

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر

UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR



Faculté de technologie

Département de génie civil et de l'hydraulique

PROJET DE FIN DE CYCLE

Présenté pour l'obtention du diplôme de master en hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

Titre :

**LA QUANTIFICATION DE LA MATIERE SOLIDE DANS L'OUED MEKERRA
- BASSIN DE LA MACTA -**

Présenté par :

KHODJA Nouredine Mahmoud

SOLTANI Mohamed Abdelali

Soutenu le 28 / 09 / 2022, devant le jury composé de :

Mme KIES Souad..... Présidente

Mme DIAF MeriemEncadreur

Mme ZAÏRI SouadExaminatrice

Année universitaire 2021/2022

TABLE DES MATIERES

Remerciements	Page 01
Résumé	Page 02
Liste des figures	Page 04
Liste des tableaux	Page 06
Liste des abréviations	Page 07
Introduction générale	Page 08

CHAPITRE 1 PROBLEME HYDRIQUE MONDIAL

1-1 : Introduction	Page 09
1-2 : Les zones arides	Page 09
1-2-1 : Les déserts de la zone intertropicale.....	Page 10
1-2-2 : Les déserts continentaux.....	Page 11
1-2-3 : Les déserts centraux.....	Page 11
1-2-4 : Les déserts côtiers	Page 11
1-2-5 : Les déserts d'abri.....	Page 11
1-2-6 : Les déserts polaires.....	Page 11
1-3 : Pénuries d'eau dans le monde	Page 13
1-3-1 : Surexploitation des eaux souterraines.....	Page 13
1-3-2 : Insuffisance de l'accès à l'eau potable.....	Page 14
1-4 : Le partage de l'eau	Page 14
1-4-1 : Les régions à risque.....	Page 15
1-5 : Conclusion	Page 16

CHAPITRE 2 GENERALITES SUR LES EFFETS D'EROSION DES OUEDS DE L'OUEST EN ALGERIE.

2-1 : Introduction	Page 17
2-2 : Description générale de l'Algérie du Nord	Page 17
2-3 : Conséquences de l'érosion hydrique en Algérie du Nord	Page 18
2-4 : Envasement des barrages	Page 19
2-5 : Conclusion	Page 19

CHAPITRE 3 PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MEKERRA

3-1 : Introduction	Page 20
3-2 : Bassin versant de l'oued Mekerra	Page 20
3-2-1 : Localisation géographique.....	Page 20
3-2-2 : Cadre morphométrique	Page 21
3-2-2-1 : Caractéristiques de la forme.....	Page 21
3-2-2-2 : Surface et périmètre.....	Page 21
3-2-2-3 : Indice de compacité de Graveillus (Kc).....	Page 22
3-2-2-4 : Rectangle équivalent.....	Page 22
3-2-3 : Etude du relief.....	Page 23
3-2-3-1 : Courbe hypsométrique.....	Page 23

3.2.3.2. Différents types d'altitudes.....	Page 24
3.2.3.3. Indices de pentes.....	Page 25
3.2.3.4. Dénivelée spécifique.....	Page 26
3.3. Cadre géologique.....	Page 27
3.3.1. Étude litho stratigraphique.....	Page 27
3.3.1.1. Le Mésozoïque.....	Page 27
3.3.1.2. Le Cénozoïque.....	Page 28
3.3.1.3. Le Plio- quaternaire.....	Page 29
3.3.1.4. Le Quaternaire.....	Page 29
3.3.2. Tectonique.....	Page 30
3.4. Données climatiques	Page 30
3.4.1. Précipitations.....	Page 31
3.4.2. Températures.....	Page 32
3.4.3. Synthèse climatique.....	Page 33
3.4.4. Autres paramètres climatiques.....	Page 35
3.5. Aperçu phyto-pédologique.....	Page 36
3.5.1. Couvert végétal.....	Page 36
3.5.2. Pédologie.....	Page 36
3.6. Hydrographie.....	Page 37
3.7. Aperçu hydrogéologique.....	Page 37
3.8. Conclusion.....	Page 38

CHAPITRE 4 CALCUL ET EVALUATION DE L'EROSION

A- PARTIE THEORIQUE :

4-1 : Introduction :	Page 39
4-2 : Causes de l'érosion des sols :	Page 39
4-3 : Erosion des sols :	Page 40
4-3-1 : Définition :	Page 40
4-3-2 : Différents types d'érosion en Afrique du Nord :.....	Page 40
4-3-3 : Différentes phases de l'érosion :.....	Page 41
4-4 : Causes de l'érosion hydrique en Algérie.....	Page 41
4-4-1 : Evolution de l'érosion hydrique :	Page 41
4-4-2 : Principaux agents de l'érosion hydrique :.....	Page 42
4-4-3 : Intensité et agressivité des précipitations :.....	Page 42
4-4-4 : Le ruissellement :.....	Page 42
a- Théorie de Horton (1945) : L'intensité de la pluie > l'infiltration :.....	Page 42
b- Théorie de la saturation du milieu :.....	Page 43
c- Théorie de la contribution partielle de la surface du bassin au ruissellement	Page 43
4-5 : Formes de manifestation de l'érosion hydrique :.....	Page 43
4-5-1 : Erosion en nappe :.....	Page 44
4-5-2 : Erosion en griffes et rigoles :	Page 44
4-5-3 : Erosion par ravinement :.....	Page 44
4 -6 : Quantification de l'érosion hydrique :.....	Page 47
1° Formule de WISCHMEIER et SMITH (1978) :	Page 47
2° Formule de FOURNIER (1960) :	Page 48
3° Formule de TIXERONT (1960) :	Page 48
4° Formule de SOGREAH (1969) :.....	Page 48

B – PARTIE PRATIQUE

4-7 : Définition de l'hydrométrie :	Page 50
4-8 : Débit liquide	Page 50
4-8-1 : Définition	Page 50
4-8-2 : But des observations :	Page 50
4-8-3 : Méthodes pour déterminer le débit liquide :	Page 51
4-8-4 : Calcul du débit liquide :	Page 51
4-8-5 : Mesures du débit liquide :	Page 51
4-9 : Débit solide :	Page 53
4-9-1 : Généralités :	Page 53
4-9-2 : Définition :	Page 56
4-9-3 : But des observations :	Page 56
4-9-4 : Calcul du débit solide en suspension :	Page 57
4-9-5 : Calcul des apports solides totaux :	Page 57
4-9-6 : Les apports annuels :	Page 57
4-9-7 : Précipitations annuelles	Page 59
4-9-8 : Exploitation des résultats	Page 65
4-9-9 : Interprétation	Page 65
4-10 : Conclusion :	Page 66

CHAPITRE 5 LUTTE CONTRE L'EROSION

5-1 : Introduction	Page 67
5-2 : Lutte contre l'érosion éolienne	Page 67
5-2-1 : Réduire la vitesse du vent à la surface des sols	Page 69
5-2-2 : Augmentation de la cohésion du sol	Page 69
5-2-3 : Augmentation de la rugosité de la surface du sol	Page 69
5-2-4 : Augmentation du couvert végétal	Page 70
5-2-5 : Fixation des dunes	Page 71
5-3 : Lutte contre l'érosion hydrique :	Page 72
5-3-1 : Lutte contre l'érosion du sol :	Page 72
5-3-1-1 : Etang d'orage :	Page 72
5-3-1-2 : Le labour profond :	Page 73
5-3-1-3 : Le labour en travers de la direction de la pente :	Page 74
5-3-1-4 : Les retenues collinaires :	Page 75
5-3-1-5 : Les terrasses en gradins soutenues par des talus :	Page 75
5-4 : Aménagement des berges des cours d'eau :	Page 76
5-4-1 : Les techniques de génie civil	Page 77
5-4-2 : Les techniques de génie végétal	Page 79
5-4-3 : Les techniques de génie mixte	Page 80
5-5 : Conclusion :	Page 81
Conclusion générale	Page 83
Références et bibliographie	Page 84

REMERCIEMENTS

Tout d'abord nous tenons à remercier le Seigneur le Tout Puissant **ALLAH** de nous avoir guidés sur le bon chemin.

Nous voudrions exprimer nos vifs remerciements pour notre encadreur

Mme. DIAF Meriem, d'avoir choisis et encadré notre travail, et qui nous a donné son soutien à tout moment.

Que les membres du jury trouvent également ici tous nos remerciements :

- **Mme. KIES Souad**

- **Mme. ZAIRI Souad**

Nous remercions aussi, l'ensemble de nos enseignants, du département de génie civil et hydraulique pour toutes les connaissances qui nous ont inculquées le long de nos études universitaires.

Finalement, nous remercions chaleureusement nos parents qui n'ont pas cessé de se sacrifier rien que pour notre bien-être ; nous leurs dédions ce mémoire qui présente le fruit de leurs fils.

RESUME

Dans cette étude, nous évaluons l'érosion des sols dans le bassin versant de l'oued Mekerra au nord-ouest de l'Algérie.

La zone d'étude est soumise à un climat semi-aride caractérisé par des pluies irrégulières et des averses, qui s'accompagnent souvent d'importantes inondations.

Pour cette étude, nous avons utilisé la base de données hydrométrique fournie par l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH). La période d'exploitation était de 1989 à 2007. Cette période a été étendue par régression classique, ce qui nous a permis de compléter les lacunes trouvées et même de quantifier par la suite les sédiments.

La moyenne de la dégradation spécifique pour la station de Haçaiba est assez élevée de l'ordre $23.07 \text{ t. km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$, dont la grande fraction a été enregistrée en 1987/1988. Et une moyenne annuelle de la charge solide en suspension est faible, elle est de l'ordre de 5.93 g/l .

Pour la station de Sidi Ali Benyoub a eu une dégradation spécifique de $146.188 \text{ t. km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$, dont la grande fraction a été enregistrée en 1989/1990.

La moyenne annuelle de la charge solide en suspension est assez élevée, elle est de l'ordre de 8.01 g/l .

Mots clés :

Erosion, Bassin versant, Oued Mekerra, Semi-aride, la charge solide.

ABSTRACT

In this study, we evaluate soil erosion in the watershed of the Oued Mekerra in northwestern Algeria.

The study area is subject to a semi-arid climate characterized by irregular rains and showers, which are often accompanied by significant flooding.

For this study, we used the hydrometric database provided by the National Agency for Water Resources (ANRH). The operating period was from 1989 to 2007. This period was extended by classical regression, which allowed us to complete the gaps found and even to quantify the sediments afterwards.

The average specific degradation for the Haçaiba station is quite high, around $23.07 \text{ t. km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$, the large fraction of which was recorded in 1987/1988. And an annual average of the suspended solid load is low, it is around 5.93 g/l .

For the Sidi Ali Benyoub station there was a specific degradation of $146,188 \text{ t. km}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$, the large fraction of which was recorded in 1989/1990.

The annual average of the solid load in suspension is quite high, it is around 8.01 g/l.

Key words :

Erosion, watershed, Oued Mekerra, Semi-arid, solid load.

ملخص

في هذه الدراسة، نقوم بتقييم تآكل التربة في مستجمعات المياه في واد ماكرا في شمال غرب الجزائر.

تخضع منطقة الدراسة لمناخ شبه جاف يتسم بعدم انتظام هطول الأمطار والرعود، والتي غالبًا ما تكون مصحوبة بفيضانات كبيرة.

في هذه الدراسة، استخدمنا قاعدة البيانات الهيدرومترية التي قدمتها الوكالة الوطنية للموارد المائية (ANRH). وذلك حسب فترة التشغيل من 1989 إلى 2007. وقد تم تمديد هذه الفترة من خلال الانحدار الكلاسيكي، مما سمح لنا بإكمال الفجوات الموجودة وحتى تحديد كمية الرواسب بعد ذلك.

إن متوسط التدهور النوعي لمحطة الحصائية مرتفع للغاية، حوالي 23.07 طنًا. كم². عام⁻¹، تم تسجيل جزء كبير منها في 1988/1987. والمتوسط السنوي للحمولة الصلبة المعلقة منخفض، حوالي 5.93 كلغ / لتر.

بالنسبة لمحطة سيدي علي بنيوب، كان هناك تدهور نوعي قدره 146,188 طن. كم² سنة⁻¹، تم تسجيل جزء كبير منها في 1990/1989. والمتوسط السنوي للحمولة الصلبة المعلقة مرتفع للغاية، فهو يبلغ حوالي 8.01 كلغ / لتر.

الكلمات الرئيسية:

تآكل، مستجمعات المياه، واد ماكرا، شبه قاحل، حمولة صلبة.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1. Carte mondiale des zones arides.....	Page 10
Figure 2. L'erg dans le désert algérien.....	Page 11
Figure 3. Figure 3. La Vallée de la mort, Californie, USA.....	Page 12
Figure 4. Figure 4. La dune de Kelso dans le désert Mojave, Californie, USA.....	Page 12
Figure 5. Le champ de boulders (roche granitique) de Catarina, Baja Californie Sur ..	Page 12
Figure 6. Populations affectées par la désertification (en millions de personnes)	Page 13
Figure 7. Les régions à risque.....	Page 15

CHAPITRE 3

Figure 8 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued Mekerra	Page 21
Figure 9 : Courbe hypsométrique du bassin d'Oued Mekerra.....	Page 24
Figure 10 : Précipitations moyennes mensuelles observées au niveau de la station de Sidi Bel Abbès (1985 à 2004).....	Page 31
Figure 11 : Histogramme des températures mensuelles minimales, maximales et moyennes de la région de Sidi Bel Abbès (1985-2004).....	Page 32
Figure 12 : Abaque pluviothermique d'Emberger de la région de Sidi Bel Abbès pour la période allant de 1985-2004.....	Page 34

CHAPITRE 4

Figure 13 : Différents types d'érosion.....	Page 40
Figure 14 : Théorie de Horton (1945) : L'intensité de la pluie > l'infiltration.....	Page 42
Figure 15 : Théorie de la saturation du milieu.....	Page 43
Figure 16 : Théorie de la contribution partielle de la surface du bassin au ruissellement	Page 43
Figure 17 : Érosion en nappe – Colorado -USA	Page 44
Figure 18 : Érosion en griffes – France	Page 45
Figure 19 : Érosion en rigoles–Algérie	Page 45
Figure 20 : Rigoles en voie d'approfondissement en petites ravines.....	Page 45
Figure 21 : Érosion par ravinement.....	Page 46
Figure 22 : Système de ravines très avancé.....	Page 46
Figure 23 : Profil en long du cours d'eau principale « Mekerra ».....	Page 49
Figure 24 : Variation annuelle des débits moyens (m^3/s) de l'oued Mekerra à la station de Sidi Ali Benyoub.....	Page 52
Figure 25 : variation annuelle des débits moyens (m^3/s) de l'oued Mekerra à la station de Haçaiba.....	Page 52

Figure 26 : Types de transport d'une particule solide au-dessus d'un fond plat.....	Page 53
Figure 27 : Débits solides de Haçaiba (kg/s).....	Page 54
Figure 28 : Débits solides de Sidi Ali Benyoub (kg/s).....	Page 56
Figure 29 : Précipitations Moyennes annuelles des deux stations pluviométriques du bassin versant de la Mekerra entre (1990 à 2005).....	Page 60
Figure 30 : Corrélation entre les débits liquides et débits solides de la station de Haçaiba $Q_s = f (Q_l)$	Page 61
Figure 31 : Corrélation entre les débits liquides et débits solides de la station de Sidi Ali Benyoub $Q_s = f (Q_l)$	Page 62
Figure 32 : Histogramme des Concentrations de la station de Haçaiba (g/l)	Page 63
Figure 33 : Histogramme des Concentrations de la station Sidi Ali Benyoub (g/l)	Page 64

CHAPITRE 5

Figure 34 : Influence d'un brise-vent sur le vent.....	Page 68
Figure 35 : Champ agricole avec chaume d'orge après la récolte de Céréales	Page 70
Figure 36 : Le labour en billons ou billonnage.....	Page 70
Figure 37 : Haie Brise-vents.....	Page 71
Figure 38 : Palissades pour fixation de dunes.....	Page 72
Figure 39 : Étang d'orage.....	Page 73
Figure 40 : Labour profond.....	Page 74
Figure 41 : Le labour en travers de la direction de la pente.....	Page 74
Figure 42 : Retenue collinaire.....	Page 75
Figure 43 : Les terrasses en gradins.....	Page 76
Figure 44 : Enrochement.....	Page 77
Figure 45 : Gabions.....	Page 77
Figure 46 : Autres types de confortement de berges en Génie civil.....	Page 78
Figure 47 : Restauration des berges en génie végétal.....	Page 80
Figure 48 : Coupe transversale schématique d'une fascine de Saule avec lits de plants et plançon.....	Page 80
Figure 49 : Le gabion surmonté végétalisé.....	Page 80
Figure 50 : Coupe transversale schématique de techniques végétales d'un enrochement de pied de berge et haut de berge.....	Page 80

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 3

Tableau n° 01 : Répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Mekerra	Page 23
Tableau n° 02 : Classification du relief d'I.R.D.....	Page 27
Tableau n° 03 : Valeurs des températures minimales, maximales et moyennes de la région de Sidi Bel Abbès entre 1985 -2004.....	Page 32
Tableau n° 04 : Classement du type de climat selon l'indice d'aridité de Demartone.....	Page 35
Tableau n° 05 : Fréquence moyenne mensuelle des gelées (période 1985-2005).....	Page 35

CHAPITRE 4

Tableau n°06 : Valeurs de α en fonction de la perméabilité du sol (d'après SOGREAH, 1969).....	Page 49
Tableau n° 07 : Variation annuelle des débits moyens (m^3/s) de l'oued Mekerra à la station de Sidi Ali Benyoub.....	Page 54
Tableau n°08 : Débits solides de Sidi Ali Benyoub (kg/s).....	Page 55
Tableau n°09 : Apports solides Annuels à la station de Haçaiba.....	Page 58
Tableau n°10 : Apports solides Annuels à la station de Sidi Ali Benyoub.....	Page 59
Tableau n°11 : Précipitations Moyennes annuelles des deux stations pluviométriques du bassin versant de la Mekerra entre (1990 à 2005) Sidi Ali Benyoub et Haçaiba...	Page 59
Tableau n°12 : Débits liquides et débits solides de la station de Haçaiba.....	Page 60
Tableau n°13 : Débits liquides et débits solides de la station de Sidi Ali Benyoub.....	Page 61
Tableau n° 14 : Concentrations de la station de Haçaiba (g/l).....	Page 63
Tableau n° 15 : Concentrations de la station de Sidi Ali Benyoub (g/l).....	Page 64

LISTE DES ABREVIATIONS

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

BV : Bassin versant

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

CSFD : Comité Scientifique Français de la Désertification.

FAO : Food and Agriculture Organization- Organisation pour l'alimentation et l'agriculture

GEO : Global Environment Outlook

INRF : L'Institut National de Recherche Forestière

IRD : Institut de recherche pour le développement

MNT : Modèle numérique d'un terrain

OMD : Objectif du Millénaire pour le développement

ONU : Organisation des Nations Unies

PNUE : Programme des nations unies pour l'environnement

SAU : Surface agricole utile

SOGREAH : Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques

UICN : Union internationale pour la conservation de la nature

USLE : Soil Universal Loss Equation - Équation universelle de perte de sol

WWF : World Wildlife Fund - Fonds mondial pour la nature

INTRODUCTION GENERALE

Le phénomène de perte d'eau est en augmentation et menace plus de 20 barrages algériens (Remini et Mokadem 2018). L'effet de l'érosion ne se limite pas à l'envasement des barrages, mais il traite également de problèmes majeurs tels que la dégradation des terres fertiles, la qualité de l'eau et la déstabilisation des ouvrages hydrauliques.

Le débit de chaque inondation dépend essentiellement de plusieurs paramètres hydrologiques et morphologiques, tels que la densité de drainage, la pente, l'indice de compacité et le rapport de confluence (Pallard et al. 2009 ; Yles et Bouanani 2016). La grande vitesse de l'écoulement provoque le détachement des particules de sol à partir de la masse du sol en vrac, ce qui pourrait conduire à des transports de sédiments détachés (Hajigholizadeh et al. 2018).

En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint des valeurs considérables, qui dépassent $10^3 \text{ t. km}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

Le bassin versant de l'oued Mekerra contribue à l'envasement du barrage de Sarno (mis en service en 1954), entraînant une quantité importante de matières en suspension dans le barrage.

Notre mémoire s'articule essentiellement sur des données hydrométriques et hydrauliques (débits liquides instantanés, concentrations instantanées des sédiments, hauteurs d'eau...) fournies par l'ANRH d'Oran.

La diversité des relations entre les flux liquides et solides en fonction des disparités spatiales et temporelles a intéressé par notre étude, qui nous a aidé à la corrélation entre les deux flux.

L'objectif principal de notre travail est d'évaluer le transport sédimentaire dans l'oued Mekerra.

CHAPITRE 1

PROBLEME HYDRIQUE MONDIAL

1-1 : Introduction :

L'un des enjeux majeurs entourant le devenir de l'humanité est la disponibilité d'une eau de qualité qui est devenue plus précieuse encore que le pétrole. C'est l'or bleu. C'est le fondement de la vie et c'est le vecteur par excellence des sédiments utiles au renouvellement des sols à l'intérieur des bassins de drainage. « L'eau est un solvant unique qui transporte les éléments nutritifs essentiels à la vie » ⁽³⁸⁾. C'est aussi, dans les zones humides un filtre efficace. Un peu partout dans le monde, l'eau se raréfie en raison des changements climatiques qui engendrent des périodes de sécheresse prolongées, puis par suite de la surutilisation de l'eau dans les zones semi-arides irriguées, de la surexploitation des nappes aquifères et de la gouvernance déficiente du patrimoine hydrique dans les zones d'abondance.

1-2 : Les zones arides :

Les terres arides occupent 41% de la surface de la terre. Elles sont peuplées par plus de deux milliards d'êtres humains dont 90% habitent des pays en développement. Entre 10 et 20% des terres arides sont dégradées. Elles correspondent à 43% des terres cultivées de la planète ⁽⁴⁵⁾ « Elles sont en proie au processus de désertification dans lequel les sols deviennent de moins en moins fertiles (dans le Sahel). Ce phénomène global résulte des activités humaines et des variations climatiques...La désertification menace les zones arides du monde entier et a lieu à un rythme beaucoup plus soutenu que par le passé. Ce processus est renforcé par l'augmentation de la population qui a pour effet d'accroître la pression sur le territoire, à travers la mise en culture ou en pâturage de zones autrefois préservées ». La raréfaction de l'eau est accentuée également par les prélèvements faits pour approvisionner les mégalo-poles comme c'est le cas à Los Angeles et dans la capitale du Mexique.

