 (%)	P4 (%)
Dmax (5 mm)	99	99	81	92
2 mm (Gros Sable)	98	98	74	87
0,2 mm (Sable Fin)	44	84	52	67
0,08 mm	5	7	41	61
0,02 mm (Limon)	-	-	33	51
2 $\mu$ m (Argile)	-	-	20	36

Suivant les courbes granulométriques de la Figure IV-2 et les résultats du Tableau III-3, on peut conclure que les sédiments du barrage étudié contiennent des particules fines, telles que les dimensions de plus de 99 % de la masse analysée sont inférieures à 5 mm. Pour les éléments inférieurs à 0.08 mm, on a un pourcentage qui ne dépasse pas les 7 % au niveau des échantillons P1 et P2, ces sédiments sont de texture sableuse (sable propre). Par contre les sédiments P3 et P4 enregistrent un pourcentage variant entre 40 % à 60%.

### IV-6-2 Poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ).

#### ➤ Définition et principe.

Le poids spécifique des grains solides  $\gamma_s$  est le rapport exprimé en ( $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$ ) de la quantité de la masse ( $M_s$ ). La technique consiste à déterminer la masse volumique des particules solides du sol au pycnomètre à eau, suivant la Norme NF P94-054.

#### ➤ Résultats et interprétations.

La valeur de la masse volumique des particules solides  $\gamma_s$  est la moyenne arithmétique de deux mesures effectuées sur deux prises d'essai provenant du même échantillon de sol. Les résultats des essais sont récapitulés dans le Tableau III-4, les valeurs obtenues varient entre 2.33 et 2.77  $\text{g/cm}^3$ ; cette variation est due aux différentes campagnes des prélèvements.

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

Tableau III-4 : Résultats du poids spécifique des sédiments étudiés.

Désignation	P3 (mesure 1)	P3 (mesure 2)	P4 (mesure 1)	P4 (mesure 2)
$\gamma_s$ mesuré	2.33	2.52	2.77	2.74
La moyenne	P3 (g/cm <sup>3</sup> ) 2.43		P4 (g/cm <sup>3</sup> ) 2.76	

### IV-6-3 Limites d'Atterberg.

#### ➤ Définition et principe.

Les valeurs des limites d'Atterberg, à savoir la limite de liquidité  $W_L$  (essai à l'appareil de Casagrande) et la limite de plasticité  $W_p$  (essai au rouleau) ont été obtenues suivant la norme NF P 94-051. Les essais s'effectuent sur la fraction du sol inférieur à 0,4 mm.

Les caractéristiques sont complétées par l'indice de plasticité IP qui s'exprime en %. L'IP c'est la gamme des teneurs en eau pour lesquelles le sol a un comportement plastique, la connaissance de cet intervalle est d'une manière générale très utile dans la partie valorisation.

#### ➤ Résultats et interprétations.

Le Tableau III-5 résume les résultats des limites d'Atterberg de  $W_L$ ,  $W_p$  et  $I_p$  obtenus pour les différents sédiments étudiés.

Tableau III-5 : Limites d'Atterberg des sédiments étudiés

Désignation	P3	P4
$W_L\%$	51.11	53.22
$W_p\%$	29.17	22.01
$I_p\%$	21.94	31.21

A partir de la connaissance des limites d'Atterberg, les classifications des sédiments P3 et P4 peuvent être effectuées. Le diagramme le plus utilisé en géotechnique pour classer les sols fins est celui de Casagrande.

La Figure IV-3 est la synthèse de l'ensemble des valeurs obtenues pour les sédiments P3 et P4. À partir de la classification de Casagrande utilisée, il est possible de constater que les sédiments du barrage Djorf-Torba peuvent être assimilés à des

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

sols argileux (P4), et des sols limoneux (P3) ; cependant la plasticité varie entre un état peu-plastique à très plastique.

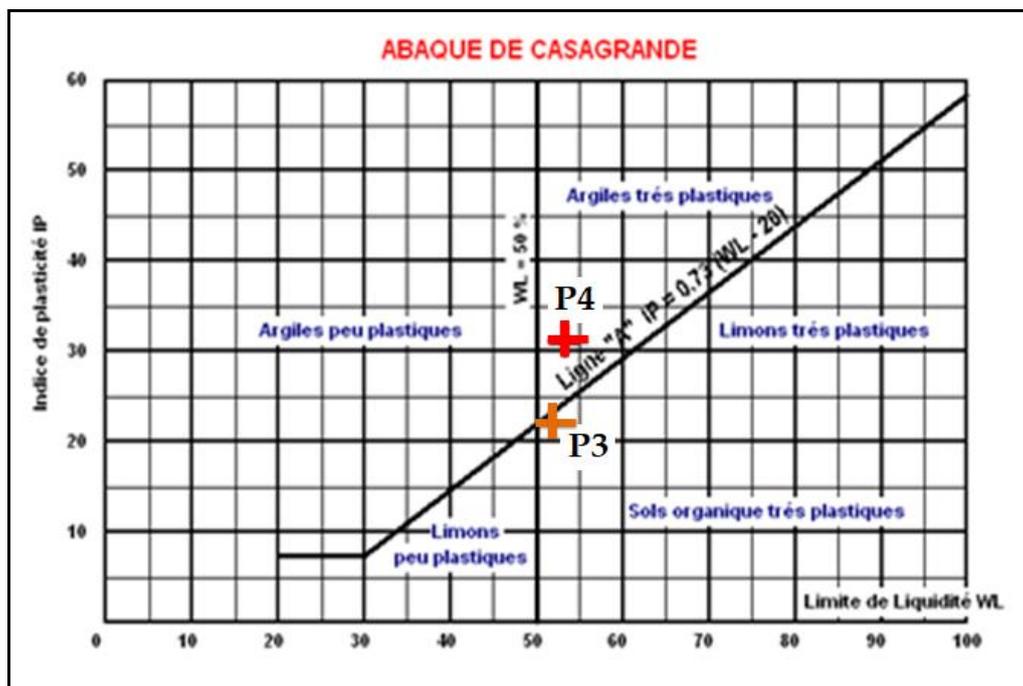


Fig. IV -3 : Classification des sédiments sur le diagramme de Casagrande.

- **Activité des argiles Ac (paramètre mesuré)**

- **Définition et principe.**

L'activité d'une argile (Ac) est définie comme le rapport entre son indice de plasticité Ip et la fraction d'argile présente dans un sol (C2), sachant que le paramètre C2 représente la teneur en particules des dimensions inférieures à 2  $\mu\text{m}$ . Généralement l'activité Ac dépend de la nature minéralogique du sol. On constate en général que l'activité d'une argile est constante ; mais pour chaque type d'argile on a une activité qui lui est propre.

- **Résultats et interprétations.**

Les résultats de (Ac) obtenus sur les sédiments étudiés sont montrés dans le Tableau III-6. Selon les résultats obtenus, on a une activité normale ( $0,75 < Ac < 1,25$ ) [BEN ABDELGHANI et al, 2014].

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

Tableau III-6 : Activité des sédiments étudiés.

Désignation	P3	P4
<b>Ip%</b>	21.94	31.21
<b>C2 (%&lt;2 µm)</b>	20	36
<b>Ac</b>	1.10	0.87

### IV-6-4 Conductivité électrique (CE).

#### ➤ Définition et principe.

La conductivité (CE) des sédiments est une mesure de la quantité d'ions présents qui pourraient se dissoudre en présence d'eau. Cette méthode permet de déterminer la salinité dans des sols qui contiennent des quantités non négligeables de sel (Na, Cl, Ca, Mg, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). La détermination de la conductivité (CE) est indispensable pour assurer une meilleure connaissance du comportement des sédiments sous diverses variables, en particulier lors de la phase valorisation.

#### ➤ Résultats et interprétations.

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau III-7. Ils représentent deux campagnes de prélèvement dans le même site.

Tableau III-7 : Résultats des mesures de la CE.

Désignation	P3 (mesure 1)	P3 (mesure 2)	P4 (mesure 1)	P4 (mesure 2)
<b>CE (ms/cm)</b>	1.54	1.10	0.55	0,49
<b>CE (Moy)</b>	<b>P3 (ms/cm) 1.32</b>		<b>P4 (ms/cm) 0.52</b>	

Selon l'Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage (INSID), dans le cas d'une valorisation agronomique construite à base de sédiments, il faut impérativement que la conductivité électrique soit inférieure à 1.40 ms/cm. Les Tableaux III-7 et III.8 montrent l'échelle de la salure des extraits de la solution du sol, en conséquence cette exigence est respectée dans les deux types des sédiments étudiés.

Tableau III-8 : Classification de la salinité en fonction de CE (Source INSID).

Désignation	Non salé	Peu salé	Salé	Très salé
<b>CE (ms/cm)</b>	<0.60	0.60 à 1.40	1.40 à 2.40	2.40<

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

### IV-6-5 Acidité du sol (pH).

#### ➤ Définition et principe.

L'acidité d'une solution peut être exprimée par la concentration en  $H_3O^+$  noté ( $H^+$ ). Plus il y a de  $H^+$ , plus le sol est acide et plus le pH est bas. La variabilité du pH tient compte de la nature des roches, sachant que les sols sableux et limoneux sont plus acides que les sols calcaires. Le pH a été mesuré à l'aide du pH mètre.

#### Résultats et interprétation.

Les échantillons analysés ont un pH qui varie entre 7.30 et 8.09 (voir Tableau III-9). Ceci indique que les sédiments du barrage Djorf-Torba présentent un caractère légèrement basique.

Tableau III-9 : Résultats du pH pour les sédiments du barrage Djorf-Torba.

Désignation	P3 (mesure 1)	P3 (mesure 2)	P4 (mesure 1)	P4 (mesure 2)
$PH_{eau}$	7.61	7.30	7,91	8.09
<b>pH (Moy)</b>	<b>P3 = 7.46</b>		<b>P4 = 8.00</b>	

### IV-6-6 Teneur en matière organique (%MO).

#### ➤ Définition et principe.

Pour toutes les filières de valorisation des sédiments, la teneur en matière organique (MO) est un paramètre très influent. À titre d'exemple, pour les filières minérales et en techniques routières, plus la teneur en MO est élevée, plus on obtient des caractéristiques indésirables à la valorisation. L'inverse est valable dans le domaine de la valorisation agricole, c'est-à-dire plus la teneur en MO est élevée, plus on acquiert des caractéristiques souhaitables à la valorisation.

Dans les analyses de terre, la détermination de la teneur en MO a été réalisée sur la fraction 0/2 mm, selon la méthode chimique (NFP 94-055). La quantité de matières organiques du sol est connue à partir d'une mesure de teneur en carbone organique (C). Elle correspond à une concentration de carbone organique dans le sol, souvent exprimée en g/kg. Cette teneur permet de déduire le pourcentage des matières organiques en la multipliant par 1,72.

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

### ➤ Résultats et interprétations.

Le Tableau III-10 montre l'ensemble des essais réalisés sur les teneurs en MO des sédiments. Les valeurs des teneurs en MO se situent entre 0.60 à 2.49 %. En conséquence les sédiments du barrage Djorf-Torba peuvent être qualifiés de faiblement organiques, car les valeurs sont inférieures à 3 %.

Dans l'ensemble, la classification de la teneur en M.O est lié directement aux procédés de valorisation et ses guides d'applications (L.P.C ; G.T.R).

Tableau III-10 : Teneurs en matières organiques des sédiments P3 et P4.

Désignation	P3 (mesure 1)	P3 (mesure 2)	P4 (mesure 1)	P4 (mesure 2)
%MO	0.60	0.86	2,49	1.89
MO (Moy)	P3 = 0.73		P4 = 2.19	

### IV-6-7 Valeur de bleu des sols (VBS)

#### ➤ Définition et principe.

La connaissance de la proportion d'argile, de sa nature et celui de l'activité ; nous renseignera en particulier sur le comportement du sédiment vis-à-vis de l'eau. Plusieurs techniques au laboratoire sont mises en œuvre, la technique adoptée dans notre cas est basée sur la capacité du sédiment à absorber le bleu de méthylène (valeur au bleu des sols à la tâche sur la fraction 0/5 mm, norme NF P 94-068). Cet essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation.

La valeur au bleu de méthylène VBS représente la quantité de méthylène pouvant être absorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol. Cette valeur est exprimée en grammes de bleu pour 100 g de sédiment.

#### ➤ Résultats et interprétations.

Les résultats de l'essai VBS dépendent directement de la nature minéralogique des argiles et de leurs quantités dans le sol. Cette mesure permet d'évaluer rapidement l'activité des matériaux argileux. La quantité de bleu de méthylène adsorbée par un échantillon croît lorsque sa surface spécifique augmente. Les résultats de VBS obtenus pour les sédiments du barrage Djorf-Torba sont résumés dans le Tableau III-11.

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

Tableau III-11 : Valeurs au bleu des sédiments étudiés.

Désignation	P3 (mesure 1)	P3 (mesure 2)	P4 (mesure 1)	P4 (mesure 2)
VBS (g/100g)	1.25	1.75	2.89	3.20
VBS(Moy)	P3 (g/100g) = 1,50		P4 (g/100g) = 3.05	

Suivant la norme de classification énoncée dans le GTR, il est possible de constater que les sédiments étudiés ont un caractère varié entre sols limoneux pour les sédiments P3 et des sols limoneux argileux pour le P4 (Tableau III-12).

Tableau III-12 : Classification de VBS du sol selon GTR.

Nature du sol	sableux	limoneux	limoneux-argileux	argileux	Très argileux
VBS (g/100g)	< 0.2	0.2-2.5	2.5-6	6-8	8<

**Note :** cette classification est valable uniquement pour les matériaux destinés à être valoriser comme des remblais.

### ➤ Classification.

Les différents essais de caractérisations, notamment l'analyse granulométrique, la valeur de l'IP et l'activité argileuse (VBS) permettent de classer les sédiments à l'état brut du barrage Djorf-Torba. Selon l'analyse granulométrique (passant à 80µm > 40%), l'indice de plasticité (Ip) et la valeur au bleu méthylène (VBS) présentés dans les Tableaux III-5 et III-11, on peut classer nos sédiments de dragage (P3 de la galerie) et P4 de la vidange de fond. Selon la classification du LPC/USCS, P3 est un sable limoneux et P4 comme une argile très plastique.

En principe, cette classification est préliminaire et provisoire, en attendant l'achèvement des analyses restantes, qui seront liées au domaine de la valorisation.

### IV-6-8 Identification physico-chimique.

#### ➤ Définition et principe.

Les caractéristiques liées à la détermination de l'origine des sédiments et leurs impacts sur l'environnement ont été étudiées, notamment les valeurs déterminées pour tous les échantillons prélevés, la teneur en CaCO<sub>3</sub>, le dosage des sulfates So<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/kg) qui permet de connaître l'agressivité et aussi le taux de gypse.

## IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.

### ➤ Résultats et interprétations.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau III-13.

Tableau III-13 : Résultats des analyses physico-chimique.

