



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah Ouargla



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
Département de Génie Civil et Hydraulique
Filière : HYDRAULIQUE
Spécialité : RESSOURCES HYDRIQUES

Thème :

Évaluation du risque d'érosion hydrique CAS DU BASSIN VERSANT OUED DJEDRA

Présentés par :

- BEHDENNA Fadila
- BENZAOUI Zoulikha

MAHI Rachid	MCA	UKM Ouargla	Président
ELFERGOUGUI Meriem	MCA	UKM Ouargla	Examineur
BOUAMRANE Ali	MCA	UKM Ouargla	Encadreur
DERDOUS Oussama	MCA	UKM Ouargla	Co- Encadreur

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude envers Dieu,
le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé le courage,
la volonté et l'amour de la connaissance,
qui ont rendu possible la réalisation de ce modeste travail.

Nous souhaitons adresser nos sincères
remerciements à BOUAMRANE Ali et DERDOUS Oussama
pour avoir accepté de nous encadrer et de nous guider tout au long de ce projet.
Leurs conseils éclairés, judicieux et leur disponibilité ont été d'une grande valeur
pour nous.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers
les membres du jury :

MAHI Rachid et ELFERGOUGUI Meriem,
Pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers tous les enseignants du
département Hydraulique et Génie civil, dont la contribution a été précieuse dans
notre formation

Dédicace

Je souhaite dédier ce travail modeste à mes chers parents,
À ma mère qui m'a donné la vie et m'a accompagné tout au long de mon parcours,
Et À mon père sans qui je n'aurais pas pu arriver jusqu'ici.
J'aspire à rester fidèle aux valeurs morales qu'il m'a inculquée.
Je tiens également à dédier ce travail à mes très chères sœurs

Tasnim et Afnane,

Ainsi qu'à toute ma famille.

Ma petite amie (loulou)

Mes chers amis et mes camarades de la promotion d'hydraulique de 2022/2023
Méritent également ma reconnaissance et ma dédicace pour leur soutien et leur
compagnie tout au long de ce parcours

Fadila

Dédicace

Je me dédie à moi-même.

Toujours ma chère mère Soutient et encouragement tout le temps dans ma vie.

À mon cher Père que Dieu ait son âme.

À mon mari comprend toujours qui me soutient le plus difficile.

À mes chers frères Taki al din , Zein al-abidin et Haitham.

À tous les membres de la famille de Benzaoui et à ma deuxième famille, Rouidjaa

Ma petite amie (Fadila)

Pour mes collègues : Irrigation promo 2023.

Je vous souhaite joie et succès.

Zoulikha

ملخص:

تآكل التربة مشكلة بيئية شديدة الخطورة والتعقيد في جميع أنحاء العالم، لأنها تهدد موارد المياه والتربة. هذه الظاهرة منتشرة على نطاق واسع في الجزائر. الهدف من هذه الدراسة هو تطوير أداة لدعم القرار لتقييم ورسم خرائط للمناطق المعرضة لخطر الانجراف المائي باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد ونظام المعلومات الجغرافية والنماذج الرياضية وشبه الكمية. تم إعداد خريطة جرد باستخدام الصور الجوية والمسوحات الميدانية لتقييم أداء الخرائط التي تم إنشاؤها. ستتيح نتائج هذا التحليل تصنيف المناطق المدروسة وتحديد الأولويات لتنفيذ تدابير مكافحة الانجراف. لذلك تهدف هذه الدراسة إلى توفير أداة عملية وموثوقة لإدارة المناطق المعرضة لخطر الانجراف في الجزائر، باستخدام مناهج مبتكرة تعتمد على الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية والنماذج الرياضية. ستجعل النتائج التي تم الحصول عليها من الممكن فهم التوزيع المكاني للمناطق المهددة بالتآكل بشكل أفضل وتوجيه إجراءات الحفظ والتنمية بشكل فعال.

الكلمات المفتاحية:

التعرية . الاستشعار عن بعد . نظم المعلومات الجغرافية . عملية التحليل الهرمي

Résumé :

L'érosion des sols est un problème environnemental d'une gravité et d'une complexité considérables dans le monde, car elle menace les ressources en eau et en sol. En Algérie, ce phénomène est largement présent. L'objectif de cette étude est d'élaborer un outil d'aide à la décision afin d'évaluer et de cartographier les régions à risque d'érosion hydrique à l'aide de techniques de télédétection, d'un système d'information géographique et de modèles mathématiques et semi-quantitatifs. Une carte d'inventaire a été préparée en utilisant des photographies aériennes et des enquêtes sur le terrain afin d'évaluer les performances des cartes générées. Les résultats de cette analyse permettront de classer les zones étudiées et d'établir des priorités pour la mise en place de mesures de lutte contre l'érosion. Cette étude vise donc à fournir un outil pratique et fiable pour la gestion des zones à risques d'érosion en Algérie, en utilisant des approches innovantes basées sur la télédétection, les SIG et les modèles mathématiques. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre la distribution spatiale des zones menacées d'érosion et de guider les actions de conservation et de développement de manière efficace.

les mots-clés :

Erosion. Télédétection. Systèmes d'informations géographiques. Processus d'analyse hiérarchique

Abstract :

Soil erosion is an environmental problem of considerable severity and complexity worldwide, as it threatens water and soil resources. In Algeria, this phenomenon is widely present. The objective of this study is to develop a decision support tool to assess and map regions at risk of water erosion using remote sensing techniques, a geographic information system and mathematical and semi-quantitative models. An inventory map was prepared using aerial photographs and field surveys to assess the performance of the generated maps. The results of this analysis will make it possible to classify the zones studied and to establish priorities for the implementation of measures to combat erosion. This study therefore aims to provide a practical and reliable tool for the management of areas at risk of erosion in Algeria, using innovative approaches based on remote sensing, GIS and mathematical models. The results obtained will make it possible to better understand the spatial distribution of areas threatened by erosion and to guide conservation and development actions effectively.

The keywords :

Erosion. Remote sensing. Geographic information systems. Analytic Hierarchy Process

TABLE DE MATIAIRE

REMERCIEMENTS.....	A
DEDICACE.....	B
DEDICACE.....	C
RUSUME	D
INTRODUCTION GENERAL :	2
Chapitre 01 Revue de la littérature sur les risques d'érosion du sol	
NOTION SUR L'ÉROSION :	5
1-1 Les facteurs influencent l'érosion :.....	6
1-2 Mécanismes de l'érosion hydrique.....	8
1-3 Type de l'érosion hydrique :.....	9
1-4 Facteur contrôle l'érosion hydrique	10
1-5 Conséquences de l'érosion hydrique.....	11
1-6 Méthodes et approches évaluation et quantification de l'érosion hydrique :	14
1-7 Méthodes et approches existantes	14
1-8 Protection contre l'érosion :.....	15
1-9 L'érosion en Algérie (à l'échelle nationale) :	19
Chapitre 02 Présentation de la zone d'étude	
2. CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUE	22
2.1. Relief, conditions géologiques	22
2.2. Hydrographie	23
2.3. Connaissance hydrométéorologique.....	27
2.4. Conditions climatiques.....	31
2.5. Précipitations	34
2.6. Régime d'eau	36
2.7. Apport fluvial	38
2.8. Apport solide.....	52
2.9. Caractéristique hydrochimique.....	54
Chapitre 03 Cartographie quantitative du risque d'érosion de Oued Djedra	
3. INTRODUCTION :	58
3.1 Méthodologie :	58
3.2- STANDARDISATION :	71
3.3- LES RESULTATS DE LA STANDARDISATION DES FACTEURS:	72
3.4- METHODE HIERARCHIQUE MULTICRITERE (AHP).....	73
CONCLUSION :	76
CONCLUSION GENERAL	78
REFERENCES:.....	80


Liste de figures:

– Figure 1.1 Ruissellement et érosion des terres agricoles.....	p5
– Figure 1.2 facteurs influencent l'érosion	p7
– Figure 1.3 Schéma de l'effet de l'érosion par l'eau	p8
– Figure 1.4 Type de l'érosion hydrique	p10
– Figure 1.5 : dégradation des sols par l'érosion hydrique.....	p12
– Figure 1.6 : envasement d'un barrage par l'érosion hydrique.....	p12
– Figure 1.7 La végétation.....	p16
– Figure 1.8 les murs de soutènement.....	p16
– Figure 1.9 les gabions.....	p17
– Figure 1.10 les fascines.....	p17
– Figure 1.11 L'aménagement du paysage.....	p18
– Figure 1.12 les géogrilles.....	p18
– figure 1.13 les enrochements.....	p18
– Figure 1.14 les géotextiles.....	p18
– Figure 1.15 La gestion de l'eau.....	p19
– Figure 2.1 courbe hypsographique du bassin de l'oued Djedra.....	p22
– Figure 2.2 le schéma hydrographique du l'oued Djedra.....	p24
– Figure 2.3.Profil longitudinal de l'oued Djedra.....	p26
– Figure 2.4 Hydrogrammes de calcul de la crue pluviale de l'oued Djedra P=0,01%, P=0,1%.....	p50
– Figure 2.5 Hydrogrammes de calcul de la crue pluviale de l'oued Djedra P=1%, P=5%.....	p51
– Fig 3-1 carte de pluie.....	p64
– Fig 3-2 carte facteur K.....	p 65
– Fig 3-3 carte SPI.....	p 66
– Fig 3-4: carte TWI.....	p 67
– Fig 3-5 : carte Pente en %.....	p 68
– Fig 3-6 : carte d'Elévations.....	p 69
– Fig 3-7 : carte NDVI.....	p70
– Fig 3-8 :carte Distance au cours d'eau.....	p70
– Fig.3.9. Le processus de standardisation.....	p71
– Fig 3-10 : Carte de la sensibilité à l'érosion de bassin versant d'OUAD DJEDRA.	p74
– Fig 3-11 : histogramme des classes des surfaces en % de sensibilité à l'érosion de bassin versant d'OUAD DJEDRA.....	p 75

Liste de tableau

- Tableau 2.1 altitudes du bassin de l’oued Djedra.....p22
- Tableau 2.2:Indices hydrographiques de l'oued Djedra(au site du barrage) et des affluents principaux.....p25
- Tableau 2.3 : Postes météorologiquesp27
- Tableau 2.4Postes des observations hydrologiques.....p29
- Tableau 2.5 : Température de l’air, ToC.....p31
- Tableau 2.6 : Direction du vent en fonction de trois temps des observations, %p31
- Tableau 2.7 : Vitesses moyennes du vent (m/s).....p32
- Tableau 2.8 : Valeurs moyennes de l’évaporation selon l’évaporateur «Colorado».....p32
- Tableau 2.9 : Evaporation à partir de la surface de la retenue Djedra, mm.....p33
- Tableau 2.10 : Postes de la mesure des précipitations.....p34
- Tableau 2.11 : Précipitations annuelles pour le bassin versant de l’oued Djedrap35
- Tableau 2.12 : Précipitations sur le miroir de la retenue Djedra, mmp35
- Tableau 2.13 : Précipitations journalières maximales, mm.....p36
- Tableau 2.14 : Apport annuel de calcul pour les site du barrage Djedra.....p39
- Tableau 2.15 : Distribution de calcul de l'apport à l'intérieur de l'année au site du barrageDjedrap42
- Tableau 2.16 : Débits maximaux de l’eau de l'oued Medjerda à Souk-Ahras.....p43
- Tableau 2.17 : Modules et les lames de l’écoulement des crues d’une probabilité de 1%.....p45
- Tableau 2.18 : Débits maximaux de l'eau pour le site du barrage.....p46
- Tableau 2.19 : Débits maximaux pour une période de mai à septembre (d’après les mois)p46
- Tableau 2.20 : Lame d’écoulement des crues de l'oued Medjerda, mm.....p 47
- Tableau 2.21 : Volumes de l’écoulement des crues au site du barrage Djedra, hm³.....p47
- Tableau 2.22 : Coordonnées de l’hydrogramme de calcul d’une vague principale de la crue au site du barrage Djedra.....p48/49
- Tableau 2.23 : Apport solide en suspension de l'oued Medjerda à Souk-Ahras, mille t....p52
- Tableau 2.24 : Valeurs moyennes de l’apport solide en suspension des oueds de la région.....p53
- Tableau 2.25 : Caractéristiques moyennes de calcul de l’apport solide au site du barrage Djedra.....p54

– Tableau 2.26 : Liste des analyses chimiques de l'eau.....	p56
– Tableau.3.1 Sources des données utilisées dans l'étude.....	p 61
– Tableau. 3.2. Echelle à 9 valeurs de Saaty.....	p 63
– Tableau 3.4 Poids des facteur.....	p74



INTRODUCTION
GENERAL

Introduction général :

L'érosion hydrique est un problème majeur qui menace les sols dans de nombreuses régions du monde (Arnoldus, H.M.J., 1977). Ce dernier a des conséquences significatives sur l'environnement, l'agriculture, la sécurité alimentaire et la qualité de l'eau (Angima et al 2003). Elle réduit la fertilité des sols, altère les écosystèmes, dégrade les habitats naturels et contribue à la perte de biodiversité (Alexakis et al 2014). De plus, l'érosion entraîne l'accumulation de sédiments dans les cours d'eau, les rivières et les réservoirs, ce qui peut obstruer les voies navigables, diminuer la capacité de stockage de l'eau et augmenter les risques d'inondation (Adiat 2012). D'après une étude de la FAO (1980), la situation continue à se détériorer : 45 % des terres de l'Algérie sont menacées par l'érosion hydrique. Malheureusement la zone méditerranéenne est parmi le plus des zones les plus affectées au monde. En raison de sa géographie, de son climat spécifique et des activités humaines (Bouzeria, H. 2018). L'Algérie n'échappe pas à ce défi. L'érosion hydrique en Algérie a des conséquences néfastes sur l'agriculture, les ressources en eau, l'économie locale et l'environnement (FAO 1980). Les terres agricoles sont particulièrement vulnérables à l'érosion hydrique, ce qui entraîne une diminution de la fertilité des sols et des pertes de rendement. De plus, l'érosion hydrique peut entraîner une dégradation des bassins versants, une diminution de la disponibilité en eau et une augmentation du risque d'inondations.

Au cours des dernières années, le gouvernement algérien a engagé plusieurs projets visant à protéger les terres et à lutter contre l'érosion hydrique (FAO, 2017). Ces initiatives reflètent la reconnaissance de l'importance de préserver les ressources naturelles et de promouvoir la durabilité environnementale dans le pays. Cependant, malgré ces efforts, le problème persiste et les objectifs de protection du sol ne sont pas entièrement réalisés. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette situation à savoir le changement climatique

Face à ces défis, il est crucial de développer des stratégies de gestion adaptées pour atténuer les effets de l'érosion hydrique dans les zones arides. Cela nécessite une compréhension approfondie des processus d'érosion, des facteurs de risque et des meilleures pratiques de conservation des sols. La cartographie des zones à risque d'érosion et l'utilisation d'outils d'analyse multicritère peuvent jouer un rôle clé dans l'identification des zones les plus vulnérables et dans la prise de décisions éclairées pour la gestion des ressources et la protection des écosystèmes. (Bougerra, S.A. 2018).

L'objectif principal de cette mémoire est de développer un outil pour cartographier et évaluer le zone à risque d'érosion hydrique en utilisant techniques d'analyse multicritère système d'information géographiques pour fournir aux décideurs et aux gestionnaires des informations précieuses pour la planification et la mise en œuvre de mesures de protection contre l'érosion hydrique.