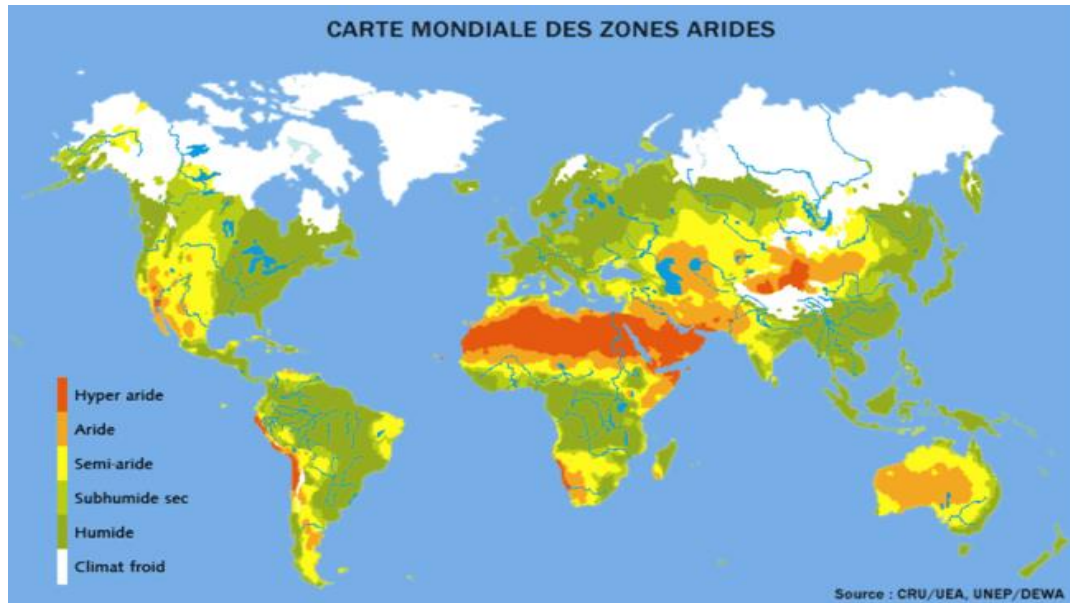


Figure 1. Carte mondiale des zones arides
Source : <https://suds-en-ligne.ird.fr/desertif/carte.html>

La disponibilité de l'eau dans les zones semi-arides devient de plus en plus problématique. Dans plusieurs régions du monde marquées par un tel régime climatique l'eau n'est tout simplement pas au rendez-vous. Ces régions sont principalement le Sahel, les contours du désert australien, les zones influencées par les courants froids telles que la côte occidentale de l'Amérique du Sud et celle de l'Afrique, les hauts plateaux intérieurs eurasiens, les zones sous le régime climatique méditerranéen et les grandes prairies intérieures de l'Amérique du Nord et de l'Amérique du Sud. Plusieurs de ces zones sont attenantes aux grands déserts (figure 1). Ces zones, dans bien des cas, surexploitées, voient leurs nappes phréatiques s'abaisser rendant le couvert végétal très vulnérable aux incendies lors des périodes de sécheresses prolongées, une situation qui se présente fréquemment dans les régions marquées par le climat méditerranéen et, notamment, en Australie et en Californie. Le régime des précipitations, fort variable et même imprévisible, peut même forcer les habitants de ces régions à pratiquer la transhumance afin de pouvoir assurer leur subsistance.

Il y a six types de déserts qui sont au cœur des zones semi-arides et qui s'agrandissent à leur détriment.

1-2-1 : Les déserts de la zone intertropicale : créés par la circulation atmosphérique globale caractérisés par de faibles précipitations, une forte évaporation et une forte insolation. À titre d'exemple, le désert du Sahara (Figure 2), qui représente environ 87 % de la superficie totale de l'Algérie.

C'est une région désertique peu peuplée, appartenant à l'étage bioclimatique aride. Dans cette zone, l'évaporation atteint des proportions considérables (entre 3 000 et 5 000 mm/an), alors que la pluviométrie reste très faible (< 200 mm).

1-2-2 : Les déserts continentaux situés sur les hauts plateaux à l'intérieur des terres caractérisés par une très forte amplitude thermique (étés très chauds, hivers très froids) tels que ceux de Gobi et de Taklimaklan (Asie de l'Est).

1-2-3 : Les déserts centraux en Australie, le Great Basin en Amérique du Nord, le désert de Monte en Amérique du Sud.

1-2-4 : Les déserts côtiers situés sur les côtes le long de zones de remontées d'eaux profondes caractérisés par de faibles précipitations, une hyperaridité et des brumes de soirée tels que celui de l'Atacama au Chili, le désert de Namibie, le désert de Baja Californie au Mexique et le désert de la côte atlantique marocaine.

1-2-5 : Les déserts d'abri de la zone tempérée ('rain shadow deserts') comme c'est le cas de la Vallée de la Mort aux USA abritée par la Sierra Nevada et caractérisée par de faibles précipitations, une forte évaporation et une forte insolation. (Figure 3).

1-2-6 : Les déserts polaires (l'Arctique et l'Antarctique) reçoivent peu de précipitations, à cause de la présence de cellules anticycloniques. Exemples, dans le désert de Mojave en Californie (figure 4), dans le désert de Djibouti et dans les déserts de Chihuahua, de Sonora et de la Baja Californie au Mexique (figure 5).



Figure 2. L'erg dans le désert algérien –Grand erg oriental
Source : alamyimages.fr



Figure 3. La Vallée de la mort, Californie, USA

Source : <http://www.roadtrippin.fr/californie/death-valley/death-valley.php>



Figure 4. La dune de Kelso dans le désert Mojave, Californie, USA

Source : http://en.wikipedia.org/wiki/Kelso_Dunes



Figure 5. Le champ de boulders (roche granitique) de Catarina, Baja Californie Sur, Mexique

Source : allposters.com

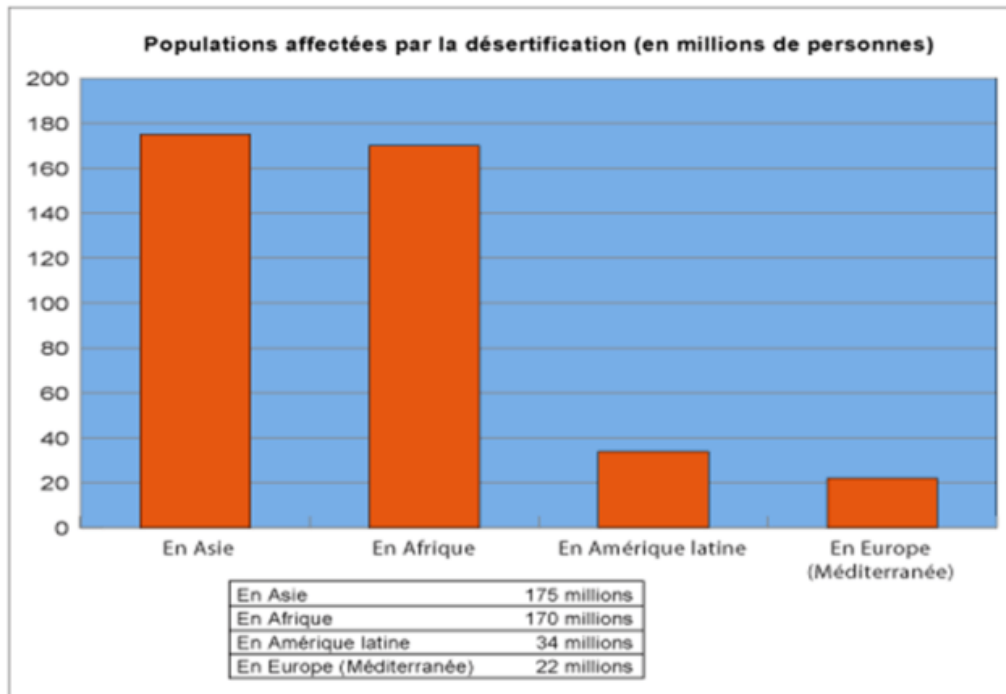


Figure 6. Populations affectées par la désertification (en millions de personnes)

Source : <https://suds-en-ligne.ird.fr/desertif/carte.html>

1-3 : Pénuries d'eau dans le monde :

Au total, quatre milliards de personnes connaissent régulièrement (plus d'une fois par mois, de graves problèmes provoqués par la pénurie d'eau douce, chiffre qui dépasse largement les estimations initiales, selon lesquelles, le nombre de personnes en manque d'eau ne dépassait pas 3,1 milliards.

L'eau recouvre 70% de la surface du globe et représente un volume d'environ 1.400 millions de mètres cubes. Les réserves d'eau douce représentent moins de 3% du total (près de 40 millions de mètres cubes), et seulement 1% est accessibles à l'homme. ⁽³⁶⁾

1-3-1 : Surexploitation des eaux souterraines :

Stress des eaux souterraines : prélèvements sur la recharge annuelle (en %). Les aquifères souterrains fournissent de l'eau potable à la moitié de la population mondiale. Mais un sur cinq est surexploité.

Avec l'élévation du niveau de la mer, des grandes villes voient ainsi la qualité de l'eau douce de leurs aquifères menacée, notamment Shanghai, en Chine, et Dacca, au Bangladesh. Et des îles du Pacifique comme Tuvalu et Samoa sont contraintes d'importer de plus en plus d'eau douce. ⁽³⁰⁾.

1-3-2 : Insuffisance de l'accès à l'eau potable :

En vingt ans, le nombre de personnes ayant accès à "un point d'eau potable amélioré" a augmenté de 2,3 milliards.

Dans le monde, 748 millions de personnes restent privées d'eau potable.

Dans les agglomérations qui s'étendent à une vitesse vertigineuse avec leurs lots de bidonvilles, le nombre de citadins sans accès à l'eau est passé de 111 millions à 149 millions entre 1990 et 2012. Et l'Afrique subsaharienne continue de souffrir de la pénurie, dans les cités comme dans les campagnes. Globalement, 36 % de la population africaine ne dispose toujours pas d'un point d'eau accessible.

1-4 : Le partage de l'eau :

Le stress hydrique - autrement dit, une ressource insuffisante pour répondre aux différentes activités humaines et aux besoins de l'environnement - commence lorsque la disponibilité en eau est inférieure à 1 700 mètres cubes par an et par personne. Quasiment les trois quarts des habitants des pays arabes vivent en dessous du seuil de pénurie, (1 000 m³ par an, et près de la moitié se trouvent dans une situation extrême avec moins de 500 m³, en Égypte, en Libye notamment).⁽⁴¹⁾

Les pays en voie de développement ne sont pas les seuls touchés, aussi sont concernés, l'Ouest américain, certaines provinces de Chine, le Mexique ou encore le Sud méditerranéen.

Les projets de centres de dessalement se multiplient pour produire de l'eau potable dans les régions du monde qui en ont les moyens, comme en Arabie Saoudite et en Algérie.⁽⁴¹⁾

« Aujourd'hui encore, les contentieux à propos de l'eau sont nombreux à travers le monde, notamment au Nord et au Sud de l'Afrique, au Proche-Orient, en Amérique centrale, au Canada et dans l'Ouest des États-Unis. Au Proche-Orient, par exemple, une dizaine de foyers de tensions existent. Ainsi l'Égypte, entièrement tributaire du Nil pour ses ressources en eau, doit néanmoins partager celles-ci avec dix autres États...Quant à l'Irak et la Syrie, ils sont tous deux à la merci de la Turquie, où les deux fleuves qui les alimentent, le Tigre et l'Euphrate, prennent leur source. L'eau de l'Euphrate a d'ailleurs souvent servi d'arme brandie par la Turquie contre ses deux voisins : grâce aux nombreux barrages qu'elle a érigé sur le cours supérieur du fleuve et qui lui permettent d'en réguler à sa guise le débit en aval, la Turquie possède là, en effet, un puissant moyen de pression ». ⁽²⁸⁾

1-4-1 : Les régions à risque :

Les régions avec pénuries structurelles correspondent à la péninsule arabique, une bande longeant la mer Méditerranée allant de l'Égypte au Maghreb, au nord-est de l'Afrique du Sud, à toute la partie du Sud-Est australien, à la Chine du Nord, à la Mongolie, au Sud-Ouest des États-Unis et à une grande partie du territoire mexicain et, en particulier, dans les plateaux intérieurs. Les régions à pénuries conjoncturelles comptent une bonne proportion du territoire de l'Afrique du Sud, Madagascar, le nord de l'Inde, l'Iran, le Pakistan, le Proche-Orient et une portion des plateaux intérieurs asiatiques. Les aires dont la situation est considérée critique en raison du manque d'investissements correspondent à l'Afrique subsaharienne entre le Sahel et l'Afrique du Sud.

Plus de neuf villes dépendent de transferts d'eau à longue distance, soit Los Angeles, Mexico, Johannesburg, Casablanca, Tripoli, Barcelone, Tel-Aviv, Téhéran et Pékin.

Les villes dont 20% de la population n'a pas accès à l'eau à domicile sont Calcutta, Djakarta, Rangoun, Karachi, Khartoum, Lagos, Abidjan, Addis-Abeba, Bombay, Chennai, Manille, Kinshasa, Luanda, Nairobi, Ho-Chi-Minh-Ville et Dacca, des villes dont les infrastructures ne peuvent donc répondre à tous les besoins d'approvisionnement et d'assainissement des eaux.⁽³¹⁾

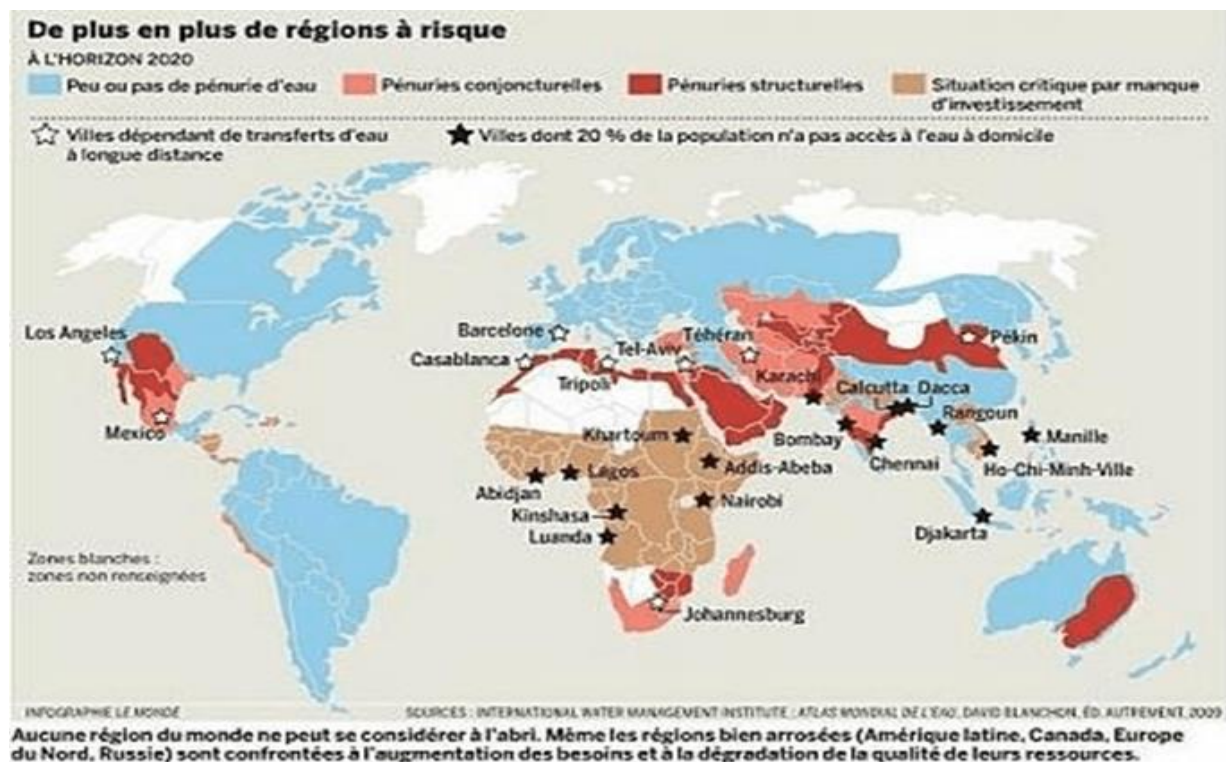


Figure 7. Les régions à risque

Source: eco-fr.e-monsite.com

1-5 : Conclusion :

En tant que principal moyen d'intégration sur la surface terrestre, l'eau possède un fort potentiel pour réduire la pauvreté, accroître la sécurité alimentaire, améliorer la santé humaine, contribuer à des sources d'énergie durables et fortifier l'intégrité des écosystèmes et leur durabilité. Les biens et services liés à l'eau représentent des opportunités significatives pour la société et les gouvernements en vue d'atteindre ensemble les objectifs du développement durable.

CHAPITRE 2

GENERALITES SUR LES EFFETS D'EROSION DES OUEDS DE L'OUEST EN ALGERIE.

2-1 : Introduction :

L'érosion entraîne également une dégradation de la qualité de l'eau, provoquée par les matières en suspension.

L'érosion des berges ou du lit d'un milieu est une réponse aux modifications de son hydrologie ou de sa morphologie. En partie naturelle, elle peut aussi être la conséquence de travaux ou d'aménagements qui perturbent la stabilité du milieu.

L'érosion hydrique est un phénomène complexe par son caractère irrégulier, aléatoire et par sa discontinuité spatio-temporelle. En raison de son ampleur et son agressivité, elle constitue une contrainte majeure au développement de l'agriculture et à la promotion des activités rurales.

La vitesse et l'ampleur de l'érosion causée par l'eau dépendent des facteurs suivants : Plus grandes sont l'intensité et la durée d'un épisode de pluie, plus grand est le risque d'érosion.

En Algérie du Nord, particulièrement l'Ouest du pays, les dispositions socio-économiques, comme d'ailleurs les conditions hydro-climatiques sont naturellement réunies pour intensifier et favoriser le déclenchement de ce mécanisme néfaste qui potentiellement menace l'équilibre de l'environnement tant à l'échelle régionale que locale ⁽¹⁴⁾.

En général, l'érosion spécifique varie entre 2000 et 4000 t/km².an ⁽¹⁵⁾, L'Algérie est de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion.

L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres, est la région la plus érodée du pays ; viennent ensuite les régions du Centre (27%) et de l'Est (26%) (Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire, 2000).

2-2 : Description générale de l'Algérie du Nord :

Du point de vue climat, l'Algérie, qui est un pays soumis à l'influence conjuguée de la mer, du relief et de l'altitude, présente un climat de type méditerranéen caractérisé par des pluies torrentielles ; irrégulières aussi bien dans l'espace que dans le temps. Ces pluies sont nettement fréquentes en automne lorsque le couvert végétal est absent et le sol ameubli par les labours, le transport solide atteint ces valeurs maximales ⁽²⁾.

Ces précipitations accusent une grande variabilité mensuelle et surtout annuelle. Cette variabilité est due à l'existence de gradients ⁽¹⁶⁾.

La lithologie de la région est principalement formée de plus de 75% des argiles et des limons.

Le Nord du pays étant essentiellement montagnard, les conditions physiques, géomorphologiques sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène d'érosion. En effet, les régions des montagnes s'étendent sur une superficie de 7.565.000 ha, dont 63% sont situés à plus de 800 m et le ¼ des terres présente une pente supérieure à 25%.

L'Algérie du Nord est soumise à des fortes pressions en homme et en bétail qui ont engendrées une sérieuse dégradation des sols et de la couverture végétale. Nous estimons pratiquement à plus de 20 millions d'hectares les terres sont touchées par l'érosion particulièrement dans les zones montagneuses où sont implantés plus de 90% des barrages⁽²⁵⁾.

Le couvert végétal et sa discontinuité spatiale sur les bassins versants font que les sols restent souvent sans protection. Les formations forestières couvrent 4,1 millions d'hectares. (Ghazi et al, 1997).

Cette fragilité écologique amplifie grandement les résultats de la dégradation.

2-3 : Conséquences de l'érosion hydrique en Algérie du Nord :

Les conséquences de l'érosion hydrique en Algérie du Nord sont dramatiques ; nous pouvons citer permis eux :

- Réduction de la production agricole (pertes en sol agricole) ;
- Une dégradation spécifique dépassant les 5000 t/km²/an ;
- Une quantité de 120 millions de tonnes de sédiments rejeté en mer chaque année par les bassins tributaires de la méditerranée ⁽¹⁵⁾ ;
- Un exode rural important ;
- Un rehaussement des lits des oueds provoquant par la suite des inondations, menace les voies de communication et les ouvrages d'arts,...
- L'envasement précoce des barrages en exploitation.

2-4 : Envasement des barrages :

Le taux d'envasement moyen est de 16,33% pour l'ensemble des barrages, soit 12,21% pour les barrages de la région Est, 16,47 et 19,08% pour les barrages de la région centre et ouest du pays.

Le taux d'envasement des barrages suit la logique de taux d'affectation des sols par l'érosion hydrique (47% pour les régions ouest, 27% et 26% pour le centre et l'est). ⁽²⁾ L'ampleur de ce phénomène varie selon les régions et les barrages. Ainsi, pour la région de l'Est, l'envasement dépasse les 50% pour les barrages Ksob (M'Sila), Foum El Gherza (Biskra) et Foum El Gueiss (Khenchela). Dans le centre, l'envasement dépasse les 40% pour le barrage de Ghrib (Ain Defla) et le barrage d'Oued Fodda (Chlef).

Ce taux dépasse aussi les 40% pour les barrages de Bouhnifia et Fergoug à Mascara. ⁽²⁾

L'envasement des barrages ne peut être considéré comme un mal inéluctable. Mais c'est un phénomène inévitable, qu'il faudrait introduire dans les calculs technico-économiques.

Les moyens de lutte utilisés surtout en Algérie sont :

Le reboisement, la restauration des sols, l'implantation des banquettes, la création des petits barrages (retenues collinaires), la plantation des cultures suivant les lignes de niveau, la plantation des végétations à longues tiges dans les oueds.

2-5 : Conclusion :

Bien que l'érosion hydrique ait été étudiée pendant de longues années en Algérie, cela n'a pas empêché que beaucoup de choses restent inconnues, les problèmes déterminants de l'érosion sont multiples. L'érodibilité des sols et comme elle peut varier sous différentes conditions mérite une meilleure compréhension afin de nous aider à réduire les pertes en eau et en sol.

Le phénomène d'érosion modifie la forme et l'hydrologie des milieux, et provoque parfois des mouvements de terrain. Les conséquences peuvent être lourdes pour la biodiversité comme pour la sécurité de tous à proximité directe des milieux.

CHAPITRE 3

PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MEKERRA

3-1 : Introduction :

Les oueds, comme les rivières, fleuves, sont des cours d'eau qui drainent les eaux de pluies et des sources émergées de leurs bassins versants, sous l'effet de gravité, vers la section la plus basse de ces cours d'eau appelée "exutoire."

En effet, le Bassin versant représente l'unité fondamentale de gestion du territoire d'un point de vue hydrologique, écologique et géomorphologique. Il est aussi le cadre analytique à considérer pour toute prise de décision en matière d'aménagement.

3-2 : Bassin versant de l'oued Mekerra :

3-2-1 : Localisation géographique :

Situé au Nord-ouest de l'Algérie, le bassin versant de l'Oued Mekerra (figure 07) fait partie du grand bassin de la Macta (répertorie par le code n° 11 selon l'ANRH). Il est localisé entre la latitude 34°31' - 35°21' Nord et la longitude 1°16' - 0°58' Ouest, et orienté du sud (en amont, 1097 m à Ras El Ma) au nord (en aval, 500m, de la ville de Sidi Bel Abbès].