Désignation	P1	P2	P3	P4	P5
% Insolubles	80.49	83.08	52.12	59.40	68.61
% CaCO <sub>3</sub>	38.46	38.10	46.15	46.20	46.45
% GYPSES	5.04	4.31	6.41	7.17	7.05
So <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/kg	2071	1771	2635	3162	3109

Le pourcentage des insolubles dans les sédiments représente le rapport du matériau Quartz et SiO<sub>2</sub>, tel que le Quartz qui est une structure cristalline constituant de nombreuses roches (granite, sable, grès), il se caractérise par sa dureté. Lorsque le Quartz est pur, il est limpide (cristal de roche), mais lorsqu'il contient des impuretés, il est violet (améthyste) [<https://www.actu-environnement.com>].

Les régions arides et semi-arides sont caractérisées par des sols de texture sableuse, pauvres en matière organique et très salés [BERKAL et DJILI, 2008]. Ces paramètres ont une influence défavorable sur les propriétés physico-chimiques, notamment la disponibilité et l'absorption des éléments minéraux nécessaires pour la vie végétale. Dans notre cas et selon les résultats obtenus, nous constatons que nos sédiments sont caractérisés par un faible taux de gypse (le taux de gypse varie entre 4 à 7%). Par ailleurs et selon la teneur en CaCO<sub>3</sub> obtenu, on peut dire que la nature des sédiments au niveau de barrage Djorf-Torba est d'origine marneuse. Aussi, d'après le tableau ci-dessus, le taux des sulfates So<sub>4</sub><sup>2-</sup> des sédiments étudiés sont caractérisés par une agressivité faible, ce résultat favorable permet d'éviter les impacts négatifs lors de la valorisation de ces sédiments soit au court ou à long terme.

## **IV/ Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement.**

---

### **IV.7 Conclusion.**

Dans le but d'assurer la meilleure exploitation des ressources locales, on recherchera des applications réelles sur la valorisation des sédiments récupérés lors des opérations du dragage. Dans cette approche, la connaissance des caractéristiques des sédiments d'envasement a permis de discuter de leurs potentialités et les faiblesses vis-à-vis des spécifications techniques des filières de valorisation. En conséquence, une étude détaillée sur les échantillons prélevés est indispensable. Sachant que cette étude doit être basée sur les résultats de plusieurs analyses d'identification physico-chimiques et minéralogiques. Les résultats des analyses des échantillons prélevés en différents points, nous guideront vers le choix d'un axe de valorisation économique à approfondir.

La valorisation des sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba dans les divers domaines doit être en accord avec le respect de l'environnement. Plusieurs solutions sont envisageables, pratiquement la technique la plus rentable est la valorisation agronomique de ces matériaux sous la forme d'amendement agricole sahariens (AAS), pour les terres agricoles de la plaine d'Abadla qui couvrent une superficie de 5400 hectares. Sachant aussi, que le sol saharien est un sol sableux, squelettique et pauvre en matière organique.

Vu les considérations citées précédemment, compte tenu des résultats encourageants, et au vue aussi des opérations de dragage programmés dans la retenue du barrage, la valorisation des sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba est un impératif qui doit être mis en œuvre. Cette dernière partie de nos travaux de recherche fera l'objet du chapitre 5.

***CHAPITRE V :***  
***VALORISATION DES***  
***SÉDIMENTS***  
***DU DJORF-TORBA EN***  
***AMENDEMENT AGRICOLE.***

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

---

### V.1 Introduction.

La valorisation des sédiments nous incite à appliquer les principes de l'économie circulaire, qui vise à transformer une contrainte en une ressource, en augmentant la valeur de la matière par une transformation [BENEDICTE, 2017]. Les sédiments d'envasement par leurs abondances constituent une ressource potentielle inexploitée, qui pourrait être un gain pour la région concernée. A cet effet, la valorisation des sédiments figure parmi les recommandations dans de nombreuses études effectuées sur le devenir des produits dragués, ainsi que sur la préservation des ressources en eau et la protection de l'environnement [SEMCHA, 2006].

En Algérie, les terres arides couvrent plus de 90% du territoire national. Selon le Centre de Recherche Scientifique et Techniques sur les Régions Arides (CRSTRA), ces terres sont caractérisées par une faiblesse, par une non uniformité de la répartition des précipitations dans l'espace et dans le temps, ainsi que par une hostilité à un développement agricole performant en conséquence [CRSTRA, 2009]. Sachant aussi, que le sol saharien est sableux, squelettique et pauvre en matière organique. C'est dans ce contexte même, qu'on envisage d'utiliser les sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba comme un amendement agricole des sols sahariens (AASS), et ceci dans le but d'augmenter la fertilisation des sols agricoles, ainsi que leur capacité de rétention de l'eau.

En conséquence, ce chapitre présente les résultats d'analyse des échantillons prélevés au niveau du barrage Djorf-Torba, notamment celle du pied du barrage (zone de dragage), et aussi les autres prélèvements de la zone de valorisation. Dans notre cas, l'objectif est orienté sur les spécifications des matières premières que les sédiments de la retenue Djorf-Torba pourraient venir substituer. Sachant que la pré-orientation des sédiments du barrage vers une filière de valorisation, ne peut se concevoir qu'en la connaissance des normes d'applications propres.

Ainsi ce chapitre présente la méthodologie adoptée à travers cinq phases ; détermination de la filière de valorisation ; les exigences des techniques et les normes d'application ; la préparation des différentes formulations et l'interprétation des résultats ; la réalisation des planches d'essais ; le mode d'exécution et les recommandations. La suite de nos travaux de recherche est l'élaboration d'une perspective, qui est basée sur les résultats expérimentaux des planches d'essais.

## **V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.**

---

### **V.2 Les différentes approches de la valorisation des sédiments du Djorf-Torba.**

#### **V.2.1 Etat des lieux sur les pratiques de valorisation en Algérie.**

Dans le but d'assurer la meilleure exploitation des ressources locales, on recherchera des applications réelles sur la valorisation des sédiments récupérés lors des opérations du dragage. En Algérie, cette technique est connue depuis des dizaines d'années, mais récemment, elle est développée de manière significative et ceci en raison des nombreuses études qui ont été menées dans divers domaines. Sur la base des études effectuées, la majorité des sédiments possèdent des propriétés géotechniques, physico-chimiques et mécaniques souvent suffisantes pour une utilisation dans les domaines du Génie Civil, environnement et agricole. Il est impératif de mener une étude approfondie, afin de connaître la méthode d'application et les traitements nécessaires pour chaque type des sédiments qui diffèrent d'un endroit à l'autre.

A l'échelle national, plusieurs filières de valorisation ont été explorées, notamment celles de : LABIOD, 2002 qui a mis en évidence les possibilités réelles d'utilisation de la vase de Fergoug et de celle de Bou-Hanifia comme fertilisant ; SEMCHA, 2006 sur l'application des sédiments du barrage Fergoug dans le BTP ; SADOK, 2013 sur la gestion des sédiments d'envasement du barrage Ouizert dans la réalisation d'un Centre de Stockage de Déchets (CSD) ; SERBAH, 2018 qui propose une cartographie des sédiments des barrages de l'ouest Algérien, avec une valorisation en Briques de Terre Crue (BTC) ; BOURABAH et al., 2011 ont travaillé sur le traitement des sédiments de dragage de Cheurfas pour une valorisation en construction routière ; BENASLA, 2015 sur la caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et la valorisation en tant que matériau de construction ; et récemment BOUNOUARA, 2021 sur la valorisation des produits dragués du barrage de Bouhanifia dans les Centres d'Enfouissement Technique.

Malgré les difficultés rencontrées, la valorisation des sédiments est le sujet d'actualité. L'investissement dans ce domaine présente une opportunité, par des avantages socio-économique réel et environnemental, tel que : la préservation des ressources en eau, le moindre impact environnemental, fournir un matériau naturel de qualité garantie à un coût inférieur au prix du revient de celui des sédiments dragués à des fins d'entretien des infrastructures. Mais de l'autre côté, l'Algérie est encore très loin de mettre les règlements d'applications de ces déchets non valorisés.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

---

### V.2.2 Le devenir des sédiments du Djorf-Torba.

Les sédiments sont des matériaux de nature complexes, souvent hétérogènes, et en dépendance constante avec les autres composantes de l'écosystème dont ils font partie. Mais globalement, les résultats des travaux de recherche effectués sur la gestion des sédiments sont tous encourageant à leurs réutilisations comme une matière première.

Dans cette optique, la valorisation des sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba dans le domaine agricole, environnement et celui des matériaux du génie civil, peut sembler présenter des propositions attractives. Mais à la condition que les sédiments de dragage doivent avant tout répondre aux normes et les guides techniques relatifs aux domaines d'application. Parmi les voies de valorisation potentielle, les filières suivantes ont été retenues comme des solutions stratégiques pour le développement durable de la région de la wilaya de Béchar :

- **Site 1 : Valorisation en Amendement Agricole des Sols Sahariens - AASS.**

Selon la Direction des Ressources en Eau (DRE-Béchar), la dernière opération de réhabilitation des infrastructures hydrauliques du périmètre agricole d'Abadla, qui ont été lancés en 2015, ont nécessité une autorisation du programme (AP) de 02 milliards DA sur la contrainte de la salinité élevée des sols [INSID, 2010]. Notant que la production agricole au niveau de la région de Béchar souffre ces dernières années de l'absence de certains éléments minéraux nécessaires à la croissance des plantes.

Dans cet axe, nous avons orienté nos travaux de recherche dans l'obtention d'une matière première utilisable, permettant d'augmenter la fertilisation agricole, ainsi que sa capacité de rétention en eau, et l'amélioration des rendements des cultures dans le périmètre agricole irrigué de la plaine d'Abadla sur 5.400 hectares (Voir Figure V-1).

L'application des sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba en amendement agricole des sols saharien (AASS) est la technique la plus rentable. Cette filière laisse entrevoir un potentiel d'application intéressant, car elle peut, après décantation des sédiments mises en œuvre sans investissement particulier, si ce n'est que le transport des matériaux aux agriculteurs.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

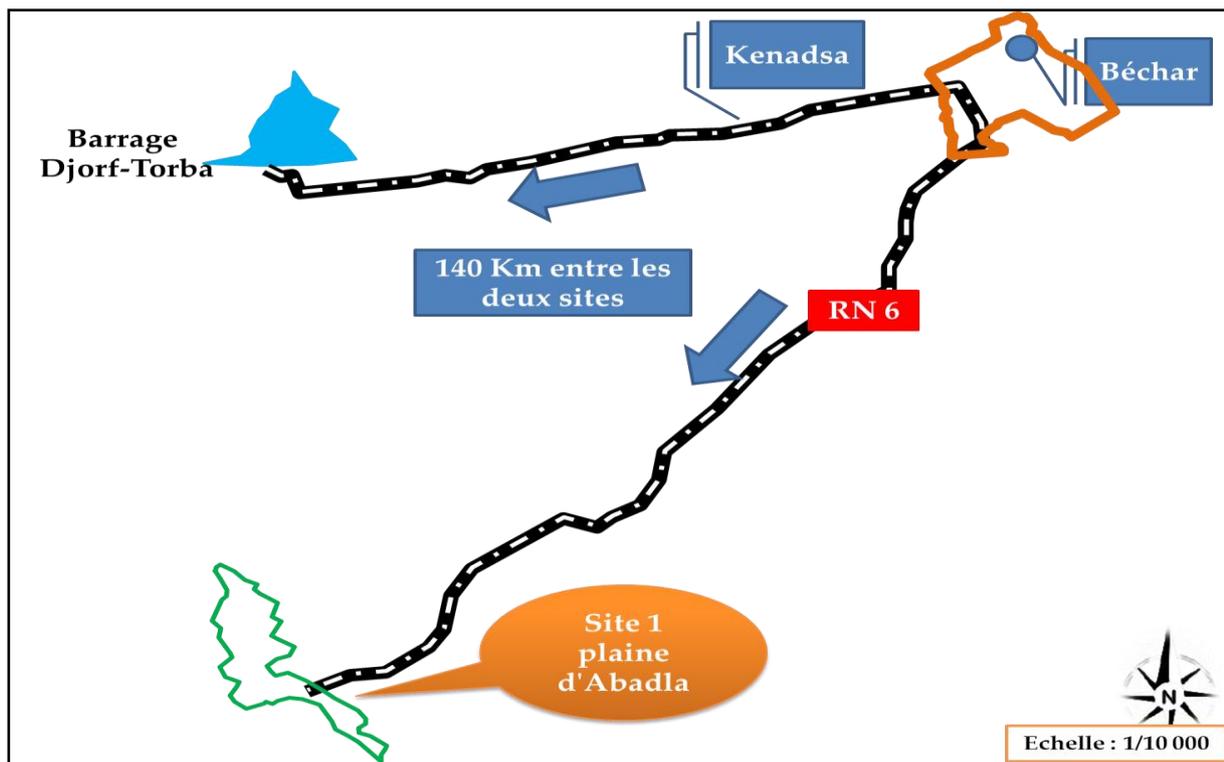


Fig. V -1 : Implantation du site 1(plaine d'Abadla) vis-à-vis du barrage Djorf-Torba.

- **Site 2 : Valorisation en clinkers pour la cimenterie de Béchar :**

L'utilisation des sédiments non plus comme granulat, mais comme matière première pour la fabrication du clinker a également fait l'objet de travaux de recherche [AOUAD et al., 2012]. Il n'y a pas de contre-indications à l'utilisation des sédiments de dragage pour la fabrication de clinker. Le clinker est élaboré à partir des marnes (roches meubles constituées de calcaire et d'argile), il est le résultat d'une calcination à 1 450 °C des roches contenant environ 75 % de calcaire et 25 % d'argile. En fonction de leurs minéralogie, les sédiments pourront être utilisés seuls ou en mélange, notamment avec des carbonates. Ce mélange pourra en plus permettre d'ajuster aux seuils de la norme les teneurs en ions sulfates et chlorures, ainsi qu'en aluminium tricalcique, dans le produit fini.