Chapitre 01

Revue de la littérature sur les risques d'érosion du sol

Introduction :

Ce chapitre se consacre à une revue de la littérature sur les risques d'érosion du sol. L'érosion du sol est un phénomène d'une importance considérable, ayant des répercussions significatives sur les écosystèmes, les ressources naturelles et les communautés humaines. Pour cela ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie des risques d'érosion du sol en explorant les principes fondamentaux, les mécanismes, les facteurs et les conséquences associés à ce phénomène. A cette fin cette revue de la littérature servira de base solide pour les chapitres ultérieurs de cette mémoire, où nous aborderons les méthodes de gestion et les stratégies d'atténuation de l'érosion du sol

Notion sur l'érosion :

L'érosion hydrique est un processus par lequel le sol est déplacé ou emporté par l'action de l'eau en mouvement, telle que les précipitations, les ruissellements ou les cours d'eau. C'est l'une des formes les plus courantes d'érosion du sol et peut avoir des conséquences significatives sur les terres agricoles, les écosystèmes naturels et les infrastructures. Cette érosion se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « Hortonien»), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux (Cros-Cayot, 1996). Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace : l'érosion de versant diffuse ou en rigoles parallèles et l'érosion linéaire ou concentrée de talweg

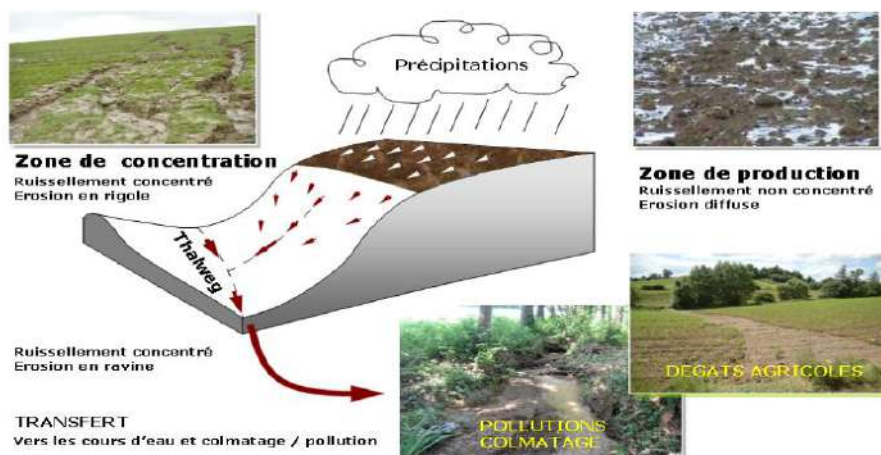


Figure 1.1 Ruissellement et érosion des terres agricoles

Selon Demangeot, (1994) l'érosion hydrique consiste en une dissociation du matériel rocheux ou terreux, ensuite en un transport et dépôt des débris arrachés. La dissociation peut se faire sous forme chimique (altération chimique et dissolution) ou physique (désagrégation mécanique et enlèvement des débris). L'érosion hydrique dépend de la présence simultanée de plusieurs facteurs qui sont la topographie, le type de formation meuble, le type de sol, la couverture végétale, l'agressivité climatique et l'action anthropique.

1-1 Les facteurs influencent l'érosion :

1-1-1 La pluie :

Est reconnue depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des sols (Ellison, 1944 ; Ekern, 1950). Déjà en 1877, Wollny, cité par Ellison (1944), décrivait l'effet de la pluie sur la désagrégation et la fermeture de la surface des sols. L'énergie et l'eau apportées par les gouttes de pluie sont à l'origine de la déstructuration des agrégats présents à la surface (Boiffin, 1976 ; Le Bissonais, 1988), du détachement de fragments de sol et de leur transfert (Free, 1952 ; Bradford & Huang, 1996). Le potentiel érosif de la pluie est désigné par le terme général d'érosivité (Bergsma et al., 1996). L'érosivité des pluies dépend, d'une part, de l'intensité et, d'autre part, des caractéristiques des gouttes de pluie comme la taille, la vitesse, la forme, l'angle d'impact (Riezebos & Epema, 1985 ; Salles et al., 2000 ; Erpul et al., 2002). Généralement, le détachement par les gouttes de pluie est exprimé en fonction de leur énergie cinétique (Quansah, 1981 ; Poesen, 1985). L'effet de la pluie est influencé par le couvert végétal et ses résidus qui, en interceptant la pluie, diminuent la quantité d'eau et modifient la distribution de taille et de vitesse, et donc l'énergie cinétique, des gouttes arrivant au sol (Moss & Green, 1987 ; Saint-Jean, 2003). La présence d'une lame d'eau à la surface du sol est aussi un facteur important qui joue sur l'érosivité de la pluie. Une faible épaisseur d'eau semble avoir un effet positif sur le détachement par la pluie mais, lorsque la lame d'eau dépasse une certaine hauteur elle agit en protégeant la surface du sol (Moss & Green, 1983 ; Torri et al., 1987 ; Proffitt et al., 1991).

1-1-2 Le ruissellement :

L'écoulement d'une lame d'eau est un moteur essentiel de l'érosion. Il détache, transporte et exporte des fragments de sol. Le ruissellement superficiel est généré soit par saturation de la porosité du sol (mécanisme de Dunne), soit par refus à l'infiltration dû à une pluie dont l'intensité est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol (mécanisme de Horton). Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement (Gimenez & Govers, 2002). Les propriétés de l'écoulement — volume ruisselé, hydraulique et distribution spatiale — sont aussi

fortement dépendantes de la rugosité de la surface (Govers et al., 2000). À l'heure actuelle, les développements méthodologiques ne permettent pas des mesures généralisées, directes et précises, de la vitesse et de l'épaisseur d'une lame d'eau peu épaisse et chargée en sédiments. Néanmoins ces deux variables sont souvent combinées pour former des paramètres hydrauliques avec une signification physique quant au détachement et au transport de sédiment (Gimenez & Govers, 2002).

❖ Les paramètres hydrauliques les plus couramment utilisés sont :

- la vitesse de cisaillement, ou ((shear velocity)) (Govers, 1985) ;
- la contrainte cisailante, ou ((shear stress)), c'est-à-dire la force tangentielle exercée par l'écoulement sur le lit (Abrahams et al., 1988 ; Ferro, 1998 ; Batalla & Martin-Vide, 2001) ;
- l'énergie du courant, ou ((stream power)), c'est-à-dire l'énergie dissipée par l'écoulement sur le lit (Rose, 1985 ; Hairsine & Rose, 1992a,b) ;
- l'énergie unitaire du courant, ou ((unit stream power)), c'est-à-dire la quantité d'énergie dissipée par unité de temps et par unité de masse de l'écoulement (Govers & Rauws, 1986).

1-1-3 La gravité :

Rarement évoquée, la gravité est aussi un agent qui participe à la mobilisation et au transfert de particules à la surface du sol. Lorsque la couche de surface est saturée en eau, des phénomènes gravitaires peuvent être observés aussi bien à l'échelle de l'agrégat que du rang de semis (Boiffin & Sebillotte, 1976 ; Boiffin, 1984). La gravité est aussi la force principale qui limite l'érosion, en s'opposant à la mise en mouvement des particules et en étant le moteur de la sédimentation.

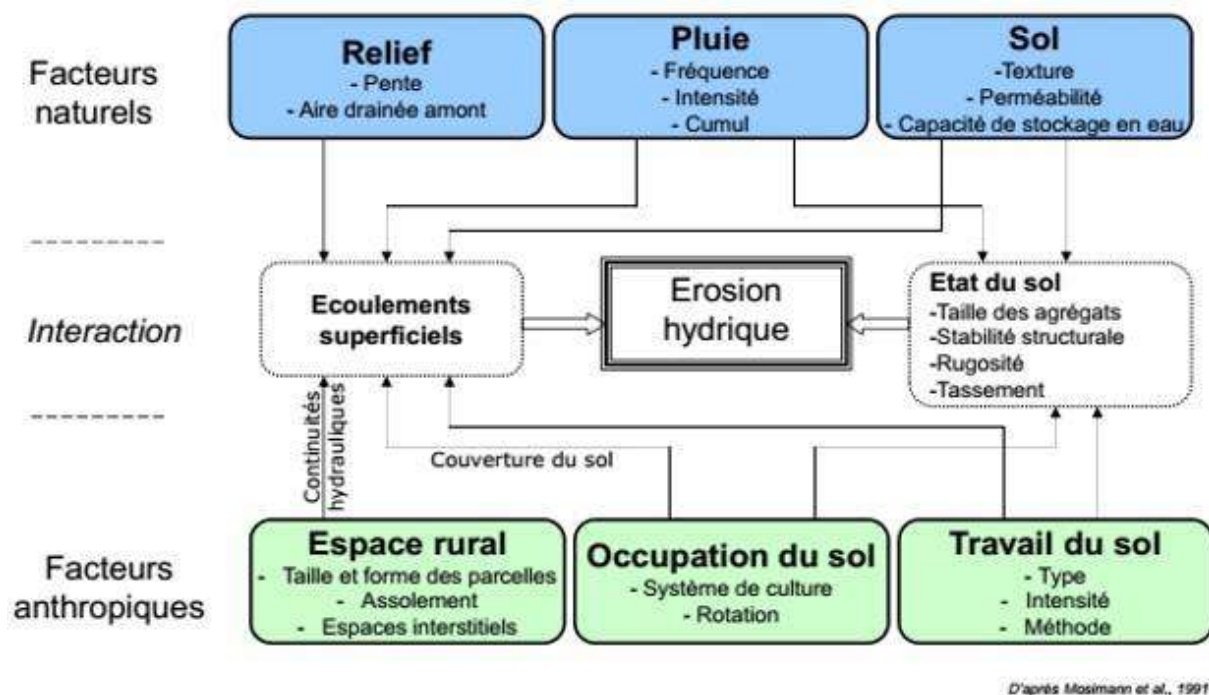


Figure 1.2 facteurs influencent l'érosion

1-2 Mécanismes de l'érosion hydrique

1-2-1 Détachement:

Le détachement se produit lorsque l'eau en mouvement agit sur la surface du sol et arrache les particules de sol de leur position initiale. Cela peut se produire en raison de l'impact des gouttes de pluie, de la force du ruissellement de surface ou de l'écoulement turbulent de l'eau. Les particules de sol détachées sont alors libérées et deviennent disponibles pour le transport ultérieur.

1-2-2 Transport :

Une fois que les particules de sol sont détachées, elles sont transportées par l'eau en mouvement. L'eau de ruissellement, les rivières, les ruisseaux ou les courants peuvent transporter les particules de sol sur de grandes distances. Le transport des particules de sol peut se produire sous différentes formes, telles que le transport en suspension (les particules sont suspendues dans l'eau), le transport par saltation (les particules rebondissent sur le fond) ou le transport par roulement (les particules roulent sur le fond).

1-2-3 Dépôt :

À mesure que le mouvement de l'eau ralentit ou s'arrête, la capacité de transport de l'eau diminue, ce qui entraîne le dépôt des particules de sol. Les particules de sol peuvent se déposer dans des zones de faible énergie hydraulique, telles que les plaines inondables, les lacs, les étangs ou les barrages. Les particules de sol déposées peuvent s'accumuler et former des sédiments, ce qui peut avoir des conséquences sur la qualité de l'eau, la fertilité des sols et l'écosystème local.

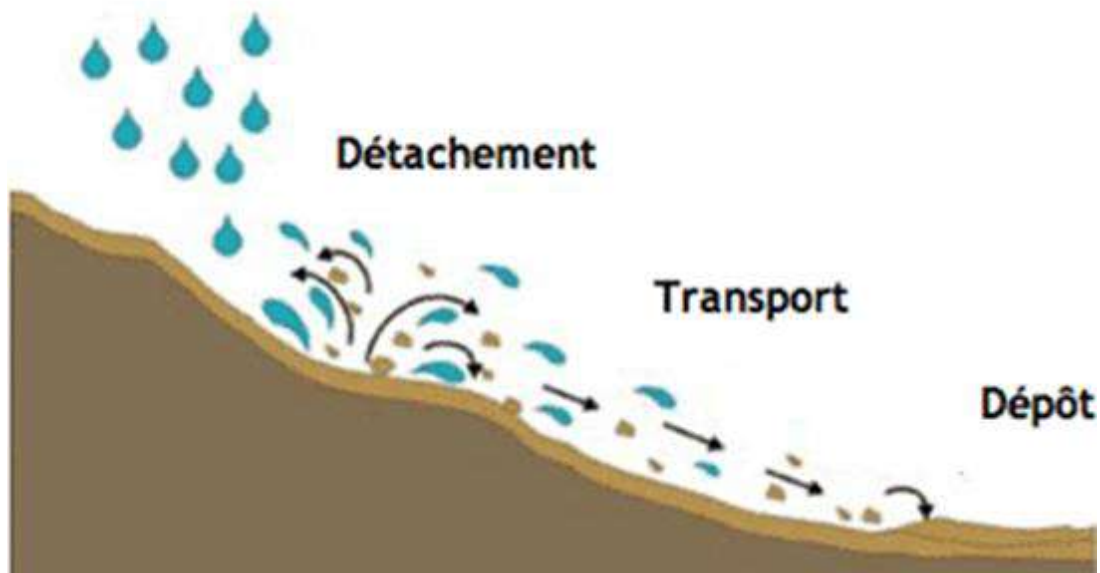


Figure1.3 Schéma de l'effet de l'érosion par l'eau.

1-3 Type de l'érosion hydrique :

Selon les classifications on peut distinguer trois types de l'érosion hydrique, notamment en nappe, en rigole et en ravine. Voici une brève description de chaque type d'érosion hydrique :

- **Érosion en nappe** : L'érosion en nappe se produit lorsque l'eau de pluie ou l'eau de ruissellement s'écoule uniformément sur une surface en pente. L'eau se répartit de manière égale sur toute la surface, entraînant le détachement et le transport des particules de sol sur une grande surface. L'érosion en nappe est généralement associée à des précipitations de faible intensité et à des pentes douces. Elle peut causer une perte généralisée de sol sur de grandes zones.
- **Érosion en rigole** : L'érosion en rigole se produit lorsque l'eau de pluie ou l'eau de ruissellement s'écoule dans de petits canaux ou rigoles sur la surface du sol. Ces rigoles peuvent se former à la suite du détachement des particules de sol et de l'accumulation d'eau dans des zones spécifiques. L'érosion en rigole est souvent associée à des précipitations de plus forte intensité et à des pentes plus prononcées. Elle peut causer des ravines peu profondes dans le paysage.
- **Érosion en ravine** : L'érosion en ravine se produit lorsque l'eau de ruissellement creuse des canaux plus profonds et plus larges dans le sol. Les ravines se forment généralement à partir de rigoles existantes qui s'approfondissent à mesure que l'eau de ruissellement s'écoule. L'érosion en ravine est courante sur les pentes raides ou dans les zones où le sol est moins résistant à l'érosion. Elle peut entraîner des pertes importantes de sol et de la dégradation des terres.

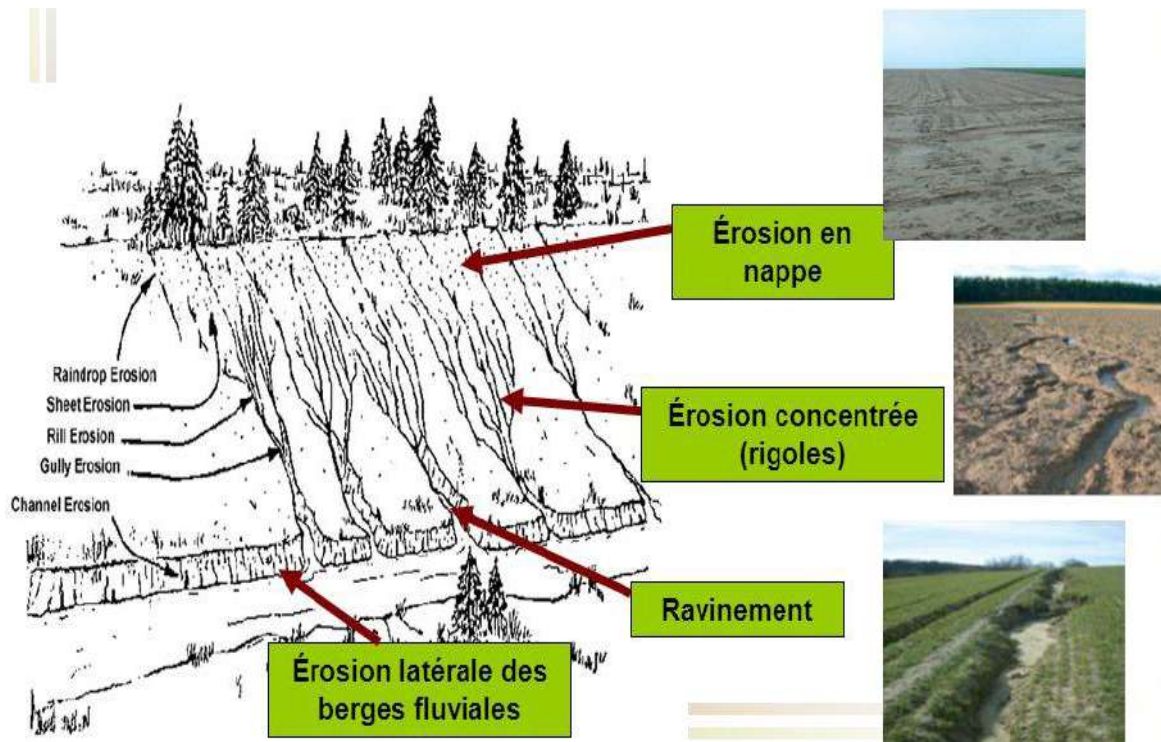


Figure 1.4 Type de l'érosion hydrique

1-4 Facteur contrôle l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est influencée par une combinaison de facteurs naturels et anthropiques dans la section suivant en présente quelques facteurs qui peuvent influencer l'érosion hydrique :

1. Pente du terrain : Plus la pente est prononcée, plus l'eau a de force et d'énergie pour détacher et transporter les particules de sol. Les pentes raides favorisent donc généralement une érosion hydrique plus intense.
2. Texture du sol : Les sols sableux et limoneux ont tendance à être plus susceptibles à l'érosion hydrique que les sols argileux, car ils sont plus facilement détachables et transportables par l'eau.
3. Couverture végétale : La présence d'une végétation dense et bien enracinée peut jouer un rôle important dans la prévention de l'érosion hydrique. Les plantes aident à ralentir le mouvement de l'eau, à absorber son énergie et à maintenir le sol en place.
4. Précipitations : L'intensité et la fréquence des précipitations peuvent avoir un impact significatif sur l'érosion hydrique. Les pluies torrentielles ou les précipitations prolongées peuvent entraîner un ruissellement intense et augmenter le risque d'érosion.