En effet, ce bassin se trouve composé de trois (03) sous-bassins, à savoir :

- La haute Mekerra : Comprise entre la région de Ras El Ma et celle de Sidi Ali Benyoub, et forme une vallée encaissée, de pente assez accentuée ;
- La moyenne Mekerra : Regroupe les régions qui s'étendent de Sidi Ali Benyoub jusqu'à la ville de Sidi Bel Abbès ;
- La basse Mekerra : Correspond à toute la partie du bassin située en aval de la ville de Sidi Bel Abbès.

L'Oued Mekerra est un cours d'eau, d'une longueur de 125 km, a un apport annuel de 25 à 60 millions de m³, soit 42 millions m³/an en moyenne, en période pluvieuse. Il prend sa source au niveau du Djebel Timizine, au Sud-Est de Ras El Ma, et traverse la ville de Sidi Bel Abbès en aval, où il conflue avec oued Sarno formant oued Mebtouh, qui alimente en eau le barrage Cheurfa de la wilaya de Mascara, devenant par la suite Oued Sig, en aval du barrage de cette commune, avant de terminer son trajectoire dans les marais de la Macta, près de la Méditerranée. ⁽⁴⁾

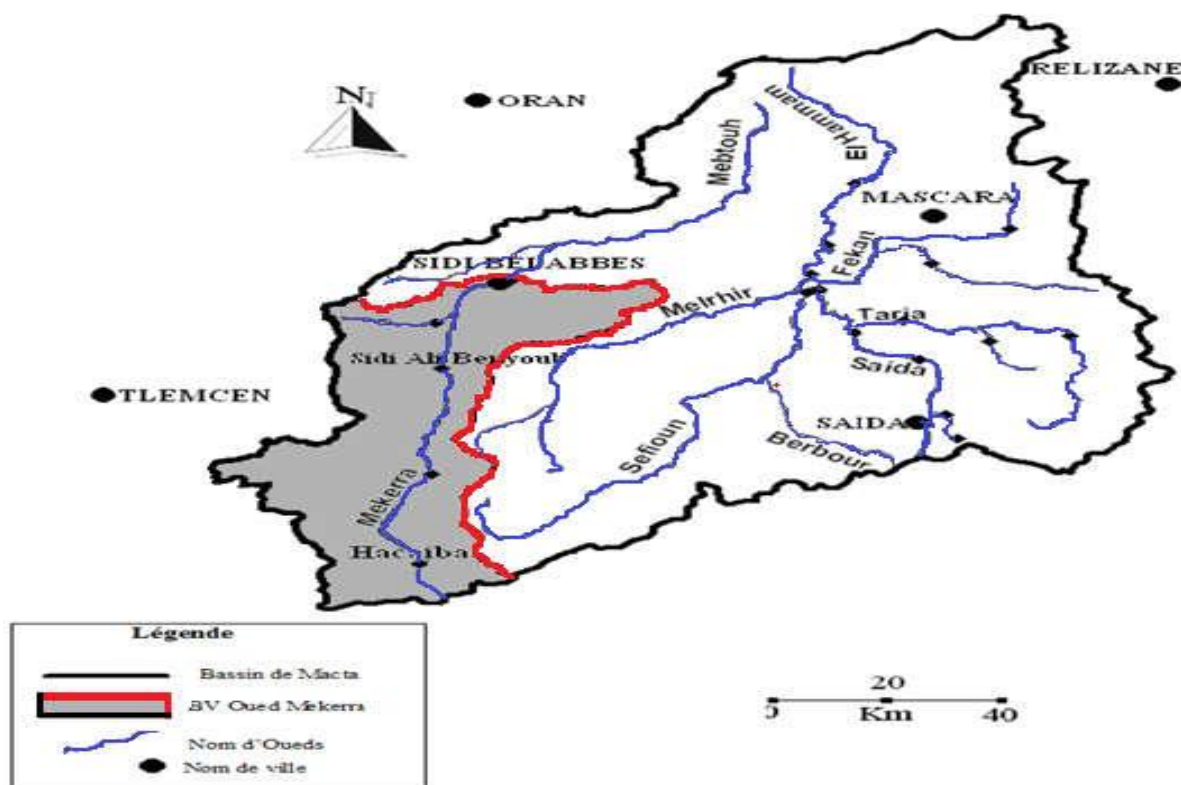


Figure 08 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued Mekerra ⁽⁴⁾

3-2-2 : Cadre morphométrique :

3-2-2-1 : Caractéristiques de la forme :

3-2-2-2 : Surface et périmètre :

La surface et le périmètre sont les premiers et les caractéristiques géométriques les plus importantes d'un bassin versant à déterminer. Ces dernières sont le fondement de calculs hydrologiques. Elles sont définies à partir soit d'une carte topographique, soit d'un modèle numérique d'un terrain (MNT).

Ainsi, et sur la base des travaux antérieurs ⁽⁹⁾ et ⁽¹¹⁾, le bassin versant de l'Oued Mekerra s'étend sur une superficie (A) de 4102 km², pour un périmètre (p) de 353 km. ⁽⁹⁾, ⁽¹¹⁾

3-2-2-3 : Indice de compacité de Graveillus (Kc) :

Cet indice, qui caractérise la forme de bassin, a été proposé pour la première fois en 1914 par Graveillus . Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface. Il s'écrit par la formule suivante :

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (01)$$

Où :

- **Kc** : Indice ou coefficient de compacité de Graveillus
- **P** : périmètre du BV en km ; 353 km, pour le bassin versant d'oued Mekerra
- **A** : Surface du BV en km² ; 4102 km², pour le bassin versant d'oued Mekerra.

Donc, l'application de la formule (a) pour le cas de ce bassin, en prenant en considération les valeurs de la surface et du périmètre citées précédemment, donne un indice de compacité de valeur $Kc = 1.54$, ce qui traduit que le bassin est de forme allongée. Cette dernière favorise généralement les faibles débits de pointe de crue, à cause du retard de l'acheminement de l'eau à l'exutoire.

3-2-2-4 : Rectangle équivalent :

La transformation géométrique du bassin réel donne évidemment une forme rectangulaire dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre ou le même coefficient de compacité du bassin en question.

A partir de ce dernier ⁽⁹⁾, il est possible, suivant la méthode de Roche (1963), d'établir un rectangle représentatif (équivalent) du bassin versant de l'Oued Mekerra, dont les paramètres sont :

□ Longueur (L) :

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right] \quad (02)$$

□ Largeur (l) :

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right] \quad (03)$$

Par conséquent, l'application des relations (2) et (3) permet de déterminer les longueurs du rectangle équivalent, avec : $L = 149,07$ km et $l = 27.05$ km.

3-2-3 : Étude du relief :

Le relief est un facteur essentiel qui permet de déterminer en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans l'étude du comportement hydrologique d'un bassin versant.

En général, le relief d'un BV se détermine au moyen de différentes méthodes tels que :

3-2-3-1 : Courbe hypsométrique :

Donnant une vue synthétique de la pente du bassin, et donc du relief, la courbe hypsométrique représente en fait la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou en-dessous), et de l'altitude représentée en ordonnée. Elle donne ainsi le pourcentage de la superficie du bassin versant situé au-dessus d'une altitude donnée. .

A partir des travaux antérieurs ⁽⁷⁾, la répartition de surfaces par tranches d'altitudes du bassin versant de l'Oued Mekerra est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau n° 01 : Répartition hypsométrique du bassin versant de l'Oued Mekerra ⁽⁷⁾, ⁽⁹⁾

Altitudes (m)	Surfaces (Km ²)	Surfaces (%)	Surfaces cumulées (Km ²)	Surfaces cumulées (%)
<500	74.37	2.48	3000	100
500-700	327.19	10.91	2925.63	97.52
700-900	549.02	18.3	2598.44	86.61
900-1100	854.9	28.5	2049.42	68.31
1100-1300	1067.72	35.59	1194.52	39.82
1300-1500	124.08	4.014	126.8	4.23
1500-1700	2.72	0.09	2.72	0.09
>1700	0	0	0	0

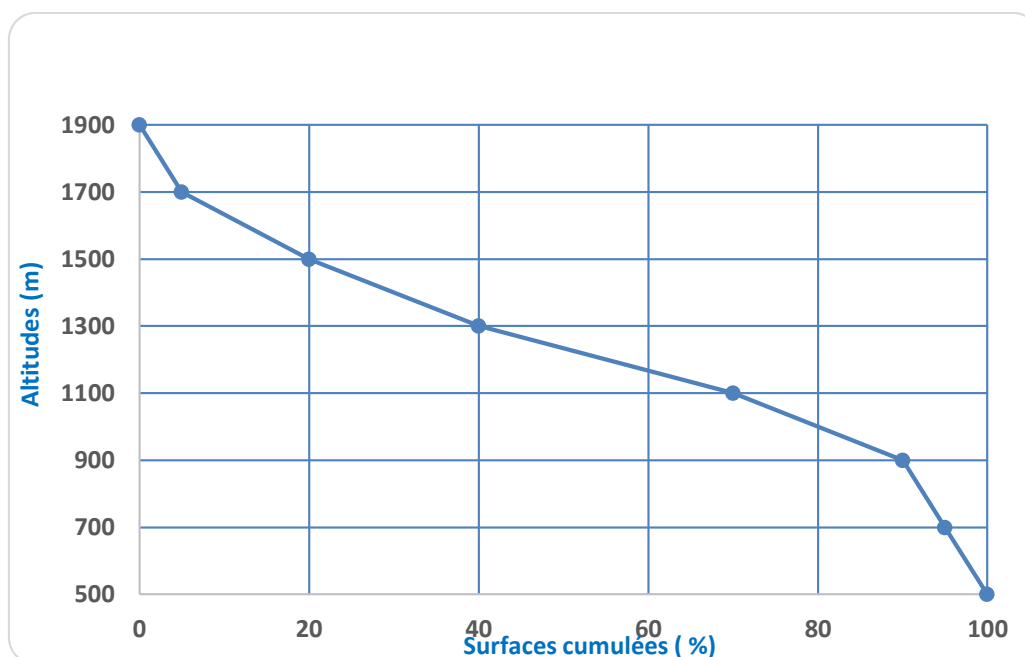


Figure n° 09 : Courbe hypsométrique du bassin d'Oued Mekerra

L'allure de la courbe hypsométrique, présentée dans la figure n° 09, donne une vue sur la répartition des altitudes au niveau du bassin versant de l'Oued Mekerra où l'on observe que les altitudes supérieures à 1500 m sont peu étendues. Par contre, la tranche d'altitudes comprises entre 700-900 m couvre plus de 90 % de la surface du bassin. En fait, la forme de la courbe est caractéristique d'un bassin à l'état de jeunesse allant vers l'équilibre.

3.2.3.2. Différents types d'altitudes :

Les différents types d'altitudes d'un bassin versant (maximales, minimales et moyennes) sont obtenus soit à partir de la courbe hypsométrique ou de la carte topographique. Ainsi :

- L'altitude maximale du bassin versant de l'oued Mekerra égale à ; $H_{max} = 1700$ m, Alors que l'altitude minimale du bassin est égale à ; $H_{min} = 500$ m (7), le point le plus bas se trouve au niveau de la ville de Sidi Bel Abbès à 437 m d'altitude, par contre le point le plus élevé se trouve à Djebel Ouargla (1714m).

- Concernant l'altitude moyenne, elle est obtenue par la relation suivante :

$$H_{moy} = \sum_{i=1}^n \frac{(H_i S_i)}{S} \quad (04)$$

où :

- H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant
- H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)
- S_i : surface partielle comprise entre deux courbes de niveau (Km^2)

- S : surface totale du bassin versant (Km²)

Suite aux travaux antérieurs ⁽⁷⁾ et ⁽⁹⁾, l'application de relation (d) révèle que l'altitude moyenne du bassin versant de l'Oued Mekerra est égale à ; Hmoy= 960m.

3.2.3.3. Indices de pentes :

La détermination des indices de pentes a pour but de caractériser les pentes du bassin versant et de permettre leur classification. En effet, Il existe plusieurs méthodes pour calculer ces indices. Parmi ces derniers, on a :

□ Indice de pente globale

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global (Ig). Ce dernier est calculé à partir de la courbe hypsométrique. Il est donné par la relation suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} - \frac{H5\% - H95\%}{L} \quad (05)$$

Avec :

- Ig : indice de pente global

- D : dénivelée (m)

- L: Longueur du rectangle équivalent en km, avec Longueur du BV d'Oued Mekerra est égale à 149,07 km

- H5% : la valeur de 5%, correspondant à l'abscisse de la courbe hypsométrique (H5%= 1480)

- H95% : la valeur de 95%, correspondant à l'abscisse de la courbe hypsométrique présentée dans la (figure 08) (H95%= 780m).

Par conséquent, l'application de la relation (e) nous permet de déterminer la pente globale du bassin versant de l'Oued Mekarra

qui est égale à : Ig = 4,69 m/km.

□ Indice de pente de Roche

L'indice de pente de Roche sert à déterminer la pente moyenne à partir des données du bassin versant, il tient compte du facteur de ruissellement et de l'influence du facteur de pente sur le régime hydrologique du bassin.

Pour calculer cet indice, il y a une formule introduite par ROCHE :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n X_i \sqrt{B_i(a_i - a_{i-1})} \quad (06)$$

Avec :

- L : longueur du rectangle équivalent (km)
- Bi : fraction de la surface totale du bassin, comprise entre les côtes a_i et a_{i-1} ; fraction donnée par le tableau hypsométrique
- Xi : distance séparant deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent
- $a_i - a_{i-1}$: dénivelée entre deux courbes de niveau voisines (m).

En s'en rapportant au travail antérieur de ⁽⁹⁾, l'application de la relation (06) montre que l'indice de pente de Roche du bassin versant de l'Oued Mekerra égale à :

$$I_p = 5,19.$$

□ Indice de pente moyen

C'est le rapport entre la dénivelée totale et la longueur du rectangle équivalent du bassin.

Selon BOUREK (2010) ⁽⁹⁾, Il est déterminé par la formule suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (07)$$

Où :

- D : dénivelée totale du bassin ($D = H_{\max} - H_{\min} = 1714 - 437 = 1277\text{m}$)
- L : longueur du rectangle équivalent, $L = 149,07 \text{ km}$.

Donc, l'application de la formule (07) donne que l'indice moyen est égal à : $I_{\text{moy}} = 08,56\%$.

En effet, la forme allongée du bassin, la faiblesse de la pente surtout au niveau de moyenne Mekerra (1,12 %), la fragilité du sol, et l'irrégularité du couvert végétal sont souvent de facteurs qui favorisent l'érosion et la sédimentation dans la plaine de Sidi Bel Abbès.

3.2.3.4. Dénivelée spécifique :

La dénivelée spécifique (D_s), permet d'utiliser la classification d'I.R. D (tableau n° 02) pour définir le type du relief d'un bassin versant. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} \quad (08)$$

Où :

- I_g : indice de pente global du bassin,
- A : superficie du bassin versant.

Tableau n° 02 : Classification des reliefs par (I.R.D.)^{*}.

R 1	Relief très faible	0 <Ds< 10 m
R 2	Relief faible	10m <Ds< 25m
R 3	Relief assez faible	25m <Ds< 50m
R 4	Relief modéré	50m <Ds< 100m
R 5	Relief assez fort	100m <Ds< 250m
R6	Relief fort	250m <Ds< 500m
R7	Relief très fort	500m <Ds< 750m

(I.R.D.)^{*} : Institut de recherche pour le développement

Ainsi, l'application de la formule (8) permet de classer relief de type très fort (R7), avec Ds=548,59m.

3.3. Cadre géologique :

La région de Sidi Bel Abbés appartient à l'unité géologique des plateaux algériens, composée de terrains dont l'éventail va du Trias au Pliocène.

Pour le bassin de l'Oued Mekerra, sa position géographique lui donne l'aspect d'une dépression remblayée par des formations quaternaires et plio-quaternaires. Limité au Nord et à l'Est, par des terrains post-crétacé, au Sud, par des terrains jurassique et crétacé.

Dans l'ensemble, les caractères géologiques essentiels à considérer pour un bassin versant sont la lithologie et la structure tectonique.

3.3.1. Étude litho stratigraphique :

Telle qu'elle se présente en affleurement et en sondage, la succession stratigraphique dans la région de Sidi Bel Abbés peut se résumer comme suit, de bas en haut :

3.3.1.1. Le Mésozoïque :

Les formations de cette période géologique affleurent au niveau des monts de Tessala au Nord du bassin et dans la zone des hauts plateaux dans sa partie Sud. Le Mésozoïque est composé essentiellement des formations d'âge de Crétacé et Jurassique :

• Le Trias

Des affleurements ont été observés aux environs de la localité de Zerouala et à la ville de Sidi Bel Abbés. En effet, le Trias est composé d'argiles et de marne bariolées, multicolores, associées à du gypse, des dolomies bréchiques, des cargneules, des ophites et des gabbros.

- **L'Oxfordien** affleure spécialement au Sud-ouest de la plaine en se présentant sous forme de grès, à passées argileuses, alternant avec quelques niveaux dolomitiques ou calcaires.

- **Le Kimméridgien inférieur et moyen** : cette formation est constituée par un ensemble de dolomies cristallines bien karstifiées, à fissures et intercalations calcaires et marneuses.

Affleurant au Sud-ouest de la plaine, sur une épaisseur d'environ 500m, Le Kimméridgien inférieur et moyen forme en fait le massif de Sidi Ali Benyoub.

- **Le Kimméridgien supérieur** : est formé dans son ensemble par une alternance de marnes grises vertes et de calcaire variés, souvent gréseux, en bancs massifs à la base de la série, apparaissant dans les environs d'Ain Tellout.

- **Le Portlandien** : avec une épaisseur d'environ 200 m, Il est formé par des grès blancs, des marnes verdâtres, des calcaires argileux et graveleux, affleurant largement dans la région qui s'étend entre Sidi Ali Benyoub et Ain Tellout (région de Tlemcen).

- **Le Berriasien-Valanginien** : Cet ensemble monotone, de 120 m de marnes vertes et jaunes et de calcaires graveleux. Il appartient à la formation des calcaires de Remailia. On l'observe dans les deux parties de la plaine (S-E et S-W), avec une épaisseur de 110m à 140m.

- **L'Hauterivien (Membre des calcaires de Remailia)** : Il affleure sous forme d'une épaisse formation de 150 m au Sud-est du bassin versant. Il est représenté par le calcaire graveleux, gréseux, à trace de coquilles, de grés, alternance de calcaire variés, et d'un ensemble marneux à bancs calcaire.

- **Le Barrémien** affleure légèrement au sud de la forêt de Belarbi. C'est une formation puissante constituée principalement de grès roux, d'argiles gréseuses et de calcaires graveleux

- **L'Aptien** : Il affleure au Sud de la commune de Belarbi, à la faveur d'un horst. Il est constitué de calcaires microcristallins ou à rognons et de grés, appelés calcaires de Zyguine. Cette formation a une épaisseur d'environ 150 m.

- **Le Crétacé moyenne et supérieur**

Cette formation allochtone affleure au Nord-ouest du bassin versant d'Oued Makerra sous forme de marnes salifères, avec la présence de quelques bancs de calcaires.

3.3.1.2. Le Cénozoïque :

Les terrains du Cénozoïque occupant le BV d'Oued Mekerra sont représentés par les formations suivantes :

- **L'Eocène** : Il affleure à l'ouest de Sidi Ali Boussidi et dans le Djebel Tignemar, Cette formation appartient aux nappes de charriage et il est constitué par un calcaire gris-bleu. .

- **l'Oligo-miocène** : Cette formation constituée l'essentiel des nappes de Tessala, elle est composée de marnes grisées avec quelques bancs métriques de grès à grains fins et ciment calcaire. Elle affleure au Nord du bassin versant.
- **le Miocène** : il se divise en deux formations, à savoir :
 - **Marin** : Affleurant au Nord Est de la plaine de S.B.A, dans la forêt de Louza. Il est constitué de grès, de marnes quelquefois à gypse ;
 - **Continental** : Il est formé des dépôts d'environ 300m de marnes grises, à bancs de grès et lentilles de galets, plus ou moins cimentés constituant ainsi le Djebel Ténira et les Djebels de Caïd Belarbi, au sud.
- **Le Pliocène** : Il est formé de grès et sable fin, alternant avec des limons rouges, avec un conglomérat à la base. On note également, le dépôt de quelques bancs peu épais de calcaires lacustres.

3.3.1.3. Le Plio- quaternaire :

Il s'agit d'un remplissage très hétérogène composé de graviers et galets, formant des lentilles plus ou moins cimentées, et inégalement réparties, sous une couverture de marnes rouges. Les formations peuvent être attribuées au Plio-Quaternaire sont :

- **Les conglomérats des chenaux aquifères** formés de galets hétérométriques, le plus souvent reliés par un ciment argilo-carbonaté, occupent les anciennes vallées des oueds Mekerra et Lamtar ;
- **Le complexe argilo-gréseux** se trouve essentiellement au Sud et à l'Est de la plaine ;
- **Les dépôts alluvionnaire des plateaux** sont composés de dépôts caillouteux et limoneux, parfois grés-sableux, avec des intercalations de lentilles et même des bancs de poudingues, à gros éléments. Ils affleurent dans plaine de SBA, en particulier dans sa partie S-W ;
- **Les conglomérats des hauts plateaux** sont ferrugineux et sont constitués d'éléments dolomitiques ou calcaires hétérométriques, comportant un peu de lentilles localisées au Sud de la plaine et dans les vallées alluviales de Sidi Ali Benyoub.

3.3.1.4. Le Quaternaire :

Considéré parmi les principaux réservoirs d'eau souterraine dans le bassin et la région de Sidi Bel Abbès en général, le Quaternaire se distingue par les terrains suivants :

- Limons, argiles et sables, d'une épaisseur allant jusqu'à 10 m, dans le centre et la partie Nord de la plaine de Sidi Bel Abbès ;
- Alluvions et conglomérats des terrasses, en bordure des Oueds ;
- Principalement en bordure des massifs calcaires, il y a des croûtes calcaires,

- Prés d'Oued Mimoun, on trouve des travertins ;
- Alluvions, plus ou moins cimentés, et conglomérats des "chenaux aquifères", principalement déposés près de Sidi Bel Abbès.

3.3.2. Tectonique :

Les études antérieures hydrogéologiques réalisées sur la région de Sidi Bel Abbès montrent la présence deux styles tectoniques différents :

- Au Nord, l'Oligo-miocène, représenté par son front des lambeaux de calcaire éocène, recouvrait, par les phénomènes de charriage, des terrains autochtones indifférenciés d'âge crétacé moyen et supérieur. Ceux-ci reposent sur le Miocène moyen marin anté-nappe ;
- Au Sud, les terrains calcaires plus ou moins plastiques et légèrement ondulés, donnent un style tectonique cassant très prononcé. En effet, ce massif se fracture en deux directions principales du fait des accidents verticaux et subverticaux et les déformations au niveau du socle :

☞ WSW-ENE : accidents effondrant, en marches d'escalier, dans le substratum jurassico-crétacé dans la plaine de Sidi Bel Abbès ;

☞ ESE-WNW : accidents obliques, délimitant des panneaux en horst et graben.

Par ailleurs, et selon toujours le travail de ^{(35), (7)} ainsi que ^{(26), (29)}, l'activité tectonique récente est marquée par la présence :

- ▶ Des déformations au niveau du Miocène,
- ▶ D'une faille, dont le rejet peut atteindre 10 m au contact Pliocène continental – Plioquaternaire,
- ▶ D'une faille à faible rejet au niveau des conglomérats quaternaires des terrasses de l'Oued Tissaf.