Selon le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie "Groupe GICA", la nouvelle cimenterie de Béchar occupe une superficie de 60 hectares à Ben-Zireg, situé à 98 km au nord du barrage (Voir Figure V-2), avec une capacité de production annuelle d'un million de tonnes de ciment (3.200 tonnes/jour). Pour ce qui est de la matière première, la cimenterie sera approvisionnée à partir de Djebel Madjouz qui se trouve à 40 km au nord-est de la ville de Béchar et celui du schiste de Benzireg, à 10 km au nord du premier gisement.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

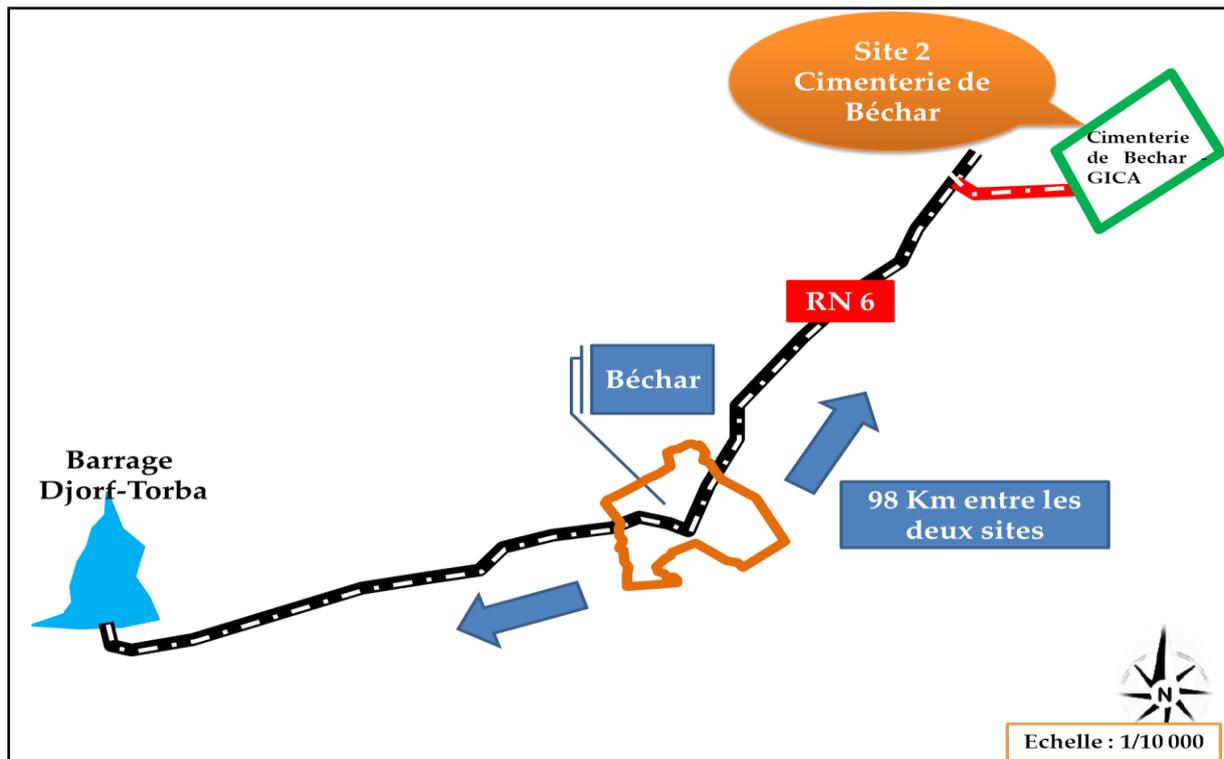


Fig. V -2 : Implantation du site 2 (Cimenterie de Béchar) vis-à-vis du barrage Djorf-Torba.

- **Site 3 : Valorisation en Noyau Etanche dans un Barrage en Terre-NEBT.**

Selon la Comité français des barrages et réservoirs (CFBR), Les barrages en remblai sont constitués de matériaux meubles allant de l'argile fine à des éléments très grossiers (enrochements). Ils regroupent plusieurs catégories en fonction de la méthode employée pour assurer l'étanchéité. Ce type d'ouvrage très ancien est le plus communément utilisé, il représente près de 70% du parc mondial des barrages. En Algérie, et selon l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) plusieurs barrages sont construits en matériaux meubles, c'est le cas des barrages Hammam Boughrara (Tlemcen) ; Fontaine des Gazelles (Biskra) ; Foug El Gueiss (Khenchela) ; Bakhadda (Tiaret) ; Beni Amrane (Boumerdès).....

En termes de caractéristiques, la valorisation des sédiments en noyau étanche dans un barrage en terre (NEBT), doit contenir plus de 30 % d'éléments inférieurs à  $80 \mu$  qui sont éventuellement étanches, dont l'indice de plasticité est inférieur à 35 pour assurer la stabilité. À l'optimum (OPN), le degré de saturation est généralement compris entre 80 et 90 % et la contrainte de pré-consolidation se situe entre 100 et 200 kPa [CFBR, 2002].

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

Le barrage prévu par l'utilisation des sédiments du Djorf-Torba est celui d'Igli, il se trouvera à 160 km au sud de Béchar. Ce barrage sera alimenté par la retenue des eaux de crue de l'oued «Saoura», avec une capacité de stockage de plus de 60 millions de m<sup>3</sup>. Ce barrage est censé de protéger la région des crues des oueds «Saoura» et «Guir», il permettra la recharge de la nappe phréatique, le renforcement des capacités d'irrigations agricoles et surtout l'approvisionnement en eau potable dans cette région qui englobe plusieurs ksour et localités (Voir Figure V-3), [ANBT, 2020].

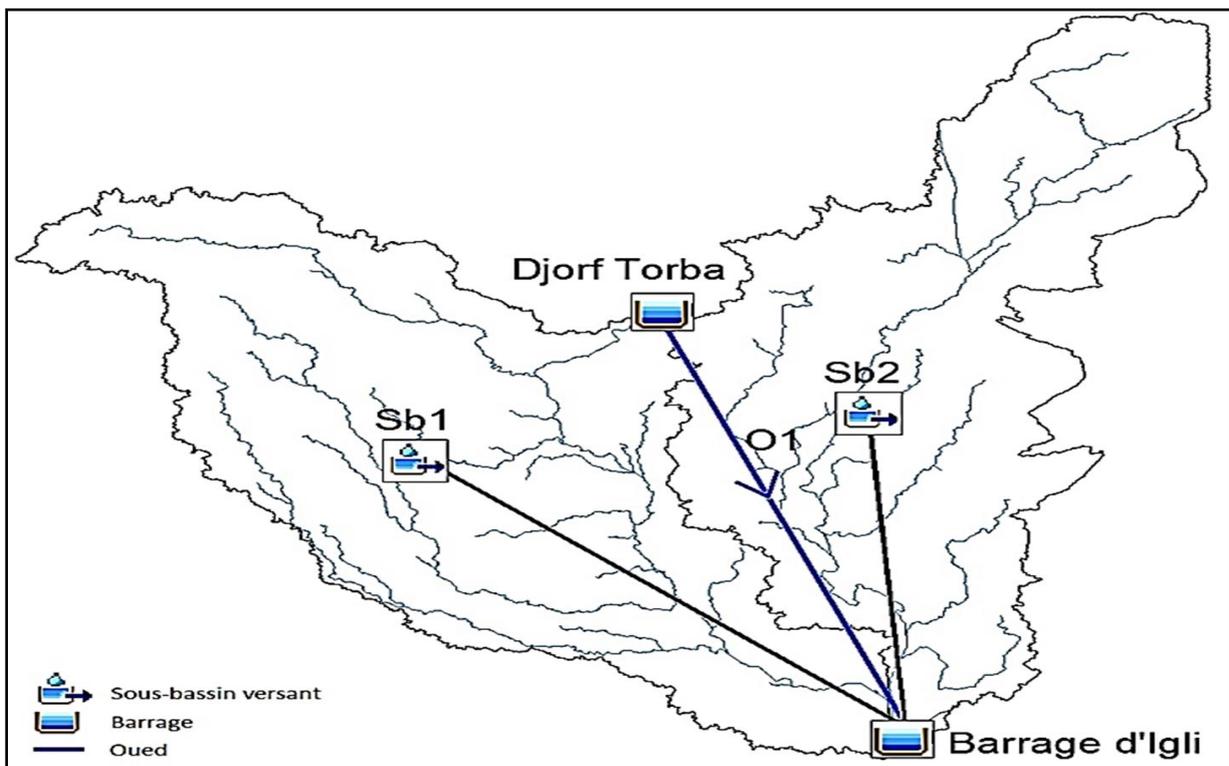


Fig. V-3 : Le bassin versant du barrage Igli (ANBT, 2020).

Cet axe de valorisation est une solution stratégique pour mettre en œuvre le programme de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts au moindre coût. Ce programme est conçu pour la construction de trois nouveaux barrages dans la région de Béchar. En plus du barrage d'Igli (Figure V-4), un second barrage sera localisé dans la commune frontalière de Béni-Ounif (100 km au nord de Béchar), d'une capacité de retenue de 2 millions m<sup>3</sup> d'eau des crues de l'oued «Laouedj». Un ouvrage hydraulique similaire, celui de Zekakat, est inscrit au profit de la région, il sera implanté à 35 km en aval du barrage de Djorf-Torba et à 30 km au nord de la plaine irriguée d'Abadla, il sera destiné à l'irrigation agricole et aussi une source d'AEP (Alimentation en Eau Potable) pour les habitants de plusieurs communes situées à proximité.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

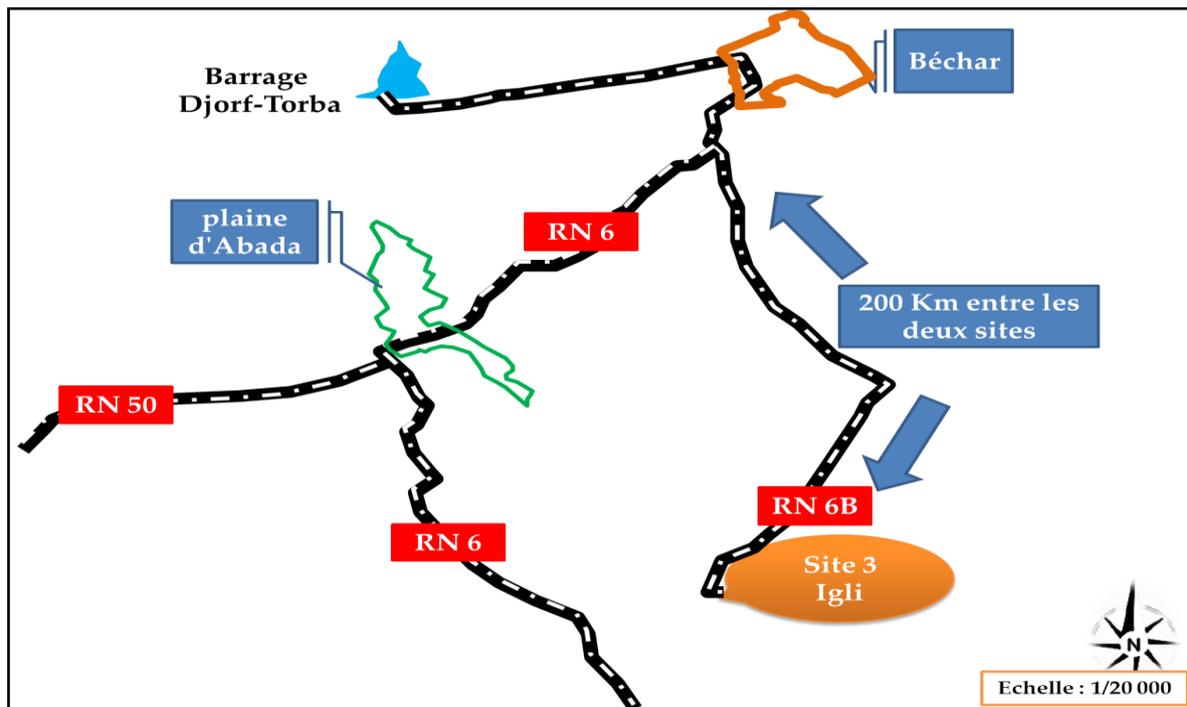


Fig. V -4 : Implantation du site 3 (Igli) vis-à-vis du barrage Djorf-Torba.

- **Site 4 : Valorisation dans l'Amélioration des Sols Sahariens (ASS).**

Les aménagements les plus efficaces pour lutter contre l'érosion sont ceux qui sont basés sur le renforcement des sols, notamment dans les bassins versants qui alimentent les cours d'eau. La valorisation de sédiments est parfaitement envisageable tant que les réglementations sont respectées. Dans ce cadre, un principe général doit être respecté : les aménagements doivent représenter une contrainte minimale pour les exploitants, ils seront toujours disposés parallèlement au sens du travail du sol, ainsi le réemploi à terre des sédiments est guidé par des valeurs seuils qui est un principe général de la non dégradation du milieu receveur. En conséquence, l'utilisation des sédiments fins comme un stabilisant dans les zones sensibles à l'érosion constitue une solution économique et durable.

Le bassin versant ciblé pour cet axe de valorisation (ASS) est celui de l'Oued Guir qui alimente le barrage Djorf-Torba (voir Figure V-5). En vue des précipitations irrégulières, la végétation est désertique. Cette particularité nous donne un paysage franchement saharien. Sachant que l'envasement de la retenue est lié directement aux phénomènes du transport solide et l'érosion des sols du bassin versant. Par conséquent, l'aménagement du bassin est la meilleure solution pour réduire l'impact de cette problématique, et cela en exploitant les résultats de chapitre III (Cartographie de l'érosion dans la zone d'influence du barrage Djorf-Torba).

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

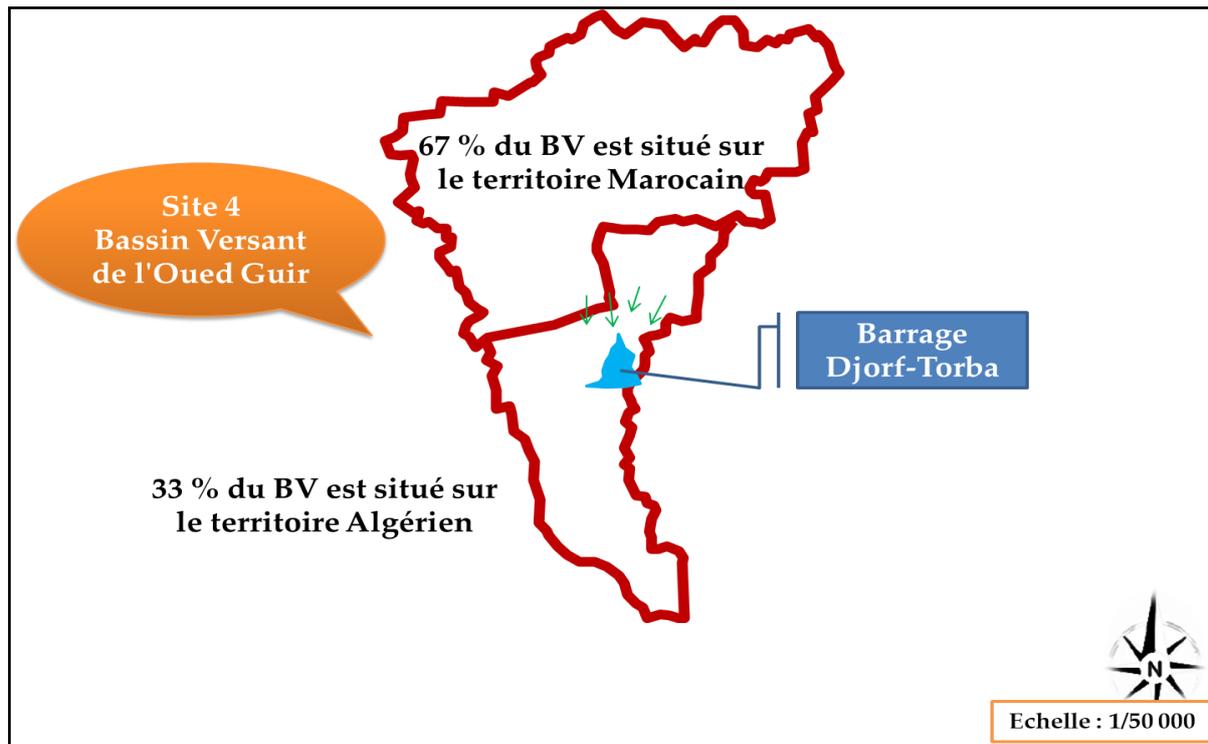


Fig. V-5 : Implantation du site 4 (Bassin Versant de l'Oued Guir).