5. Pratiques agricoles : Les pratiques agricoles telles que le labour intensif, le surpâturage, l'absence de couverture végétale ou la conversion des terres en cultures en pente peuvent augmenter l'érosion hydrique en exposant le sol nu aux forces de l'eau.
6. Urbanisation : L'expansion urbaine et la construction de routes, de bâtiments et de surfaces imperméables peuvent modifier les schémas de ruissellement de l'eau, augmentant ainsi le risque d'érosion dans les zones environnantes.
7. Drainage inadéquat : Un système de drainage insuffisant peut entraîner une accumulation excessive d'eau, ce qui peut favoriser l'érosion hydrique.

1-5 Conséquences de l'érosion hydrique

Les conséquences de l'érosion hydrique des sols peuvent être significatives et avoir un impact à la fois sur l'environnement et sur les activités humaines.

1-5-1 Perte de fertilité du sol :

La perte de ces couches supérieures du sol entraîne une diminution de la fertilité. La matière organique, telle que le compost et les débris végétaux, fournit des éléments nutritifs essentiels aux plantes et améliore la structure du sol. Les nutriments, tels que l'azote, le phosphore et le potassium, sont également importants pour la croissance et le développement des plantes. Lorsque ces éléments sont emportés par l'érosion hydrique, le sol devient moins fertile et moins propice à la croissance des cultures. En conséquence, les rendements agricoles peuvent diminuer et la productivité des terres peut être affectée. Les agriculteurs peuvent être confrontés à des difficultés pour cultiver des cultures de haute qualité et obtenir des récoltes abondantes. La diminution de la fertilité du sol peut également avoir un impact sur la sécurité alimentaire, en réduisant la disponibilité des aliments et en augmentant les coûts de production agricole.



Figure 1. 5 : dégradation des sols par l'érosion hydrique

1-5-2 Diminution de la potentialité en eau :

L'érosion hydrique peut entraîner une diminution de la capacité des barrages et des plans d'eau en raison de l'accumulation de sédiments. Lorsque l'eau ruisselle sur les surfaces du sol, elle transporte avec elle des particules de sol et des matériaux en suspension. Ces sédiments peuvent être déposés dans les barrages, les réservoirs et les plans d'eau, réduisant ainsi leur capacité de stockage. La diminution de la capacité des barrages et des plans d'eau peut avoir des conséquences importantes sur la gestion des ressources en eau



Figure1. 6 : envasement d'un barrage par l'érosion hydrique

1-5-3 Dégradation de la qualité de l'eau

L'érosion hydrique peut entraîner une dégradation de la qualité de l'eau de différentes manières. Lorsque le sol est érodé par l'eau, les particules de sol et les sédiments sont transportés vers les cours d'eau et les plans d'eau. Cela entraîne une sédimentation excessive, où les sédiments se déposent au fond des cours d'eau et des réservoirs. La présence de sédiments dans l'eau peut réduire la clarté de l'eau, obstruer les habitats aquatiques et réduire la pénétration de la lumière, affectant la photosynthèse des plantes aquatiques. En outre l'érosion hydrique peut également entraîner le ruissellement de nutriments, tels que l'azote et le phosphore, ainsi que de produits chimiques agricoles tels que les pesticides et les engrais, dans les cours d'eau et les plans d'eau. Ces substances peuvent entraîner une eutrophisation excessive, favorisant la croissance des algues et des plantes aquatiques, ce qui peut entraîner une diminution de l'oxygène dissous et perturber l'équilibre écologique des écosystèmes aquatiques. de plus L'accumulation de sédiments dans les cours d'eau peut altérer les habitats aquatiques, tels que les zones de reproduction des poissons et les zones d'alimentation des invertébrés aquatiques. Cela peut perturber les cycles de vie des espèces aquatiques et entraîner une diminution de la biodiversité aquatique. De plus la présence de sédiments dans l'eau peut entraîner une augmentation de la turbidité, rendant l'eau trouble et réduisant la pénétration de la lumière. Cela peut avoir des conséquences négatives sur les plantes aquatiques qui dépendent de la lumière pour la photosynthèse, ainsi que sur les organismes qui se nourrissent de particules en suspension.

1-5-4 Perte de biodiversité :

L'érosion hydrique peut entraîner la destruction des habitats naturels, la disparition de la végétation et la diminution de la biodiversité. Cela peut avoir un impact sur les écosystèmes et la faune qui en dépend.

1-5-5 Dégradation des cours d'eau :

L'érosion hydrique peut entraîner le transport de sédiments vers les cours d'eau, ce qui peut entraîner une diminution de la qualité de l'eau, la perte d'habitats aquatiques et l'altération des écosystèmes aquatiques.

1-5-6 Augmentation des risques d'inondation :

L'érosion hydrique peut obstruer les cours d'eau avec des sédiments, réduisant leur capacité à transporter l'eau et augmentant ainsi les risques d'inondation lors de fortes précipitations.

1-6 Méthodes et approches évaluation et quantification de l'érosion hydrique :

L'évaluation et la quantification de l'érosion hydrique peuvent être réalisées à l'aide de différentes méthodes et approches. Soit quantitatives ou qualitatives.

1-6-1 Méthodes quantitatives :

- Modélisation mathématique : Les modèles mathématiques, tels que l'USLE (Universal Soil Loss Equation) et le RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), sont largement utilisés pour quantifier l'érosion hydrique. Ces modèles prennent en compte des facteurs tels que l'érosivité des précipitations, l'érodibilité du sol, la longueur et la pente du versant, la couverture végétale, et estiment les taux d'érosion sur la base de ces paramètres.
- Systèmes d'information géographique (SIG) : Les SIG permettent d'intégrer des données spatiales et attributaires pour évaluer et cartographier l'érosion hydrique. Ils permettent de superposer des données topographiques, des données sur l'utilisation des terres, des données climatiques et des données de sol pour identifier les zones sensibles à l'érosion et estimer les taux d'érosion dans une zone donnée.

1-6-2. Méthodes qualitatives :

- Observations sur le terrain : Les observations directes sur le terrain permettent de détecter visuellement les signes d'érosion hydrique, tels que les ravines, les rigoles et les sillons. Ces observations qualitatives peuvent fournir des informations sur les caractéristiques et l'intensité de l'érosion.
- Entretiens avec les agriculteurs et les experts locaux : Les entretiens avec les agriculteurs et les experts locaux peuvent fournir des informations sur les changements observés dans les pratiques agricoles, les pertes de sols et les impacts sur les cultures en raison de l'érosion hydrique. Ces informations qualitatives complètent les données quantitatives et aident à comprendre les facteurs sociaux, économiques et culturels liés à l'érosion.
- Analyse des données historiques et des documents : L'analyse des données historiques, des relevés de terrain antérieurs, des cartes et des documents officiels peut fournir des informations sur les tendances passées de l'érosion hydrique dans une région. Cela peut aider à évaluer les changements dans le temps et à identifier les facteurs qui contribuent à l'érosion.

1-7 Méthodes et approches existantes

La modélisation de l'érosion hydrique est une approche couramment utilisée pour évaluer et prédire les processus d'érosion des sols causés par l'eau. Elle permet de simuler et de quantifier les

taux d'érosion, d'identifier les zones à risque et d'évaluer l'efficacité des mesures de conservation des sols

- **Modèle RUSLE** (Revised Universal Soil Loss Equation) : Le modèle RUSLE est l'un des modèles les plus utilisés pour évaluer l'érosion hydrique. Il prend en compte plusieurs facteurs tels que l'érosivité des précipitations, l'érodibilité du sol, la longueur et la pente du versant, la couverture végétale et les pratiques de gestion des terres. Le modèle calcule le potentiel d'érosion du sol en estimant la quantité de sol érodé par unité de surface sur une période donnée.
- **Modèle SWAT** (Soil and Water Assessment Tool) : Le modèle SWAT est un modèle de simulation hydrologique utilisé pour évaluer les processus d'érosion hydrique et de transport des sédiments à l'échelle du bassin versant. Il intègre des données sur la topographie, les sols, l'utilisation des terres, le climat et les pratiques de gestion pour simuler les flux d'eau, les taux d'érosion et les dépôts de sédiments dans un bassin versant donné.
- **Modèle WEPP** (Water Erosion Prediction Project) : Le modèle WEPP est un modèle de processus physique qui simule l'érosion hydrique et le transport des sédiments à l'échelle des parcelles agricoles. Il prend en compte les caractéristiques du sol, la couverture végétale, les précipitations, la pente du terrain et les pratiques de gestion des terres pour estimer les taux d'érosion et de sédimentation.
- **Modèle EUROSEM** (European Soil Erosion Model) : Le modèle EUROSEM est spécifiquement conçu pour simuler les processus d'érosion hydrique en milieu agricole. Il tient compte de la topographie, des propriétés du sol, de la couverture végétale et des pratiques agricoles pour évaluer les taux d'érosion et de sédimentation sur les terres agricoles.

1-8 Protection contre l'érosion :

La protection contre l'érosion est un ensemble de mesures visant à prévenir ou à réduire l'érosion des sols, qui est l'enlèvement progressif des particules de sol par les agents d'érosion tels que l'eau, le vent ou la glace. L'érosion des sols peut causer de nombreux problèmes environnementaux, tels que la perte de fertilité des terres agricoles, la dégradation des écosystèmes naturels et la pollution des cours d'eau.

Quelques méthodes couramment utilisées pour protéger contre l'érosion :

- **La végétation** : Planter des arbres, des arbustes, des herbes ou d'autres types de plantes sur les zones exposées à l'érosion peut aider à renforcer le sol et à prévenir l'érosion. Les racines des plantes agissent comme un filet qui retient le sol en place, tandis que le couvert végétal réduit l'impact direct des agents d'érosion tels que la pluie ou le vent.



Figure 1.7 La végétation

- **Les barrières physiques** : L'utilisation de barrières physiques telles que les clôtures, les murs de soutènement, les gabions (structures en treillis métallique remplis de pierres) ou les fascines (faisceaux de branches liées) peut aider à prévenir l'érosion en bloquant le mouvement des sols.



Figure 1.8 les murs de soutènement



Figure 1.9 les gabions



Figure 1.10 les fascines

- **L'aménagement du paysage** : La modification de la topographie du terrain peut être utilisée pour réduire l'érosion. Cela peut inclure la création de terrasses, de bassins de rétention ou de canaux de drainage pour diriger l'écoulement de l'eau et réduire sa vitesse.



Figure 1.11 L'aménagement du paysage

- **Les techniques de génie civil** : Des techniques de génie civil peuvent être mises en œuvre pour protéger contre l'érosion, notamment l'utilisation de revêtements de protection tels que les géotextiles, les géogrilles ou les enrochements pour stabiliser les pentes ou les berges des cours d'eau.



Figure 1.12 les géogrilles



figure 1.13 les enrochements

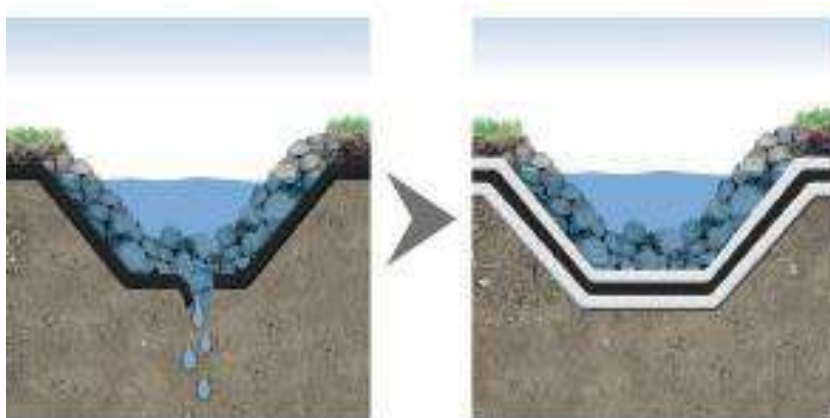


Figure 1.14 les géotextiles

- **La gestion de l'eau** : La gestion adéquate de l'eau peut contribuer à prévenir l'érosion. Cela peut inclure la construction de systèmes de collecte des eaux de pluie, l'irrigation contrôlée pour éviter l'excès d'eau, ou l'utilisation de techniques de conservation des sols comme les terrasses en courbes de niveau.



Figure 1.15 La gestion de l'eau

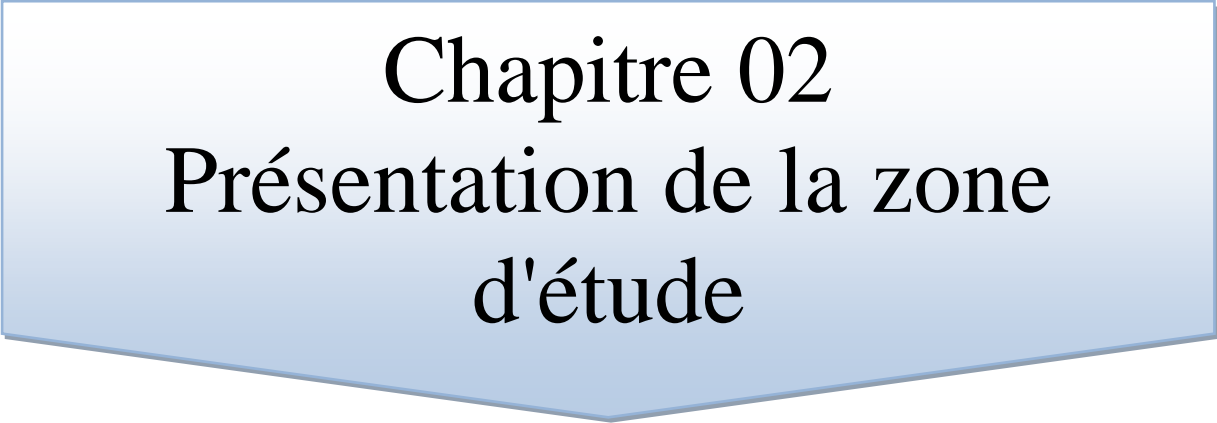
Il est important de noter que les mesures de protection contre l'érosion peuvent varier en fonction des conditions locales, des caractéristiques du sol et des objectifs spécifiques. Il est recommandé de consulter des experts en environnement ou en génie civil pour déterminer les meilleures solutions adaptées à une situation donnée.

1-9 L'érosion en Algérie (à l'échelle nationale) :

- Les résultats d'un grand nombre d'études réalisées sur plusieurs bassins versants sont probants : l'érosion en nappe reste la forme la plus faible, au profit de l'érosion du réseau d'écoulement par ravinement qui est la forme la plus dangereuse.
- Le seuil tolérable de 10 t/ha/an a été largement dépassé.
- En matière d'érosion spécifiques, l'estimation de la quantité de matériau arraché annuellement sur une surface donnée ne peut être extrapolée quel que soit l'espace considéré en matière de surface ; autrement dit, il est impossible d'extrapoler les valeurs d'érosion d'une échelle spatiale à une autre.
- Les infrastructures hydrauliques algériennes, notamment « les barrages », courent un vrai danger d'envasement et de sédimentation.
- L'effet de surface joue un rôle négatif dans l'estimation de l'érosion spécifique. (Touaibia, B. (2010))
- L'érosion à l'échelle de l'Algérie est un problème majeur qui affecte de vastes régions du pays. En raison de sa géographie diversifiée, de son climat aride à semi-aride et de sa variété de

types de sols, l'Algérie est confrontée à plusieurs formes d'érosion des sols, notamment l'érosion éolienne et l'érosion hydrique.