3.4. Données climatiques :

C'est l'ensemble des caractéristiques météorologiques d'une région donnée. La nature du climat joue un rôle capital pour ajuster et équilibrer les caractéristiques écologiques des écosystèmes continentaux.

Aussi, la bonne connaissance des conditions climatiques et ses caractéristiques d'une zone d'étude donnée est importante pour la compréhension du comportement hydrologique des cours d'eau, ainsi que l'évolution de leur qualité.

La région de Sidi Bel Abbès, son climat est caractérisé dans son ensemble par une pluviométrie faible, très irrégulière et par des variations thermiques très importantes, imposant une amplitude entravant souvent le développement des espèces végétales sensibles.

Afin de donner un aperçu sur le climat de la zone d'étude, notamment la pluviométrie et la température, nous nous sommes basés sur les données de la station la plus fiable de la ville de Sidi Bel Abbés. Elle est située à la limite nord du bassin.

3.4.1. Précipitations :

D'après BLINDA (2007) ⁽⁸⁾, les précipitations jouent un rôle très important dans l'alimentation des cours d'eau et des nappes souterraines. En plus, elle participe avec d'autres facteurs dans le contrôle et la modification de plusieurs paramètres biotiques et abiotiques des hydro systèmes.

En régime climatique méditerranéen, on distingue deux origines principales de précipitations :

- Les précipitations frontales de convergence, dues à l'opposition des grandes masses d'air polaires et tropicales. Elles sont en partie responsables des chutes de neige en altitude ;
- Les précipitations de convection, dues à l'ascension rapide des masses d'air chaud tropical provoquant ainsi une situation instable orageuse et des averses très violentes.

Pour la région de Sidi Bel Abbés, les données pluviométriques mensuelles pour la période allant de 1985 à 2004 (figure 09), montre que le mois de janvier est le plus pluvieux, avec 44,78 mm, alors que le mois de juillet est le plus sec, avec 2,03mm. La quantité totale annuelle des précipitations pour cette période d'étude est de 300,06 mm. La valeur maximale est observée durant l'année 1996 (425,2 mm).

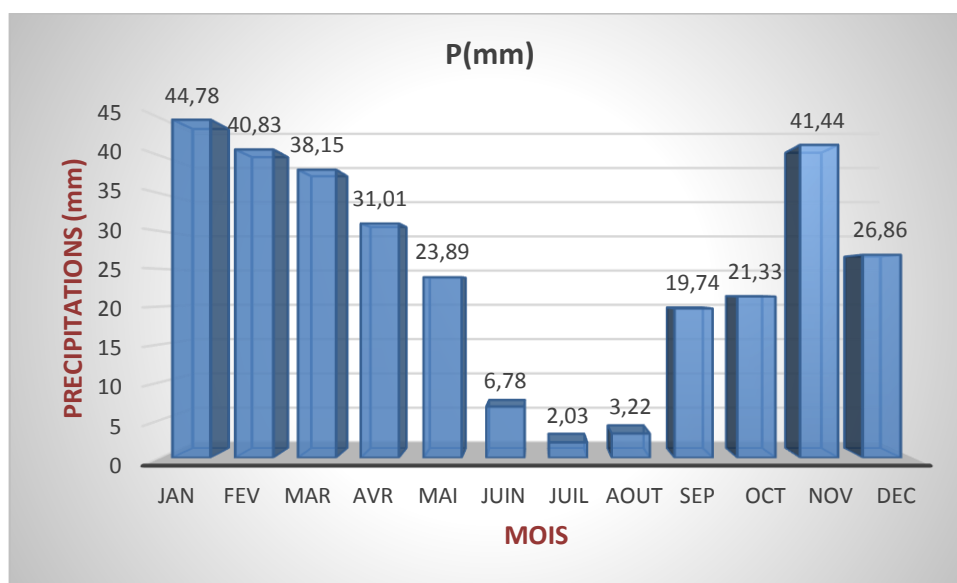


Figure 10 : Précipitations moyennes mensuelles observées au niveau de la station de Sidi Bel Abbés (1985 à 2004)

3.4.2. Températures :

Les températures représentent un facteur important dans la détermination des types de climat d'une région. Ces températures sont caractérisées par des observations moyennes, minimales et maximales, reflétant ainsi les fluctuations annuelles et saisonnières des précipitations atmosphériques.

A cet effet, on s'est intéressé dans l'étude des températures relevées dans la station de Sidi Bel Abbès pendant toujours la période allant 1985 à 2004.

Tableau n° 03 : Valeurs des températures minimales, maximales et moyennes de la région de Sidi Bel Abbès entre 1985 -2004.

MOIS	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	juil.	Aout.
Min °C	14.12	11.77	7.33	3.7	3.63	3.95	5.39	6.6	10.44	14.47	14.64	18.23
Max °C	30.3	25.29	19.14	16.17	14.98	15.72	18.97	20.75	25.14	30.51	34.47	35.09
Moy °C	22.5	18.37	13.2	10.47	9.16	10.12	12.1	14.15	17.73	22.51	24.95	26.6

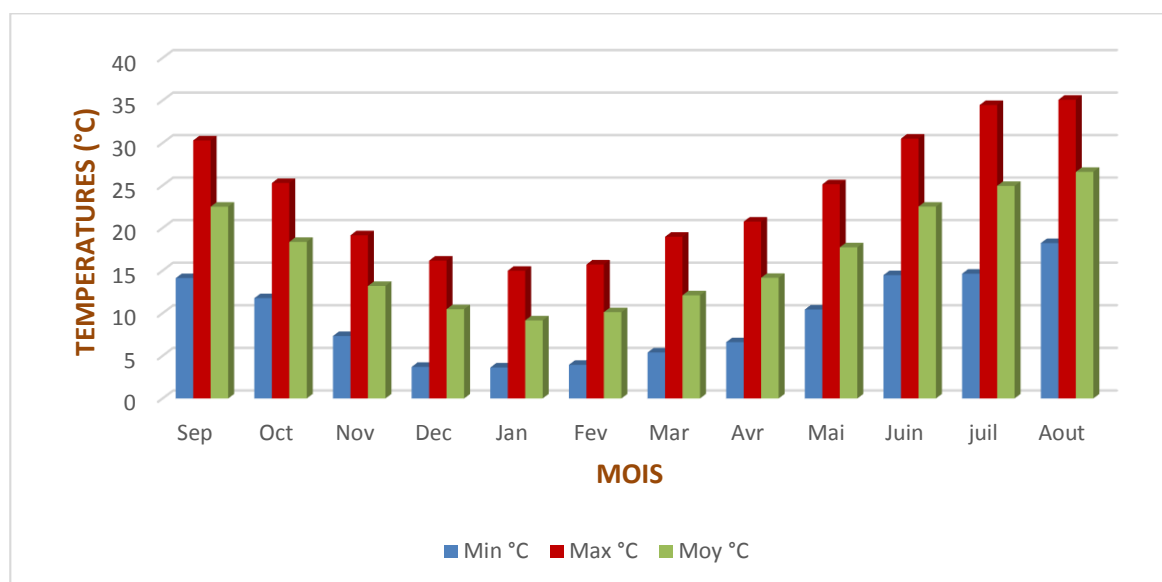


Figure 11 : Histogramme des températures mensuelles minimales, maximales et moyennes de la région de Sidi Bel Abbès (1985-2004).

A partir du tableau n° 03 et la figure n° 10, ci-dessus, on peut ressortir les remarques suivantes :

- L'évolution des Températures moyennes, minimales et maximales, est similaire durant la période d'observation, soit 18 années ;
- Les températures moyennes enregistrées durant la période 1986-2004, montrent un maximum de 26,60°C, au mois d'Août, et un minimum de 9,16 °C, au mois de Janvier ;
- Le minimum des moyennes mensuelles des températures minimales, enregistré au mois de Janvier, est de 3,63 °C, et le maximum est de 35,09 °C, enregistré au mois d'Août.

3.4.3. Synthèse climatique :

• Climagramme pluviothermique d'Emberger

Le botaniste EMBERGER (1930), a proposé un quotient pluviothermique (Q2) qui permet de situer la station dans l'étage bioclimatique convenable où il fait intervenir :

Le total des précipitations annuelles (P),

La moyenne des maxima des mois les plus chauds (M)

et La moyenne des minima des mois les plus froids (m).

$$Q_2 = (2000P) / (M^2 - m^2) \quad (09)$$

Avec :

- **Q2** : Quotient pluviothermique

- **P** : Précipitation moyenne annuelle, en mm

- **M** : Moyenne des maxima des mois les plus chauds,

en degrés absolus K° ($T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273,2$)

- **m** : Moyenne des minima des mois les plus froids, en K° ($T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273,2$)

Donc, l'application de la formule (I) donne : $Q_2 = 32,46$, qui permet de situer la plaine de Sidi Bel Abbès dans un étage bioclimatique semi-aride inférieur, à hiver tempéré (figure 10, ci-après).

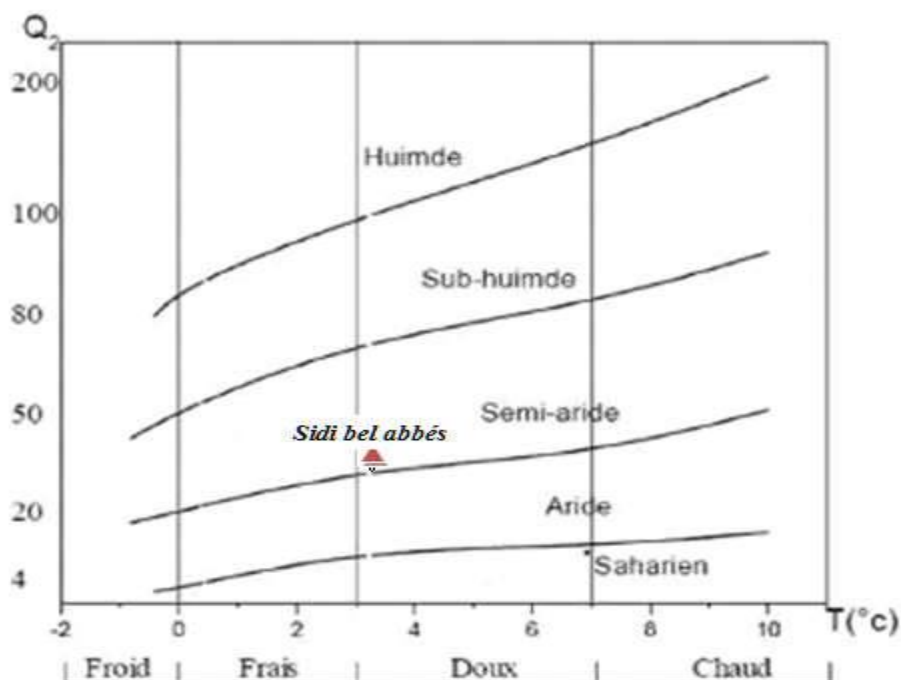


Figure 12 : Abaque pluviothermique d'Emberger de la région de Sidi Bel Abbès pour la période allant de 1985-2004.

•Indice d'aridité de Demartone (1923)

En se basant sur les données pluviométriques et celles des températures durant la même période, on peut déterminer le type de climat de la région étudiée par le calcul de l'indice d'aridité de Demartone (1923), qui correspond au rapport entre la moyenne annuelle des précipitations (P, en mm) et la moyenne annuelle des températures (T, en °C), à savoir :

$$I = P / (T+10) \quad (10)$$

Où :

- **I** : indice d'aridité de Demartone
- **P** : précipitations moyennes annuelles (P= 298,76 mm)
- **T** : température moyenne annuelle T = 16,68 °C.

L'Application de la formule (10) montre que l'indice d'aridité de Demartone est égal à : I = 11,19. La projection de cette valeur sur le tableau, ci-dessous, donne que la région de Sidi Bel Abbès est caractérisée par un climat semi-aride.

Tableau n° 04 : Classement du type de climat selon l'indice
d'aridité de Demartone

Indice d'aridité (I)	Type de climat
$20 < I < 30$	Tempéré
$10 < I < 20$	Semi-aride
$7,5 < I < 10$	Steppique
$7 < I < 7,5$	Désertique
$I < 7$	Hyperaride

3.4.4. Autres paramètres climatiques :

• Vents :

Ce sont des courants, résultants d'un gradient de pression dans son ensemble, de masses d'air. La vitesse des vents dans la région de Sidi Bel Abbés varie de 21 m/s à 30 m/s, avec une moyenne de 25,25 m/s. D'après les études effectuées dans la région, les directions des vents sont :

- Les vents du Nord-ouest, dominants dans la région, soufflent de 10 à 15 jours/mois, pendant toute l'année ;
- Les vents du Nord, sont fréquents sur toute l'année (4 à 5 jours/mois), les vents plus violents apparaissent entre Octobre et Mars ;
- Les vents de l'Ouest, s'observent en hiver (7 à 10 jours/mois) ;
- Les vents du Nord-est, apparaissent surtout en été (7 à 8 jours/mois).

• Gelée et sirocco :

Pour la gelée, la période critique se situe entre les mois de Décembre et de Février et se distingue par une fréquence inquiétante en période printanière, au moment où la végétation est en période de floraison. La fréquence mensuelle moyenne des gelées est présentée dans le tableau n° 05, ci-dessous :

Tableau n° 05 : Fréquence moyenne mensuelle des gelées

(Période 1985-2005)

Mois	Jan	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Freq. Moy. mensuelle	11	8.85	4.09	1.66	00	00	00	00	00	0.09	2.19	7.9

Concernant le sirocco, qui est un vent très sec et très chaud soufflant du Sahara vers le littoral, il dure près d'une semaine annuellement dans la région semi-aride de l'ouest algérien et n'atteint au maximum qu'une quinzaine de jours, en Juillet et Août. Les dernières années, il a une tendance de se manifester d'une manière plus importante. Il souffle environ une vingtaine de jours par an, principalement en Juillet et Août, quelquefois dès le mois d'avril et atteint au maximum vingt-cinq jours.

3.5. Aperçu phyto-pédologique :

3.5.1. Couvert végétal :

La couverture végétale dans le bassin de l'Oued Mekerra est développée de manière irrégulière.

On trouve à l'aval de la ville de Ras El Ma des terrains couverts d'Alfa, alors que vers le Nord, les terrains sont réservés aux broussailles. Dans la région de Sidi Ali Benyoub, où elle cède la place aux céréalicultures et arboricultures (vignes, agrumes, etc.). Enfin, près de 20 % de la superficie du bassin est couverte de forêt, ce qui donne une impression que la couverture forestière n'assure qu'une faible protection envers le phénomène d'érosion dans le BV.

3.5.2. Pédologie :

En général, les principaux types de sols rencontrés dans le bassin se présentent comme suit :

❖ **Sols alluviaux** : localisés essentiellement dans les vallées, surtout dans celle de l'Oued Mekerra, et la plus part de ces sols sont profonds, occupent environ 30% de la plaine de Sidi Bel Abbés et sont utilisés par la céréaliculture, les cultures maraichères et l'arboriculture,

L'extension du tissu urbain s'est fait sur ces sols et agit négativement sur la surface agricole utile (SAU) ;

❖ **Sols à croûte calcaire ou rendzines** : ils se localisent dans la majeure partie des hautes plaines steppiques, on les retrouve également dans les alluviaux des plus anciennes terrasses de la plaine de Sidi Bel Abbés. Ils ont été occupés par le vignoble, mais actuellement et après l'arrachage de plus de 90% de la vigne, ces sols sont utilisés pour la céréaliculture et ne donnent que de très faibles rendements, entre 4 et 7 quintaux par hectare ;

❖ **Sols calcaires** : c'est l'espace privilégié pour les formations forestières qui couvrent plus de 200 000 ha. Ils se rencontrent presque dans la majeure partie de la wilaya de Sidi Bel Abbés, sauf dans les hautes plaines steppiques ;

❖ **Sols bruns rougeâtres** : de texture sablonneuse, ils colonisent les surfaces plates, occupées par les cultures annuelles où domine la céréaliculture.

3.6. Hydrographie :

La wilaya de Sidi Bel Abbés dispose d'un réseau hydrographique assez important, représenté par des chaâbats et des cours d'eau qui sont presque tous à sec pendant les périodes chaudes. La principale artère de ce chevelu hydrographique, qui traverse la plaine de Sidi Bel Abbés en passant par le chef-lieu de la wilaya, est drainé par un bassin versant d'une superficie de 3000 km², représentée par l'Oued Mekerra qui prend sa source au niveau du Djebel Timizine ; au Sud-est de Ras El Ma. Cet Oued, en fait, est alimenté par des précipitations et par des sources (comme celle d'Ain – Skhouana) où l'écoulement annuel peut atteindre 42 millions de m³ en moyenne.

D'après OTMANE (2015), les principaux affluents d'Oued Mekerra sont : Oued Touifza, O.Tadjmount, O. Faïd Et Taga , O. Mzi , O. Sekhana, O. El Khetoua , O. Ras El Ouidiane, O.Farat ez ziet, O. Smar, O. Tissaf et O. Mellah .

3.7. Aperçu hydrogéologique :

Compte tenu de la diversité des formations géologiques et des structures géologiques, ainsi que de l'importance de l'alimentation des nappes, on trouve différents types de systèmes aquifères dans le bassin.

Les principaux aquifères, de grande à faible importance, ont été reconnus dans des formations plus ou moins récentes au niveau de la région de Sidi Bel Abbés, qui fait partie, totalement ou partiellement, du bassin. Il s'agit des nappes suivantes :

- La nappe alluviale plio-quaternaire, de Sidi Bel Abbés
- La nappe de grès pliocène, de la forêt de Tenira
- La nappe des calcaires éocènes, de Sidi Ali Boussidi
- La nappe des calcaires et dolomies de zygine (aptien), de la forêt domaniale de Belarbi
- La nappe des calcaires et dolomies jurassico-crétacé, des monts de Sidi Ali Benyoub.

En fait, les nappes de Sidi Ali Benyoub, Sidi Ali Boussidi et Tenira présentent des horizons perméables, qui sont en communications hydrauliques, au moins partielle, directe ou indirecte, avec la nappe plio-quaternaire. Les potentialités en eau, de cette dernière, sont estimées à plus de 40 millions de m³ annuellement et sa qualité est relativement médiocre. De plus, en l'absence d'une gestion correcte cette nappe subit une surexploitation préjudiciable à son équilibre.

3.8. Conclusion :

Le bassin versant de l'Oued Mekerra est situé au Nord-ouest de l'Algérie et fait partie du grand bassin de la Macta. Il est localisé entre la latitude 34°31' - 35°21' Nord et la longitude 1°16' - 0°58' Ouest, et orienté du sud (en amont, 1097 m à Ras El Ma) au nord (en aval, 500m, de la ville de Sidi Bel Abbès). Il s'étend sur une superficie (A) de 4102 km², pour un périmètre (p) de 353 km.

L'altitude maximale du bassin versant de l'oued Mekerra égale à ; Hmax= 1700 m, Alors que l'altitude minimale du bassin est égale à ; Hmin= 500 m

L'Oued Mekerra est un cours d'eau, d'une longueur de 125 km, a un apport annuel de 25 à 60 millions de m³, soit 42 millions m³/an en moyenne, en période pluvieuse.

Du point de vue cadre géologique, la position géographique du bassin versant de l'Oued Mekerra, lui donne l'aspect d'une dépression remblayée par des formations quaternaires et plio-quaternaires. Limité au Nord et à l'Est, par des terrains post-crétacé, au Sud, par des terrains jurassique et crétacé.

CHAPITRE 4

CALCUL ET EVALUATION DE L'EROSION

A- PARTIE THEORIQUE :

4-1 : Introduction :

L'érosion des sols désigne le processus naturel de détachement et l'entraînement de leurs particules par la pluie (érosion hydraulique) et le vent (érosion éolienne). C'est cette érosion qui entraîne la dégradation des terres cultivées et la destruction des sols.

En plus des terres arables perdues, l'érosion provoque d'autres effets inquiétants comme l'envasement des barrages.

La perte annuelle en sol à l'échelle mondiale serait actuellement de 5 à 7 millions d'hectares/an, selon l'Organisation Mondiale pour l'Agriculture et l'Alimentation – Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO).

Le compactage du sol, l'appauvrissement du sol en matière organique, la dégradation de la structure du sol, un mauvais drainage interne, des problèmes de salinisation et d'acidification du sol sont d'autres causes de détérioration du sol qui en accélèrent l'érosion.

4-2 : Causes de l'érosion des sols :

Le Climat constitue la cause et la source d'énergie érosive. Ce sont les gouttes de pluie, les eaux de ruissellement sur les terrains en pente et les vents violents qui détachent et entraînent les particules terreuses.

La topographie du terrain conditionne la gravité de l'érosion. Les terres qui ont une pente supérieure à 15%, que les physiciens du sol considèrent comme pente érosive.

La nature des sols et leur vulnérabilité à l'érosion. Les sols issus de roches tendres (marnes, schistes feuilletés) sont imperméables et très sensibles à l'érosion.

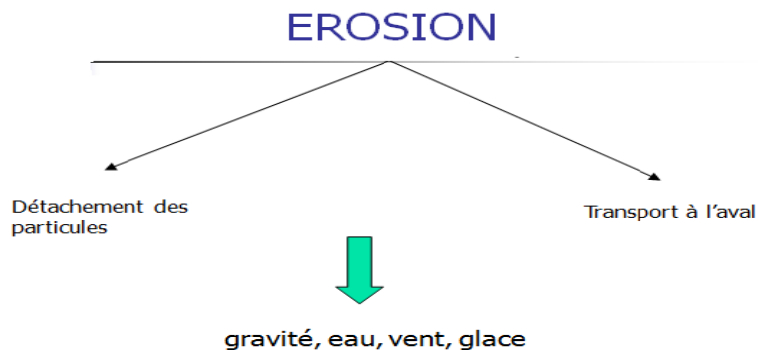
L'absence du couvert végétal qui expose le sol à l'action directe des gouttes de pluie.

L'homme qui, par maladresse et par des pratiques inadaptées sur les versants, est le facteur principal conditionnant l'intensité de l'érosion. Les défrichements qu'il opère sur les forêts et les parcours naturels, le surpâturage, la mise en culture sans précaution des terres tendres en pente, les labours mécanisés dans le sens des grandes pentes et la non restitution au sol de ses éléments nutritifs enlevés par les cultures facilitent le ruissellement et par conséquent l'érosion et ses effets indésirables pour l'environnement et pour l'économie.

4-3 : Érosion des sols

4-3-1 : Définition : Érosion vient de ERODERE, verbe latin qui signifie «ronger»

L'usage courant du terme "érosion" réfère à l'érosion dite accélérée provoquée par l'homme et qui, au niveau quantitatif et à court terme, est beaucoup plus considérable que le phénomène naturel⁽³⁰⁾.