### V.3 Le choix de la filière de valorisation.

En dehors des normes d'applications techniques, et afin d'assurer le succès de la filière de valorisation, il apparaît indispensable de satisfaire les critères suivants :

- **Critère 1 :** Proposer des coûts de production stables en tenant compte de la concurrence des matériaux initiaux souvent peu onéreux ;
- **Critère 2 :** Assurer l'existence d'un marché capable d'absorber la production, en tenant compte des possibles de concurrence avec d'autres matériaux primaires.
- **Critère 3 :** Assurer la pérennité de la filière grâce à une bonne connaissance du « gisement » des sédiments dragués (quantité et qualité) ;
- **Critère 4 :** Maîtriser les aspects juridiques : responsabilité du producteur des déchets, autorisation légale d'exploitation et les modalités de réutilisation des matériaux ;
- **Critère 5 :** Assurer l'acceptabilité sociale du matériau produit, qui peut souffrir de son image de déchets potentiellement contaminés.

## **V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.**

---

Plusieurs solutions sont envisageables (voir V-2-2), mais d'après les articles ci-dessus (Critère 1 ; Critère 2 ; Critère 3 ; Critère 4 ; Critère 5), et en tenant compte de l'objectif principal de ces travaux de recherche, qui s'intitule : «les sédiments d'envasement une richesse et un défi pour le développement durable des régions saharienne». La technique la plus rentable est la valorisation agronomique de ces matériaux, sous la forme d'amendement agricole des sols sahariens (AASS), notamment celle de la plaine d'Abadla qui couvre une superficie de 5400 hectares.

- **Pourquoi les terres agricoles de la plaine d'Abadla ?**

Deux principes fondamentaux gèrent la valorisation agronomique des sédiments et plus généralement l'utilisation des matières fertilisantes :

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

- **Critères liés à la région de valorisation :**

- Critère technique : les terres agricoles de la plaine d'Abadla sont des sols à texture sableuse, donc la rétention en eau est faible ; le sol est très salé ; pauvre en matière organique ; le taux du phosphore dans le sol est faible et aussi ce sol est fortement calcaire (voir V-5-2 et V-5-3). En conséquence, la production agricole au niveau de la région de Béchar souffre ces dernières années de l'absence des conditions nécessaires à la plante. A cet effet, l'ajout de la vase du barrage à un sol avec sa caractéristique argileuse et fine permettra de corriger la granulométrie et la capacité de rétention en eau.
- Critère économique : la distance entre la zone de dragage (Barrage Djorf-Torba) et la zone de la valorisation (les terres agricoles de la plaine d'Abadla), est environ 140 km. Cette particularité réduit les coûts d'investissement, ainsi que ce type de valorisation ne nécessite pas des moyens logistiques et des équipements particuliers ou coûteux.
- Les terres agricoles de la plaine d'Abadla d'une superficie de 5400 hectares sont l'un des pôles agricoles les plus stratégiques au niveau national. En conséquence, leurs productions sont indispensables pour couvrir les besoins du marché local et national.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

### V.4 Principe de la valorisation et les normes d'application.

#### V.4.1 La méthodologie adoptée.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba en tant que matériau naturel, et par la suite, de proposer une méthodologie générale de valorisation en amendement agricole des sols saharien (AASS), de la plaine d'Abadla. En conséquence, la recherche effectuée dans cette partie consiste à déterminer le domaine d'application puis de trouver les formulations optimales des mélanges dans le but d'un comportement idéal du sol.

Afin de pouvoir répondre à l'objectif fixé, la méthodologie adoptée s'appuie sur une meilleure connaissance des sédiments bruts et les sédiments traités pour une application dans la zone de valorisation (voir Figure V-6).

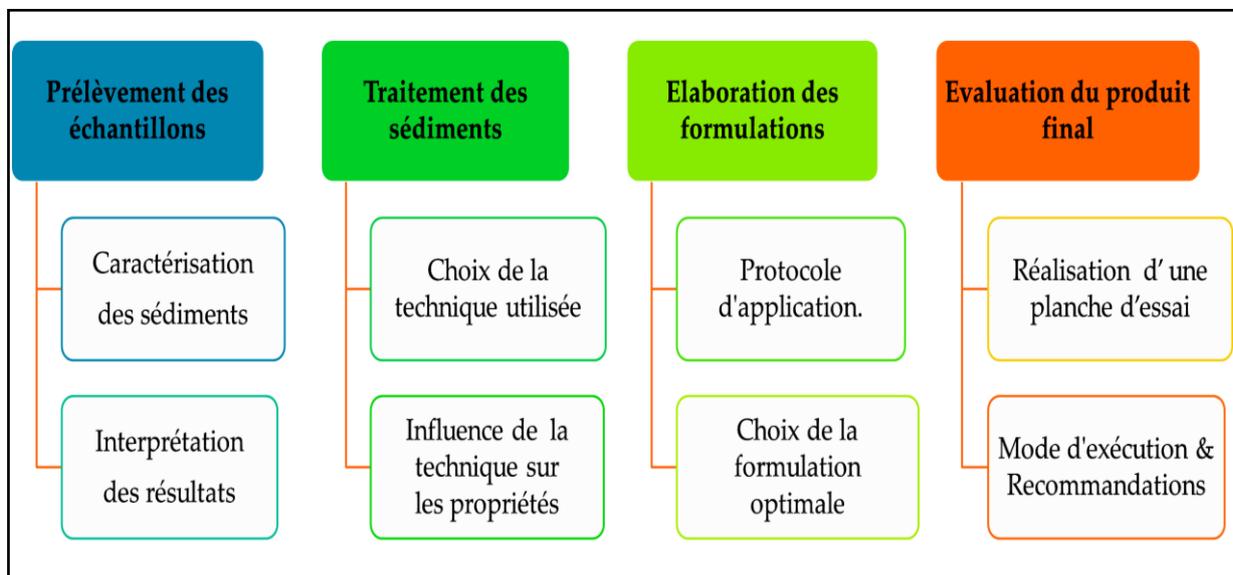


Fig. V -6 : La méthodologie adoptée pour la valorisation des sédiments.

La première phase réalisée a permis le prélèvement des échantillons et la caractérisation des sédiments bruts (voir chapitre IV, Identifications et caractérisations des sédiments d'envasement). Ces différents essais ont permis d'identifier les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sédiments, dans le but d'évaluer leurs comportements sous l'effet des différents paramètres.

On précise que les sédiments choisis dans cet axe de valorisation, sont celles prélevés en Novembre 2017, au niveau de la Vidange de Fond (P4-VF) ; ainsi que l'utilisation de l'échantillon prélevé en Octobre 2020, dans la Zone de Dragage (P4-ZD), ce dernier a été prélevé au niveau du pied de barrage.

## **V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.**

---

Le prélèvement de ces échantillons a été réalisé en collaboration avec l'équipe de l'entreprise Hydro-Dragage qui était chargée de l'opération de dévasement.

Les sédiments utilisés dans le cadre de la valorisation doivent répondre à des critères physiques, chimiques ou minéralogiques qui ne sont pas présents dans les sédiments bruts, mais qui peuvent être atteints par traitement ou mélange avec d'autres matériaux. À cet effet, la deuxième phase consiste au choix de la technique adoptée pour le traitement, cette dernière doit être en fonction du domaine de la valorisation et leurs possibilités d'application. On étudiera aussi l'influence de la technique choisie sur les diverses propriétés des sédiments.

La troisième phase permet d'étudier le comportement des différentes formulations qui constituent les sédiments traités avec des pourcentages variables de sols agricoles ciblés dans le cadre de cette valorisation (% sédiments du Djorf-Torba + % sol agricole de la plaine d'Abadla). Ces différentes formulations sont préparées selon le protocole expérimental et les normes en vigueur. L'objectif principal de cette partie consiste à déterminer la formulation optimale qui permet d'atteindre un comportement idéal à l'échelle technique, scientifique, environnementale, économique et sociale.

La dernière phase sera consacrée à la réalisation d'une planche d'essai expérimentale, dans le but d'évaluer la faisabilité de la solution, vis-à-vis des contraintes du site, de la mise en place, ainsi que la vérification de la durabilité pédologique et environnementale, à moyen et long terme pour une durée minimale de trois ans de suivi [BATAILLARD et al., 2017].

### **V.4.2 Hypothèses et normes d'applications.**

L'analyse de l'état de l'art de la méthodologie adoptée doit être en accord avec les cinq hypothèses principales suivantes :

- 1- Les sédiments étudiés ne sont pas contaminés et la valorisation en amendement agricole ne doit pas présenter un danger à l'environnement. On rappelle que plus de 90 % des sédiments provenant des dragages d'entretien sont considérés comme acceptables d'un point de vue environnemental [ANGER, 2014]. C'est également le cas de nos sédiments du barrage Djorf-Torba, car l'ensemble des échantillons étudiés ne présentent pas de pollution (voir les résultats obtenus dans le chapitre IV).

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

- 2- Techniquement, les sédiments fins de la retenue de Djorf-Torba peuvent être utilisés comme apport de sol support de végétation, avec un sol ciblé choisi dans un axe de valorisation.
- 3- Les sédiments seuls n'ont pas une fertilité physique, chimique et pédologique satisfaisante dans l'axe de la valorisation en amendement agricole.
- 4- Un apport de matériaux organiques locaux est nécessaire à l'amélioration à court et long terme des propriétés agronomiques des sédiments (les sédiments du barrage Djorf-Torba sont des matériaux pauvres en termes de la matière organique).
- 5- Toutes ces hypothèses sont considérées comme un outil d'aide, elles vont permettre d'adapter les normes d'application suivant la méthode de la valorisation choisie.

Les normes d'application sont complètement liées à l'axe de la valorisation. En Algérie, il n'existe pas de cadre réglementaire propre à la valorisation des sédiments d'envasement. Les normes utilisées sont celles de l'Association Française de Normalisation (AFNOR, 2009). En conséquence, trois normes seront suivies (Voir Figure V.7).

<b>La norme NF U44-001 relative aux amendements minéraux basiques</b>	s'appliquer aux sédiments qui contiennent au minimum 15 % de l'oxyde de calcium (CaO) + oxyde de magnésium (MgO) <ul style="list-style-type: none"><li>• matière fertilisante contenant des carbonates, des oxydes, des hydroxydes et/ou des silicates, généralement associés à du calcium et/ou du magnésium, et destinées principalement à maintenir ou à élever le pH du sol et à améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques.</li></ul>
<b>La norme NF U42-001 relative aux engrais minéraux</b>	s'appliquer aux sédiments qui ont des teneurs en N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ou K <sub>2</sub> O qui dépassent les 3 % de matière brute ou dont la somme de ces trois éléments dépasse 7 % <ul style="list-style-type: none"><li>• matières fertilisantes dont la fonction principale est d'apporter aux plantes des éléments directement utiles à la nutrition (éléments fertilisants majeurs, éléments fertilisants secondaires, oligo-éléments).</li></ul>
<b>La norme NF U44-051 relative aux amendements organiques</b>	autorisés aux sédiments qu'une teneur minimale en matière organique allant de 15 % à 20 % (sur matière sèche) <ul style="list-style-type: none"><li>• matières fertilisantes composées principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale, ou animale et végétale en mélange, destinées à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol et à l'amélioration de ses propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques</li></ul>

Fig. V-7 : Classification des engrais et amendements selon AFNOR ; 2009.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

On recense aussi l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation) qui définit les termes relatifs aux engrais et les amendements à travers 62 articles (ISO-8157 en 2015). Dans notre cas, on s'intéresse aux amendements qui sont définis dans l'article 2.1.21 : améliorateur/amendement du sol (Voir Tableau V-1). Cette article donne un concept général des amendements, comme suit : « matériau apporté au sol in situ dont la principale fonction est de maintenir ou d'améliorer ses propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques ou l'activité du sol, à l'exception des amendements minéraux basiques ».

Tableau V-1: Classification des engrais et amendements selon ISO-8157 ; 2015.

Article	Désignation	Définition
2.1.1	engrais	Substance contenant un ou plusieurs éléments nutritifs reconnus, utilisée pour sa teneur en éléments nutritifs et qui est conçue pour favoriser la croissance des plantes.
2.1.5	engrais minéral	Engrais sans matières organiques autres que celles définies comme étant des additifs
2.1.6	engrais organique	Matériau contenant du carbone ou un ou plusieurs éléments autres que l'hydrogène et l'oxygène, appliqué soit directement sur la plante soit au sol.
2.1.18	amendement	Matériau (pouvant être minéral ou organique) apporté aux sols pour améliorer leurs propriétés physiques et/ou chimiques et/ou l'activité biologique des sols sans teneur en éléments nutritifs déclarable.
2.1.21	améliorateur/ amendement du sol	Matériau apporté au sol in situ dont la principale fonction est de maintenir ou d'améliorer ses propriétés physiques et/ou chimiques et/ou biologiques ou l'activité du sol, à l'exception des amendements minéraux basiques
2.1.22	amendement minéral basique	Substances ou mélange de substances minérales dont la principale fonction est de corriger l'acidité du sol
2.1.23	amendement organique	Matériau organique naturel apporté principalement pour améliorer les propriétés physiques et l'activité biologique du sol.

Cette forme d'application des sédiments en amendement agricole (article 2.1.21 ; améliorateur/ amendement du sol), repose sur les résultats encourageants qui sont obtenus dans la partie identification et caractérisation des sédiments (voir conclusion du chapitre IV). Les hypothèses citées précédemment ont tenu compte de l'axe de la valorisation choisie.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

### V.5 Études expérimentales et techniques d'application.

La valorisation des sédiments est guidée par des valeurs seuils et selon un principe général qui est le non dégradation du milieu receveur. Les valeurs seuils sont basés sur les normes en vigueur [BATAILLARD et al., 2017]. En conséquence la caractérisation des sédiments désignés dans le cadre de la valorisation agronomique peut être basée sur de nombreux paramètres. Ces paramètres peuvent être interprétés différemment, mais dans tous les cas il est nécessaire de caractériser les propriétés physiques, chimiques voire biologiques [ANGER, 2014].