- L'érosion éolienne, causée par le vent, est un problème particulièrement important dans les régions désertiques et semi-désertiques de l'Algérie. Les vents forts peuvent transporter les particules de sol, ce qui entraîne la formation de dunes de sable et la perte de terres arables. Cela peut avoir un impact négatif sur l'agriculture, la végétation naturelle et les infrastructures.
- L'érosion hydrique est une autre forme d'érosion préoccupante en Algérie, principalement causée par les précipitations irrégulières et intenses.
- Les sols mal protégés et la déforestation contribuent à cette problématique. Lorsque les pluies se produisent, elles peuvent provoquer des ruissellements, emporter les couches supérieures des sols fertiles et provoquer des inondations. Les rivières, les lacs et les réservoirs peuvent également être obstrués par les sédiments transportés par les eaux de ruissellement, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur la qualité de l'eau et les écosystèmes aquatiques.
- L'érosion des sols en Algérie a des conséquences socio-économiques importantes.
- L'agriculture est l'un des secteurs les plus touchés, car la perte de terres arables réduit les rendements des cultures et menace la sécurité alimentaire.
- De plus, l'érosion des sols peut entraîner la désertification, la dégradation des pâturages et la perte de biodiversité, ce qui a un impact sur les moyens de subsistance des populations locales.
- Le gouvernement algérien a pris des mesures pour lutter contre l'érosion des sols. Il a mis en place des projets de conservation des sols, tels que la construction de murets en pierre pour réduire l'érosion éolienne, la plantation d'arbres pour stabiliser les sols et la mise en place de pratiques agricoles durables. Des programmes de sensibilisation et de formation sont également mis en œuvre pour informer les agriculteurs et les communautés locales sur les meilleures pratiques de gestion des terres.
- Cependant, malgré ces efforts, l'érosion des sols reste un défi important en Algérie. Il est essentiel de continuer à investir dans la recherche scientifique, la surveillance des sols et la mise en œuvre de politiques efficaces pour prévenir et atténuer l'érosion des sols à l'échelle du pays.



Chapitre 02
**Présentation de la zone
d'étude**

2. CONDITIONS HYDROMETEOROLOGIQUE

2.1. Relief, conditions géologiques

Le bassin de l'oued Djedra est situé dans la partie est du Nord de l'Algérie et se rapporte, suivant le relief, au type montagneux.

Les altitudes les plus basses du bassin versant de l'oued Djedra se trouvant dans le parcours aval sont de 500 - 550m et les lignes de partage des eaux au Nord et à l'Est s'élèvent jusqu'à 1300 - 1550m. Les systèmes des chaînes montagneuses ont une direction nettement prononcée de nord-est à sud-ouest non seulement suivant la périphérie mais ils traversent la partie médiane du bassin.

L'altitude moyenne du bassin de l'oued Djedra jusqu'au site du barrage en projet est de 890m; la courbe hypsographique (Figure 2.1) donne la représentation des zones altimétriques.

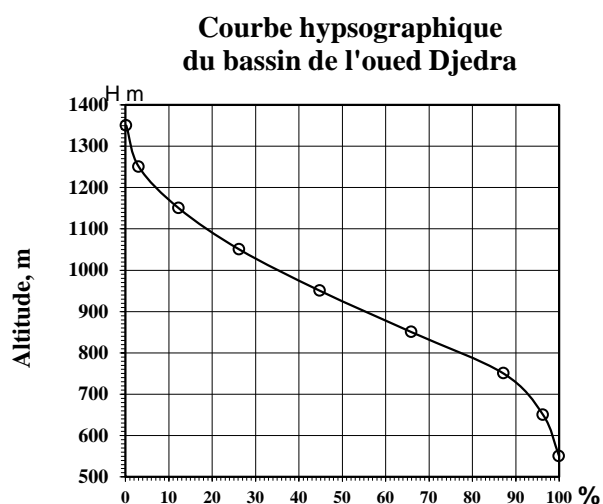


Figure 2.1 courbe hypsographique du bassin de l'oued Djedra

Altitudes, m	%
1350	0,8
1200-1300	3,1
1100-1200	12,3
1200-1100	26,3
900-1000	44,9
800-900	66,0
700-800	87,2
600-700	96,3
500-600	100

Tableau 2.1 altitudes du bassin de l'oued Djedra

La raideur moyenne des flancs du bassin déterminée d'après la carte à l'échelle 1: 50 000 est de 2240/00 ce qui témoigne du caractère montagneux de la majeure partie du bassin. Conformément aux données de la carte géologique et des coupes géologiques dans le site du barrage le bassin de l'oued Djedra est en général constitué des terrains rocheux (d'une puissance supérieure à 100m) représentés par de calcaires, marnes denses, avec des intercalations de calcite. On rencontre les couches noires et denses sableuses et argileuses. Les terrains rocheux sont

recouverts de sédiments quaternaires représentés par de restes d'origine diluviale et d'éboulis constitués de débris de calcaires, marnes, argiles, limons et autres produits de l'altération. La puissance des sédiments quaternaires diminue de 9 - 10m dans les vallées à 3 - 5m dans les pieds des versants et à 1.5 - 2m en moyenne plus haut. Il faut noter que la puissance des sédiments diluviaux et alluviaux varie largement en fonction du relief et de la raideur des versants formant les poches dans les plis de la surface jusqu'à 7 - 10m et, sur les tronçons raides, inférieure à 1m. La zone de l'altération des terrains rocheux est en moyenne de 18 - 20m et la zone de l'altération faible va jusqu'à 25 - 27m; les signes du karst se rencontrent jusqu'à la profondeur de 40 – 50m.

A partir de la profondeur supérieure à 35m dans la zone de la fissilité tectonique la perméabilité des calcaires diminue avec la profondeur.

L'existence des terrains meubles crée la capacité hypodermique du bassin qui conditionne la régularisation de l'écoulement fluvial et l'alimentation des oueds par les eaux souterraines.

Le premier horizon des eaux souterraines dans la partie proche du lit dans le site du barrage a une puissance des roches aquifères de 8 – 10 m et il est drainé par le lit de l'oued.

Sur les versants de la vallée les eaux souterraines se trouvent à la profondeur de 40 –50m ce qui est supérieure de 6 – 7m aux cotes du lit. Les données portant sur les eaux en charge sont absentes, cependant, compte tenu du caractère de la structure géologique et du relief doivent avoir lieux les résurgences locales des eaux hypodermiques sous forme des sources périodiquement fonctionnantes.

La grande partie du bassin versant est ouverte et couverte par la végétation herbeuse, les forêts sont concentrées dans la partie nord-ouest du bassin, la superficie boisée est de l'ordre de 15%, près de 17% de la surface est couvert par les buissons.

L'utilisation des surfaces pour les cultures agricoles est insignifiante.

2.2. Hydrographie

L'oued Djedra est l'affluent de l'oued Medjerda qui coule de l'Est – Nord-Est dans les limites de la partie est du Nord de l'Algérie.

La longueur l'oued Medjerda est de 460km, la surface du bassin versant - 22 000km², dans les frontières de la République Algérienne Démocratique et Populaire la longueur est de 114km. L'emplacement des bassins versants est montré sur le schéma hydrographique (Figure 2.2).

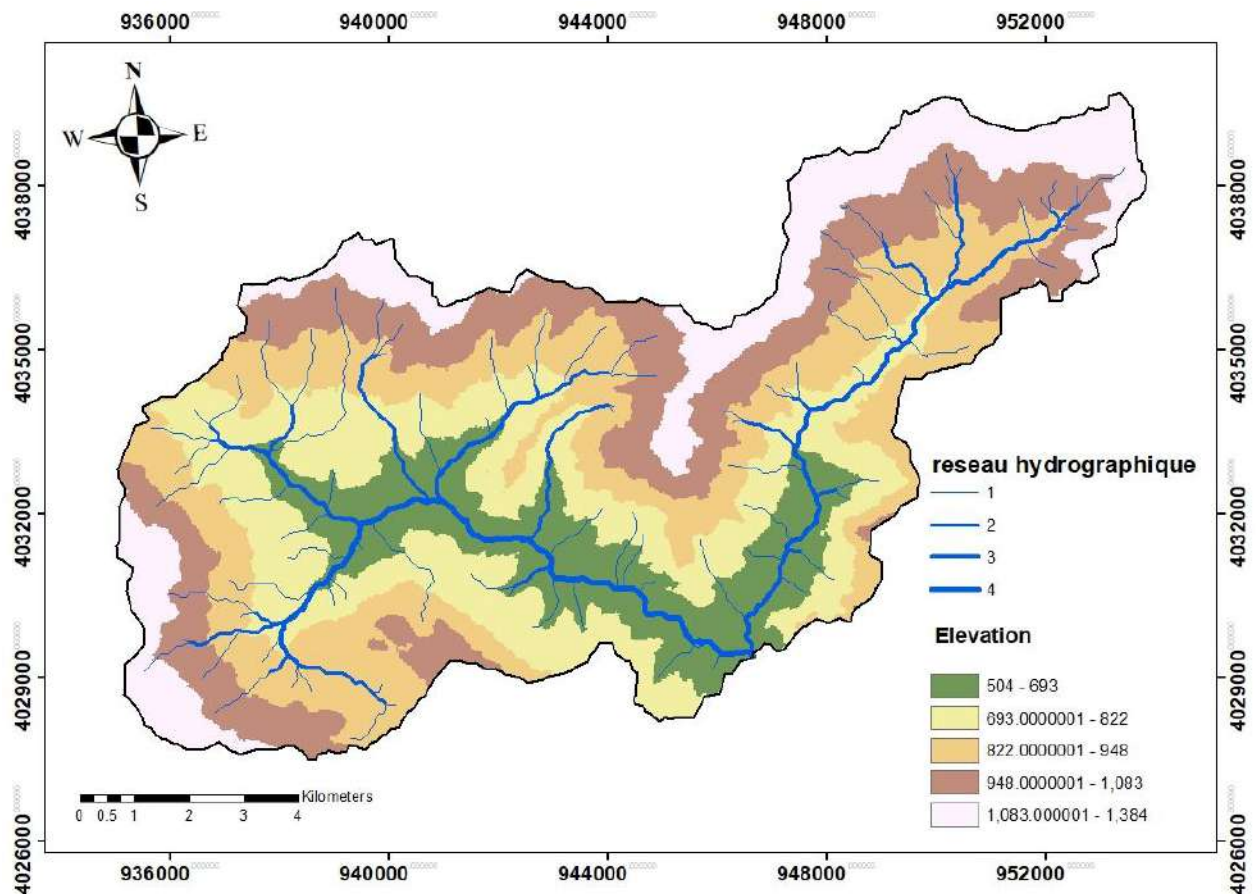


Figure 2.2 le schéma hydrographique du l'oued Djedra

L'oued Djedra se jette du gauche (du Nord) dans l'oued Medjerda à 400km de l'embouchure, la surface du bassin versant est de 127km², la longueur de l'oued est de 5km mais avec un affluent le plus long elle est de 21km. L'oued Djedra proprement dit se forme par la confluence de deux l'oueds : Akiba et Hammam qui détermineront l'apport dans la retenue à créer.

Le bassin versant de l'oued Akiba représente la partie ouest du bassin versant de l'oued Djedra, il a une forme presque quadratique et recueille le ruissellement des versants montagneux du Nord, du Nord-Ouest et du Sud. Le réseau des cours d'eau montagneux périodiquement coulants est bien développé. Suivant l'affluent le plus major s'écoulant du Sud-Est la longueur de l'oued est de 13,7km et de l'oued même – 1,7km.

Les pentes du lit augmentent de 6,5o/oo à 14o/oo ; en ce qui concerne les affluents formant l'oued Akiba elles sont jusqu'à 54o/oo et sur les tronçons les plus hauts s'approchent des pentes des versants

Le bassin versant de l'oued Hammam représente la partie est du bassin versant de l'oued Djedra et sa surface est deux fois inférieure à la surface du bassin versant de l'oued Akiba. La longueur de l'oued est déterminée en prenant en compte les tronçons du parcours amont qui ont d'autres noms (Tsertsoir, Okseyba).

Le bassin versant a une forme allongée avec les affluents développés du Nord. Sur le tronçon de 5km en amont du point de confluence avec l'oued Akiba les pentes accroissent de 120/00 à 300/00.

Le lit de l'oued Djedra sur le tronçon du barrage et le lit de ses affluents sont constitués de terrains pierreux, galets - cailloux et graviers - galets.

Les principaux indices hydrographiques de l'oued Djedra (site du barrage), des oueds Akiba et Hammam sont présentés dans le tableau 2.2.

Oued - site	Distance de l'embouchure (longueur de l'oued), km	Surface du bassin versant, km ²	Pente moyenne des versants, ‰	Altitude moyenne des versants, m	Pente de l'oued sur le tronçon à l'amont du site		Surface boisée %
					longueur, km	pente, ‰	
Djedra	4,7	119	886	224	-	-	14
Akiba	14,1	76	934	238	4,0	11,8	2,2
Hammam	16,1	43	859	216	4,0	14,2	-

Tableau 2.2: Indices hydrographiques de l'oued Djedra (au site du barrage) et des affluents principaux

La présentation du caractère du pendage de l'oued Djedra est donnée par le profil longitudinal schématisé de ses tronçons inférieurs (Figure 2.3).

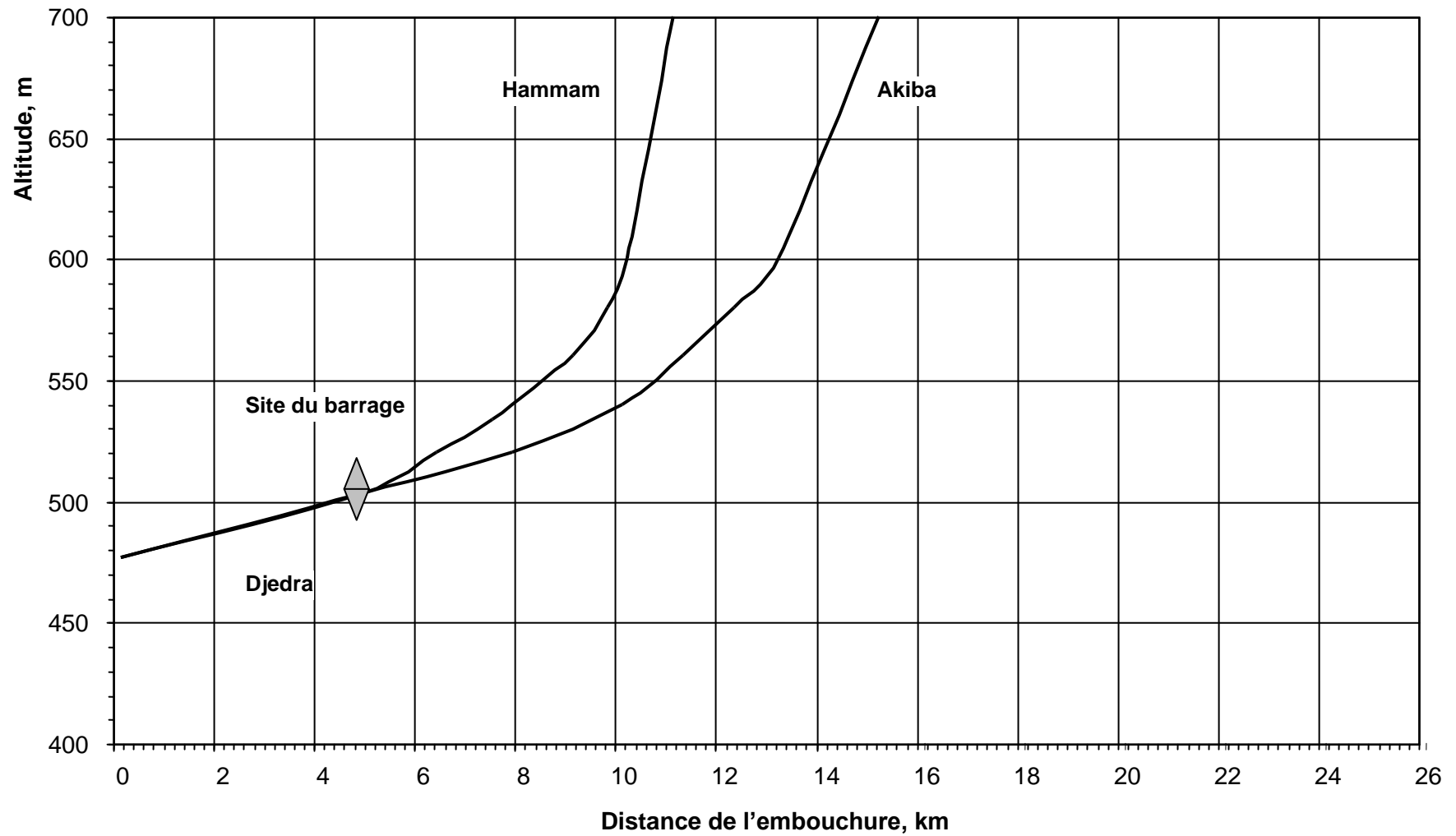


Figure 2.3. Profil longitudinal de l'oued Djedra

2.3. Connaissance hydrométéorologique

Les observations météorologiques dans la région des bassins versants des oueds en question sont effectuées à l'aide des postes dont la densité est d'environ une poste sur 250 km². Les observations directes dans les limites du bassin versant de l'oued Djedra n'ont pas été faites. L'information sur les postes météorologiques dont les données sont utilisées dans cette étude est présentée dans le tableau 2.3

Nom	Code	Coordonnées		Altitude	Période des observations, années
		X	Y		
Souk-Ahras	120101	967,7	342,2	580	1910-1997
	(120102)				
Ain Seynour	120103				1968-96
Raines	120104				1947-56,1967-94
Taoura (Guembetta)	120105	980,4	331,5	880	1947-56,67-94
	120113				1974-84
	120503				1968-90
Bou Khadjar	031503	984,2	369,68	300	1926-62,67-94
	031604				1968-95
Ain Settara	140105				1971-93
Mehroha	140502	961,2	351,85	748	1935-1996
	140503				1947-96
Bauchegof	140505	949,2	362,5	800	1947-62,67-96
Zardezas (Evaporateur «Colorado»)	030903				1953-1984
Tebessa (Evaporateur «Colorado»)	120103				1947-1966

Tableau 2.3 : Postes météorologiques

Note: Dans la colonne «Période des observations» on cite l'année initiale et l'année finale des observations.