REF MULLAH

Quelques chiffres :

- Érosion normale (géologique) : 0.1 t/ha/an
- Érosion accélérée : 10 à 700 t/ha/an
- Érosion catastrophique : 1 m de décapage en quelques heures
- Ravinement : 100 à 300 t/ha/jour
- Glissement en masse : 1000 à 10 000 t/ha/heure

4-3-2 : Différents types d'érosion en Afrique du Nord :

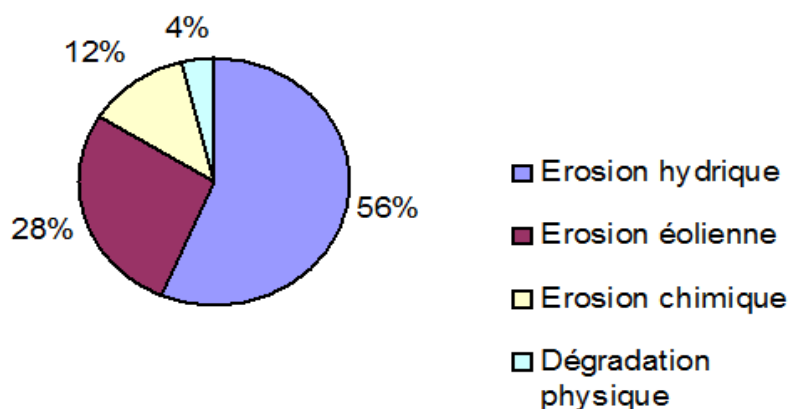


Figure 13 : Différents types d'érosion en Afrique du Nord ⁽³⁾

4-3-3 : Différentes phases de l'érosion :

1^{ère} Phase : Destruction de la structure du sol.

2^{ème} Phase : Dispersion des colloïdes.

3^{ème} Phase : Entraînement des éléments fins par l'eau de ruissellement le long des pentes.

4^{ème} Phase : Destruction totale des couches superficielles, décapage progressif

du sol pouvant atteindre la roche mère.

4-4 : Causes de l'érosion hydrique en Algérie

- Le relief : L'Algérie est connue pour être un pays montagneux où les fortes pentes sont la cause de la torrentialité des écoulements superficiels.

- La nature des sols : Les argiles et les marnes constituent la majorité des sols facilement érodables.

- Le climat : Les pluies torrentielles et orageuses.

- L'homme : Le défrichement des terrains en pente par l'activité agricole.

4-4-1 : Évolution de l'érosion hydrique :

État de l'érosion	Aspects de l'érosion
1. Stabilité	<ul style="list-style-type: none"> • Ruissellement insignifiant • Pas d'érosion
2. Début d'érosion	<ul style="list-style-type: none"> • Faible ruissellement d'eau trouble à très faibles vitesses (fortes ou moyennes précipitations). • Apparition de pierres à la surface du sol. • Apparition de rides de faible profondeur. • Baisse sensible de la fertilité du sol.
3. Erosion intense	<ul style="list-style-type: none"> • Fort ruissellement d'eau boueuse. • Grand nombre de pierres. • Apparition de rides très profondes.
4. Erosion dangereuse	<ul style="list-style-type: none"> • Ruissellement marqué pour toutes précipitations. • Eaux très chargées (graviers, agrégats se déplaçant à grandes vitesses). • Terres emportées en masse.
5. Stade final de l'érosion	<ul style="list-style-type: none"> • Exportation totale de la terre végétale.

4-4-2 : Principaux agents de l'érosion hydrique :**4-4-3 : Intensité et agressivité des précipitations :**

♦ L'énergie cinétique des gouttes de pluie :

$$Ec = 11.89 + 8.73 \log I_p \quad (11)$$

- Cette énergie de battance est dissipée par 4 actions :

- Tassement du sol : sous l'impact des pluies après humectation rapide de la surface du sol
- Écrasement et force tangentielle d'arrachement : séparation des particules agrégées
- Projection des particules : effet SPLASH
- Bruit du choc des gouttes : sur les matériaux résistants.

4-4-4 : Le ruissellement :**a- Théorie de Horton (1945) : L'intensité de la pluie > l'infiltration**

Le ruissellement naît lorsque l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration du sol.

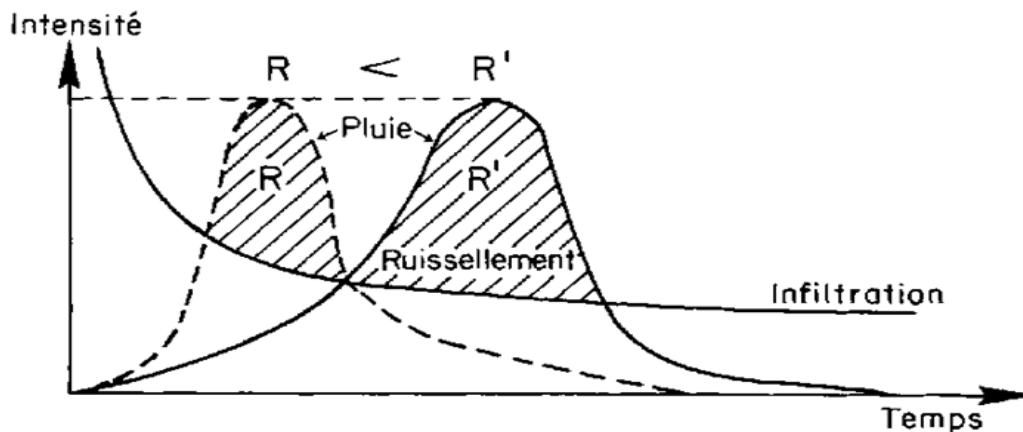


Figure 14 : Théorie de Horton (1945) : L'intensité de la pluie > l'infiltration ⁽³⁾

b- Théorie de la saturation du milieu :

Le ruissellement naît lorsque l'espace poreux du sol est saturé.

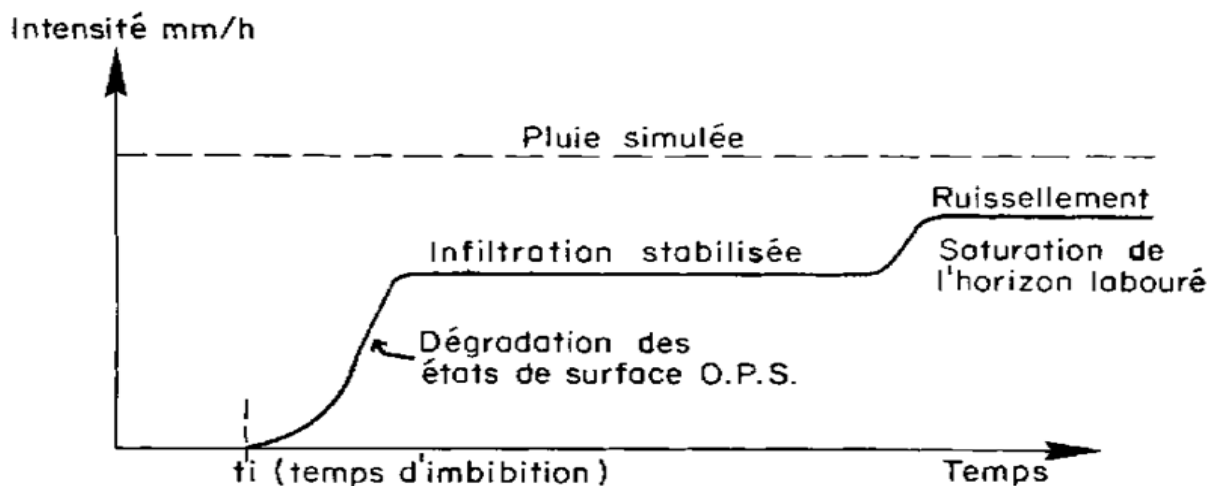


Figure 15 : Théorie de la saturation du milieu ⁽³⁾

c- Théorie de la contribution partielle de la surface du bassin au ruissellement :

On constate que le ruissellement observé au niveau de la rivière est fonction de la surface du sol saturé au fond de la vallée.

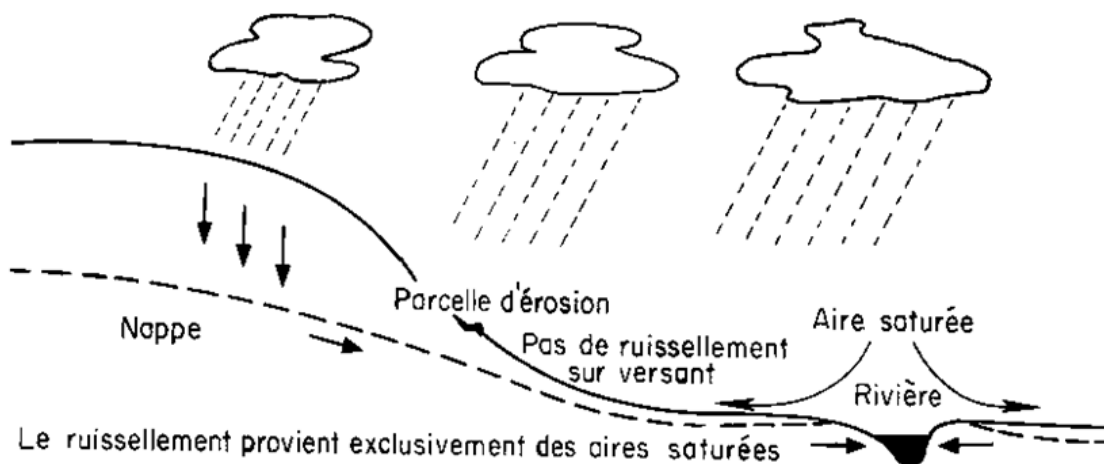


Figure 16 : Théorie de la contribution partielle de la surface du bassin au ruissellement ⁽³⁾

4-5 : Formes de manifestation de l'érosion hydrique :

4-5-1 : Érosion en nappe :

♦ Elle se produit lorsque l'écoulement et l'érosion se font sur toute la surface du sol, ce qui provoque une usure homogène non perceptible dans la majorité des cas.

♦ Quantitativement, l'érosion en nappe est très modeste.

En Algérie, les chercheurs de l'I.N.R.F (L'Institut National de Recherche Forestière) et de l'I.R.D (L'Institut de recherche pour le développement) ont évalué les pertes en terres par ce type d'érosion de 0.10 à 20 t / ha / an.

♦ L'érosion en nappe dépend de :

- L'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement
- L'énergie cinétique des pluies qui détachent les particules
- La durée des pluies et/ou l'humidité avant les pluies. ⁽³⁴⁾

♦4.5.2 L'érosion linéaire

♦ Elle se manifeste lorsque la concentration des eaux conduit à la formation de chenaux de dimension croissante : griffes (quelques centimètres de profondeur), rigoles (incision dans la couche labourée), ravines (incision dépassant la couche labourée).

4-5-3 : Erosion en griffes et rigoles : Elle se produit lorsque l'écoulement d'eau se concentre et choisit son passage. Dès qu'une griffe s'établit, l'eau de ruissellement tend à s'y réunir et plus elle se creuse, plus il y a appel d'eau dans la rigole. Ainsi, le phénomène s'accélère de lui-même.

4-5-4 : Erosion par ravinement : Les ravines suivent la ligne de plus grande pente des versants. Puisque le ruissellement provenant des versants peut atteindre 50 à 80 % durant les averses exceptionnelles tombant sur des terres battues ou compactées, l'essentiel des transports solides provient des ravines et des oueds.

- En Algérie, l'érosion ravinant a déplacé 90 à 300 t / ha / an : vitesse d'altération des versants de 8 à 17 mm / an.



Figure 17 : Erosion en nappe – Colorado -USA (www.alamyimages.com)



Figure 18 : Erosion en griffes – France-(altituderando.com)



Figure 19 : Erosion en rigoles –Algérie -(e-biblio.univ-mosta.dz)



Figure 20 : Rigoles en voie d'approfondissement en petites ravines –
Cote d'ivoire –foa.rog



Figure 21 : Érosion par ravinement –Missouri – U.S.A. Wikipédia



Figure 22 : Système de ravines très avancé (région de Biskra, Algérie)
(Djerrab-geologie-guelma.e-monsite.com)

4 -6 : Quantification de l'érosion hydrique

1°/ Formule de WISCHMEIER et SMITH (1978) :

$$A = R . K . L . S . C . P \quad (12)$$

- **A** : Valeur moyenne à long terme de la perte de sol annuelle (t/Ha/an)
- **R** : Erosivité des pluies (t/ha)
- **K** : Erodibilité du sol ou Susceptibilité du sol à l'érosion (t/ha)
- **L** : Facteur de longueur de pente (sans dimension)
- **S** : Facteur de pente (sans dimension)
- **C** : Facteur d'aménagement (sans dimension)
- **P** : Facteur du système de conservation des sols pratiqué (sans dimension).

Paramètres de l'USLE (Soil Universal Loss Équation)

$$R = \sum_{j=1}^m (E . I_{30}) \quad [t / ha] \quad (13)$$

R : Erosivité moyenne annuelle à long terme (t/ha)

E : Energie cinétique de l'orage (kJ/m^2)

I₃₀ : Intensité maximale de l'orage j durant 30 min (mm/h)

m : Nombre d'orages érosifs par an.

$$K = 2.77.10^{-6} . M^{1.14} . (12 - OM) + 0.043 . (SC - 2) + 0.033 . (4 - PC) \quad (14)$$

$$M = (si + ffS) . (100 - cl) \quad (15)$$

cl : Argile (< 2 µm) (%)

si : Limon (2 – 50 µm) (%)

ffS : Sable très fin (0.05 – 0.1 mm) (%)

OM : Matière organique (%)

SC : Classe de structure (SD)

PC : Classe de perméabilité (SD)

2°/ Formule de FOURNIER (1960) :

$$Ass = \frac{1}{36} \left(\frac{P_m}{P_{Am}} \right)^2 2.65 \left(\frac{h}{S} \right)^2 0.46 \quad (16)$$

- **Ass** : Apport solide spécifique moyen annuel (t/km²/an)
- **P_m** : Précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm).
- **P_{Am}** : Précipitations moyennes annuelles (mm).
- **h** : Dénivelée moyenne (m).
- **S** : Superficie du bassin versant (km²).

3°/ Formule de TIXERONT (1960) :

Basée sur les données recueillies dans 32 bassins Algériens et 9 bassins

Tunisiens sur une durée comprise entre 2 et 22 ans.

$$Ass = 354 . E^{0.15} \quad \text{Pour les bassins Tunisiens} \quad (17)$$

$$Ass = 92 . E^{0.21} \quad \text{Pour la région est Algérien} \quad (18)$$

$$Ass = 200 . E \quad \text{Pour la région centre Algérien} \quad (19)$$

- **Ass** : Apport solide spécifique en t/km²/an
- **E** : Écoulement en mm.

4°/ Formule de SOGREAH (1969) :

Basée sur les données de 30 bassins algériens de superficie comprise entre 100 et 300 km², soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000 mm

$$Ass = \alpha . E^{0.15} \quad (20)$$

- **Ass** : Apport solide spécifique (t/km²/an)
- **α** : **Coefficient** dépendant de la perméabilité du sol
- **E** : Écoulement annuel (mm).

Tableau n°06 : Valeurs de α en fonction de la perméabilité du sol
(D'après SOGREAH, 1969)

Perméabilité	α
♦ Perméabilité forte	8.5
♦ Perméabilité moyenne	75
♦ Perméabilité moyenne à faible	350
♦ Perméabilité faible	1400
♦ Imperméable	3200

L'oued Mekerra présente un profil en long assez régulier, qui montre une pente moyenne de son cours d'eau principal . Ce profil est tracé à partir de la carte topographique à l'échelle 1/200.000 en tenant compte de l'altitude et de la longueur de cours d'eau à l'exutoire.

(Figure 22)

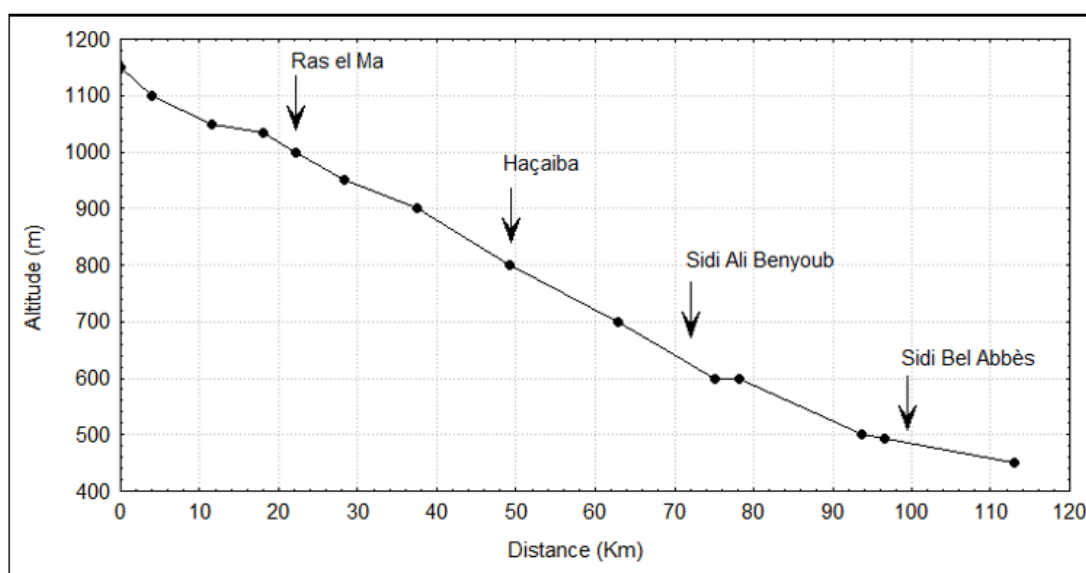


Figure 23 : Profil en long du cours d'eau principale « Mekerra » (26)

B – PARTIE PRATIQUE**4-7 : Définition de l'hydrométrie :**

L'hydrométrie est la branche de l'hydrologie qui concerne la mesure du débit des eaux continentales, superficielles ou souterraines. En général, l'hydrométrie concerne la mesure du débit des cours d'eau, qui s'indique avec la lettre Q .

4-8 : Débit liquide :**4-8-1 : Définition :**

Le débit instantané, Q , est le volume d'eau passant à travers la section d'un cours d'eau pendant une unité de temps

$$Q = \frac{V}{t} \quad (21)$$

- Q : débit (en m^3/s)
- V : volume (en m^3)
- t : temps (en s)

En considérant la « surface mouillée » (S , en mètres carrés), définie comme la section du cours d'eau prise perpendiculairement à l'écoulement, le volume V correspond au produit de cette surface par une longueur dans la direction de l'écoulement (L en mètres) :

$$V = S \times L \quad (22)$$

La longueur L correspond ainsi à la distance parcourue par le courant durant une unité de temps. Le rapport de cette longueur par le temps t correspond donc à la vitesse moyenne du courant dans la section (v_{moy}) :

$$\frac{L}{t} = v_{\text{moy}} \quad (23)$$

Le débit est donc donné par la relation :

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{S \times L}{t} = \frac{L}{t} \times S = v_{\text{moy}} \times S \quad (24)$$

4-8-2 : But des observations :

Relation débit liquide – niveau d'eau :

Une série de mesures de débits liquides dans une section de contrôle permet d'établir la relation entre le niveau d'eau local et le débit (courbe de débit).

La valeur approximative du débit pour un niveau d'eau quelconque peut ensuite être déduite de la courbe.

La comparaison des débits liquides relevés à intervalles de temps variables, permet de déceler la fermeture ou l'ouverture de chenaux par lesquelles ils transitent.

L'évolution de la distribution du débit liquide entre les différents chenaux, mesurée régulièrement est un indicateur pour les changements à la morphologie du système de méandres.

4-8-3 : Méthodes pour déterminer le débit liquide :

- Les méthodes 'volumétriques' : permettent de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient d'une contenance déterminée.
- Les méthodes 'd'exploration du champ de vitesse' : Consiste à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée.
- Les méthodes 'hydrauliques' : Tiennent compte des forces qui régissent l'écoulement (pesanteur, inertie, viscosité...).
- Les méthodes 'physico-chimiques' : Prennent en compte les variations, lors de l'écoulement de certaines propriétés physiques du liquide (concentration en certains éléments dissous).

4-8-4 : Calcul du débit liquide :

Deux éléments sont donc indispensables pour les calculs du débit liquide :

- La géométrie de la section de jaugeage
- Les vitesses locales ou la vitesse moyenne

4-8-5 : Mesures du débit liquide :

- Méthode classique au moulinet équipement
- Méthode classique au moulinet fréquence

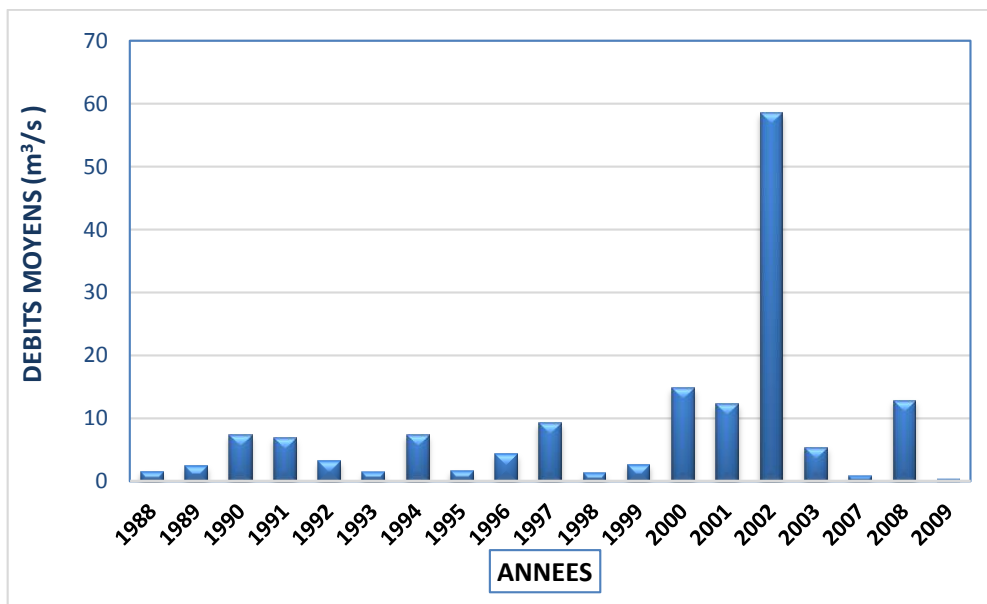


Figure 24 : Variation annuelle des débits moyens (m³/s) de l'oued Mekerra à la station de Sidi Ali Benyoub (Agence national des ressources hydriques)

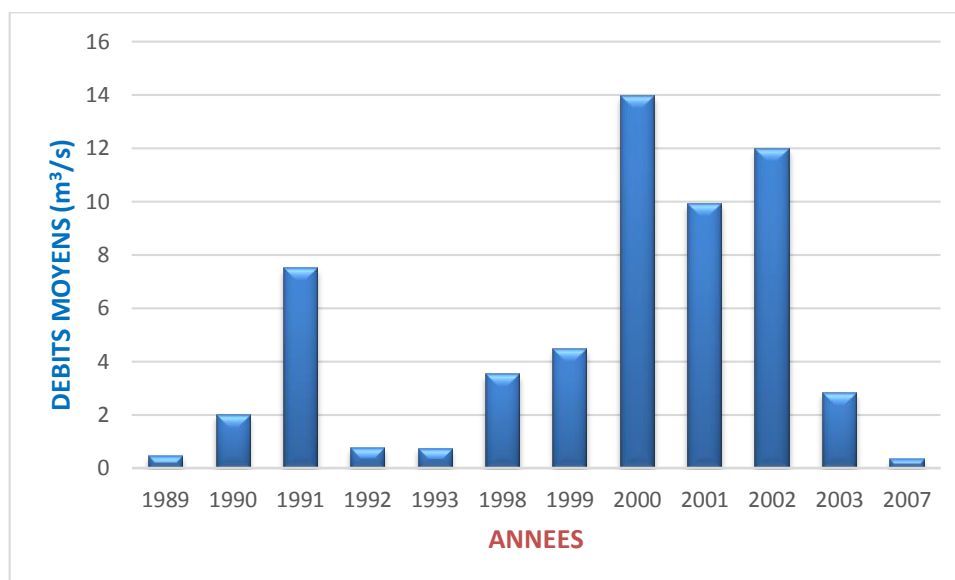


Figure 25 : variation annuelle des débits moyens (m³/s) de l'oued Mekerra à la station de Haçaiba (Agence national des ressources hydriques)

4-9 : Débit solide :

4-9-1 : Généralités :

Les eaux des rivières transportent des alluvions suivant plusieurs processus. En fonction de leurs caractéristiques (dimensions, poids spécifique...) et celles du courant (vitesse, profondeur...), les alluvions peuvent être traînées ou roulées sur le fond, déposées ou arrachées au fond du lit et restées en suspension dans le courant.