Plusieurs facteurs peuvent influencer les propriétés du produit final, comme la minéralogie de la matière première et sa composition physico-chimique. En effet, la détermination de ces paramètres va permettre de connaître les potentialités et les points des faiblesses des sédiments de la valorisation. Le Tableau V-2 rassemble les paramètres utilisés dans la caractérisation agronomique des sédiments, et aussi applicables sur les sols agricoles qui sont choisis comme une zone de valorisation.

Tableau V-2: Synthèse des paramètres de caractérisation agronomiques des sédiments.

Paramètres	Méthode	Objectifs agronomiques
Répartition granulométrique	NFX31-107 Méthode à la pipette	Classe de texture Répartition selon 5 classes : $A < 2\mu\text{m} < LF < 20\mu\text{m} < LG < 50\mu\text{m}$ $< SF < 200\mu\text{m} < SG < 2000\mu\text{m}$
CaCO <sub>3</sub>	NF ISO 10693	Capacité à tamponner l'acidité des terres.
Matière organique	NF ISO 14235	Capacité à fournir des éléments nutritifs par minéralisation de la matière organique.
pHeau	NF ISO 10390	Condition du milieu pour la germination.
Conductivité électrique	NF ISO 11265	
Capacité de rétention en eau	Mesure de propriétés physiques	Disponibilité d'eau pour la croissance des végétaux.
Capacité d'Echange Cationique (CEC)	NF X 31-130	Disponibilité d'éléments nutritifs pour la croissance des végétaux.
Phosphore assimilable	NF ISO 11263	
K <sub>2</sub> O échangeable	NF X 31-108	
CaO échangeable	NF X 31-108	
MgO échangeable	NF X 31-108	
Na <sub>2</sub> O échangeable	NF X 31-108	

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

### V.5.1 Caractérisations des sédiments désignées pour la valorisation.

Dans le but de concrétiser au mieux les essais de caractérisation sur les sédiments en relation avec la filière de valorisation choisie, nous avons effectué les différents essais au niveau du laboratoire INSID (Institut National du Sol, de l'Irrigation et du Drainage). Dans la phase de la caractérisation, certains paramètres sont recherchés pour l'ensemble des sédiments, et ceci concernant les résultats des premiers prélèvements réalisés en Novembre 2017 (voir chapitre IV).

Les sédiments désignés dans le cadre de cette valorisation sont limités à deux zones de prélèvement (voir la partie de la méthodologie adoptée). Cette particularité est justifiée par le programme de l'ANBT dans le barrage Djorf-Torba, qui lié à la zone dans laquelle s'effectue l'opération de dévasement, notamment au pied du barrage. A cet effet, ces échantillons ont été prélevés en octobre 2020 au niveau de la vidange de fond (P4-VF) et au pied du barrage (P4-ZD). Les photos ci-dessous montrent les sédiments extraits par l'entreprise Hydro-Dragage lors des opérations de dévasement au niveau du barrage Djorf-Torba (Voir Photo V-1).



Photo IV-1 : Les sédiments extraits lors des opérations de dragage (Mars -2021).

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

Afin d'établir un état des lieux sur la qualité des sédiments du barrage Djorf-Torba, l'analyse des données recueillies à travers les échantillons sont résumés dans le tableau V-3.

Tableau V-3 : Synthèse des caractéristiques physico-chimiques et les propriétés des sédiments désignées à la valorisation.

Désignation	P4-VF*	P4-ZD**	Valeur Souhaitée
Fraction argileuse « A » (%)	21,30	30,66	>20
Fraction limoneuse « L = Lf + lg » (%)	51,58	44,14	> 40
Fraction sableuse « S = Sf + Sg » (%)	27,12	25,20	<30
Calcaire total (CaCO <sub>3</sub> ) (%)	20,83	13,95	< 20
Calcaire actif (CaCO <sub>3</sub> ) (%)	5,00	2,00	<5
Phosphore assimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (ppm)	36,00	156,00	>120
pHeau (1/2,5)	8,09	8,04	6,5 – 7,5
Conductivité électrique 1/5 (ms/cm)	0,55	1,34	<0,6
Matière organique (%)	0,35	1,54	3 - 6
K <sub>2</sub> O (ppm)	215,00	201,00	180 - 300
Ca <sup>++</sup> (meq/100g)	17,70	16,40	-
Mg <sup>++</sup> (meq/100g)	8,12	6,04	-
K <sup>+</sup> (meq/100g)	0,94	0,85	-
Na <sup>+</sup> (meq/100g)	1,60	3,50	-
CEC (meq/100g)	8.26	6,75	>9

P4-VF\* : Echantillon prélevé au niveau de la Vidange de Fond.

P4-ZD\*\* : Echantillon prélevé au pied du barrage (la Zone ciblé par le Dragage).

Selon les résultats obtenus, nous avons constaté ce qui suit :

- Les sédiments du barrage contiennent des particules fines, ils se positionnent dans un même fuseau. Sachant que la fraction limoneuse représente la moyenne de 50%, le pourcentage des éléments argileux varie entre 21 à 31% avec un taux suffisant vis-à-vis de la valeur souhaitable (>20 %). Par contre le pourcentage de la fraction sableuse varie entre 25 à 27 %, il est largement inférieure à la valeur souhaitable (<30%).
- Les sédiments étudiés présentent des teneurs en calcaire (CaCO<sub>3</sub>) variables, allant de 14 à 20 % pour le Calcaire total, et entre 2 à 5 % pour le Calcaire actif. En conséquence, les résultats des analyses de Calcaire (CaCO<sub>3</sub>) montrent que les spécifications des recommandations sont satisfaites par rapport aux valeurs souhaitées.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

---

- La valeur de la Conductivité Electrique (CE) enregistrée est de 0,55 (P4-VF) à 1,34 (ms/cm) pour l'échantillon P4-ZD ; cela signifie que la salinité du sol est variable entre non salé ( $CE < 0,6$  ms/cm) à peu salé ( $0,6 < CE < 1,4$  ms/cm).
- Tous les sédiments étudiés sont basiques (P4-VF et P4-ZD), ils ont un pH supérieure à 7,5. En outre, la valeur de la CEC est inférieure à 9 (meq/100g), avec une concentration faible des éléments majeurs échangeables ( $Ca^{++}$  ;  $Mg^{++}$  ;  $K^{+}$  ;  $Na^{+}$ ), sauf pour le  $K_2O$  qui présente des valeurs acceptables. Il est à noter que les taux du Phosphore assimilable ( $P_2O_5$ ) sont négligeables pour le P4-VF (36 ppm) et en moyenne suffisante pour l'échantillon P4-ZD (156 ppm), avec une valeur minimale de (120 ppm).
- Les résultats qui sont liés à la disponibilité d'éléments nutritifs pour la croissance des végétaux, sont justifiés par la valeur de la matière organique. Les échantillons des sols analysés montrent qu'on a des sols de type peu ou pas organiques ( $MO < 3\%$ ). Cependant la Capacité d'Echange Cationique (CEC) et les éléments nutritifs pour la culture sont variables selon le complexe argilo-humique, c'est-à-dire en fonction des espèces argileuses en présence de leurs quantités, ainsi que la teneur et la qualité de la MO.

### V.5.2 Interprétation des résultats selon la filière de valorisation (AASS).

L'interprétation des résultats peut changer selon le type de la valorisation envisagé (épandage agricole ou reconstitution de sol). Dans le cas d'une utilisation comme un amendement physique, les caractéristiques des sédiments fins auxquelles il faut porter une attention particulière sont la granulométrie, la Conductivité Electrique (CE) et la teneur en Calcaire ( $CaCO_3$ ). Ces trois paramètres sont demandés dans les différentes classifications de référence qui permettent d'identifier les sédiments à un usage agronomique ou non.

Selon les résultats des analyses agronomiques, notamment celle de la répartition granulométrique, la Conductivité Electrique (CE) et la teneur en Calcaire ( $CaCO_3$ ). Vu l'objectif de la valorisation, comme un amendement physique, afin d'améliorer la structure du sol saharien qui présente une texture sableuse et/ou de ces qualités fertilisantes. On peut conclure que les sédiments du barrage Djorf-Torba présentent un intérêt agronomique et ne portent pas atteintes à la santé et/ou à l'environnement. En conséquence, les spécifications normatives sont satisfaites pour une valorisation agricole.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

### V.5.3 Caractérisations des sols agricoles de la plaine d'Abadla.

La plaine d'Abadla d'une superficie de 5400 ha est conçue en partie par des grands projets de développement de l'agriculture menés par l'Etat algérien. Après plusieurs décennies d'exploitation de ces terres, on a recensé qu'une bonne partie des terres n'est plus cultivée (plus de 50% des terres), à cause de leurs dégradations très avancées. Parmi les causes de cette dégradation, il y a lieu de noter l'évolution en permanence du taux de salinité. Cette augmentation continue de la salinité a obligé certains agriculteurs à abandonner leurs terres [INSID, 1998]. La salinité constitue l'un des phénomènes de dégradation les plus remarquables, il évolue et progresse sans cesse du fait de la combinaison de plusieurs facteurs, notamment la détérioration et parfois carrément la destruction des réseaux de drainage.

Devant cette situation et dans le but de permettre la prise en charge de la problématique de la dégradation des terres agricoles dans ce périmètre, la Direction des Services Agricoles (DSA) et l'INSID ont convenu ( dans le cadre de l'instruction ministérielle n°467 du 07/10/1998 ) de mener une campagne de mesures et de diagnostic en vue de caractériser l'état actuel de la salinité et d'évaluer l'état physique du périmètre irrigué d'Abadla, et aussi de proposer des solutions de correction et d'amélioration.

- **Prélèvements des échantillons.**

La série de prélèvement des échantillons a été réalisée en Janvier 2021. Les échantillons étudiés ont été prélevés en deux sites différents au niveau de la plaine d'Abadla. Le Tableau V-4 montre les coordonnées UTM des points de prélèvements, et la Figure V.8 montre aussi son implantation sur la plaine d'Abadla.

On précise que les premiers échantillons du point (P6-1) ont été enlevés dans le site 01 (El Djorf Elbarda), par contre le deuxième échantillon du site 02 (Erg Ferradj) a été réalisé au point (P6-2).

*Tableau V-4 : Les coordonnées UTM des prélèvements de la plaine d'Abadla.*

N° Point/Site	X	Y
P6-1- de Site El Djorf Elbarda	519958.07	3446097.25
P6-2 de Site Erg Ferradj	520912.34	3433541.41

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

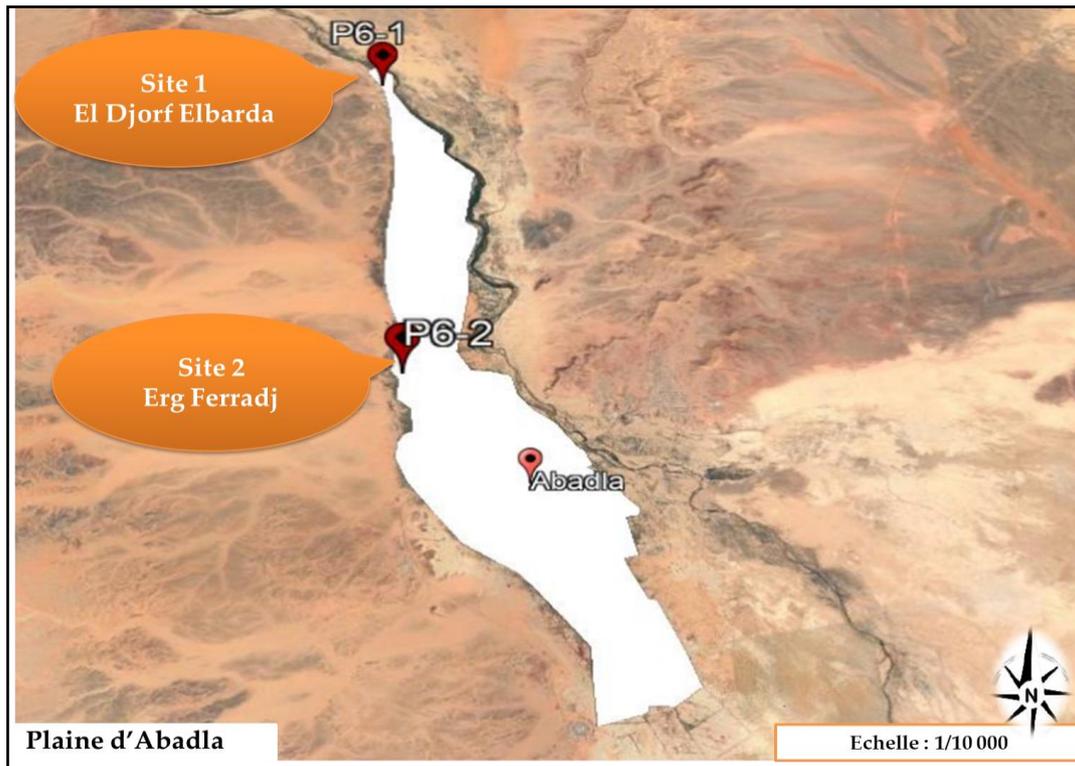


Fig. V -8 : Implantation des points de prélèvement au niveau de la plaine d'Abadla.

Les échantillons étudiés sont prélevés à l'aide d'une pelle manuelle sur une profondeur moyenne de 60 cm (voir Tableau V-5). Ces échantillons ont été conditionnés dans des sachets en plastique, il est préférable que la durée de conservation ne dépasse pas les 4 jours. Par la suite, ces deux prélèvements ont été mélangés pour constituer un échantillon moyen représentatif du sol en place.

Tableau V-5 : Classes d'appréciation de la profondeur du sol en cm en fonction du groupe cultural (INSID).

Désignation	Très faible	Faible	Moyenne	Satisfaisant	Très Satisfaisant
Céréale et pâturage	<10	10 - 20	20 - 50	50 - 90	>90
Culture annuelle de tubercules	<20	20 - 40	40 - 60	60 - 90	>90
Plantes pérennes à enracinement profond	<30	30 - 60	60 - 90	90 - 150	>150

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

- **Préparation des échantillons.**

Selon le protocole de la préparation, les échantillons des sols agricoles obtenus subissent une étape de séchage dans une salle avec une température ambiante de l'ordre de 30°C (Voir Photo V-2) ; ceci dans le but d'éviter et de modifier les caractéristiques minéralogiques et aussi dans le but de conserver la matière organique. À la fin du séchage, les sédiments sont sous forme de mottes, qu'il est nécessaire de les fragmenter et de les tamiser à 2 mm afin d'obtenir une classe granulaire de 0/2 mm. Sachant que le protocole adopté dans la phase préparation des échantillons, doit être conforme aux normes en vigueur de chaque essai.