Tous les postes météorologiques ont des lacunes d'observations pour les années entières et à l'intérieur de certaines années. Les périodes les plus longues des observations ont les postes météorologiques de Souk-Ahras (depuis le 1910) et de Mechroha (des le 1935).

Du point de vue hydrologique l'oued Djedra n'est pas étudié. Aucune observation et mesure au niveau de l'oued n'ont été effectuées à part une prospection de reconnaissance in situ des tronçons des oueds prévus pour le choix des sites du barrage en 1997.

Le réseau de base des postes hydrologiques dans la région étudiée n'est pas suffisant tant en nombre que du point de vue de la durée.

Les données sur les postes des observations sont citées dans le tableau 2.4.

Oued - poste	Code	Surface du bassin versant, km ²	Altitude moyenne du bassin versant, m	Altitude maximale m	Longueur de l'oued jusqu'au site, km	Pente moyenne du bassin versant, ‰	Précipitations moyennes annuelles, mm	Période des observations	Nombre d'années des observations sur les apports	
									Au total	Année entière
Medjerda – Ain-Dalia	120114	91	900	1317	□	□	□	1987	□	□
Medjerda – Souk-Ahras	120101	217	890	1317	42	190	686	1952-57,59-61 68-83,85	26	20
Medjerda - Ain-Dalia	(barrage)	193	900	1317	37	□	□	□	□	□
Ressoul- Ain Berda	140602	103	305	927	24	□	575	1963-85	33	32
Kebir (est)-Ain Assel	31601	680	398	1200	50	□	1180	1946-55,59-94	44	36
Kebir (ouest)-AinShershar	31101	1130	280	1220	68	□	650	1952-81,85-95	41	32
Bou-Hamdane-Asmar II	140301	1105	785	1280	90	□	(570)	1968-80,84-87	17	16
Hammam-Zit Emba	31102	485	376	1220	□	□	(680)	1968-86	□	□
Melleque-Quenza	120401	4575	□	1626	□	□	□	1980,81,86-93 (1972-94)	10	10
Beni-Zid - Djedida		58,6	□	□	□	□	□	□	□	□
Seybouse-Mirebek	140601	□	□	□	□	□	□	1980-94	15	14

Tableau 2.4 Postes des observations hydrologiques

Les données sur les périodes des observations présentées dans le tableau 1.3 proviennent de la documentation remise par l'Administration de l'Agence Nationale des Barrages et du dossier de l'étude de faisabilité.

Le principal type d'observations hydrologiques sont les mesures des débits de l'eau et le calcul de l'apport journalier. Les séries de l'apport des oueds sur tous les postes hydrologiques de la partie nord-est de l'Algérie ne dépassent pas 32 – 36 années et ces postes sont en nombre 3; en ce qui concerne d'autres postes les séries d'observations sont de l'ordre 10 – 20 années. Tous les postes ont des lacunes des observations, 15% de données ont les lacunes à l'intérieur de l'année. L'analogie la plus convenable pour le pronostic des caractéristiques de l'oued Djedra est le poste hydrométrique Souk-Ahras (120101) ayant la période des observations égale à 26 années qui a été fermé en 1985 à cause de la réalisation du barrage Ain-Dalia à 5km à l'amont du poste.

Pour augmenter la série de débits au site Souk-Ahras on a utilisé les données des apports dans la retenue Ain-Dalia en 1992 – 1997 calculés par le service d'exploitation de l'aménagement hydraulique et réduit au site Souk-Ahras en conformité avec le coefficient de surface. Par rapport aux données de mesures directes ces valeurs ont une exactitude moins grande mais elles peuvent être utilisées dans les calculs de l'apport annuel. La précision de tout apport calculé en conformité avec le bilan d'eau est inférieure à celui mesuré. Cependant, à l'issue de l'analyse il est établi que l'erreur de la valeur annuelle ne dépasse pas 20% et c'est pourquoi les valeurs d'apport peuvent être utilisées.

Les lacunes de l'apport pendant les mois lacunaires dans les données du poste hydrométrique Souk-Ahras, ainsi que pour d'autres postes hydrométriques, sont reconstituées par des valeurs calculées obtenues par l'analyse minutieuse de la distribution des précipitations et des apports d'autres oueds de la région. En le faisant on a respecté la condition qu'une erreur de la valeur de l'apport annuel ne dépasse pas 10%. Pour les mois de la période sèche de l'année (du mai à l'août) les valeurs de calcul sont déterminées en conformité avec la courbe type de l'épuisement des réserves en eau à condition de l'absence des précipitations dont les grandeurs sont anormales.

2.4. Conditions climatiques

2.4.1. Température de l'air

Les conditions climatiques de la région sont caractérisées par l'été chaud et sec et par l'hiver relativement tiède et humide. La température moyenne interannuelle est de +15,4°C.

Les températures moyennes mensuelles du juin au septembre dépassent +20° et la température maximale - +30°C. Les maximums absolus atteignent aux mois de juillet - août +45÷46°C.

Les températures minimales sont observées du décembre au février. Les températures mensuelles moyennes et extrêmes de l'air selon les données du poste météorologique Souk-Ahras sont présentées dans le tableau 2.5.

Caractéristique de la température	Mois												Année
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
moyenne	7,4	8,0	9,9	12,1	17	21,3	24,9	25,3	21,9	16,9	11,7	8,6	15,4
maximale	13,5	17,0	17,6	20,4	27,8	31,5	36,3	36,6	31,6	26,7	19,3	16,3	36,6
minimale	1,1	2,4	3,5	5,2	7,1	11	15	15	14	9,2	4,3	2,7	1,1

Tableau 2.5 : Température de l'air, T°C

2.4.2. Régime de vents

La caractéristique du régime de vent est faite sur la base des observations du poste météorologique Souk-Ahras. Conformément aux principaux processus de la circulation et aux conditions locales ce sont les vents des rhumbs de l'hémisphère nord qui prévalent.

La fréquence moyenne interannuelle (en %) du vent au cours de diverses heures du jour en fonction des rhumbs est citée dans le tableau 2.6.

Temps	Direction							
	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
7 heures	8	8	1	8	23	30	7	15
13 heures	28	27	2	4	9	8	5	22
18 heures	14	13	2	23	15	5	3	22

Tableau 2.6 : Direction du vent en fonction de trois temps des observations, %

Les vitesses moyennes interannuelles selon les valeurs moyennes mensuelles sont données dans le tableau 2.7.

Mois												Année
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
3,4	3,8	4,1	3,9	3,2	3,4	3,4	3,1	3,4	2,8	3,2	3,6	3,4

Tableau 2.7 : Vitesses moyennes du vent (m/s)

Les vitesses les plus grandes du vent sont observées pendant les mois d'hiver. La vitesse moyenne maximale du vent est de 31 m/s avec les coups de pointe jusqu'à 39m/s. Les vitesses maximales de calcul du vent d'une probabilité de dépassement annuelle de 20%, 10%, 4% et 2% sont respectivement de 35m/s, 37m/s, 40m/s et 42m/s.

2.4.3. Evaporation à partir de la surface d'eau

Les observations les plus proches sur l'évaporation à partir de la surface d'eau ont été effectuées par le service d'exploitation du barrage Ain-Daliades le 1989 à l'aide du petit évaporateur du type A, cependant ces observations ne sont pas longues et elles ne sont pas systématisées. Les observations les plus longues ont été faites à l'aide de petits évaporateurs du type « Colorado » au niveau des postes Zardezas et Tebessa. Les valeurs moyennes interannuelles de l'évaporation obtenues par les résultats des observations sont citées dans le tableau 2.8. Avec l'introduction du facteur correctif des données provenant du petit évaporateur pour la période d'avril à octobre qui est égal à 0,78 et pour la période du novembre au mars (0,9) les valeurs moyennes interannuelles diminuent respectivement.

Unité de mesure.	Mois												Année
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
Zardezas (1956-1984)													
mm	142	96	63	50	54	56	69	77	110	143	191	186	1236
%	11,5	7,8	5,1	4,0	4,4	4,5	5,6	6,2	8,9	11,6	15,4	15,0	100
Tebessa (1947-1966)													
mm	207	126	74	49	51	75	120	145	199	264	341	299	1950
%	10,6	6,5	3,8	2,5	2,6	3,9	6,2	7,4	10,2	13,5	17,5	15,3	100

Tableau 2.8 : Valeurs moyennes de l'évaporation selon l'évaporateur «Colorado»

En prenant en considération les données provenant d'autres régions de la Méditerranée avec les conditions semblables en tant que la norme de l'évaporation à partir du miroir d'eau des retenues en projet on a adopté une valeur de 1280mm. D'autres paramètres de la distribution sont pratiquement standards: $C_v=0,15$; $C_s=0,30$. Les valeurs de calcul de l'évaporation pour la retenue sur l'oued Djedra sont cités dans le tableau 2.9. Les répartitions des valeurs de l'évaporation en fonction des mois sont arrêtées pour une probabilité de 50% d'après les données moyennes annuelles et pour les années de l'hydraulicité faible et haute en fonction de la probabilité de précipitations dans le reflet de miroir, d'après les données caractéristiques réelles.

Hydraulicité selon les précipitations	P% selon l'évaporation	Mois												Année
		IX	X	XI	XII	IX	I	II	III	IV	V	VI	VII	
Faible	25	150	115	70.0	56	48	58	80	98	130	180	215	200	1400
Moyenne	50	138	92	57	42	44	52	75	85	122	160	209	191	1267
Haute	75	124	106	68	48	34	50	71	95	118	125	160	145	1144

Tableau 2.9 :Evaporation à partir de la surface de la retenue Djedra, mm

2.5. Précipitations

2.5.1. Précipitations annuelles, saisonnières et mensuelles

A cause de l'absence des mesures faites directement dans les limites du bassin versant examiné le calcul des précipitations pour le bassin versant de l'oued Djedra jusqu'au site du barrage ainsi que de l'oued Medjerda jusqu'au poste Souk-Ahras est effectué sur la base des données des postes météorologiques de la région (Tableau 2.10).

Poste	Code	Altitude , m	Période des observations, années	Nombre d'années			Moyenne mm	Norme des précipitations annuelles, mm
				Obs- vations	Années entières	Avec complément		
Souk-Ahras	120101 (120102)	580	1910-1996	87	83	86	686	886
Ain- Saounour	120103		1968-1996	28	18	23	1048	1106
Raynes	120104		1947-55,68-69, 72-90	31	14	20	497	498
Taoura	120105	880	1947-57,62,68, 71-93	35	27	27	571	587
	120403						326	□
	120503		1968,74-81, 83-90	20	10	16	452	493
Bou Hadjar	031503	300	1925-61,67-94	68	44	61	618	621
	031604		1968-1995	28	21	26	799	□
Ain-Settara	140105		1971-1993	23	20	20	303	344
Mehroha	140502	748	1934-42,47-62 67-93,94,96	54	36	38	990	988
	140503		1947-54,67-96	37	20	39	622	678
Bouchegof	140505	800	1947-62,67-96	46	38	41	543	566

Tableau 2.10 : Postes de la mesure des précipitations

Le calcul des sommes des précipitations annuelles se faisait pour une année hydrologique: du septembre à l'août avec la signification selon la première année.

La durée des observations sur les précipitations est de 20 à 88 années mais il y a de préférence les données avec les années entières en nombre de 20 – 40 années et seulement pour le

poste météorologique Souk-Ahras la série de précipitations annuelles comprend 83 années. Pour certaines années avec les lacunes d'observations les précipitations ont été approximativement calculées sur la base des données des postes météorologiques voisins à condition que l'erreur des précipitations ne dépasse pas 10%.

Les sommes moyennes interannuelles pour la période avec l'existence des données et leurs valeurs extrémales sont citées dans le tableau 2.11.

Moyenne mm	C_v	C_s	Précipitations annuelles, mm					
			de probabilité %					
			5	25	50	75	90	95
780	0,25	1,5	1120	905	768	628	530	435

. Tableau 2.11 :Précipitations annuelles pour le bassin versant de l'oued Djedra

La répartition des précipitations à l'intérieur de l'année est irrégulière; en période de la saison humide du septembre à l'avril tombent en moyenne 87–90% de la somme annuelle et en période du novembre au mars – près de 80%. Durant certaines années en période sèche la somme des précipitations est inférieure à 1% de la somme annuelle. Les précipitations mensuelles les plus grandes pendant l'année peuvent tomber en n'importe quel mois du novembre au mars et d'après la valeur peuvent atteindre jusqu'à 50% de la norme annuelle.

Les précipitations annuelles sur le miroir de la retenue Djedra sont adoptées d'après le poste météorologique Souk-Ahras et la répartition à l'intérieur de l'année – suivant les modèles de la distribution réelle d'après les données des postes météorologiques Souk-Ahras et Taoura (Tableau 2.12).

Probabilité, %	Mois												Année
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
25	29	22	59	108	150	57	140	80	65	13	2	1	726
50	36	54	61	86	91	106	80	76	50	14	7	14	675
75	30	90	60	110	34	60	74	40	48	6	0	12	564

Tableau2.12 :Précipitations sur le miroir de la retenue Djedra, mm

2.5.2. Précipitations journalières maximales

Les précipitations journalières maximales, les paramètres de leur distribution d'après les données des postes météorologiques de la région sont cités dans le tableau 2.13.

Poste	Code	Nombre d'années des observations	Maximum journalier	Année	Moyenne	C _v	C _s	P _{1%}
Souk-Ahras	120101	80	112	1948	53	04	16	122
Ain-Sainar	120103	18	128	1978	□	□	□	□
Raines	120104	20	164	1978	□	□	□	□
Taoura	120105	27	97	1979	40	045	18	101
	120113	6	92	1983	□	□	□	□
Mehroha	140502	40	186	1986	70	05	20	192
Bou Hadjar	031503	44	130	1973	56	045	18	142

Tableau 2.13 : Précipitations journalières maximales, mm

2.6. Régime d'eau

L'oued Djedra comme d'autres oueds de la partie est du Nord de l'Algérie en conformité avec le régime de l'alimentation se rapportent au type avec les crues pluviales en période humide, du décembre à l'avril, et avec l'écoulement très faible en période sèche du mai à l'août. Pour la commodité des calculs le début de l'année hydrologique est adopté en Algérie à partir du 1 septembre et à la période humide on rapporte une période du septembre à l'avril.