Les différentes phases du charriage des alluvions se produisent simultanément et l'on ne peut établir une séparation nette entre elles.

Cependant pour les besoins de l'analyse, on classe habituellement les transports solides en 2 catégories : les transports solides en suspension et les transports solides charriés sur le fond (ou charriage).

Il existe donc 2 mécanismes physiques différents : le charriage et la suspension.

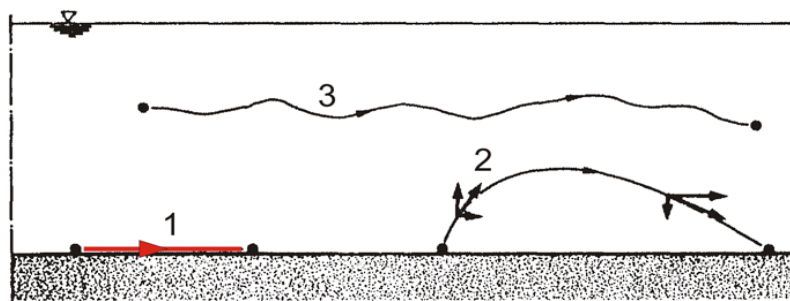
La saltation est une combinaison de ces deux.

•**La suspension** : les particules solides les plus fines sont entraînées par le courant et restent suspendues dans le liquide par lequel elles sont transportées, et ne touchent jamais le fond. Les particules sont plus ou moins entraînées à la même vitesse que le courant.

•**Le charriage** : les grains les plus grossiers roulent ou glissent sur le fond sans jamais le quitter. Les grains charriés sur le lit ont une vitesse inférieure à celle du courant près du fond.

•**La saltation** : certains matériaux de granulométrie intermédiaire restent souvent en contact avec le lit mais font parfois des bonds au travers du liquide pour retomber au fond.

TYPES DE TRANSPORT D'UNE PARTICULE SOLIDE AU DESSUS D'UN FOND PLAT



- 1 Transport par charriage**
 2 Transport par saltation
 3 Transport en suspension

Figure 26 : Types de transport d'une particule solide
au-dessus d'un fond plat

Tableau n°07 : Débits solides de Haçaiba (kg/s)

(Agence nationale des ressources hydriques)

Années	Débits solides kg/s
1989	3,22
1990	1,74
1991	1,50
1992	1,44
1993	2,45
1998	16,42
1999	56,31
2000	256,95
2001	215,34
2002	287,77
2003	47,28
2007	0,91

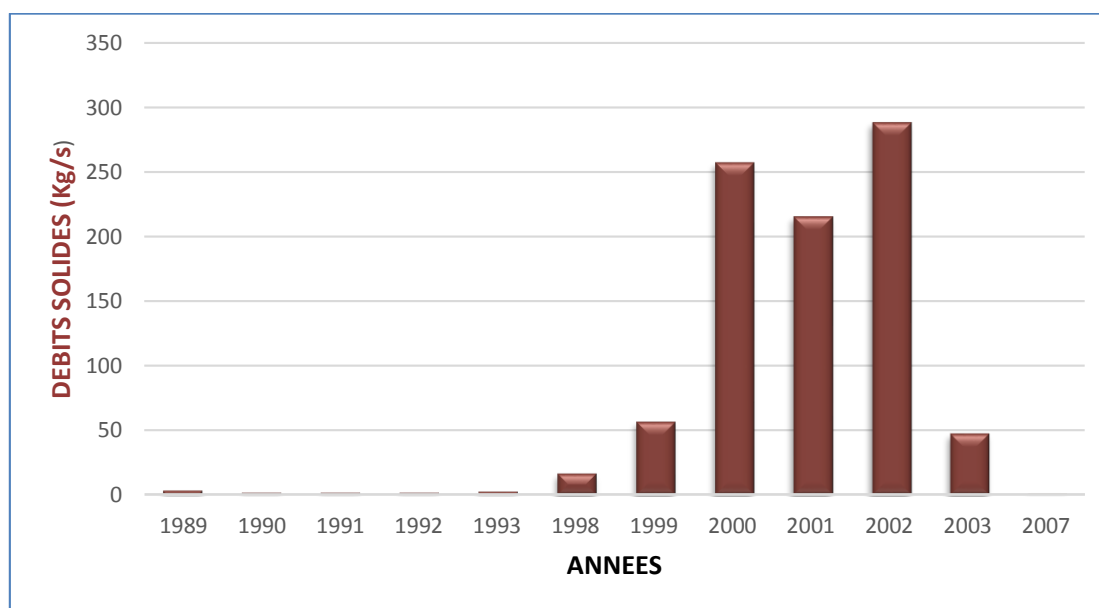


Figure 27 : Débits solides de Haçaiba (kg/s)

Tableau n°08 : Débits solides de Sidi Ali Benyoub (kg/s)

(Agence nationale des ressources hydriques)

Années	Débits solides (kg/s)
1988	148,16
1989	36,04
1990	140,03
1991	69,79
1992	25,69
1993	12,96
1994	113,66
1995	18,45
1996	38,73
1997	181,54
1998	14,03
1999	70,89
2000	607,39
2001	397,30
2002	1829,29
2003	63,13
2007	2,58
2008	17,13
2009	1,24

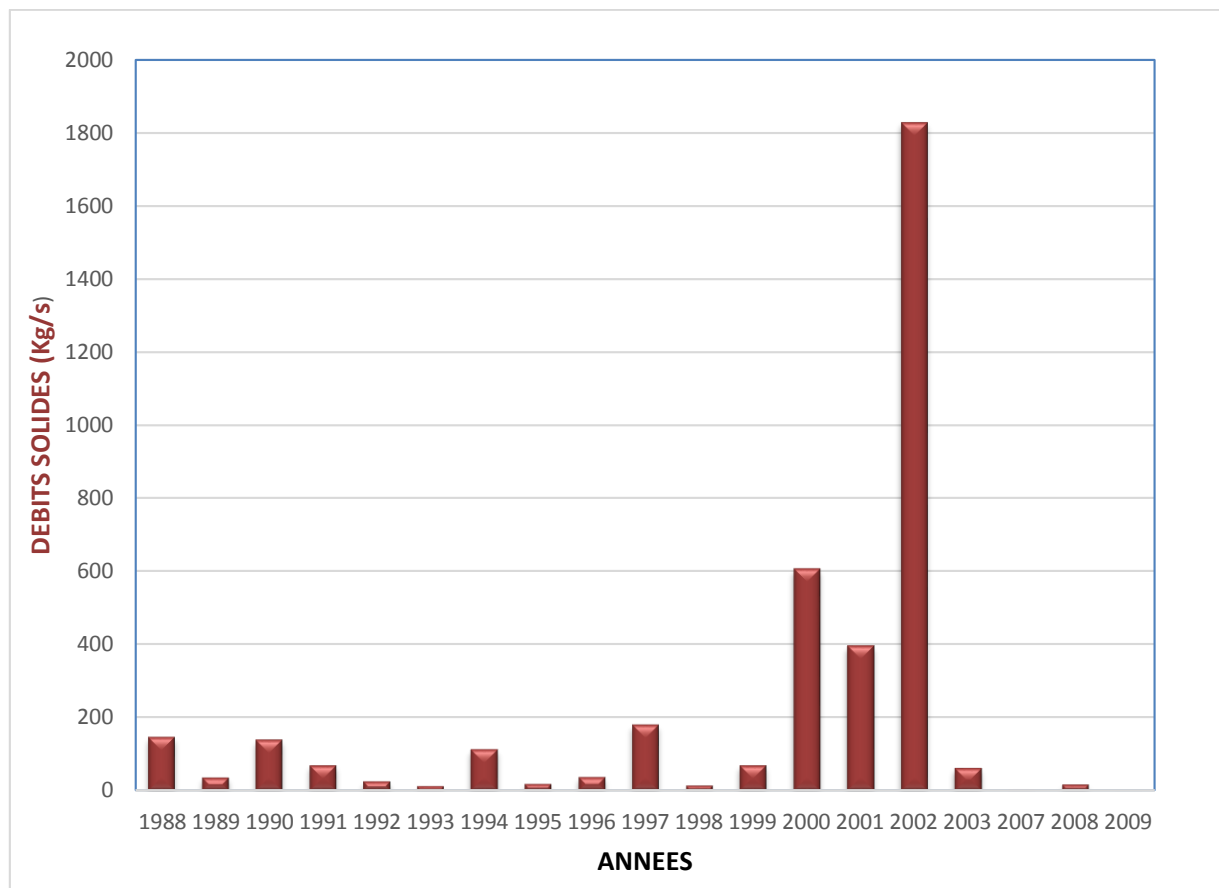


Figure 28: Débits solides de Sidi Ali Benyoub (kg/s)

4-9-2 : Définition :

Le débit solide est la quantité de sédiment (particules, argiles, limons, sables, graviers, ...) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant une unité de temps (p. ex. 1 jour, 1 mois, 1 année).

4-9-3 : But des observations :

Le transport solide des rivières et des fleuves est un processus très important à prendre en compte et sa variabilité spatiale et temporelle est très forte.

Les modifications de géométrie des chenaux navigables résultent des transports de sable. Ceux-ci modifient la morphologie du fleuve à différentes échelles.

L'observation systématique s'impose et peut fournir des renseignements importants sur la grandeur et la répartition du transport dans une section, ainsi que sur le rapport entre transport en suspension et transport en charriage.

On détermine le débit en intégrant la vitesse sur la section, ou encore en multipliant la superficie de la section mouillée (en m²) par la vitesse moyenne (en m/s) des filets liquides traversant la dite section.

$$\int_A v \cdot dA = v_{moy} \cdot A \quad (25)$$

Avec :

v = vitesse locale

dA = aire locale

v_{moy} = vitesse moyenne sur la section

A = aire de la section mouillée totale

4-9-4 : Calcul du débit solide en suspension :

Le débit solide en suspension est déterminé sur la base du débit liquide et de la concentration de la matière en suspension :

$$Q_{ss} = C \cdot Ql \quad (26)$$

Q_{ss} : Débit solide en suspension (kg/s)

Ql : Débit liquide (m³/s)

C : Concentration ou turbidité (g/l)

4-9-5 : Calcul des apports solides totaux

Les apports solides en tonnes ou en millions de tonnes, As (10⁶t ou Mt) et les apports spécifiques Ass en (t/km²/an) sont données par :

$$As = Qs \cdot N \cdot 10^9 \quad (27)$$

$$Ass = (As \cdot 10^6) / S \quad (28)$$

Avec : As : apport solide annuel, mensuel ou saisonnier (Mt)

Qs : débit solide annuel, mensuel ou saisonnier (kg/s)

N : temps en secondes (s)

Ass : apport solide spécifique (t/km²/an)

S : superficie du bassin versant (km²)

4-9-6 : Les apports annuels :

Le flux annuel des matières solides en suspension exporté par l'oued est calculé par la formule :

$$As = \sum_{j=1}^n (T_{j+1} - T_j) Qj \cdot Cj \quad (29)$$

Avec :

C_j : est la concentration mesurée à l'instant t_j ;

Q_j : correspondant au débit liquide à l'instant t_j ;

N : est le nombre de prélèvement effectués sur l'année considérée ;

$T_{j+1} - T_j$: est le pas de temps séparant deux prélèvements consécutifs.

Au moment des crues les prélèvements sont intensifiés, et donc par suite, le pas de temps est réduit.

De même, Al , l'apport liquide annuel engendrant le flux des apports solides As , est calculé par la formule

$$Al = \sum_1^n (T_{j+1} - T_j) Q_j \quad (30)$$

Tableau n°09 : Apports solides Annuels à la station de Haçaiba
(Agence nationale des ressources hydriques)

Années	Concentration moyenne	Apport Liquide	As Suspension	As charriage	As Total	Abrasion
	(Kg/m ³)	(Hm ³)	(T/an)	(T/an)	(T/an)	(T/Km ² /an)
87/88	21.364	2.325	49671.300	9934.260	59605.560	64.508
90/91	0.187	8.159	1525.733	305.147	1830.880	1.981
91/92	0,74	1.252	926.480	185.296	1111.776	1.203
92/93	3.481	1.407	4897.767	979.553	5877.320	6.361
93/94	1.613	0.765	1233.945	246.789	1480.734	1.603
98/99	4.852	1.877	9107.204	1821.441	10928.645	11.828
99/00	9.760	4,697	45842.720	9168.544	55011.264	59.536
00/01	5.434	5,327	28946.918	5789.384	34736.302	37.593
Moyenne	5.929	3.226	17769.008	3553.802	21322.810	23.077

Tableau n°10 : Apports solides Annuels à la station de Sidi Ali Benyoub
(Agence nationale des ressources hydriques)

Années	Concentration moyenne	Apport Liquide	As Suspension	As charriage	As Total	Abrasion
	(Kg/m ³)	(Hm ³)	(T/an)	(T/an)	(T/an)	(T/Km ² /an)
88/89	8.594	9.49	81557.060	16311.412	97868.472	104.337
89/90	12.100	34.43	416603.000	83320.600	499923.600	532.968
90/91	6.200	36.79	228098.000	45619.600	273717.600	291.810
91/92	4,900	6.61	32389.000	6477.800	38866.800	41.436
92/93	5,390	4.83	26033.700	5206.740	31240.440	33.305
93/94	9.920	4.46	44243.200	8848.640	53091.840	56.601
95/96	4.712	22.47	105878.640	21175.728	127054.368	135.452
96/97	6.00	5.07	30420.000	6084.000	36504.000	38.917
97/98	11.475	15.97	183255.750	36651.150	219906.900	234.442
98/99	4.685	3.70	17334.500	3466.900	20801.400	22.176
99/00	13.562	5.57	75540.340	15108.068	90648.408	96.640
00/01	8.688	14.95	129885.600	25977.120	155862.720	166.165
Moyenne	8.019	13.695	114269.899	22853.979	137123.879	146.188

4-9-7 : Précipitations annuelles :

Les précipitations moyennes annuelles sur le bassin versant de la Mekerra est de 350 mm, cette variabilité est illustrée dans la (Figure 28), celle-ci représente des relevés pluviométriques annuelles sur deux stations se trouvant sur le long du bassin.

Tableau n°11 : Précipitations Moyennes annuelles des deux stations pluviométriques du
bassin versant de la Mekerra entre (1990 à 2005)
Sidi Ali Benyoub et Haçaiba (Agence nationale des ressources hydriques)

Années	Les precipitations des stations (mm)	
	Sidi Ali Benyoub	Haçaiba
1990	472,0	438,8
1991	381,9	355,4
1992	274,7	222,1
1993	303,1	263,0
1994	353,8	306,0
1995	442,5	464,9
1996	200,9	162,1
1997	371,0	290,4
1998	236,6	216,1
1999	242,4	219,3
2000	403,1	249,7
2001	357,0	262,7
2002	316,2	335,7
2003	380,1	439,2
2004	156,2	183,7
2005	285,3	372,5

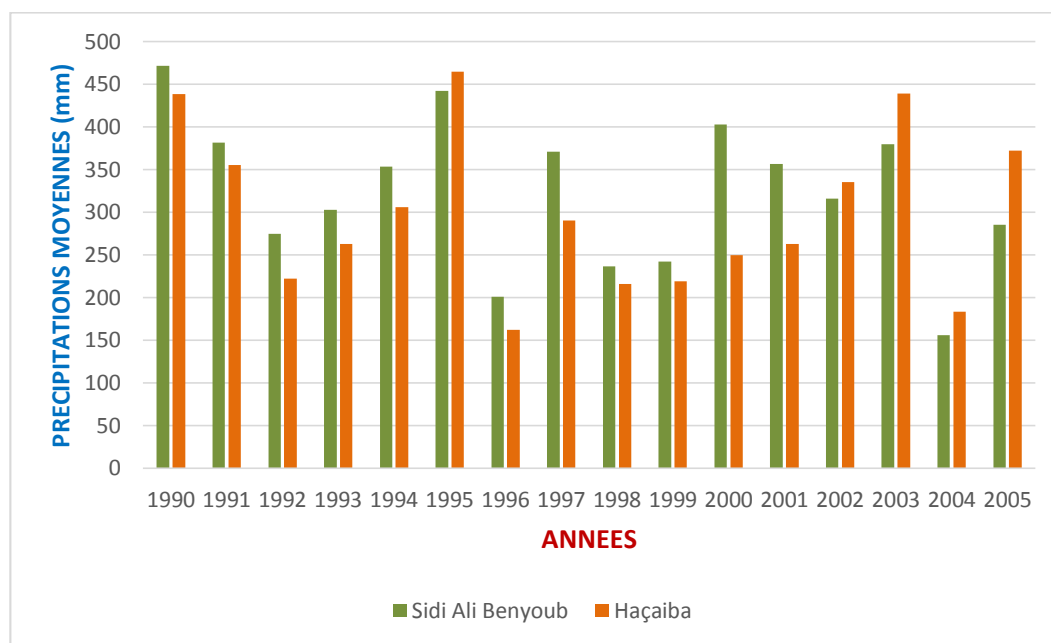


Figure 29 : Précipitations Moyennes annuelles des deux stations pluviométriques du bassin versant de la Mekerra entre (1990 à 2005)
Station Sidi Ali Benyoub et Haçaiba

Tableau n°12 : Débits liquides et débits solides de la station de Haçaiba
(Agence nationale des ressources hydriques)

Années	Débits liquides m ³ /s	Débits solides kg/s
1989	0,46	3,22
1990	1,99	1,74
1991	7,49	1,50
1992	0,75	1,44
1993	0,74	2,45
1998	3,51	16,42
1999	4,47	56,31
2000	13,96	256,95
2001	9,91	215,34
2002	11,96	287,77
2003	2,82	47,28
2007	0,340	0,91

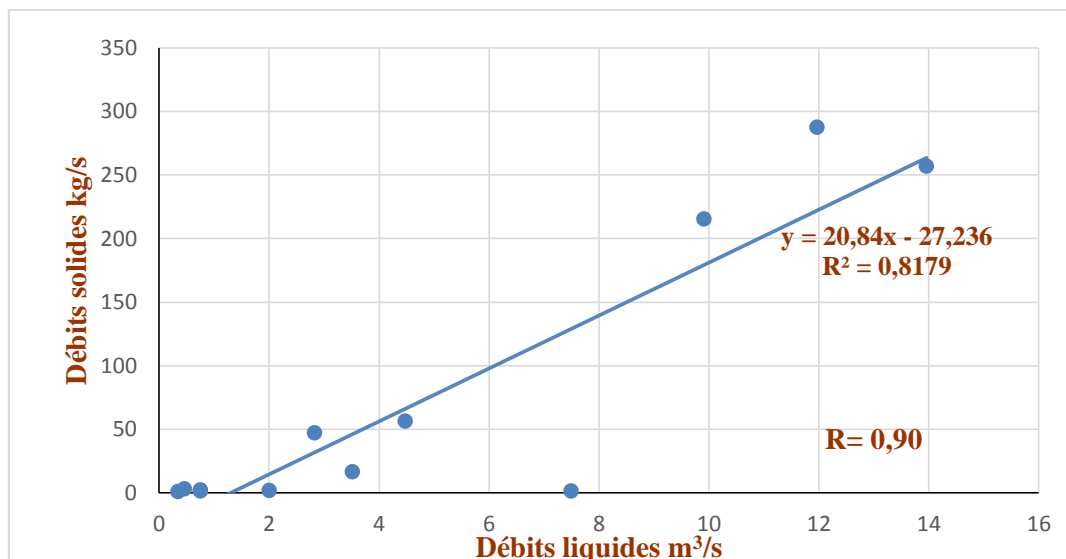


Figure 30: Correlation entre les debits liquides et debits solides de la station de Haçaiba $Q_s = f(Q_l)$

Le Coefficient de corrélation $R = 0.90$, bonne corrélation entre les débits liquides et les débits solides de Haçaiba, donc les données bien que lacunaires sont représentatives.