*Photo IV-2 : La nature des sols agricoles prélevés au niveau de la plaine d'Abadla.*

- **Résultats des caractérisations.**

La caractérisation des sols de la plaine d'Abadla a été réalisée en collaboration avec le Laboratoire de l'Institut National du Sol, de l'Irrigation et du Drainage (INSID), spécialisé dans ce type d'analyses. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau V-6.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

Tableau V-6 : Synthèse des caractéristiques des sols agricoles de la plaine d'Abadla.

Désignation	P6-1*	P6-2**	Valeur Souhaitée
Fraction argileuse « A » (%)	03,49	8,22	20 - 25
Fraction limoneuse « L = Lf + lg » (%)	09,52	18,61	30 - 35
Fraction sableuse « S = Sf + Sg » (%)	86,99	73,17	40 - 45
Calcaire total (CaCO <sub>3</sub> ) (%)	29,20	24,40	< 20
Calcaire actif (CaCO <sub>3</sub> ) (%)	11,00	10,50	<5
Phosphore assimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (ppm)	60,00	97,15	>120
pHeau (1/2,5)	8,14	8,37	6,5 – 7,5
Conductivité électrique 1/5 (ms/cm)	4,27	2,31	<0,6
Matière organique (%)	0,86	0,34	3 - 6
Gypse total (CaSO <sub>4</sub> ) (%)	0,01	0,51	-
Sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (meq/L)	0,20	0,68	-
Chlorure (Cl <sup>-</sup> ) (meq/L)	0,017	0,004	-
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (meq/L)	0,005	0,003	-
CEC (meq/100g)	7,50	7,10	>9

P6-1\* : Echantillon prélevé au niveau de site 01 (El Djorf Elbarda).

P6-2\*\* : Echantillon prélevé au niveau de site 02 (Erg Ferradj).

L'interprétation des résultats a permis de définir les conclusions suivantes :

- Suivant les résultats qu'on a trouvé à travers l'analyse granulométrique, on peut dire que les sols agricoles de la plaine d'Abadla sont sableux, selon que les dimensions de plus 75 % de la masse de l'échantillon analysée représente la fraction sableuse. Par contre, concernant la fraction argileuse on a un pourcentage qui ne dépasse pas les 8 %, pour une valeur souhaitable qui doit varier entre 20 à 25%, le pourcentage de la fraction limoneuse varie entre 10 à 19%, sachant que la valeur souhaitée doit être entre 30 à 35%.
- Les régions arides et semi-arides sont caractérisées par des sols avec un taux de calcaire élevé, soit pour le calcaire total ou pour le calcaire actif ; ainsi que la salinité qui représente l'un des problèmes majeurs. Le calcaire et la salinité réduisent la productivité agricole et entraînent une réduction importante des superficies cultivées. Selon les résultats obtenus dans notre cas, nous avons un sol fortement calcaire (%CaCO<sub>3</sub> total>25% ; %CaCO<sub>3</sub> actif>5%).
- Selon la classe de salure, notre sol varie de salé à très salé, car la conductivité électrique se situe entre 2.31 pour P6-2 et 4,27 ms/cm pour P6-1, sachant que la valeur souhaitée doit être inférieure à 0,6.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

---

- Naturellement, les sols les plus acides sont rencontrés sous des climats chauds et humides. Les sols neutres ou alcalins se rencontrent sous des climats secs (pas de perte d'alcalinité). En forêt, les dépôts atmosphériques acides ou alcalins peuvent accélérer l'acidification du sol. Dans notre cas, on remarque que les valeurs du pH sont supérieures à 7, dans ce cas les échantillons analysés sont basiques.
- Le carbone organique du sol principal constituant les matières organiques est une préoccupation d'intérêt majeur en raison des enjeux agronomiques (fertilité physique, chimique et biologique des sols) et environnementaux. Dans notre cas, nous remarquons que les échantillons des sols analysés montrent qu'on a des sols de type peu ou pas organiques.
- Selon le taux des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) constaté dans le tableau ci-dessus V-6, notre sol est caractérisé par une agressivité faible, ce résultat est favorable pour éviter les impacts négatifs lors de la valorisation de ces sédiments soit à court ou à long terme. Par ailleurs, le taux de Gypse total ( $\text{CaSO}_4$ ) est pratiquement négligeable, il varie entre 0,01 à 0,51%.
- Afin d'apprécier la disponibilité des éléments essentiels à la plante (Calcium  $\text{Ca}^{2+}$ , Potassium  $\text{K}^+$ , ion hydrogène  $\text{H}^+$ , Sodium  $\text{Na}^+$  ...etc.), on détermine la Capacité d'Echange Cationique, sachant que sa valeur est liée aux quantités d'argile et de la Matière Organique qu'il contient. Dans notre cas, la CEC des sols agricole de la plaine d'Abadla varient entre 7,10 à 7,50%, ces valeurs restent très faibles par rapport à ce qui est exigé dans les normes (valeur souhaitable >9%).
- Selon les résultats obtenus et les normes en vigueur, nous pouvons dire que ce sol est de texture sableuse, donc la rétention en eau est pratiquement faible. Le pH basique est nécessaire à un apport de la matière organique pour acidifier le sol. Concernant le pourcentage de calcaire, notre sol est fortement calcaire d'où il y a risque de chlorose (blocage d'assimilation du Fer et Mn). Les sols agricoles de la plaine d'Abadla sont pauvres en matière organique d'une part et le taux du phosphore faible d'autre part ; dans ce cas il est nécessaire d'apporter du fumier d'entretien et la fumure de redressement et/ou d'engrais vert afin d'enrichir le sol.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

---

### V.6 Étude des formulations : sédiment - sol agricole.

Un effet amendant par l'amélioration des sols dépend d'un nombre conséquent de paramètres qui sont interdépendants. Cette technique est définie par trois composantes physiques essentielles (granulométrie, capacité de rétention en eau, ...) et/ou chimiques (pH, capacité d'échange cationique, ...) et/ou biologiques (biomasse, azote ...). Un équilibre optimal des composantes du sol permet un jugement global de la valeur sur la qualité d'un milieu.

Dans notre cas, l'application des sédiments en amendements agricoles doit cibler les caractéristiques physiques, particulièrement pour augmenter la capacité de rétention en eau des sols et par la correction granulométrique de la texture. On s'intéresse à identifier le processus nécessaire pour traiter et remédier de manière plus efficace et satisfaisante les sols sableux et salins de la plaine d'Abadla. La suite de nos travaux de recherche consistent à étudier les différentes formulations (sédiments - sols agricoles) à l'échelle du laboratoire, puis par la suite on détermine la combinaison optimale qui donne les meilleurs résultats sur le terrain.

#### V.6.1 Protocole d'application.

L'étude des paramètres influençant le comportement des sédiments ainsi que les sols agricoles dans les différentes formulations, permet de définir la formulation optimale qui présente la potentielle d'utilisation des sédiments. En conséquence, les formulations ciblées doivent permettre d'obtenir un produit conforme à la réglementation en vigueur. En effet tout un programme a été élaboré en collaboration avec les encadreurs et l'équipe de l'INSID, en conséquence les essais ont été réalisés à l'INSID d'Adrar et celle de Matemar. Les essais ont été élaborés à différents ratios de sédiments du barrage Djorf-Torba avec le sol de la plaine d'Abadla (Tableau V-7), à savoir :

- 10%P4 (Ratio 04/40) : apport de 04 cm de sédiments sur 40 cm de sol cultivé ;
- 30%P4 (Ratio 12/40) : apport de 12 cm de sédiments sur 40 cm de sol cultivé ;
- 50%P4 (Ratio 20/40) : apport de 20 cm de sédiments sur 40 cm de sol cultivé ;
- 70%P4 (Ratio 28/40) : apport de 28 cm de sédiments sur 40 cm de sol cultivé.
- 90%P4 (Ratio 36/40) : apport de 36 cm de sédiments sur 40 cm de sol cultivé.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

Tableau V-7 : Les différentes formulations adoptées.

Ratio	04/40	12/40	20/40	28/40	36/40
Sédiments du barrage Djorf-Torba (%P4)	10	30	50	70	90
Sol agricole de la plaine d'Abadla (%P6)	90	70	50	30	10
Nomination	10P4	30P4	50P4	70P4	90P4

Afin d'avoir un état homogène au niveau du matériau, nous avons utilisé un malaxeur pour mélanger les produits. Chaque élément est ajouté par ordre dans le malaxeur, pendant cette phase une quantité d'eau est nécessaire pour humidifier le mélange. Puis les mélanges sol agricole-sédiments sont retirés du malaxeur et conservés dans des sacs en plastique (Voir Photo V-3).



Photo IV-3 : La nature des sols agricoles prélevés au niveau de la plaine d'Abadla.

- **N.B.** : Les autres modalités liées à la préparation des échantillons demeurent applicables tant qu'elles ne sont pas contraires aux dispositions réglementaires contenues dans cet axe de valorisation (étude des formulations : sédiment - sol agricole). Sauf en cas de différence, on doit se conformer aux normes en vigueur de chaque essai.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

### V.6.2 Evaluation des formulations étudiées.

Selon le type de la valorisation envisagée des sédiments, les propriétés recherchées diffèrent. En conséquence, les paramètres peuvent être interprétés différemment. Concernant les amendements physiques, la caractérisation permet de par la connaissance des paramètres à améliorer, de les ajuster et de déterminer d'éventuels apports de matériaux pour obtenir un substrat fertile. Dans notre cas, et selon les résultats des analyses sur les sols agricoles de la plaine d'Abadla, nous pourrions intervenir pour rectifier le facteur défaillant. A cet effet, la correction granulométrique de la texture est le paramètre ciblé, ceci dans le but d'augmenter la capacité de rétention en eau.

Dans ce contexte, la première étape la plus importante est la détermination des propriétés physiques. En effet, le premier caractère qui sera testé pour les différentes formulations est celle de la distribution granulaire. Cette méthodologie est justifiée par l'influence de la texture d'un sol (pourcentage d'argile, limon et sable) sur l'ensemble des paramètres physiques et chimiques qui interfèrent sur les composants du sol (Voir Figure V.9).

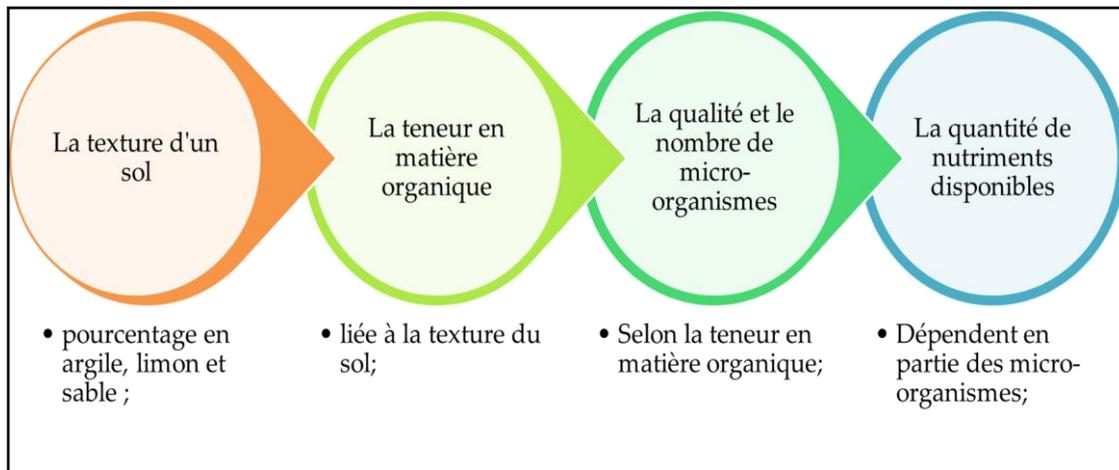


Fig. V -9 : Les différents équilibres dans les sols agricoles.

#### • Résultats de l'analyse granulométrique.

En agronomie, on considère généralement les trois principales classes : les argiles, les limons et les sables, chacune de ces catégories à un comportement physique différent. Pour déterminer ces classifications, l'analyse granulométrique est la méthode la plus utilisée. Le Tableau V-8 et la Figure V.10 synthétise les résultats des caractérisations granulométriques réalisées sur les différentes formulations.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

Tableau V-8 : Résultats d'analyse granulométrique des différentes formulations.

Désignation	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
MIN	20	30	40
MAX	25	35	50
P6 (témoin)	8,22	18,61	73,17
P4 (ajouté)	30,66	44,14	25,20
90P6 + 10P4	11,59	30,14	58,27
70P6 + 30P4	19,87	35,39	44,74
50P6 + 50P4	21,50	44,97	33,53
30P6 + 70P4	25,41	46,16	28,43
10P6 + 90P4	29,75	49,82	20,43

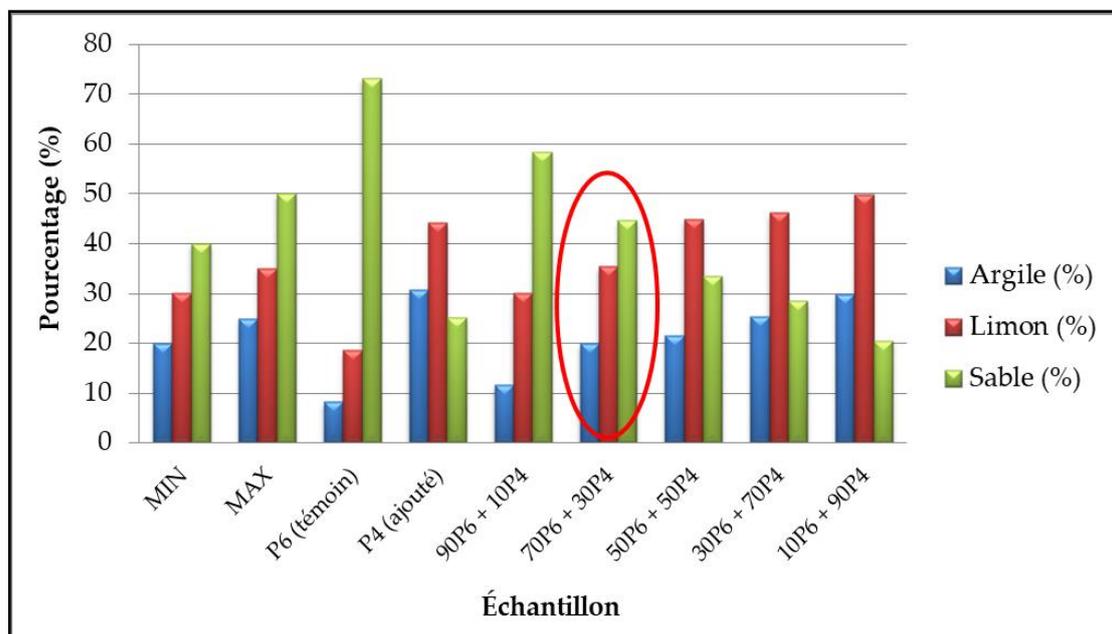


Fig. V -10 : Analyse granulométrique des différentes formulations.