L'alimentation des cours d'eau est pluviale, et d'après la genèse de l'écoulement fluvial, est déterminée par le ruissellement sur les versants y compris à travers le réseau des petits ruisseaux, par les eaux souterraines et hypodermiques. On entend par souterraines les eaux provenant du deuxième (à partir du terrain naturel) horizon des eaux souterraines ou les eaux des sources naturelles de la zone du déchargement des eaux des fissures profondes. A l'écoulement hypodermique se rapporte l'écoulement plus ralenti (par rapport au ruissellement sur le versant) provenant de la couche végétale, du diluvium des versants montagneux ; de la couche superficielle du territoire boisé, des éboulis pierreux ainsi que l'écoulement provenant du premier horizon des eaux souterraines. La part de l'écoulement hypodermique (qui détermine l'écoulement fluvial

pendant les périodes de l'absence du ruissellement) dans les régions montagneuses et proches d'elles dépend de la capacité de régularisation du bassin. Vu l'absence des observations hydrométriques la détermination de la capacité de régularisation présente une tâche difficile. Du fait de l'absence des observations au niveau de l'oued Djedra le caractère général du régime de l'alimentation est donné d'après les données de l'oued Medjerda à Souk-Ahras avec les conditions de la formation de l'écoulement et des dimensions du bassin versant proches des bassins examinés.

Avec le débit moyen interannuel de l'ordre de $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ les variations des débits journalières de l'oued Medjerda à Souk-Ahras étaient de 0 à $345 \text{ m}^3/\text{s}$ et celles des débits moyennes mensuelles – de 0 à $23,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Les volumes de l'écoulement en période sèche, du mai à l'août, sont en moyenne de l'ordre de 9%, mais sans tenir compte des rares crues pluviales – près de 5%.

L'apport annuel pendant une année de faible hydraulité d'une fréquence 1 fois sur 20 – 30 années est 5 fois inférieur, mais pendant les années avec la haute hydraulité il est 2 fois supérieur à l'apport moyen interannuel.

Les grandes crues pluviales dont les débits de pointe dépassent $10 \text{ m}^3/\text{s}$ s'observent au cours d'un ou quelques mois en période du décembre à l'avril et rarement (1 fois sur 10 années) – en octobre, novembre ou mai. En fonction de la durée et de la succession de la tombée des précipitations les crues sont à une seule pointe ou complexe – à quelques pointes. Pendant les périodes de la haute hydraulité selon les précipitations l'écoulement mensuel peut dépasser la norme de volume moyen annuel de l'apport. La répartition de l'apport entre les mois de la saison humide est irrégulière et instable.

D'après le volume de l'apport en période sèche et selon les courbes de l'épuisement (suivant le tronçon descendant de la courbe des hydrogrammes des crues) la capacité de la régularisation du bassin est près de 15 Hm^3 mais au début de la saison sèche au mois de mai – $2,5 \text{ Hm}^3$ en moyenne et durant certains années – 4 Hm^3 .

L'ALIMENTATION SOUTERRAINE A PARTIR DES HORIZONS PROFONDS A LIEU, MAIS SA PART N'EST PAS GRANDE ET ELLE EST ABSENTE AU COURS DE CERTAINS MOIS

2.7. Apport fluvial

2.7.1. Apport annuel

Le calcul des caractéristiques de l'écoulement de l'oued Djedra a été effectué sur la base des précipitations et les débits de l'eau des cours d'eau analogues. Aux critères du choix de l'analogue c'est l'oued Medjerda à Souk-Ahras qui répond le plus. Du fait des différences des précipitations, des caractéristiques morphométriques des bassins et d'autres facteurs déterminant les conditions de la formation de l'apport il n'y a pas de possibilité d'utiliser directement les valeurs unitaires de l'apport de l'oued analogue. En outre, la durée des observations au niveau du poste hydrologique à Souk-Ahras est insuffisante pour estimer l'indice principal des ressources en eau – la valeur moyenne interannuelle de l'apport annuel. C'est pourquoi, les séries de données concernant l'apport annuel de l'oued Medjerda à Souk-Ahras sont complétées à l'aide des relations de la régression par les données d'autres oueds et précipitations. En prenant en considération que pour estimer la norme, l'erreur admissible est égale à $\pm 10\%$ avec le coefficient de variation $C_v=0,65$ il faut avoir une série dont la taille est supérieure ou égale à 40, mais en prenant en considération les variations cycliques des précipitations et de l'apport la taille de la série doit être au moins 2 fois supérieure. Les séries de valeurs annuelles de l'apport des oueds analogues ne dépassent pas 30-40 années et seulement les mesures des précipitations dépassent 80 années. La transformation des précipitations en écoulement a un caractère complexe ce qui est lié à la variété des coefficients d'écoulement en fonction de l'état de la surface du terrain naturel, de la distribution des précipitations dans le temps et l'espace, leur intensité et tout un nombre d'autres facteurs. C'est pourquoi, les relations chronologiques «précipitations - apport » donnent les liens insuffisamment étroits malgré qu'ils aient les mêmes phases bien semblables.

L'application de la méthode des valeurs d'égale probabilité avec le rangement des membres des séries a permis d'augmenter l'étroitesse du lien et d'obtenir une série assez vraisemblable des valeurs d'écoulement en période de longue durée. L'utilisation de ces relations pour l'estimation des apports dans les cas des années concrètes est limitée mais elle assure le calcul sûr de la valeur moyenne. La relation «précipitations – apport » est curviligne ce qui est lié à la diminution du coefficient d'écoulement en cas de petites valeurs des précipitations du fait de l'augmentation de la part de pertes de l'eau par filtration et évaporation. La relation entre l'apport annuel de l'oued Medjerda et les précipitations du bassin est approximée par l'équation non linéaire :

$$y = 0,0009x^2 - 0,422x + 94$$

où y – apport annuel de l'oued Medjerda, mm ;

x – précipitations annuelles du bassin, mm.

La série de valeurs de l'apport calcule d'après cette relation pour la période de 1911–1997 a permis de faire l'estimation assez sûre de la norme d'écoulement en tenant compte des phases de l'hydraulicité des variations cycliques de longue durée.

Pour calculer les valeurs chronologiques de l'apport de l'oued Medjerda en cas de l'existence des données provenant des oueds analogues ont été aussi utilisées les équations de régression en conformité avec la méthode de la corrélation linéaire paire et multiple justifiées par des données en période commune des observations.

En ce qui concerne des coefficients de régression pour la corrélation paire ils sont calculés par la méthode de la régression orthogonale selon le rapport des écarts types ce qui est conforme à la coïncidence de la position de la ligne de régression avec l'axe long de l'ellipse de dispersion.

Pour établir les relations de calcul pour des régions ces données sont insuffisantes, c'est pourquoi la norme d'écoulement et d'autres paramètres de la distribution pour Djedra sont arrêtés par analogie avec les données concernant l'oued Medjerda à Souk-Ahras avec la correction tenant compte des différences des précipitations, des terrains de la couche superficielle et d'autres caractéristiques hydrologiques des bassins versants.

Pour de l'oued Djedra le module moyen de l'écoulement est pris égal à 8 l/s km².

Les paramètres de χ^2 -distribution triparamétrique et l'apport annuel de calcul pour le site du barrage sont cités dans le tableau 2.14.

Unités de mesure	Moyen	C _v	C _s	Apport annuel de probabilité, %						
				5	10	25	50	75	90	95
m ³ /s	0,95	0,65	1,5C _v	2,12	1,80	1,30	0,84	0,48	0,25	0,16
Hm ³	30			66,9	56,9	41,1	26,5	15,1	8,0	5,0

Tableau 2.14 : Apport annuel de calcul pour les site du barrage Djedra

2.7.2. Distribution de l'apport à l'intérieur de l'année

Pour définir la distribution de calcul de l'apport aux sites des barrages sur les oueds Djedra et Renem sont utilisées les données de l'oued Medjerda à Souk-Ahras. La répartition de l'eau suivant les saisons et les mois de l'oued Medjerda ainsi que d'autres oueds de la région est

extrêmement irrégulière. En saison humide, de septembre à avril, les volumes de l'apport fluvial de l'oued Medjerda sont en moyenne de 95% avec la variation de 77 à 97,5%. Pratiquement à la saison sèche se rapportent, au cours de la majeure partie d'années, le septembre et le novembre, c'est pourquoi en 6 mois de la période froide l'apport est 10 fois supérieur à l'apport de la saison sèche de même durée.

De décembre à avril les crues pluviales déterminent la formation de l'apport fluvial dont la distribution mensuelle pour les diverses années se diffère fortement. Les débits mensuels maximaux s'observent pendant n'importe quels mois de décembre à avril. En général 55–80% de l'apport annuel sont rapportés à 2 n'importe quels mois de cette période et seulement pendant certaines années cette part de l'apport annuel passe en 1 ou 3 mois. C'est pourquoi le choix de la distribution de calcul est déterminé par les buts de la projection. Dans le cas de la régularisation interannuelle le choix du type de la distribution n'a pas d'importance substantielle et en tant que la distribution de calcul on adopte la distribution d'après les modèles des années réelles. Il n'existe pratiquement pas la relation évidente de la distribution des apports mensuels en fractions de l'apport annuel pour la période humide en fonction du rangement de l'hydraulicité de l'année.

Pour la saison sèche de mai à août (pratiquement à octobre) la tendance consiste en diminution des débits dès le début de la saison avec certaine augmentation en octobre. Pour l'oued Medjerda à Souk-Ahras la réserve en eau dans le bassin versant au début du mois de mai est en moyenne de 2,5–4,0 Hm³ qui détermine les débits de l'eau pendant les mois de la saison sèche puisque les précipitations en cette période, à part quelques cas, ne sont pas celles qui forment l'apport.

Le calcul de la distribution de l'apport à l'intérieur de l'année pour le site du barrage sur l'oued Djedra a été fait en utilisant la méthode simplifiée par composition avec la division de l'année en deux saisons. En tant que la période limitante on a pris la période de la saison sèche V–VIII dont la probabilité est égalisée à la probabilité de l'année et l'apport en saison humide IX–IV était déterminée comme la différence.

Les volumes de l'apport pour la saison sèche sont déterminés par analogie avec les données de l'oued Medjerda à Souk-Ahras avec l'introduction des facteurs de correction diminuants qui tiennent compte de la réduction de la capacité de régularisation dans le bassin de l'oued Djedra (en moyenne 0,10).

La distribution de l'apport suivant les mois de la saison humide est adoptée selon les modèles de la distribution réelle de l'apport de l'oued Medjerda avec une certaine correction des débits en septembre. En tant que les modèles pour les gradations correspondantes de l'hydraulicité

sont retenues les années : 1952,1978,1980 et 1982. Pour la période sèche la distribution mensuelle est prise d'après la courbe de l'épuisement de l'oued Medjerda en V–VIII en prenant en considération les données des années modèles : 1969 (25%), 1976, 1978 (50%), 1973, 1980 (75%) et 1960 (95%). La distribution de calcul est présentée dans le tableau 2.15.

Hydraulici té de l'année	Probabilit é	Unités de mesure	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	IX- IV	V	VI	VII	VIII	V- VIII	Année
Haute	25	m ³ /s	0,020	0,030	0,24	4,85	4,59	1,83	2,91	0,56		0,33	0,14	0,025	0,011		1,30
		hm ³	0,05	0,08	0,62	13,0	12,3	4,45	7,8	1,45	39,75	0,88	0,37	0,07	0,03	1,35	41,1
Moyenne	50	m ³ /s	0,027	0,049	0,12	1,4	3,10	3,65	1,12	0,47		0,23	0,081	0,024	0,013		0,84
		hm ³	0,07	0,13	0,32	3,70	8,30	8,84	3,0	1,22	25,58	0,62	0,21	0,06	0,035	0,92	26,5
Faible	75	m ³ /s	0,015	0,018	0,054	0,17	0,15	0,33	0,81	4,05		0,112	0,040	0,018	0,011		0,48
		hm ³	0,04	0,05	0,14	0,45	0,39	0,81	2,18	10,5	14,6	0,30	0,10	0,05	0,03	0,48	15,1
Très faible	95	m ³ /s	0,008	0,013	0,087	0,39	0,69	0,20	0,28	0,17		0,041	0,022	0,011	0		0,16
		hm ³	0,02	0,035	0,22	1,04	1,86	0,49	0,74	0,43	4,84	0,11	0,06	0,03	0	0,2	5,04

Tableau 2.15 : Distribution de calcul de l'apport à l'intérieur de l'année au site du barrage Djedra

2.7.3. Débits maximaux de l'eau :

Les débits maximaux de pointe des grandes crues se forment lors de la tombée des précipitations de haute intensité dont la durée est supérieure au temps de concentration.

Au cours de la prospection de reconnaissance le débit de l'eau de l'oued Djedra au site du barrage a été estimé, suivant les traces du niveau, en $260\text{m}^3/\text{s}$. Pour déterminer les caractéristiques de calcul de l'apport durant la crue dans les sites des barrages sont utilisées les données des observations faites sur l'oued Medjerda à Souk-Ahras et sur d'autres oueds de la région.

Conformément aux données des observations faites sur l'oued Medjerda à Souk-Ahras en période de 1952 à 1985 (avec prise en compte des lacunes la durée est de 22 années) le débit maximal au mois de mars 1973 était $345\text{m}^3/\text{s}$ et 6 fois les maximums annuels dépassaient $100\text{m}^3/\text{s}$. D'après la période de retour 1 fois sur 30 années la probabilité de dépassement annuel du débit de 1973 est d'environ 3%.

Pour augmenter la taille de la série est utilisée la relation entre les débits maximaux de l'oued Medjerda à Souk-Ahras et ceux de l'oued Ressoul à Ain-Berda. Car dans plupart des années les grandes crues pluviales sur ces oueds ne coïncident pas dans le temps, le lien chronologique a une valeur inadmissiblement basse du coefficient de corrélation ($<0,7$) et il ne peut pas être utilisé pour le calcul. C'est pourquoi on a appliqué la relation de fréquence entre les valeurs des maximums d'égale probabilité en période de 15 années des observations communes qui permet d'augmenter le volume de l'information sans attachement à une année concrète.

La relation est approximée par l'équation orthogonale de la régression :

$$y = 2,64x - 11$$

où x – débits maximaux de l'oued Ressoul.

Les paramètres de la distribution et les débits maximaux de calcul sont cités dans le tableau 2.16.

Unités de mesure	Moyen	Cv	Cs	Apport maximal de probabilité, %					
				1200	780	486	344	274	170
m^3/s	115	0,98	1,5Cv						
$\text{m}^3/\text{s km}^2$				5,53	3,59	2,24	1,58	1,26	0,78

Tableau 2.16 : Débits maximaux de l'eau de l'oued Medjerda à Souk-Ahras

Pour justifier la relation empirique régionale tenant compte de la réduction du module du débit maximal sur la surface on a fait une analyse des données des observations des oueds de la région avec l'estimation des paramètres de la distribution et des maximums d'une probabilité de 1%.

Les valeurs de calcul des modules des débits maximaux ainsi que celles des lames d'écoulement sont présentées dans le tableau 2.17.

Du fait de la justification insuffisante de la relation et de l'hétérogénéité possible des bassins suivant les conditions de la formation de l'écoulement l'indice de réduction est pris égal à 0,55.

Les débits maximaux au droit de l'aménagement hydraulique en projet sont déterminés selon la formule de réduction :

$$Q_{p\%} = q_{p\%} \times (S_a/S)^n \times S, \text{ m}^3/\text{s},$$

où S_a –surface du bassin analogue, km^2 ;

S –surface du bassin versant du site de calcul, km^2 ;

$q_{p\%}$ –module du débit maximal d'après l'analogie d'une probabilité $P\%$;

n –indice de réduction.

NN	Oued	Poste	S, km ²	Débits maximaux		Lames de l'écoulement	
				q _{1%} , m ³ /s•km ²	Cv	h _{1%} , mm	Cv
1	Medjerda	Souk-Ahras	217	2,10	0,92	80	0,85
2	Ressoul	Ain Berda	103	2,3	0,92	–	–
3	Kebir (est.)	Ain Assel	680	1,0	–	–	–
4	Kebir (ouest)	Ain CherChar	1130	0,6	–	110	0,80
5	Hammam	Zit-Emba	485	2,63	1,0	144	0,94
6	Melleque	Quenza	4575	0,40	0,82	–	–
7	BouHamdane	Asmar II	1105	0,9	0,80	–	–
8	Beni-Zid	Djedida	58,6	8,1	–	196	–

Tableau 2.17 : Modules et les lames de l'écoulement des crues d'une probabilité de 1%

Les valeurs de calcul de débits maximaux sont citées dans le tableau 2.18.