Tableau n°13 : Débits liquides et débits solides de la station de Sidi Ali Benyoub (Agence nationale des ressources hydriques)

Années	Débits liquides m³/s	Débits solides kg/s
1988	1,54	148,17
1989	2,45	36,04
1990	7,28	140,03
1991	6,86	69,79
1992	3,22	25,69
1993	1,45	12,96
1994	7,15	113,66
1995	1,64	18,45
1996	4,26	38,73
1997	9,23	181,54
1998	1,30	14,03
1999	2,64	70,89
2000	14,74	607,39
2001	12,23	397,30
2002	57,85	1829,29
2003	5,37	63,13
2007	0,86	2,58
2008	12,64	17,13
2009	0,32	1,24

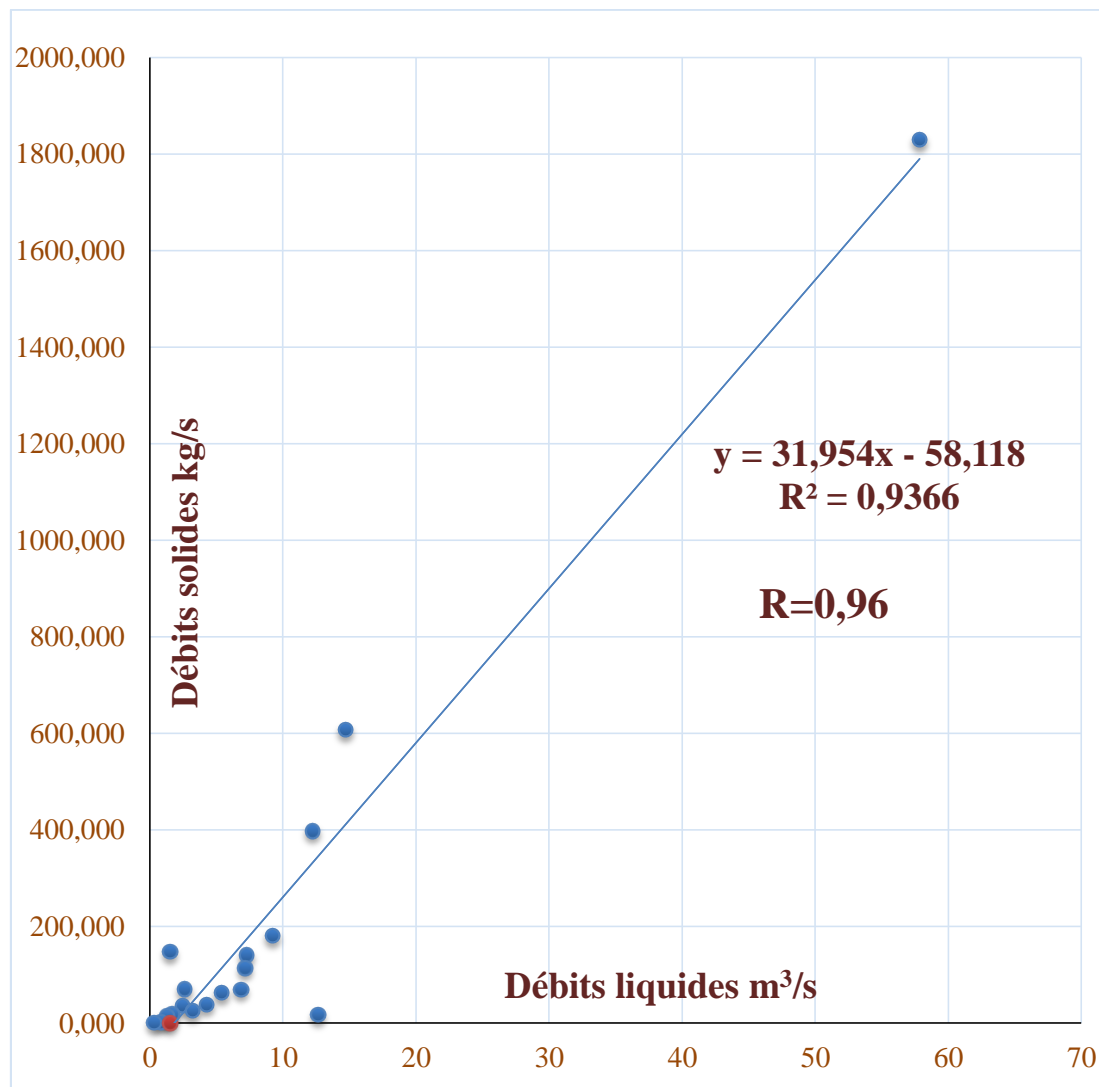


Figure 31: Corrélation entre les débits liquides et débits solides de la station de Sidi Ali Benyoub $Q_s = f(Q_l)$

Le Coefficient de corrélation $R = 0.96$, bonne corrélation entre les débits liquides et les débits solides de Sidi Ali Benyoub, donc les données bien que lacunaires sont représentatives.

Tableau n° 14: Concentrations de la station de Haçaiba (g/l)

(Agence nationale des ressources hydriques)

Dates	Concentrations (g/l)
1989	5,24
1990	1,60
1991	0,18
1992	2,20
1993	1,60
1998	1,31
1999	5,90
2000	6,53
2001	5,92
2002	5,14
2003	5,77
2007	1,54

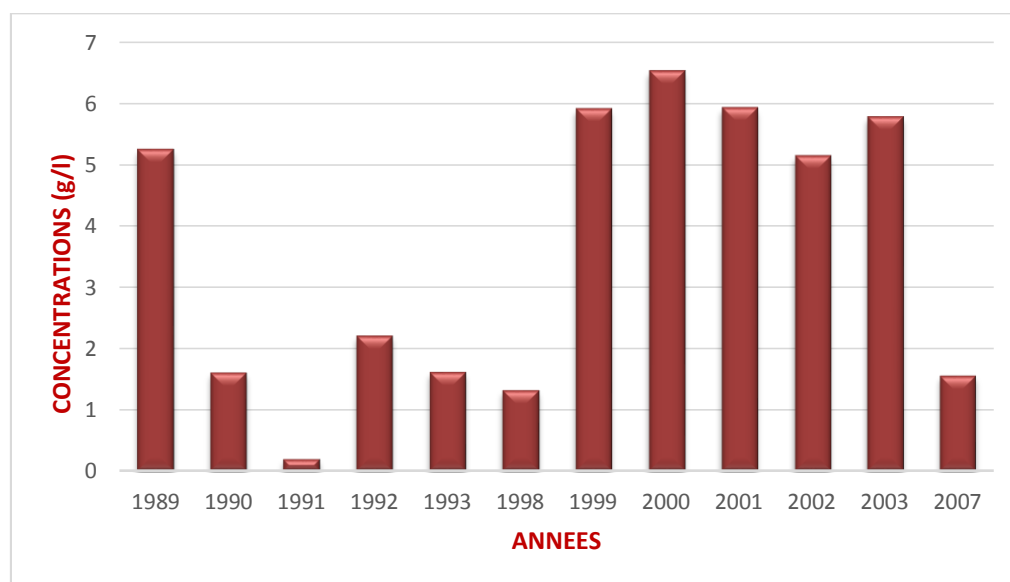


Figure 32 : Histogramme des Concentrations de la station de Haçaiba (g/l)

Tableau n° 15 : Concentrations de la station de Sidi Ali Benyoub (g/l)
(Agence nationale des ressources hydriques)

Années	Concentrations (g/l)
1988	22,88
1989	4,66
1990	5,78
1991	1,42
1992	3,73
1993	2,84
1994	6,57
1995	2,59
1996	2,39
1997	4,61
1998	0,79
1999	3,48
2000	6,28
2001	7,62
2002	7,66
2003	5,64
2007	0,69
2008	1,05
2009	1,58

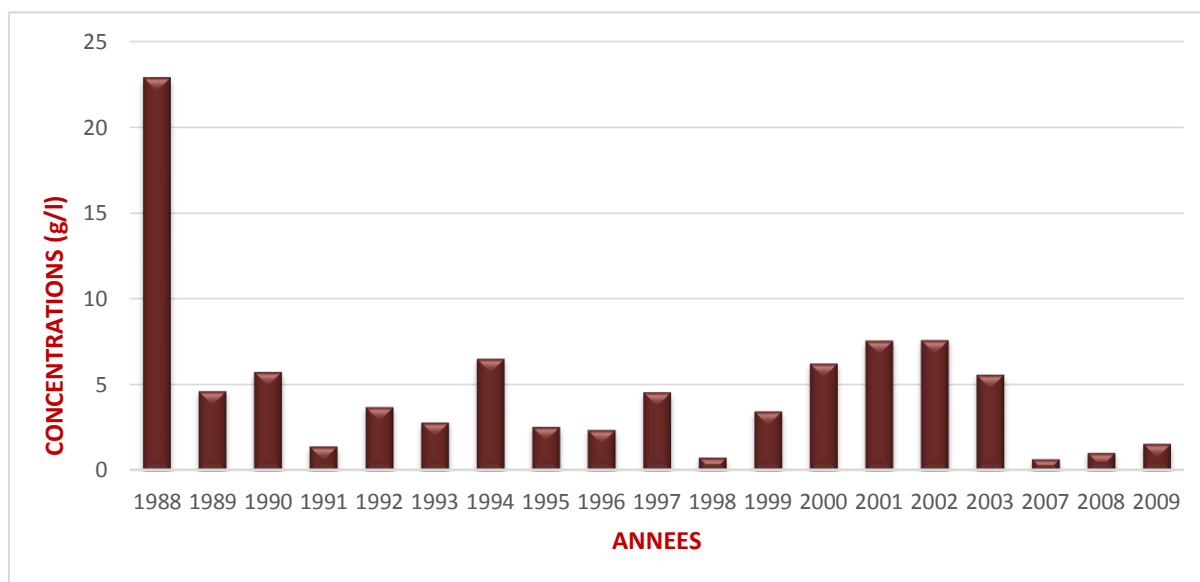


Figure 33 : Histogramme des Concentrations de la station Sidi Ali Benyoub (g/l)

4-9-8 Exploitation des résultats :

La série hydrométrique de la station de Sidi Ali Benyoub s'étend du 1^{er} janvier 1988 au 30 décembre 2009 et celle de la station de Haçaiba s'étend du 1^{er} janvier 1989 au 30 décembre 2007 et comprend les données instantanées de débits de liquide Q_l ($m^3 s^{-1}$), de débits solides Q_s ($kg s^{-1}$), de concentration de matières en suspension ($g l^{-1}$) et hauteurs (cm).

Ces données sont enregistrées tous les 2 jours. Lors des inondations, le relevé des données est intensifié jusqu'à 1 h voire 30 min d'intervalle en fonction du débit. Cependant, ces séries manquent de données manquantes pour les années 1994, 1995, 1996, 1997, 2004, 2005 et 2006 pour la station de Haçaiba et 2004, 2005 et 2006 pour la station de Sidi Ali Benyoub.

Ces lacunes sont corrigées en appliquant une régression classique sous la forme de ($Q_s = a Q_l - b$). La méthode utilisée est une méthode numérique basée sur l'application d'un modèle de régression classique avec la série hydrométrique de (1989–2007) pour la station de Haçaiba et de (1988–2009) pour la station de Sidi Ali Benyoub.

La loi de régression est déduite avec un coefficient de corrélation de la station de Haçaiba $R = 0,90$ et de la station de Sidi Ali Benyoub avec un coefficient de corrélation $R = 0,96$.

4-9-9 : Interprétation :

La station de Haçaiba, contrôlant un bassin versant caractérisé par une forte pente et drainant un volume important de matériaux solides, admet un apport annuel moyen égal à 21322 t.

Le cours d'eau apporte annuellement en moyenne 3.22×10^6 de m^3 d'eau. Ces quantités d'eau apportent 17769 t de sédiments fins en suspension et 3553 t de sédiments grossiers en charriage.

Ce transport est favorisé par une érosion active qui se manifeste par une dégradation spécifique assez élevée de l'ordre $23.07 t \cdot km^2 \cdot an^{-1}$, dont la grande fraction a été enregistrée en 1987/88.

La moyenne annuelle de la charge solide en suspension est faible, elle est de l'ordre de 5.93 g/l.

Il est à noter aussi que les apports liquides et solides sont très variables d'une année à une autre.

La station de Sidi Ali Benyoub, contrôlant un bassin versant caractérisé par une forte pente et drainant un volume important de matériaux solides, admet un apport annuel moyen égal à 137123 t.

Le cours d'eau apporte annuellement en moyenne 13.69×10^6 de m³ d'eau. Ces quantités d'eau apportent 114269 t de sédiments fins en suspension et 22854 t de sédiments grossiers en charriage.

Ce transport est favorisé par une érosion active qui se manifeste par une dégradation spécifique assez élevée de l'ordre 146.188 t. km² .an⁻¹, dont la grande fraction a été enregistrée en 1989/90.

La moyenne annuelle de la charge solide en suspension est assez élevée, elle est de l'ordre de 8.01 g/l.

Il est à noter aussi que les apports liquides et solides sont très variables d'une année à une autre.

4-10 : Conclusion :

L'étude du transport solide de l'oued Mekerra se heurte à l'insuffisance des données et aux mesures très discontinues, qualitative et quantitative.

Dans ce bassin caractérisé par l'irrégularité de la pluviométrie, des hautes eaux et des crues très importantes qui sont la conséquence d'un ruissellement intensif des précipitations torrentielles, par un couvert végétal souvent discontinu, l'érosion est très active car c'est le résultat d'un processus de dénudation de sol et qui admet une signification morphologique et hydrologique, essentiellement sur les pentes fortes et les berges de l'Oued.

Concernant les relations statistiques de forme $Q_s = f(Q_i)$, les analyses mettent en évidence le modèle linéaire pouvant être utilisé pour obtenir des relations acceptables, sous conditions que les données utilisées soient suffisantes du point de vue statistique et hydrologique.

Le bassin versant de l'oued de Mekerra caractérisé par une forte pente drainant un volume important de matériaux solides, admet un apport annuel moyen égal à 137123 t.

CHAPITRE 5

LUTTE CONTRE L'ÉROSION

5-1 : Introduction :

La lutte contre l'érosion est la pratique de prévention ou de contrôle de l'érosion éolienne ou hydrique qui concerne l'agriculture, les aménagements fonciers, les zones côtières, les berges des rivières et la construction.

Des contrôles efficaces de l'érosion gèrent le ruissellement de surface et sont des techniques importantes pour prévenir pollution de l'eau, perte de sol, perte d'habitat faunique et les pertes foncières.

La lutte contre l'érosion est utilisée dans les zones naturelles, les milieux agricoles ou les environnements urbains. Dans les zones urbaines, le contrôle de l'érosion fait souvent partie des programmes de gestion du ruissellement des eaux pluviales (eau de ruissellement) exigés par les gouvernements locaux.

Les contrôles impliquent souvent la création d'une barrière physique, telle que végétation ou roche, pour absorber une partie de l'énergie du vent ou celle de l'eau, qui est à l'origine de l'érosion. Ils impliquent également la construction et l'entretien des réseaux d'égouttages pluviaux.

Les berges des rivières, comme la plupart des espaces ruraux, ont subi des modifications de leur état naturel dues à l'abandon des pratiques anciennes d'entretien, et à l'implantation d'habitation, de cultures et de routes sur leurs rives. Nombre d'entre elles ont été dénaturées par les travaux de curage ou de reprofilage, ou rendues artificielles par les matériaux utilisés pour leur stabilisation (béton, empierrements...). Dans de nombreux cas, les cours d'eau ont été transformés en de véritables fossés ou canaux d'écoulement sans tenir compte de leur caractère naturel et de leur rôle écologique. De plus, les caractéristiques paysagères des berges en tant qu'élément d'identification du cours d'eau dans le paysage et de support de découverte pour les populations n'ont pas été prises en compte lors des projets d'aménagements.

5-2 : Lutte contre l'érosion éolienne :

La lutte contre l'érosion éolienne s'organise à deux niveaux :

- Réduire la vitesse effective du vent au niveau du sol ;
- Augmenter la cohésion du sol.

Les méthodes de conservation peuvent aussi être classées selon leur nature : Techniques de travail du sol, techniques fondées sur la gestion des cultures ou des résidus de culture, et brise-vents.

Pour lutter contre l'érosion éolienne, il existe 4 méthodes fondamentales de défense :

- Former ou ramener en surface des agrégats ou des mottes de dimension suffisante pour résister à la force du vent ;
- Rendre la surface inégale de façon à ralentir le vent et à retenir la terre mise en mouvement ;
- Établir par intervalles des pare-vent ou des bandes de fixation pour réduire la vitesse du vent et freiner le processus d'avalanche ;
- Établir et maintenir une végétation ou des résidus végétaux qui protègent le sol.

Ces principes peuvent trouver partout leur application, mais l'efficacité relative de chacun d'eux varie avec les conditions locales de climat, du sol et d'utilisation du sol. ⁽³⁾

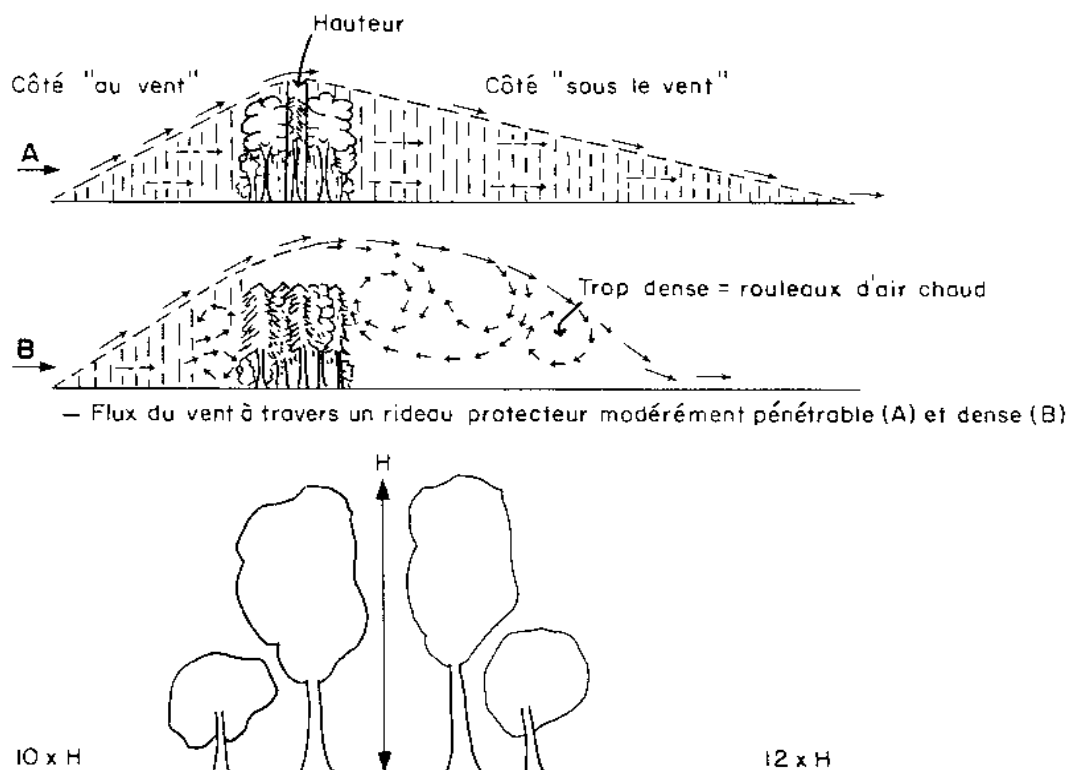


Figure 34 : Influence d'un brise-vent sur le vent
(d'après Combeau, 1977 ,FAO 1997)

5-2-1 : Réduire la vitesse du vent à la surface des sols :

Les principales techniques pour réduire la vitesse du vent à la surface des sols sont entre autre les brise-vents, le paillage, l'augmentation de la rugosité du sol par travail du sol, le maintien d'une litière ou couverture végétale.

Les brise-vent sont des plantations d'arbres ou d'arbustes servant de barrière pour ralentir le vent et protéger les cultures, le bétail, les bâtiments, les aires de travail et les routes du vent, ainsi que pour accroître la biodiversité du milieu.

L'objectif premier des brise-vents est de réduire la vitesse du vent au niveau du sol.

Les brise-vents sont constitués de bandes de végétation naturelle, d'arbres ou d'arbustes.

5-2-2 : Augmentation de la cohésion du sol :

La création de mottes par labour, humidification du sol par irrigation, apport d'amendements organiques, sont visés par l'augmentation de la cohésion du matériau.

- L'apport de matières organiques
 - La pulvérisation de déchets pétroliers
 - La pulvérisation d'huile lourde
 - La pulvérisation de bitume
 - Épandage de déchets de l'industrie plastique (genre de colle diluée)
 - L'irrigation d'appoint.
- **Amélioration de la structure du sol** : L'apport de matières organiques dans les horizons superficiels du sol améliore sa structure ;
 - **Limitation de l'érosion des sols** : La pratique de l'irrigation d'appoint contribue à réduire les problèmes d'érosion. Il suffit en effet, d'irriguer le sol avant la saison des pluies normales pour permettre le labour dans de bonnes conditions et l'installation d'un couvert végétal avant les tornades qui, généralement, causent des dégâts au début de la saison des pluies.

5-2-3 : Augmentation de la rugosité de la surface du sol :

- Un bon travail du sol en laissant à la surface de grosses mottes ou par la confection des billons de 40 cm environ perpendiculaires à la direction dominante des vents ;
- Le maintien des résidus de cultures sur le site : c'est le paillage à titre d'exemple : on constate, que les tiges blé, lorsqu'elles sont coupées et sont laissées verticales à la surface du sol, piègent un volume important de sable mais également les feuilles d'arbres qui sont soufflées par les vents à l'époque des tornades.



Figure 35 : Champ agricole avec chaume d'orge après la récolte de céréales
Source : fr.freepik.com



Figure 36 : Le labour en billons ou billonnage
Source : newsitkagri.blogspot.com

5-2-4 : Augmentation du couvert végétal :

On peut également réduire la vitesse du vent en augmentant la densité du couvert végétal. Ceci est évidemment difficile en milieu aride, aussi est-il particulièrement important de veiller à une saine gestion des résidus de culture qu'il faut tenter de maintenir à la surface du sol de façon à augmenter sa rugosité, à protéger la surface du sol plus qu'à être enfouis où ils ne pourront améliorer que légèrement la structure et la résistance à l'agression du vent.



Figure 37 : Haie Brise-vents

Source : aujardin.info

5-2-5 : Fixation des dunes :

Les dunes de sables sont en mouvement lorsqu'elles sont dépourvues de végétation. La fixation des dunes vise à empêcher au sable de se déplacer pendant un temps suffisamment long pour permettre à la végétation naturelle ou plantée de s'y développer par l'application de la technique de la stabilisation des sables. Cette technique consiste à freiner le mouvement de sables et pour cela on peut ériger des palissades. Ces palissades sont en branches, en nattes, en planches enfoncées dans la dune, etc. Ces obstacles doivent être parallèles entre elles et perpendiculaires à la direction des vents dominants. Si les vents viennent dans toutes les directions, il faut faire alors des palissades croisées. Lorsqu'on veut fixer les dunes, il est nécessaire de faire un certain nombre d'études préalable portant sur ;

- La composition du sable ;
- La force, la fréquence, la direction des vents dominants ;
- La Hauteur, la durée, la répartition des pluies ;
- L'Existence de la végétation naturelle sur les dunes.



Figure 38 : Palissades pour fixation de dunes au Niger.

Source : projet.oss-online.org

5-3 : Lutte contre l'érosion hydrique :

5-3-1 : Lutte contre l'érosion du sol :

5-3-1-1 : Étang d'orage :

Un Étang d'orage est un ouvrage d'art, souterrain ou en surface, muni de parois artificielles qui stocke provisoirement tout ou une partie des eaux de pluie générées par l'imperméabilisation d'un site. L'eau stockée est généralement renvoyée dans le réseau d'égouttage avec un débit régulé mais peut aussi être infiltrée vers la nappe ou lentement libérée vers une eau de surface.



Figure 39 : Étang d'orage
Source : usagers.leau.bordeaux-metropole.fr

5-3-1-2 : Le labour profond :

Le labour est un travail profond avec retournement du sol et mélange de ses horizons ; il permet :

- d'enfouir les résidus
- de corriger des compactions du sol (car c'est un travail profond) : correction des problèmes de trafic (compactions liées à des passages répétés d'engins) sans passer par une fissuration

Le labour profond est exécuté en tête d'assolement (pomme de terre, betteraves ...) et se fait généralement en automne pour que le sol puisse profiter de l'action des agents climatiques d'hiver.



Figure 40 : Labour profond
(Source : Detraux et Oestges, 1979)
Agronomie.info

5-3-1-3 : Le labour en travers de la direction de la pente :

Les opérations de travail du sol effectuées en travers de la pente permettent habituellement de réduire l'érosion qui y est associée.

Le labour est effectué en suivant les courbes de niveau avec les sillons.

Les lignes perpendiculaires forment des sortes de petits barrages, qui diminuent l'intensité du ruissellement et retardent son apparition.



Figure 41 : Le labour en travers de la direction de la pente

5-3-1-4 : Les retenues collinaires :

Les retenues collinaires sont des ouvrages de stockage de l'eau qui sont remplies par les eaux de surface, les eaux de ruissellement.