L'interprétation la plus immédiate est la détermination de la classe de texture. En conséquence on choisit le référentiel le plus courant, à savoir le triangle de texture du G.E.P.P.A (Groupe d'Etudes des Problèmes de Pédologie Appliquée). Seize (16) classes sont proposées, ils sont réunis en 3 groupes à dominance argileuse, limoneuse ou sableuse. La classe texturale de l'échantillon analysé est déterminée en fonction du positionnement des valeurs en argile et limon totaux (voir Figure V.11).

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

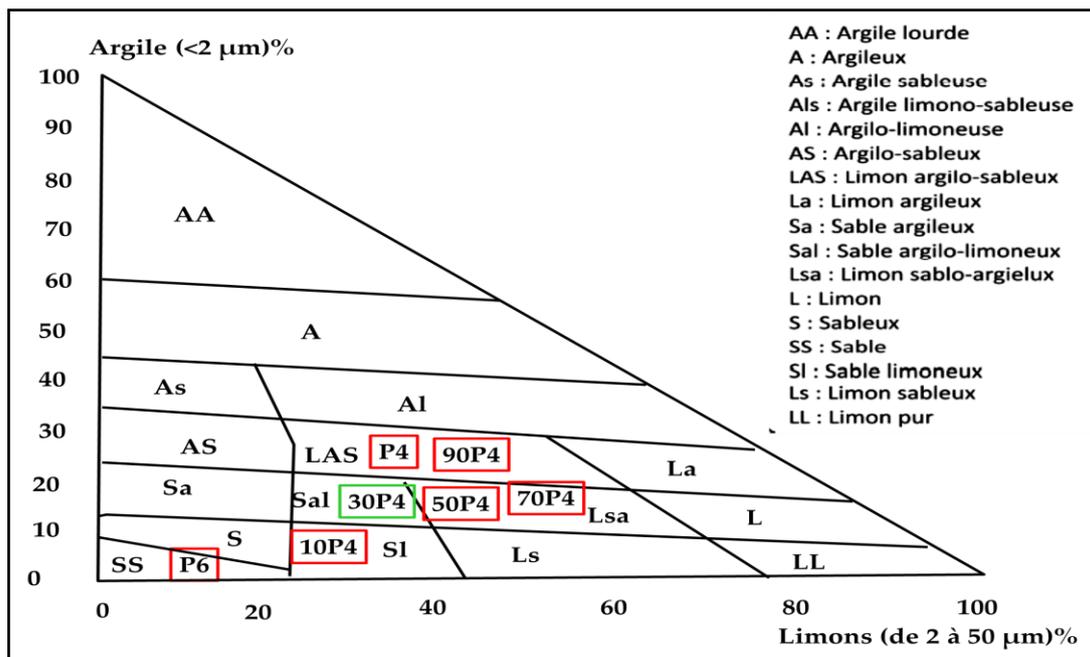


Fig. V -11 : La classe de texture des différentes formulations selon G.E.P.P.A.

D'après les résultats présentés dans le Tableau V-8 et la Figure V.10, en tenant compte aussi de la classe de texture vis-à-vis du triangle du G.E.P.P.A. ; les principales conclusions de cette analyse sont les suivantes :

- Pour un épandage de 4 cm (10P4), la potentialité de rectifier le facteur défaillant est pratiquement négligeable, il n'y a pas d'influence importante des sédiments, sachant que cette formule de 10P4 est de la classe « **Sl** ; Sable limoneux » pour une classe « **S** ; Sableux » de sol ciblé (P6) ;
- L'augmentation du ratio sédiments/sol entraîne une potentielle de correction granulométrique plus importante, notamment celle de la deuxième composition (70%P6 + 30%P4). Le taux d'argile constaté est estimé à 19,87% pour une fourchette qui varie de 20 à 25%. Par contre, le taux de limon est égale à 35,39% pour une fourchette qui varie de 30 à 35%. Tandis que, la fraction sableuse représente 44,74% de mélange, et ceci pour une fourchette de 40 à 50%. En finalité, ces résultats permettent de se positionner à la formule P30 et de se classer dans la zone souhaitée comme « **Sal** ; Sable argilo-limoneux » ;
- Le reste des formules 50P4 ; 70P4 ; 90P4 donnent des résultats complètement hors de la fourchette recommandée, notamment celles de 70P4 et 90P4 ; avec une classe de texture qui varie entre « **Lsa** ; Limon sablo-argilo » et « **LAS** ; Limon argilo-sableux ».

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

Afin d'optimiser les pratiques agricoles, il convient donc de prendre en compte le pourcentage d'argiles, de limons et de sables dans le sol. C'est pour cela que la notion de texture du sol entre en jeu lors d'une analyse de sol. Dans notre cas, selon les résultats obtenus par les analyses granulométriques effectuées sur les différentes compositions et aussi sur les échantillons brutes de P6 (sol agricole), P4 (sédiment), on conclut que l'ensemble des formules varient de sol type « S1 ; Sable limoneux » à sol du type « LAS ; Limon argilo-sableux ». Sachant que les sols les plus sableux risquent davantage de s'assécher (cas de P6 et 10P4), tandis que les sols les plus limoneux ou argileux ont tendance à se compacter et à former une croûte, ce qui augmente les risques de mauvais drainage et d'érosion hydrique (le cas de 50P4 ; 70P4 et 90P4). En conséquence, les spécifications normatives sont satisfaites par la composition 30P4 de classe « Sa1 ; Sable argilo-limoneux », qui représente la formulation le plus recommandé.

- **Variation de la capacité de rétention en eau (coefficient de perméabilité).**

Bien que la texture nous informe sur le potentiel de fertilité d'un sol, mais aussi d'autres propriétés physiques sont pratiquement liées à la texture, notamment la perméabilité et la rétention en eau. Sachant que la variation de la capacité de rétention en eau est fortement liée aux changements du coefficient de perméabilité. Dans notre cas, l'évaluation de la capacité de rétention en eau pour les différentes formulations est basée sur le calcul de coefficient de perméabilité (K). Les essais ont été réalisés avec un perméamétrie à charge constante (Voir Photo V-4), avec des teneurs en eau initiales qui sont pratiquement les mêmes pour l'ensemble des mélanges (la teneur en eau varie entre 10 et 12%). Les résultats sont présentés sur la Figure V.12.

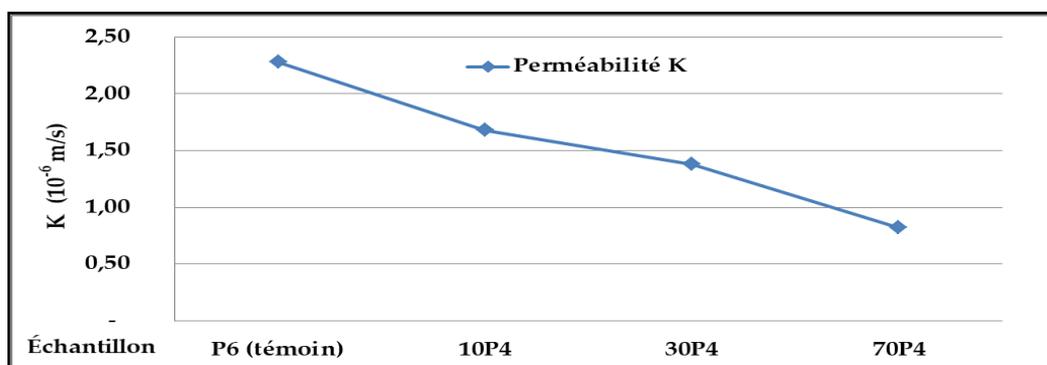


Figure V-12 : Variation de coefficient de perméabilité pour les différentes formulations.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.



Photo V-4 : Essais de perméabilité (Laboratoire : LTPE-Sétif ; Février 2021).

D'après les résultats présentés sur la figure ci-dessus, les coefficients de perméabilité (K) sont de plus en plus faibles pour des pourcentages des sédiments élevés. L'évolution de k en fonction des différentes formulations est quasiment linéaire et inversement proportionnelle au pourcentage des sédiments.

Dans l'ensemble, on peut dire que le changement des valeurs de perméabilité est très acceptable, il se situe de  $0,28 \cdot 10^{-6}$  m/s pour la formule 70P4 jusqu'à  $1,86 \cdot 10^{-6}$  m/s pour la composition 10P4, sachant que la valeur de l'échantillon témoin P6 est de l'ordre de  $2,28 \cdot 10^{-6}$  m/s.

A partir de la nature de la texture et la valeur du coefficient de la perméabilité (k), il est possible de déterminer une classification de la perméabilité (k). Le Tableau V-9 donne des ordres de grandeur selon la nature de sol.

Tableau V-9 : classification de perméabilité selon la nature de sol [ANGER, 2014].

Perméabilité K (m/s)	$10^{-4} - 10^{-6}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-8} - 10^{-10}$
Nature de texture	Sable	Limon	Argile
Classe de perméabilité	Forte	Modérée	Faible

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

La limite inférieure du fuseau dans lequel s'insèrent les perméabilités, concerne la formule 70P4, alors que la limite supérieure intéresse les deux échantillons les plus grossiers (P6-Témoin et 10P4). Cependant la perméabilité de l'ensemble des formules est caractérisée par une classe modérée, qui est en accord avec les résultats de l'analyse granulométrique.

Les résultats des coefficients de perméabilité sont directement liés à la capacité de rétention en eau de sol. Sachant que plus la valeur de la perméabilité est faible, plus la capacité de rétention d'eau d'un sol est élevée, et plus sa capacité d'échange cationique est importante. Ceci est fortement recommandé dans les sols agricoles, mais dans le cadre des valeurs minimales et maximales (compte tenu des valeurs des normes en vigueur). Les argiles permettent une bonne rétention de l'eau dans le sol, mais elles sont mal aérées, mal drainés et alcalins (acides), elles sont aussi difficiles à l'exécution car elles se compactent facilement (cas de 50P4 et 70P4). Tandis que les sables retiennent peu l'eau et sont peu fertiles (P6 et 10P6). En conséquence, la formule appropriée doit se situer entre une texture sableuse et argileuse, ce qui correspond à la formule choisie (30P4).

- **Évolution des Caractéristiques physico-chimiques**

La sélection d'un mélange approprié est basée sur une réponse acceptable des végétaux pour un rapport économiquement faisable des sédiments de dragage et d'autres matériaux si nécessaire. A cet effet, une caractéristique physico-chimique a été effectuée sur la formule choisie (30P4). Les valeurs présentées dans le Tableau V-10 sont la moyenne des deux essais par le paramètre mesuré.

Tableau V-10 : Propriétés physico-chimiques de la formule choisie (30P4).

Désignation	30P4 (ZD)	30P4 (VF)	La norme
Calcaire total (CaCO <sub>3</sub> ) (%)	20,00	21,25	< 20
Calcaire actif (CaCO <sub>3</sub> ) (%)	4,00	5,50	<5
Phosphore assimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (ppm)	100,00	67,23	>120
pHeau (1/2,5)	7,76	7,80	6,5 – 7,5
Conductivité électrique 1/5 (ms/cm)	0,67	0,75	<0,6
Matière organique (MO) (%)	1,03	0,54	3 - 6
Gypse total (CaSO <sub>4</sub> ) (%)	0,10	0,20	-
Sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (meq/L)	0,77	1,07	-
Chlorure (Cl <sup>-</sup> ) (meq/L)	0,22	0,30	-
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (meq/L)	0,17	0,22	-
CEC (meq/100g)	-	-	>9

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

Les résultats des analyses agronomiques montrent que les spécifications normatives sont satisfaites par la formule étudiés (30P4), notamment pour les paramètres liés à la réserve minérale (%Calcaire total ; %Calcaire actif ; %Gypse total), et aussi celle de solution du sol (pHeau ; CE ; Sulfate ; Chlorure ; Bicarbonate). Sauf leurs teneurs en matière organique qui sont trop faible pour répondre aux critères des normes en vigueur. En effet, du compost est ajouté (il est recommandé que le matériau ajouté soit présent localement). La quantité de compost est variable Selon le pourcentage d'argile constitue dans la formulation (voir Tableau V-11). Dans notre cas, le pourcentage d'argile dans la formule 30P4 varie entre 15 et 20%, cela signifie que le taux souhaitable de la matière organique est compris entre 2 et 2,5%.

Tableau V-11 : Normes d'interprétation de la matière organique (source : INSID).

Taux d'argile en %	Taux souhaitable de la M.O en %
<10	3 – 3,5
10 - 15	2,5 - 3
15 - 20	2 – 2,5
20 - 25	2,5
25 – 30	2,5 - 3
>30	3 – 3,5

Le mélange qui a donné les meilleures caractéristiques contient 30 % de sédiments du barrage Djorf-Torba et 70 % de sol agricole de la plaine d'Abadla, auxquels du compost est ajouté pour obtenir une teneur en M.O qui varie entre 2 et 2,5%.

La M.O a un rôle primordial dans le comportement global du sol, et ceci vis-à-vis de la qualité physique du sol, elle est le liant des particules minérales (argiles, limons et sables) à travers le complexe argilo-humique (un véritable réservoir d'éléments nutritifs pour la culture). De ce fait, la MO participe à la qualité de la structure du sol et à sa stabilité au regard des agressions extérieures (pluie, pression ou les charges entraînée par le passage d'engins agricoles...). La M.O assure aussi le stockage et la mise à disposition pour la plante, par minéralisation des éléments dont elle a besoin. Enfin, la MO du sol stimule l'activité biologique de celui-ci.

Des planches d'essais seront décrites dans le but de déterminer les ratios les plus productifs du mélange des sédiments de dragage et les sols agricoles de la plaine d'Abadla. Il s'agit aussi d'évaluer la durabilité du système « sédiment-sol agricole » en mesurant les évolutions des caractéristiques agronomiques à court terme et à long terme.

## V/ Valorisation des sédiments du Djorf-Torba en amendement agricole.

---

### V.7 Conclusion.

L'application des sédiments de Djorf-Torba nous a orienté à développer un amendement physique pour la plaine d'Abadla. Sachant que ces terres agricoles souffrent de la faiblesse des précipitations, le caractère de la texture dans les régions arides qui sont pratiquement sableuses ; pauvres en matière nécessaire ; salins ; faible fertilité et aussi la fragilité des écosystèmes, ce qui entraîne des réductions inacceptables des rendements des terres agricoles.

D'un autre côté, les activités agricoles dans ces régions sont difficiles, elles nécessitent une expérience préalable et des précautions spécifiques. En conséquence, cette valorisation doit être techniquement et économiquement rentable et efficace, et ceci dans le but de répondre aux besoins de la société, respectueuse de l'environnement et faire un développement durable.

Sur le plan technique, les résultats montrent un intérêt réel de la valorisation des sédiments sous forme d'amendement agricole et la possibilité légale de tels épandages. A cet effet, les sédiments de Djorf-Torba peuvent améliorer la qualité des sols appauvris par l'exploitation agricole. Ils seront épandus sur les terres agricoles par refoulement hydraulique, sous forme d'un matériau solide, mais après une procédure de traitement. Ce traitement est une étape indispensable et doit faire l'objet de priorité, afin d'assurer son utilisation dans des conditions technico-économiques acceptables.