Unités de mesure	Probabilité en %					
	0,01	0,1	1	5	10	25
m ³ /s	915	595	378	262	208	128
m ³ /s km ²	7,69	5,00	3,18	2,20	1,75	1,08

Tableau 2.18 : Débits maximaux de l'eau pour le site du barrage

2.7.3.1. Débits maximaux de chantier

Les débits maximaux de l'eau d'une probabilité de 10% pour la période estivale ont été calculés selon la formule de réduction avec la justification des données de l'oued Medjerda à Souk-Ahras pour une période de 1952 à 1986. L'allongement des séries pour ces calculs ne s'est pas produit (Tableau 2.19).

Mois	V	VI	VII	VIII	IX
Débits maximaux, m ³ /s, d'une probabilité de 10%	15,6	1,04	0,35	0,1	8,8

**Tableau 2.19 : Débits maximaux pour une période de mai à septembre (d'après les mois)
Au site du barrage Djedra**

2.7.4. Volume de l'eau et les hydrogrammes de crues

Les crues pluviales sur les oueds de la région ont une forme complexe à quelques pointes, cependant les pointes de crues correspondant aux maximums de débits se prononcent bien par rapport à l'écoulement de base. Les débits de l'écoulement de base suivant les données des observations sur l'oued Medjerda varient de dixièmes de m³/s à 10m³/s ce qui présente une petite part du débit maximal. Le volume de l'écoulement de base peut être important. Du fait de la régularisation de bassin la durée de la branche descendante de la crue au niveau de l'écoulement de base peut être de quelques jours à des dizaines de jours. La majeure partie de la crue, d'après les valeurs des débits, est caractérisée par la croissance intensive des débits dont la durée correspond au temps de concentration mesuré pour les bassins en étude en quelques heures et par la décroissance plus lente prolongée au niveau de l'écoulement de base jusqu'à quelques jours.

Les études faites sur la base des données des observations de l'oued Medjerda ont permis d'obtenir une courbe empirique de la distribution des lames d'écoulement des crues. Une partie de ces données a été empruntés des études de ANRH. Les valeurs proches ont aussi été retenues dans le projet du barrage Ain Dalia.

Les paramètres de courbe de la distribution du volume de l'apport pendant les crues ont été obtenus par la méthode grapho-analytique. Les valeurs de calcul des lames d'écoulement des crues sont données dans le tableau 2.20.

Moyenne	C_v	C_s	Ecoulement maximal de probabilité, %					
20	1,0	$2C_v$	212	127	82,00	53	41	93

Tableau 2.20 :Lame d'écoulement des crues de l'oued Medjerda, mm

Pour le site du barrage sur l'oued Djedra les volumes de l'écoulement pendant les crues sont calculés par analogie avec les données de l'oued Medjerda (Tableau 2.21).

Probabilité, %					
0,01	0,1	1	5	10	25
25,2	15,1	9,76	6,30	4,88	4,00

Tableau 2.21 :Volumes de l'écoulement des crues au site du barrage Djedra, hm³

A la suite de l'analyse des hydrogrammes de l'oued Medjerda au site Souk-Ahras on a établi que la vague principale des pointes solitaires des crues était approximée par l'équation :

$$Y = 10^x \frac{-a(1-X)^2}{X},$$

où Y –ordonnées de l'hydrogramme de calcul Q_i exprimées en fractions de débit maximal $Q_{P\%}$;

$X = t_i/t_n$ –abscisse exprimée en fractions de durée conventionnelle de la montée de la crue par rapport à la durée totale de la crue t_n où

$$t_n = \frac{0.28\lambda h_{p\%}}{g_{p\%}}, \text{ heures}$$

$h_{p\%}$ – lame de l'écoulement de la crue, mm, de probabilité P% ;

$q_{p\%}$ – module de calcul du débit maximal, $m^3/s km^2$;

λ – coefficient de forme de l'hydrogramme dépendant de l'indice d'asymétrie de l'hydrogramme déterminé par la relation entre les volumes de l'apport avant et après le débit maximal de l'eau ;

a – paramètre dépendant du coefficient de forme de l'hydrogramme.

Les volumes et débits maximaux de la crue sont adoptés d'égale probabilité.

La durée conventionnelle de la montée de la crue pour la période de la partie la plus intensive de la pluie est proche du temps de concentration qui est égal pour le site du barrage sur l'oued Djedra à environ 5 heures. Les hydrogrammes ne comprennent pas l'écoulement de base qui doit être pris en considération lors des calculs spéciaux. Pour des calculs relatifs au passage de l'écoulement de la crue à travers les ouvrages d'évacuation l'écoulement de base peut être négligé.

Les coordonnées des hydrogrammes sont présentées dans les tableaux 2.22 et les graphiques des hydrogrammes – sur les figures 2.4 -2.5.

P%	0,01		0,1		1		5	
$Q_M m^3/s$	915		595		378		262	
$W hm^3$	25,20		15,10		9,76		6,30	
λ	0,7		0,7		0,7		0,7	
t_n heures	5,4		5,3		5,3		5	
	t_i heures	$Q_i m^3/s$	t_i heures	$Q_i m^3/s$	t_i heures	$Q_i m^3/s$	t_i heures	$Q_i m^3/s$
	0,5	0,00	0,5	0,00	0,5	0,00	0,5	0,00
	1,1	2,70	1,1	1,80	1,1	1,10	1	0,79
	1,6	46,0	1,6	29,8	1,6	18,8	1,5	13,0
	2,2	174	2,1	113	2,1	71,8	2	49,8
	2,7	366	2,6	238	2,6	151	2,5	105
	3,2	558	3,2	363	3,2	231	3	160
	3,8	723	3,7	470	3,7	299	3,5	207
	4,3	833	4,2	541	4,2	344	4	238
	4,9	897	4,8	583	4,8	370	4,5	257
	5,4	915	5,3	595	5,3	378	5	262
	5,9	897	5,8	583	5,8	370	5,5	257
	6,5	860	6,4	559	6,4	355	6	246
	7,0	805	6,9	524	6,9	333	6,5	230
	7,6	741	7,4	482	7,4	306	7	212

	8,1	677	8,0	440	8,0	280	7,5	194
	8,6	604	8,5	393	8,5	249	8	173
	8,9	540	9,0	351	9,0	223	8,5	155
	9,7	476	9,5	309	9,5	197	9	136
	10,3	421	10,0	274	10,0	174	9,5	120
	10,8	366	10,6	238	10,6	151	10	105
	11,9	274	11,7	178	11,7	113	11	78,6
	13,0	201	12,7	131	12,7	83,0	12	57,6
	14,0	146	13,8	95,0	13,8	60,4	13	41,9
	15,1	110	14,8	71,4	14,8	45,4	14	31,4
	16,0	78,0	15,9	51,2	15,9	32,5	15	22,5
	19,0	33,8	18,6	22,0	18,6	14,0	17,5	9,69
	27,0	14,6	21,2	9,50	21,2	6,00	20	4,20
			26,5	1,80	26,5	1,13	25,0	0,80
					31,0	0,00	30	0,00

Légende :

P% - probabilité de dépassement annuel; Q_M - débit maximal ;

W –volume de la crue ; λ - coefficient de forme de l'hydrogramme ;

**Tableau 2.22 : Coordonnées de l'hydrogramme de calcul d'une vague principale
de la crue au site du barrage Djedra**

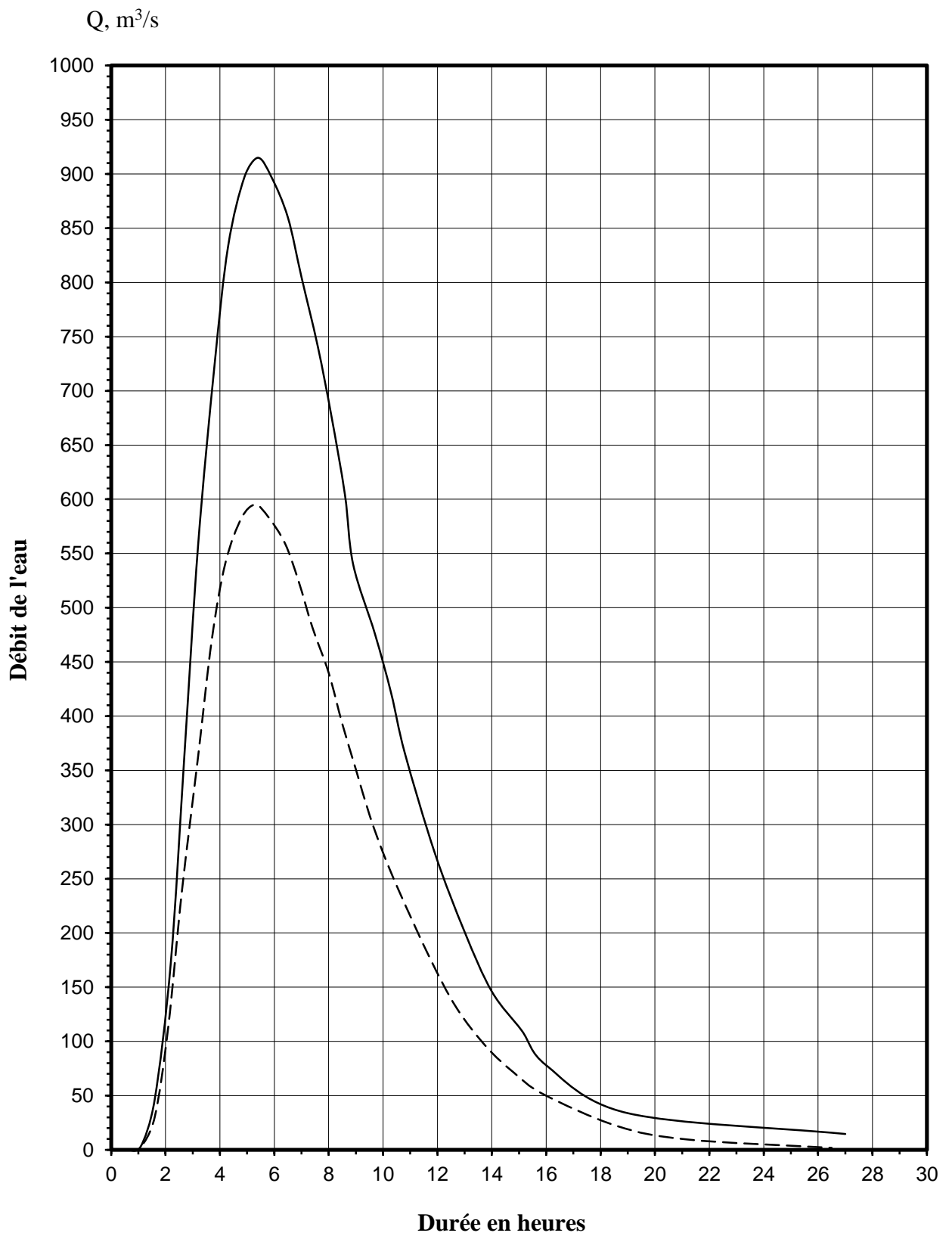


Figure 2.4 Hydrogrammes de calcul de la crue pluviale de l'oued Djedra
 P=0,01%, P=0,1%

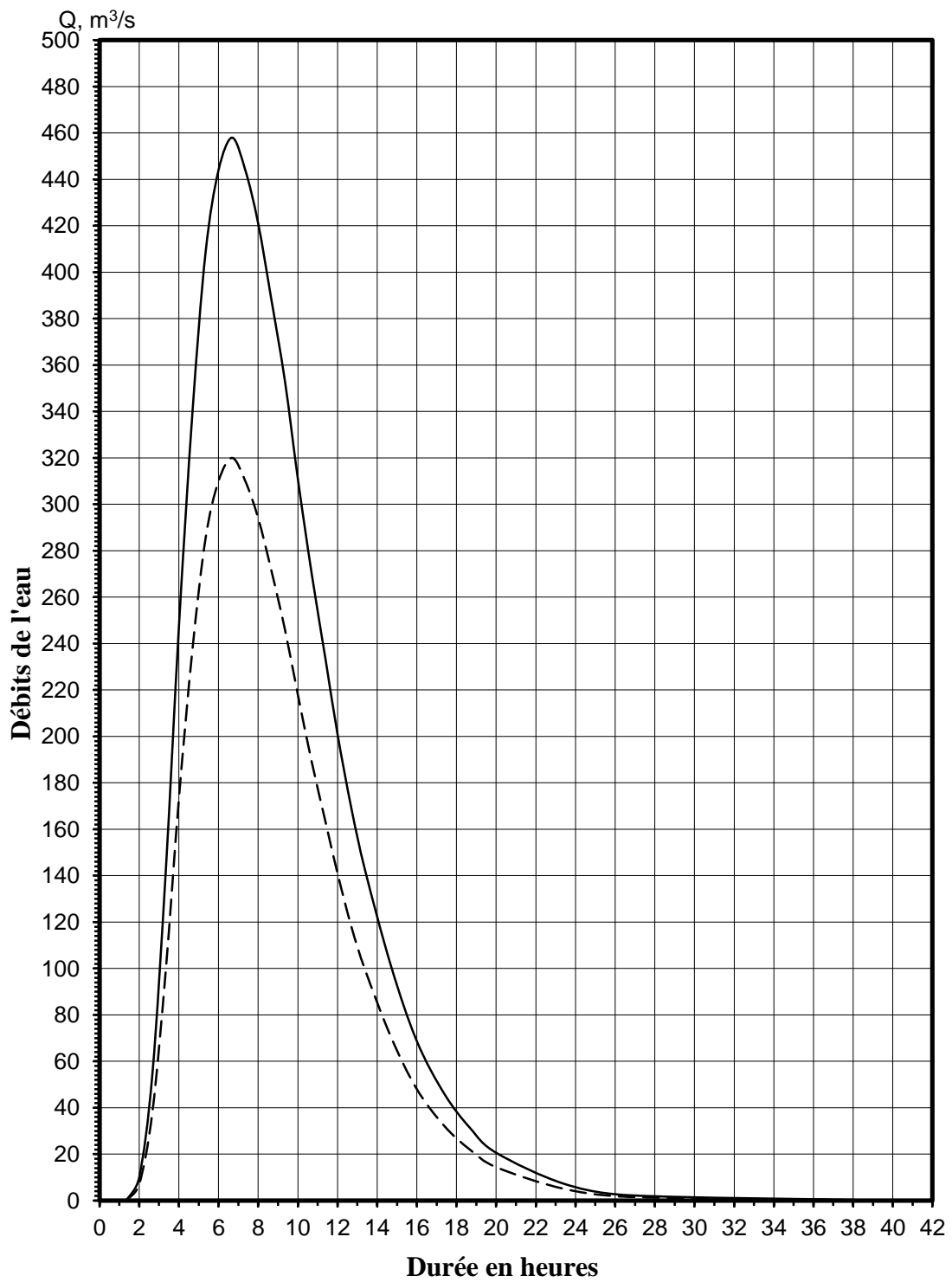


Figure 2.5 Hydrogrammes de calcul de la crue pluviale de l'oued Djedra
 P=1%, P=5%

2.8. Apport solide

Les mesures de l'apport solide, de la turbidité et de la granulométrie des sédiments de fond de l'oued Djedra ne se sont pas produites. La source de l'information pour l'estimation de l'apport solide au site du barrage en projet est les données des observations sur l'oued Medjerda à Souk-Ahras en période de 1949 à 1956 présentées par ANRH (Tableau 2.23), ainsi que les valeurs

Année	Mois												Total
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1949-50	0,02	0,07	0,20	0,09	2,44	2,53	35,81	8,05	2,92	0,11	0,04	0,11	52,4
50-51	2,25	0,73	2,05	1,92	4,09	1,76	0,25	0,11	0,09	0,02	0,02	0,02	13,3
51-52	0,92	17,75	1,92	23,15	140,45	370	97	1,40	1,00	0,20	0,09	0,01	713,7
52-53	0,05	0,02	0,72	16,05	14,61	0,71	8,96	0,41	1,29	0,0	0,0	0,0	42,8
53-54	0,0	14,48	132,09	4,17	28,68	39,03	5,21	13,55	0,07	0,07	0,0	0,0	237,4
54-55	0,0	0,0	1,80	8,70	2,60	31,2	1,40	2,40	0,0	0,0	0,0	3,2	51,3
55-56	0,0	0,4	0,06	23,7	0,05	6,41	2,12	0,0	1,82	0,0	0,0	0,0	34,6
56-57	0,0	0,0	0,0	10,11	31,58	0,0	0,0	0,0	3,92	0,0	0,0	0,0	45,6

Tableau 2.23 : Apport solide en suspension de l'oued Medjerda à Souk-Ahras, mille t

Moyennes de l'écoulement par suspension des oueds Kebir (est) et Kebir (ouest) citées dans le tableau 2.24.