L'ouvrage, constitué d'une digue en terre ou maçonnerie permet de retenir l'eau dans un talweg, un ravin, un vallon et de stocker une part des écoulements d'eaux. Ces eaux sont utilisées ensuite dans les domaines de l'irrigation agricole et la protection incendie,



Figure 42 : Retenue collinaire-Boumerdes
(Source : algerie-eco.com)

5-3-1-5 : Les terrasses en gradins soutenues par des talus :

Ce sont les aménagements les plus connues et les plus utilisées par les agriculteurs.

Ce sont des constructions qui arrivent à casser la pente. Ces terrasses tirent leur nom de la forme qu'elles donnent au versant lorsque celui-ci est totalement aménagé. Les successions de terrasses prennent en effet la forme d'un escalier ou de gradins.

Ces terrasses, accrochées au versant, doivent s'adapter à la pente de celui-ci : lorsque la pente augmente les terrasses rétrécissent tandis que le mur (ou le talus) de soutènement prend de la hauteur.

On distingue, parmi ces terrasses, celles qui sont soutenues par un mur et celles qui sont soutenues par un talus.



Figure 43 : Les terrasses en gradins
(Source : e-learning. Université Mila)

5-4 : Aménagement des berges des cours d'eau :

L'aménagement des berges des cours d'eau ayant pour vocation la restauration écologique du cours d'eau et le ralentissement dynamique des crues,

- La conservation ou la restauration des zones naturelles d'expansion de crues. En effet, il faut garder à l'esprit que la majorité de nos cours d'eau ne possèdent pas suffisamment de place pour accueillir et évacuer les eaux issues d'une pluie importante. Les débordements, malgré les travaux réalisés par le passé et poursuivis aujourd'hui, sont inéluctables pour les crues fortes et doivent être régulés pour les crues les plus courantes. Les zones d'expansion de crues permettent alors de stocker des volumes en période de crue, avec pour incidence de diminuer les hauteurs d'eau en aval, et d'impacter de manière moins grave les points les plus vulnérables du territoire.
- La conservation des capacités d'écoulement du lit naturel,
- L'aménagement des berges au droit d'un enjeu justifiant de l'intérêt général (infrastructures publiques, bâtiment public, ponts communaux), rendu nécessaire suite à une crue.

Pour réaliser ces aménagements, trois techniques peuvent être déployées : le génie civil, le génie végétal ou encore les techniques mixtes.

Plusieurs facteurs interviennent dans le choix de l'une ou l'autre technique (les enjeux à protéger, les possibilités du site, les capacités et limites des techniques) mais de façon générale :

- Le génie végétal est privilégié dans les zones à faibles enjeux ou à enjeux modérés (naturel ou agricole). Il permet en outre de réduire l'impact des phénomènes d'érosion lors des crues.
- Le génie civil est parfois nécessaire dans les secteurs à enjeux fort (contexte urbain, voiries, oueds...) pour protéger des sites particuliers justifiant de l'intérêt général mais il ne permet pas de dissiper l'énergie déployée par le cours d'eau. Il existe donc un risque de reporter les phénomènes d'érosion.

5-4-1 : Les techniques de génie civil :

Les techniques de génie civil consistent à utiliser des matériaux de construction (minéral) pour protéger les berges des assauts du courant. Ces techniques, souvent onéreuses, sont déployées lorsque les enjeux à protéger sont importants (voirie, bâtiments, oueds...) et que l'emprise foncière ne permet pas de mettre en œuvre du génie végétal.



Figure 44 : ENROCHEMENT



Figure 45 : GABIONS

(Source : cc-golfdesaittropez.fr (France))

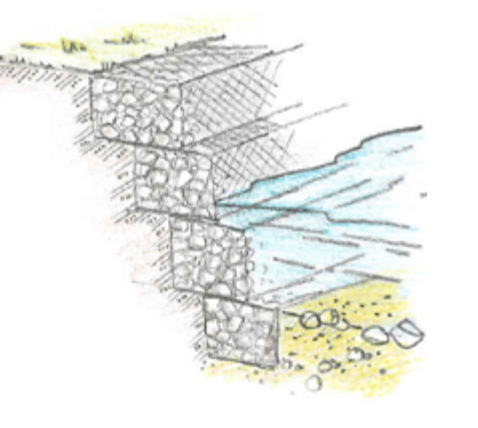
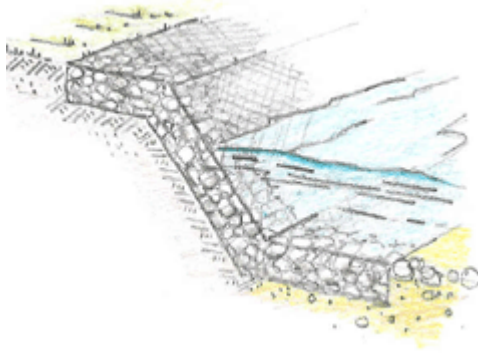
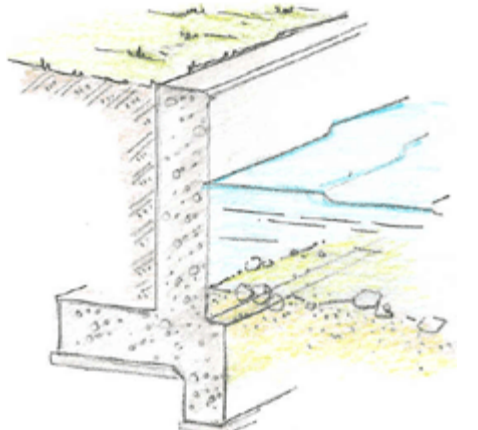
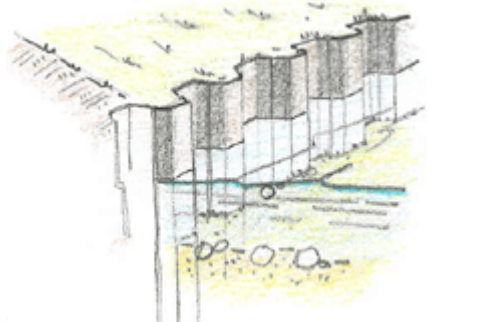
<p>Gabions</p>	<p>Enveloppes de grillage remplies de pierres, confectionnées sur leur lieu d'implantation. Leur souplesse leur permet de s'adapter à l'évolution du lit de la rivière. Leur valeur esthétique est faible mais peut être améliorée par végétalisation.</p>	
<p>Matelas-gabions</p>	<p>Matelas construits sur le principe des gabions d'environ 20cm d'épaisseur. Ils sont plus discrets que les gabions et se végétalisent plus facilement. Ils s'adaptent bien en cas d'évolution du lit et des berges.</p>	
<p>Murs</p>	<p>Constitués de pierres, moellons ou béton ils remplacent la berge et font du cours d'eau un canal. A réserver pour les agglomérations, leur intégration au site est difficile et relève de l'urbanisme.</p>	
<p>Palplanches</p>	<p>Feuilles de métal épais préformées et emboîtables les uns dans les autres. Protection rigide à réserver à des usages précis : restauration de chaussées, consolidation d'anciennes protections, de ponts...</p>	

Figure 46 : Autres types de confortement de berges en Génie civil

5-4-2 : Les techniques de génie végétal :

Les techniques de génie végétal répondent à la nécessité d'une gestion équilibrée entre les besoins des riverains et ceux de l'écosystème. Ce sont des pratiques anciennes basées sur la capacité des végétaux à protéger la berge. La pose de pieux vivants, de branchages de saules... conjuguée à des bouturages et à de la replantation, permet une recolonisation du milieu par la végétation et assure une protection efficace contre l'érosion.

Quelques exemples : l'ensemencement, la plantation, le bouturage, le marcottage, le peigne ou piège à sédiments, les couches de branches à rejets, le tressage de saules, la fascine de saules.

❖ : Intérêts et limites du génie végétal

Les techniques basées sur le génie végétal permettent de maintenir ou d'installer sur les cours d'eau une végétation adaptée, et présentent par conséquent l'avantage de s'intégrer pleinement à l'écosystème des rivières et de respecter son fonctionnement.

Mais l'utilisation de techniques végétales présente d'autres intérêts :

- Dissipation et absorption de l'énergie du courant, grâce aux parties aériennes souples des végétaux qui les composent, à leurs capacités de déformation et à leur propre résistance (ancrage profond dans la berge, et non pas structure rigide prenant appui contre elle),
- Ralentissement des vitesses d'écoulement et augmentation de la cohésion des sols grâce aux racines qui leur permettent de mieux résister face aux crues,
- Préservation des relations entre la rivière et la nappe phréatique,
- Réduction du coût des aménagements par rapport aux techniques faisant appel au génie civil,
- Conservation et embellissement du paysage.
- L'utilisation de matériaux vivants présente tout de même des limites. Outre le fait de sa capacité de protection limitée les premières années et de la nécessité d'entretenir et de surveiller l'ouvrage (arrosage régulier, remplacement des matériaux morts, etc.), les principales difficultés rencontrées sont :
 - L'emprise foncière : la mise en place de techniques végétales nécessite une emprise des aménagements en bord de rivière, afin de redonner une pente faible à la berge lors des terrassements (30% à 20%). Dans des secteurs où cette concession de terrain n'est pas envisageable, il peut être nécessaire de recourir à des techniques mixtes (minérale et végétale).
 - Le délai nécessaire pour atteindre l'efficacité optimale de l'aménagement, lié à la nécessité d'une bonne reprise de la végétation qui prendra plusieurs mois.



Figure 47 : Restauration des berges en génie végétal
Source : lacompagniedesforestiers.com

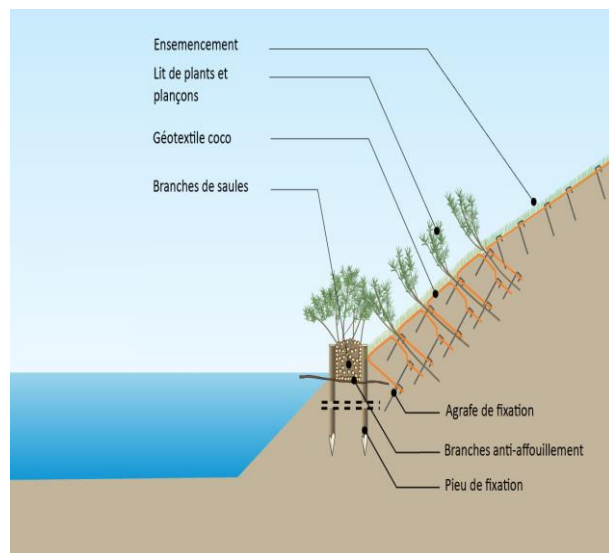


Figure 48 : Coupe transversale
Schématique d'une fascine de
Saule avec lits de plants et plançon
Source : genibiodiv.inrae.fr

5-4-3 : Les techniques de génie mixte :

Les techniques de génie mixte associent le génie civil et le génie végétal. Généralement le pied de berge est en génie civil (fondation de l'ouvrage en cas de contraintes hydrauliques fortes) et le haut de berge en génie végétal (pour une stabilisation plus équilibrée et une intégration environnementale et paysagère).



Figure 49 : Le gabion surmonté végétalisé
Source : lacompagniedesforestiers.com

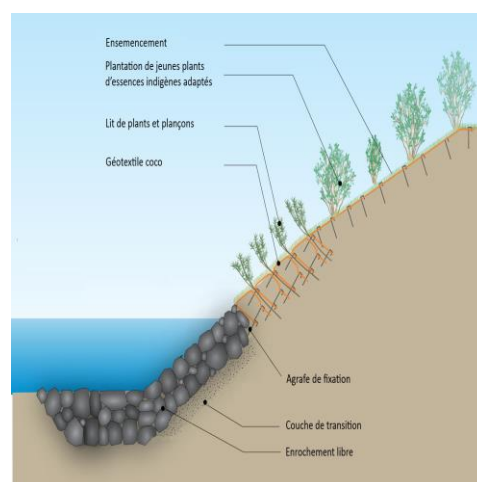


Figure 50 : Coupe transversale
schématisée de techniques végétales.
d'un enrochement de pied
de berge et haut de berge
(Source : genibiodiv.inrae.fr)

5-5 : Conclusion :

Bien que l'érosion hydrique ait été étudiée pendant de longues années en Algérie, cela n'a pas empêché que beaucoup de choses restent inconnues, les problèmes déterminants de l'érosion sont multiples. L'érodibilité des sols et comme elle peut varier sous différentes conditions mérite une meilleure compréhension afin de nous aider à réduire les pertes en eau et en sol.

La stabilité d'un cours d'eau (section et talus) n'est pas un phénomène simple à décrire. La stabilité générale d'un cours d'eau est en fonction de la vitesse d'écoulement ou de la force d'arrachement, ou de la pente de compensation alors que celle des talus est fonction de la stabilité mécanique du sol, de la résistance aux forces d'arrachement et de la résistance au suintement. De façon générale, nous pouvons dire que plus un cours d'eau est large par rapport à sa profondeur, et que plus la pente des talus est faible, plus il est stable.

L'analyse et la comparaison des coûts sont d'autant plus difficiles qu'il existe différentes modalités de réalisation pour une même technique. Les coûts unitaires propres à chaque technique ne sont pas non plus fournis avec les mêmes unités (unité, ml, m² ou m³), ce qui complexifie encore la comparaison.

Les techniques purement végétales semblent moins coûteuses que les techniques mixtes. La variation des prix mise en évidence pour une même technique est relativement importante. Elle dépend notamment :

- de la provenance des matériaux (achetés ou prélevés sur site) ;
- du type de structure qui réalise les travaux (entreprise, association d'insertion, régie) et de son expérience ;
- de la densité des plantations, boutures et enherbements ;
- de l'accessibilité du site ;
- de la qualité des matériaux utilisés ;
- du cours des marchés.

Pour les enrochements le prix est calculé sur la base du prix de la tonne de roche.

Ce prix est déterminé en fonction des critères suivants :

- qualité de la roche
- dimensions des blocs
- forme des blocs
- éloignement de la carrière où seront prélevées les blocs (coût du transport en camions).

Suivant le profil de l'enrochement choisi et sa longueur, on calcule alors le volume de roche nécessaire.

Suivant la densité de roche que l'on souhaite on en déduit le prix total.

CONCLUSION GENERALE :

L'étude du transport solide de l'oued Mekerra se heurte à l'insuffisance des données et aux mesures très discontinues, qualitative et quantitative.

Dans ce sous bassin de Mekerra caractérisé par l'irrégularité de la pluviométrie, des hautes eaux et des crues très importantes qui sont la conséquence d'un ruissellement intensif des précipitations torrentielles, par un couvert végétal souvent discontinu, l'érosion est très active car c'est le résultat d'un processus de dénudation de sol et qui admet une signification morphologique et hydrologique, essentiellement sur les pentes fortes et les berges de l'Oued.

Concernant les relations statistiques de forme $Q_s = f(Q_l)$, les analyses mettent en évidence le modèle puissance pouvant être utilisé pour obtenir des relations acceptables, sous conditions que les données utilisées soient suffisantes du point de vue statistique et hydrologique. Les débits liquide et solide sont fortement corrélés avec des coefficients de corrélation $R = 0,90$ pour la station de Haçaiba et $R = 0,96$ pour la station de Sidi Ali Benyoub. Cette relation obtenue nous a été aidé à remplir les lacunes de deux séries.

Ce transport est favorisé par une érosion active qui se manifeste par une dégradation spécifique assez élevée de l'ordre $146 \text{ km}^2 \cdot \text{an}^{-1}$, la charge solide moyenne est assez élevée de l'ordre de 8 g/l .

L'objectif de ce mémoire est d'améliorer la compréhension du phénomène de transport solide sous climat méditerranéen et semi-aride et mettre au point des outils simples et pratiques permettant l'élaboration des données nécessaires à la planification, l'aménagement et la gestion des ressources hydrauliques pour lutter contre l'érosion et l'envasement des barrages qui provoquent la diminution des volumes d'eau utiles d'où cette dernière constitue un facteur déterminant du développement économique.

REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE :

- 1- Achite M. et Meddi M (2005) Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi aride. Cas du bassin de l'oued Mina (nord-ouest Algérien Revu. Scientifique. Eau. 18 (spécial), P : 37-56.
- 2- Achite M, Touaibia B, et Ouillon S (1989)-Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences et Perspectives.
- 3- Abdelaziz L, Merzouk : Érosion du sol avec le soutien de la direction du développement et de la coopération Suisse. Université des sciences et de la technologie d'Oran, Département d'hydraulique.
- 4- Guenfoud A (2020) Étude hydro biologique comparative des eaux des deux oueds (Mekerra et Saida) à la traversée des zones urbaines des villes de Sidi Bel Abbés et Saida : impact sur la santé et l'environnement. (Pages 24-40).
- 5- Associated Press. (AP) (2012) L'eau, une source probable de conflits dès 2022. Montréal. <http://www.ledevoir.com/environnement/actualites-sur-l-environnement/345744/l-eau-une-source-probable-de-conflits-des-2022>
- 6- Arabi M et Roose E (1989) Influence du système de production et du sol sur l'érosion et le ruissèlement en nappe en milieu montagnard méditerranéen (Station de Ouzera).
- 7- Bensalem M B (2009) : Étude des inondations et leurs impacts dans le bassin versant de l'oued Mekerra (Sidi Bel Abbés), mémoire de magistère, université de Djilali Liabes –Sidi Bel Abbés (Algérie).
- 8- Blinda M (2007) Pollution tellurique du littoral nord-ouest du Maroc entre Tanger et Tétouan : Caractérisation, Impact sur l'environnement et proposition de solutions, thèse de doctorat, université Rabat, Maroc.
- 9- Bourek R (2010) Modélisation pluie - débit. Application au bassin versant de la Mactaa (NW algérien), mémoire de magistère, université de Aboubkeur Belkaid Tlemcen (Algérie).
- 10- Bouraba M (2002) Comparaison de la charge solide en suspension dans les oueds Algériens Essai de synthèse. Bulletin réseau érosion 21, IRD (Institut de recherche pour le développement) (Montpellier (France), pp : 358 – 374.
- 11- Cherife A (2009) Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéen, Hydrological sciences journal.

- 12- Centre national de la recherche scientifique (2004) L'eau, une source de conflits entre nations. http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/mondial/05_eau.htm
- 13- Comité Scientifique Français de la désertification (2009) Combattre l'érosion éolienne. www.csf-desertification.org/combattre-la-.../item/fiche-combattre-l-erosion-eolienne
- 14- Dekich A, Bekhadi A et Hammoum A (1997) Évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion par télédétection et SIG. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (Algérie), 32 p.
- 15- Demmak A (1982) Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en suspension en Algérie septentrionale. Thèse de docteur-Ingénieur, Univ. Paris IV, France.
- 16- Djellouli Y (1990) Flores et climats en Algérie septentrionale. Déterminismes climatiques de la répartition des plantes. Thèse Doctorat. Sciences, USTHB., Alger, 210 p.
- 17- Food and Agriculture Organisation (1997) La lutte contre l'érosion éolienne. www.fao.org/docrep/T1765F/t1765f0w.htm
- 18- Food and Agriculture Organisation (1988) Les mécanismes de l'érosion éolienne - 1988 www.fao.org/docrep/t0492f/t0492f04.htm
- 19- Liniger L, Van Lynden, G, Nachtergaele F, Schwilch G (2003) Un questionnaire pour la cartographie de la dégradation et de la gestion durable des terres.
- 20- Madani Cherif H, Bouanani A et Errih M (2001) Modélisation statistique des débits liquides – débits solides dans les zones semi - arides « cours d'eau de Mekerra à Sidi Bel Abbès - Bassin Versant de la MACTA ».
- 21- Heusch B et Millies-lacrois A (1971) Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin : application au Maghreb. Mines et géologie pp : 21-39.
- 22- Huynh Thanh S (2014) Érosion et stabilité des berges. Institut Polytechnique ; Université du Vietnam à Ho Chi Minh Ville.
- 23- Laime M (2015) Eau : crise humanitaire au Proche-Orient. Carnets d'eau. <http://blog.mondediplo.net/2015-04-09-Eau-crise-humanitaire-au-Proche-Orient>.
- 24- Lemonde.fr (2015) Un stress hydrique qui touche une large partie du globe.
- 25- Mazour M, Roose E (2002) Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du nord-ouest de l'Algérie Bull Réseau Erosion.
- 26- Mokadmi S (2012) Prévision des crues dans Le bassin versant de l'oued Makerra (sidi Bel Abbès), page 26.

- 27- Notre planète Info.(2015) La sécheresse historique et persistante en Californie fait bondir le prix de l'eau (vidéo). <http://www.notre-planete.info/actualites/4245-secheresse-Californie-prix-eau>.
- 28- Petitjean O (2009) L'eau, source de conflits et de coopération. Partage des eaux. Ressources et informations pour une gestion juste et durable de l'eau. <http://www.partagedeseaux.info/L-eau-source-de-conflits-et-de-cooperation>
- 29- Otmane A (2015) Prédétermination des valeurs des pluies et crues extrêmes dans le bassin versant d'Oued Mekerra , Mémoire de magister , université d'Oran.
- 30- Olivier P. (2004) La surexploitation des eaux souterraines : enjeux et gouvernance dans natures sciences sociétés (Vol. 12), pages 146 à 156.
- 31- Programme des Nations Unies pour L'environnement (PNUE), L'avenir de l'environnement mondial. Global Environment Outlook (Revue GEO-3) (2002). Le passé, le présent et les perspectives d'avenir. Bruxelles, de boeck. 445 pages.
- 32- Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)
Global Environment Outlook. (Revue GEO 4.) (2007) Les problèmes les plus graves de la planète persistent, avertit un rapport de l'ONU. 8 pages.
- 33- Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE),
Global Environment Outlook (revue GEO-5) (2012). L'avenir de l'environnement mondial. Résumé à l'intention des décideurs. 20 pages.
http://www.unep.org/geo/pdfs/GEO5_SPM_French.pdf
- 34- Roose (1994) La cause et les processus de l'érosion en nappe.
- 35- Sadek A (2006) Prédiction des crues dans le bassin versant d'oued Mekerrra (Région de Sidi Bel Abbés), mémoire de magistère, Centre universitaire de Djillali Bounaama –Khemis -Miliana (Algérie) ,92p.
- 36- Serrat C (2015) L'ONU redoute une pénurie mondiale d'eau d'ici 15 ans. AFP-Paris, Montréal, Journal Le Devoir, le 22 mars 2015, p. A3.
- 37- Servat E, Mahé G (2009) Eau et zones arides : enjeux et complexité.
- 38- Union internationale pour la conservation de la nature, PNUE : Programme des Nations Unies pour l'environnement et WWF : World Wildlife Fund (1991) Sauver la Planète. Stratégie pour l'Avenir de la Vie. Gland, Suisse. 248 pages.
- 39- Union internationale pour la conservation de la nature, PNUE Programme des Nations Unies pour l'Environnement et WWF (World Wildlife Fund)
Prescott-allen R (1991) Sauver la Planète. Stratégie pour l'Avenir de la Vie. Gland, Suisse. 248 pages. (Sauver la Planète, p. 152).

- 40- Union internationale pour la conservation de la nature (2000) Vision de l'eau et de la nature : stratégie mondiale de conservation et de gestion durable des ressources en eau au 21^{ème} siècle. 73 pages.
- 41- Valo, M (2015). La crise de l'eau.