Cette filière de valorisation est intéressante par le faible nombre de moyens à mettre en œuvre. En effet, il n'y a pas d'importants procédés de traitements appliqués aux sédiments avant de les mettre en œuvre, seule une phase de décantation nécessaire pour augmenter la siccité des sédiments, et aussi par l'ajout d'un pourcentage en matière organique. On conclut que le coût de l'opération est relativement modéré, mais en doit confirmer cette particularité par une étude technico-économique.

La voie de la valorisation choisie doit être géographiquement proche du lieu d'extraction pour que le bénéfice économique lié à l'utilisation du matériau de substitution par rapport à des matériaux naturels ne soit pas excessif par le coût du transport.

***CONCLUSION GÉNÉRALE ET  
PERSPECTIVES.***

### I. Conclusion générale.

L'objectif de nos travaux de recherche a pour but d'étudier la valorisation des déchets-sédiments d'un cas réel de barrage envasé Djorf-Torba situé en région aride. On se propose d'utiliser les sédiments de ce barrage comme une source de matières premières dans une filière de valorisation potentielle, à savoir un amendement physique pour les terres agricoles de la plaine d'ABADLA.

Après avoir établi une fiche signalétique sur le barrage, une cartographie de l'érosion détaillée a été mise en évidence dans le but d'évaluer la capacité de stockage dans la retenue à long terme. L'importance de cette thèse est la caractérisation des sédiments d'envasement en plusieurs points de prélèvement de la retenue. A cet effet, un ensemble d'essais à l'échelle du laboratoire a été conduit sur les sédiments fins provenant de deux sites principaux en amont et en aval de la retenue. Ces différents essais ont permis d'établir les caractéristiques des sédiments et d'estimer leurs aptitudes à être employé dans la filière ciblée.

Une connaissance approfondie sur la problématique de l'envasement du barrage est indispensable. Dans ce contexte, la détermination des zones productrices des sédiments au niveau des différents sous bassins versants a permis d'établir un système de protection de notre ouvrage. Selon les résultats obtenus par l'application du logiciel ArcGIS, le barrage Djorf-Torba perd annuellement une capacité de 2,91 hm<sup>3</sup>.

Les sédiments fins du barrage Djorf-Torba ont fait l'objet de caractérisations «géotechniques» et aussi une étude dans le domaine «pédologique» en vue d'être valorisé. On a pu mettre en évidence des essais de caractérisation et des analyses sur la valorisation des sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba. En conséquence, plusieurs solutions sont envisageables, pratiquement la technique le plus rentable est la valorisation agronomique de ces matériaux sous la forme d'amendement agricole des sols sahariens (AASS), pour les terres agricoles de la plaine d'Abadla qui couvrent une superficie de 5400 hectares.

Les sédiments fins du barrage ont été employés comme une composante dans des mélanges avec d'autres matériaux couramment utilisés, notamment un amendement physique pour les sols agricoles. Les résultats des essais de valorisation confirment qu'il est possible d'utiliser les sédiments dragué du barrage.

A travers une recherche bibliographique approfondie, normes, guides techniques, les expériences menées au laboratoire et la prise en considération d'avis d'experts, une formulation optimale a été développée. Le mélange ayant donné les meilleures caractéristiques contient de 30 % des sédiments du barrage Djorf-Torba et 70% de sol agricole de la plaine d'Abadla, auxquels une teneur en matière organique sera ajoutée, avec un pourcentage qui varie entre 2 et 2,5%.

### II. Perspectives.

À partir de ces travaux, plusieurs axes de recherche et de développement peuvent être conduits. Ils regroupent plusieurs aspects :

- La réalisation des planches d'essais afin d'évaluer la durabilité du système « sédiment-sol agricole », en mesurant les évolutions des caractéristiques agronomiques à court terme et long terme.
- Amélioration et la validation de la formulation proposée, l'application se fait en collaboration avec les services locaux concernés, notamment la Direction des Services Agricoles (DSA) et le secteur économique.
- Elaboration d'un protocole expérimental, permettant l'application des résultats sur le terrain. Ainsi que les normes à suivre, soit pour l'identification et caractérisation des sédiments, ou bien pour les techniques de valorisation et les traitements à prendre en considération. Ceci dans le but d'obtenir une substance améliorée au niveau de la zone ciblée.
- Parmi les recommandations les plus convenues, l'encouragement des autorités supérieures de pays à valoriser les sédiments de dragage. Une étude sur l'intérêt et la faisabilité technico-économique de cet axe de valorisation est indispensable. Les éléments techniques mis en évidence par la présente étude indiquent que le projet de la valorisation des sédiments d'envasement du barrage Djorf-Torba en amendement physique pour les terres agricoles de la plaine d'ABADLA est techniquement faisable, et fortement rentable en termes de coût, cette particularité reste à confirmer par une étude technico-économique.
- Appliquer cette opportunité à l'échelle plus large, notamment dans les zones arides. En tenant compte de l'aspect économique et des normes techniques de chaque zone de réception.

***RÉFÉRENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES.***

### Références bibliographiques.

- ABDELGHANI FB., MAHEREZI W., BOUTOUI M., Caractérisation géotechnique des sédiments de dragage marins en vue de leur valorisation en techniques routières. 2014. Déchets Sciences et Techniques, vol. 66, p. 4-13.
- Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T). 2004. Levées bathymétriques des barrages en exploitation. Rapport sur le barrage de Djorf-Torba.
- Agence Nationale des Barrages et Transfert (A.N.B.T). 2020. Levées bathymétriques des barrages en exploitation. Rapport sur le barrage de Djorf-Torba.
- Agence Nationale des Barrages et Transfert ANBT., Barrage Djorf-Torba sur l'Oued Guir. 1985. Rapport (Monographie), 156 p.
- AÏT HSSAINE A., Éléments sur l'hydrologie de la partie atlasique de l'oued Guir (Maroc sud-oriental) et sur l'inondation catastrophique du 10 octobre 2008. 2014. Revue : Géographie Physique et Environnement, Vol 8, pp 337-354.
- ANBT et TECSULT., Étude de la protection des bassins versants de l'ensemble des barrages en études d'Avant-Projet Détaillé (lots nos 1 à 4) et des bassins versants des barrages en exploitation (lots no 5 et 6). 2005. Rapport d'expertise.
- ANGER B., Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière. 2014. Thèse de Doctorat. Université de Caen Basse-Normandie.
- BELKENDIL A., Étude de transport solide dans le bassin versant du Guir. 2014. Mémoire de Magistère en aménagement hydraulique, Université de Béchar, Algérie.
- BENASLA M., Caractérisation de la vase de dragage du barrage de l'Oued Fodda et valorisation en tant que matériau de construction. 2015. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- BENEDICTE D., La faisabilité de la valorisation des sédiments de dragage de l'estuaire de la Vilaine, une démarche territoriale. 2017. Thèse professionnelle (Formation Mastère Spécialisé en économie circulaire). Institution d'Aménagement de la Vilaine.
- BENHADDAD D., Evolution des grands barrages dans l'est algérien: quel devenir?. 2015. Mémoire de Magister en Hydraulique. Université Abderrahmane Mira-Bejaia.

- BENFETTA Hassan N., Perte de capacité dans les barrages situés dans les zones arides : Cas d'études: Gargar-Bouhanifia-Ouizert-Foum El Gherza. 2019. Éditions universitaires européennes.
- BENSAFIA D., Erosion et Sédimentation des barrages: perspectives et mise en œuvre de nouvelles formes d'ingénierie. 2016. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- BERKAL I., DJILI K. Création d'une base de données spatiale sur les sols du Sahara d'Algérie. Evaluation de divers scénarios en vue d'aide à la prise de décision. 2008. Colloque International sur l'Aridoculture (Optimisation des productions agricoles et développement durable)- Biskra.
- BOURABAH M A., Comportement mécanique des sols fins, application à la valorisation des sédiments de barrages en technique routière. 2012. Thèse de doctorat en sciences, Université de Tlemcen, Algérie.
- BRAHIM A., El Hafid D., Quantification De L'érosion Hydrique En Utilisant Le Modèle Rusle Et Déposition Intégrée Dans Un Sig. Cas Du Bassin Versant De L'oued Isly (Maroc Oriental). 2018. European Scientific Journal, vol. 14, no 5, p. 1857-7881.
- CHELLALI F., KHELLAF A., BELOUCHRANI A., RECIQUI A., A contribution in the actualization of wind map of Algeria. 2011. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no 2, p. 993-1002.
- COYNIE et BELLIER., Bureau d'ingénieurs conseils, Barrage Djorf-Torba sur l'Oued Guir. 1985. Rapport (Monographie) pour l'ANBT.
- DEGOUTTE G., Diagnostic, aménagement et gestion des rivières: hydraulique et morphologie fluviale appliquées. 2006. Ouvrage de l'Éditions Lavoisier.
- FRÉMION F., Dynamique des flux sédimentaires et des éléments métalliques en lien avec l'exploitation courante et exceptionnelle d'un barrage hydroélectrique. 2016. Thèse de Doctorat. Université de Limoges.
- GAROUANI A., MERZOUK A., Délimitation des zones de protection autour de la retenue du barrage Hachef (Maroc) par télédétection et SIG. 2006. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, vol. 19, no 1, p. 1-10.
- Groupe d'étude et d'observation sur le dragage et l'environnement (GEODE), Bonnes pratiques pour la caractérisation des matériaux en vue d'une opération de dragage et d'immersion en milieu marin et estuarien. 2016. Guide méthodologique.

- HJULSTROM F., Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river FYRIS. 1935. Bulletin Geological Institute Upsalsa, vol 25, p. 221-527.
- Institut National des Sols, de l'Irrigation et Drainage (INSID), Etude de caractérisation de l'état actuel de la salinité et d'évaluation de l'état physique du réseau de drainage au niveau du périmètre irrigué d'Abadla (Wilaya de Bechar). 1998. Rapport d'expertise.
- KABIR M., DUTTA D., HIRONAKA S., Process-based distributed modeling approach for analysis of sediment dynamics in a river basin.2011. Journal International Hydrology and Earth System Sciences (HESS), pp 1308-1321.
- KABOUR A., MEKKAOUI A., CHEBBAH L., Le barrage de Djorf Torba (Béchar, Sud-Ouest Algérien), sous contraintes du climat, de l'environnement et de gestion. 2016. International Journal for Environment & Global Climate Change, vol. 3, no 5, p. 23-32.
- KACI M., HABI M., MORSLI B., Estimation de l'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol (USLE). Cas du bassin versant non jaugé de l'oued Rhiou,(Bassin de Cheliff) Algérie. 2017. Geo-Eco-Trop, vol. 41, no 3, p. 503-518.
- KASSOUL M., ABDELGADER A., BELORGEY, M. Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. 1997. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, vol. 10, no 3, p. 339-358.
- KOEHL M., SIG, une histoire de définitions.... 2004. Revue XYZ, N° 101 – 4.
- KOUSSA M., et BOUZIANE M. T., Apport du SIG a la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans la région de Djelfa, Algérie. 2018. Lebanese Science Journal, vol. 19, no 1, p. 31-46.
- LUBKER M., Dynamique sédimentaire, érosion physique et altération chimique dans le système HIMALAYEN. 2011. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine.
- MAHERZI W, BENZERZOUR M, BEN ABDELGHANI F., Essais d'aptitude au traitement des sédiments de dragage marins en vue de leur valorisation en techniques routières. 2014. Déchets Sciences et Techniques, vol. 68, p. 16-22.
- MARKHI A., LAFTOUHI N E., SOULAIMANI A., FNIGUIRE F., Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG. application dans le bassin versant n'fis dans le haut atlas de Marrakech (Maroc). 2015. European Scientific Journal, vol. 11, no 29, p. 340-356.

- MEKERTA B., Étude des propriétés géomécaniques des sédiments d'envasement de la retenue du barrage de Génissiat. 1995. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- MEKIDECHE D., SAI N., TOUAT S., YOUNSI N., Carte hydrogéologique de la région de Béchar. 1995. Rapport interne, notice explicative, DHWB. Béchar, Algérie, p. 74.
- NANGIA V., WYMAR P., KLANG J., Evaluation of a GIS-based watershed modeling approach for sediment transport. 2010. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 3, no 3, p. 43-53.
- OUIDIR K., Barrages d'Ighil emda et Erraguene (Est Algérie) : Mécanismes et soutirages des sédiments. 2012. Mémoire de Magister en Hydraulique. Université Abderrahmane Mira-Bejaia.
- REMINI B., L'évaporation des lacs de barrages dans les régions arides et semi arides: exemples algériens. 2005. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, no 4.
- REMINI B., BENSAFIA D., Envasement des barrages dans les régions arides. Exemples algériens. 2016. Larhyss Journal, no 27, p. 63-90.
- REMINI B., HALLOUCHE W., Le dragage des retenues de barrages: quelques exemples algériens. 2004. Journal La houille blanche, vol. 90, no 5, p. 95-100.
- REMINI B., LEDUC C., HALLOUCHE W., Evolution des grands barrages en régions arides: quelques exemples algériens. 2009. Revue Sécheresse, vol. 1, no 20, p. 1-8.
- REMINI W., REMINI B., La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du Nord. 2003. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, no 2.
- ROLLET A.J., Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse de l'Ain. 2007. Thèse de Doctorat. Université Jean Moulin-Lyon III.
- ROOSE E., Georges. Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique: revue et perspectives. Science et changements planétaires/Sécheresse, 2004, vol. 15, no 1, p. 121-129.
- SEMCHA A., Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug. 2006. Thèse de Doctorat. Université de Reims.

- SERBAH B., Cartographie des sédiments de dragage des barrages de l'ouest Algérien: Une solution de valorisation en BTC. 2018. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid.
- SERHAL S., Etude des propriétés de structuration de matériaux mixtes et fins. Application à l'envasement des systèmes naturels. 2017. Thèse de doctorat en Génie Civil. Rennes, INSA.
- TOUMI S., MEDDI M., MAHÉ G., BROU Y. T., Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. 2013. Hydrological sciences journal, vol. 58, no 7, p. 1542-1558.
- TADRIST N., DEBAUCHE O., Impact de l'érosion sur l'envasement des barrages, la recharge des nappes phréatiques côtières et les intrusions marines dans la zone semi-aride méditerranéenne: cas du barrage de Boukourdane (Algérie). 2016. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, vol. 20, no 4, p. 453-467.
- ZAOUI L., Apports de la Télédétection Satellitaire dans le Suivi de l'évolution Spatio-Temporelle des sables dunaires. 2018. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed BOUDIAF, USTO-MB, Algérie.

***ANNEXE.***

# Annexe





- Les photos prises pendant les diverses visites au barrage Djorf-Torba (en 2017 ; 2018 ; 2020 et en 2021).