Oued – site	Nombre d'années d'observations	Apport solide, mille t par an	Module d'érosion, t/km ² par an	Turbidité moyenne, kg/m ³
Medjerda - Souk-Ahras	8	149	690	1,7
Kebir (est) – Ain Assel	8	677	995	3,2
Kebir (ouest) – Ain-Cherchar	14	148	131	1,1

Tableau 2.24 : Valeurs moyennes de l'apport solide en suspension des oueds de la région

On sait que la variabilité des valeurs moyennes annuelles de l'écoulement par suspension est considérablement supérieure à l'apport liquide. La majeure partie du transfert des particules solides se déroule pendant les années avec les grandes crues en cas de l'existence du matériau à éroder. Par exemple, au cours des années de haute hydraulité (1951, 1953) l'écoulement par suspension était de 80% de l'apport total en 8 années, tandis que l'écoulement liquide n'est que 36%. En prenant en considération que la période de 1949 à 1956 se rapporte aux années de haute hydraulité avec le coefficient de module égal à 1,3 l'écoulement moyen des sédiments en suspension en cette période est aussi supérieur à la norme. Dans les études de projet pour le bassin de l'oued Medjerda en tant que le module moyen annuel on a pris le module d'érosion égal à 620t/km² par an.

L'observation hydrologique in situ des affluents de l'oued Medjerda en 1997 a montré qu'il n'y a pas de raisons pour retenir les valeurs de l'érosion du bassin de l'oued Djedra inférieures à celles de l'oued Medjerda. On a remarqué que les sédiments de fond du lit de l'oued Djedra sont de préférence graviers-galets.

Donner l'estimation sûre de l'apport solide sans justification appropriée par mesure n'est pas possible. C'est pourquoi pour l'oued Djedra en tant que les valeurs de calcul des sédiments en suspension on a pris le module d'érosion par analogie avec l'oued Medjerda.

Les données relatives au transport par charriage dans les oueds de la région considérée sont absentes. Selon les données concernant l'envasement des retenues dans les régions montagneuses de la Méditerranée la part du transport par charriage est, en fonction des pentes des bassins versants, des caractéristiques de la surface et des paramètres hydrauliques du cours d'eau, de 20% à 80% de l'apport solide total.

Pour l'oued Medjerda le transport par charriage était adopté égal à 20% de l'apport solide total.

Pour l'oued Djedra la part du transport par charriage était adopté égal à 40%.

Les valeurs moyennes de l'apport solide pour le site du barrage sont citées dans le tableau 2.25. Il faut prendre en considération que les moyennes interannuelles sans tenir compte de 1-2 crues de faible fréquence peuvent être inférieures 10 fois.

Sédiments en suspension				Sédiments par charriage, mille t par an	Apport solide sommaire, mille t par an
Module d'érosion, t/km ² par an	Turbidité moyenne, kg/m ³	Débit, kg/s	Apport solide, mille t par an		
600	2,4	2,25	71	47	118

Tableau 2.25 : Caractéristiques moyennes de calcul de l'apport solide au site du barrage Djedra

2.9. Caractéristique hydrochimique

De la composition chimique de l'eau de l'oued Djedra on peut juger seulement selon les résultats des analyses unitaires faits en 1997–1998. (Tableau 2.26).

En conformité avec la teneur en sels l'eau de l'oued Djedra pendant la période de l'absence des grands débits de crues se rapporte au type des eaux douces avec une minéralisation élevée (500–1000 mg/l). On peut considérer qu'en cas des débits supérieurs à 3,0 m³/s la minéralisation diminue à la moyenne (< 500 mg/l).

Suivant la composition anionique la prédominance prononcée (> 25% de l'équivalent) n'existe pas, selon la valeur absolue dominant les ions SO₄²⁻ 210–280 mg/l et HCO₃⁻ 200–280 mg/l. D'après les cations la prédominance bien prononcée est de l'ion Ca²⁺ (25–37% de l'équivalent), le calcium a aussi l'importance maximale suivant les valeurs absolues - 70–156 mg/l. On peut considérer que les eaux de l'oued Djedra se rapportent en période du passage des crues au type carbonate-calcium mais en période des débits faibles - au type chlorure-calcium. L'eau de l'oued Djedra ne possède pas de l'agressivité générale acide et lixiviation par rapport au béton mais elle a l'agressivité sulfatique très faible.

Il faut noter que ces estimations sont faites selon un nombre insuffisants d'analyses de l'eau et elles ne peuvent pas prétendre à l'exactitude absolue.

Date	Débit de l'eau m ³ /s	Température de l'eau	Unités de mesure	Résidu sec	Anions			Cations				Matières organiques et M.E.S				Azote et phosphates				pH
					HCO ₃ '	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	M.O d' O ₂	DCO	Oxygène dissolu	M.E.S. 105°C	NH ₄	NO ₃	NO ₂	PO ₄	
Oued Djedra – site du barrage																				
3.11.1997	□	16	mg/l	784	207	150	210	70	40	94	12	9,9	56	0	40	0,6	10	0,05	0	7,9
24.02.1998	□	14	mg/l	960	250	115	200	130	28	97	4	12,6	38	10,7	30	0,65	8	0	0,5	8,1
19.05.1998	□□□	20	mg/l	914	256	150	278	150	18	114	6	11,8	43	9,5	140	0	6	0,015	0,6	8,9
Oued Djedra - embouchure																				
24.02.1998	□□□□	12	mg/l	500	189	45	144	100	8	40	3	20,6	14,8	10,2	80	0	14	0	0,28	8,4
Oued Akiba – amont de l'embouchure																				
19.05.1998	0,2	20	mg/l	914	281	185	284	156	22	114	6	4	41	8,2	260	0	5	0,015	0,9	8,1
24.02.2001	2,58	10,1	mg/l	420	140	35	118	80	10	35	3	6,3	20	10	80	0	12	0	0,48	8,4
Oued Hammam – amont de l'embouchure																				
24.02.2001	0,2	□8,5	mg/l	622	256	85	134	96	20	53	6	7,5	17	9,3	180	0	8	0,015	0,75	8,4
24.02.2001	1,56	10	mg/l	420	183	30	138	90	8	31	3	5,9	14	10,2	40	0	12	0	0,30	8,4

Tableau 2.26 : Liste des analyses chimiques de l'eau

Chapitre 03
**Cartographie quantitative du risque
d'érosion de Oued Djedra**

3. Introduction :

L'érosion des sols est un problème environnemental majeur qui affecte de nombreuses régions à travers le monde. Elle entraîne la perte de terres fertiles, la dégradation des écosystèmes et la diminution des ressources en eau. Pour lutter contre ce phénomène et prendre des décisions éclairées, il est essentiel de disposer d'outils d'analyse robustes et efficaces. Dans ce chapitre, nous proposons de développer un outil de prise de décision basé sur l'analyse multicritère et SIG. L'objectif est de fournir aux décideurs des informations précises et exploitables pour la gestion et la prévention de l'érosion des sols.. Pour ce faire, nous appliquerons cet outil au cas spécifique du bassin versant de l'Oued Djedra.

3.1 Méthodologie :

Pour étudier le risque d'érosion dans une zone spécifique, il est nécessaire de développer une compréhension approfondie des facteurs qui influencent ce phénomène, ainsi que des conditions régionales propres à la zone d'étude. Dans cette optique, une méthodologie structurée a été mise en place pour évaluer et identifier les zones à risque d'érosion dans le bassin versant l'Oued Djedra.. Cette méthodologie se compose de quatre étapes suivantes:

1. Collecte de données : La première étape consiste à collecter des données pertinentes pour évaluer les risques d'érosion. Cela peut inclure des données topographiques, climatiques, , d'occupation des sols, ainsi que des données historiques sur l'érosion. Ces données serviront de base pour l'analyse et la modélisation ultérieures.
2. Prétraitement des données : Une fois les données collectées, il est nécessaire de les prétraiter afin de les rendre compatibles et cohérentes pour l'analyse multicritère. Cela peut impliquer la normalisation des données, la résolution de problèmes de qualité des données, l'extraction de variables pertinentes, etc.
3. Développement d'une base sur l'analyse multicritère : Dans cette étape, une méthodologie d'analyse multicritère est développée en utilisant les données prétraitées. Différents critères, tels que l'érosion potentielle, la pente, la couverture végétale, peuvent être pris en compte. Des méthodes d'évaluation multicritère, telles que l'analyse hiérarchique (AHP) ou l'analyse des préférences déclarées (APD), peuvent être appliquées pour attribuer des poids à chaque critère et obtenir une évaluation globale des risques d'érosion pour chaque zone étudiée.
4. Cartographie des résultats : Une fois l'évaluation des risques d'érosion réalisée, il est nécessaire de représenter spatialement les résultats pour une visualisation claire et compréhensible. Des techniques de cartographie géospatiale sont utilisées pour générer

des cartes de risques d'érosion. Ces cartes permettent de localiser les zones les plus sensibles à l'érosion, ce qui est essentiel pour orienter les actions de prévention et de gestion des risques.

3.1.1 Collecte des données :

Des données pertinentes ont été collectées, telles que des données topographiques, climatiques, d'occupation des sols et autres informations géospatiales liées à la zone d'étude.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs sources de données ont été identifiées comme des éléments clés dans le processus d'analyse

Les données	Sources (URL)
images satellitaires d'élévation	USGS Earth Explorer
Satellite images	Landsat 8
Pluie	l'ANRH
la texture du sol	World SoilGrid

Tableau.3.1 Sources des données utilisées dans l'étude

- La première source de données utilisée dans cette recherche est constituée des images satellitaires d'élévation, disponibles via USGS Earth Explorer. Ces images fournissent des informations précieuses sur la topographie du terrain, notamment les variations d'altitude et les pentes.
- Une autre source de données importante est la texture du sol, qui est obtenue à partir du World SoilGrid. Cette base de données mondiale offre des informations détaillées sur la composition du sol, y compris les proportions relatives de sable, de limon et d'argile.
- En ce qui concerne les données climatiques, l'ANRH fournit des données sur les précipitations. Ces données sont cruciales pour évaluer les régimes de précipitations dans la région d'étude, car elles ont un impact direct sur les processus d'érosion des sols
- Enfin, les données du satellite Landsat 8 sont utilisées pour obtenir le NDVI (NormalizedDifferenceVegetation Index). Le NDVI permet d'évaluer la densité de la végétation, qui joue un rôle important dans la prévention de l'érosion des sols. Les données du satellite Landsat 8 fournissent des informations sur la couverture végétale, ce qui permet

d'évaluer l'influence de la végétation sur la rétention du sol et la réduction des risques d'érosion.

3.1.2 Le prétraitement des données

Le prétraitement des données est une étape cruciale dans l'analyse des données qui vise à garantir la qualité, la cohérence et la fiabilité des données utilisées. Ce processus comprend plusieurs étapes clés. Tout d'abord, il est essentiel de traiter les données manquantes en les supprimant ou en les complétant de manière appropriée à l'aide de méthodes d'imputation ou d'interpolation. Ensuite, la normalisation des données est également importante pour mettre toutes les variables sur une échelle commune, facilitant ainsi leur comparaison et leur analyse. Des transformations de variables peuvent être nécessaires pour améliorer la distribution ou réduire l'impact de valeurs extrêmes. Enfin, la sélection des variables pertinentes peut être réalisée pour réduire la complexité de l'ensemble de données en ne conservant que les variables les plus significatives pour l'analyse. En suivant ces étapes de prétraitement des données, il est possible d'obtenir des données propres, cohérentes et prêtes à être utilisées dans l'analyse multicritère et la cartographie des résultats, facilitant ainsi la prise de décisions éclairées basées sur des données fiables.

3.1.3 Développement du modèle de prise de décision AHP

Le développement du modèle de prise de décision basé sur l'AnalyticHierarchyProcess (AHP) est une étape clé dans la méthodologie proposée. L'AHP est une méthode structurée qui permet de prendre des décisions en analysant et en hiérarchisant les critères et les alternatives.

Dans cette étape, plusieurs sous-étapes sont impliquées pour construire le modèle AHP.

3.1.3.1 Principe de la Méthode

➤ Fondements de la méthode

Saaty a développé le processus d'analyse hiérarchique (AnalyticHierarchyProcess: AHP) dans les années 1980. Cette méthode vise à représenter un problème de prise de décision sous la forme d'une structure hiérarchique qui reflète les interactions entre les différents éléments du problème. Le fonctionnement de la méthode AHP repose sur quatre étapes :

- 1- Construction de la structure hiérarchique : le problème est décomposé en une hiérarchie arborescente de critères, de sous-critères et d'alternatives. L'objectif se situe en haut de la

hiérarchie, et les éléments contribuant à l'atteinte de cet objectif se trouvent aux niveaux inférieurs. Le dernier niveau correspond aux actions possibles.

- 2- Construction de la matrice de décision : cette étape consiste à effectuer des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau supérieur. Cela permet de construire la matrice de comparaison. Les valeurs de cette matrice sont obtenues en transformant les jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (échelle de comparaisons binaires). La forme générale d'une matrice de décision est exprimée par :

$$A = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & \dots & x_{nn} \end{pmatrix} \quad a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j; \\ x_i & \text{si } i \neq j; \end{cases}$$

Les éléments x_{ij} sont obtenus à partir du tableau 3.3, qui contient les niveaux de préférences de 1-9.

Valeur numérique	Jugement verbal
1	Important égale
3	Modérément plus important
5	Fortement plus important
7	Très fortement plus important
9	Excrément plus important
2, 4, 6, 8	Valeurs Intermédiaires entre deux jugements, utilisées pour affiner le jugement

Tableau. 3.2. Echelle à 9 valeurs de Saaty

- 3- Construction de la matrice de décision standardisée: la matrice standardisée (a_{ij}) est obtenue à partir de la matrice $A(x)$, en utilisant la formule suivante:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

- 4- Déterminer l'importance relative à chaque élément : le poids de chaque facteur i peut être calculé par :

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^n W_i = 1$$

Où n représente le nombre des éléments comparés.

3.1.3.2 Sélection et extraction des facteurs de du modèle de prise de décision

Dans le cadre de cette étude, huit facteurs de conditionnement ont été pris en compte pour établir la carte des risques d'érosion. Ces facteurs comprennent, la distance par rapport aux cours d'eau (DAD), les précipitations, le facteur k (texture du sol), la pente du terrain, le NDVI (indice de végétation par différence normalisée), le TWI (indice d'humidité topographique) et le SPI (indice de puissance de flux). Ces facteurs ont été choisis en fonction de leur influence connue sur les processus d'érosion des sol.

En ce qui concerne le premier facteur qui est la distance par rapport aux cours d'eau , qui représente la proximité des zones étudiées par rapport aux cours d'eau, jouant un rôle important dans les processus d'érosion. Le deuxième facteur est les précipitations, qui mesurent la quantité de pluie reçue dans la région, un élément essentiel dans le déclenchement des processus d'érosion. Le troisième facteur est le facteur k , qui représente la texture du sol, incluant les proportions de sable, de limon et d'argile, et influençant la résistance du sol à l'érosion. La pente (slope) est également un facteur

crucial, car elle détermine la vitesse à laquelle l'eau s'écoule sur le terrain, impactant ainsi les processus d'érosion. Le cinquième facteur est le NDVI (NormalizedDifferenceVegetation Index), qui évalue la densité de la végétation et son impact sur la prévention de l'érosion. Le sixième facteur est le TWI (TopographicWetness Index), qui représente l'humidité du sol en fonction de la topographie, influençant les processus d'infiltration et d'écoulement de l'eau. Enfin, le septième facteur est le SPI (StandardizedPrecipitation Index), qui mesure l'écart par rapport aux conditions de précipitation normales, permettant d'évaluer les variations dans les régimes de précipitations. En combinant ces huit facteurs de conditionnement, il est possible de créer une carte du risque d'érosion détaillée, offrant des informations précieuses pour la gestion et la prévention de l'érosion des sols dans la région étudiée.

facteur	Auteurs	Formule/ Method
la distance par rapport aux cours d'eau	Pavelsky& Smith (2008)	Analyse
les précipitations	Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis(2005)	Interpolation
le facteur k (texture du sol)	SoilGrid	Data gride
la pente du terrain	Wentworth (1930)	Analyse
le NDVI (indice de végétation par différence normalisée)	Carlson & Ripley(1997)	$NDVI = \frac{(NIR - red)}{(NIR + red)}$
le TWI (indice d'humidité topographique)	Beven&Kirkby(1979); Moore, Grayson, & Ladson (1991)	$TWI = \ln(\alpha/\tan \beta)$
le SPI (indice de puissance de flux)	Moore et al. (1991)	$SPI = As \times \tan \beta$

Tableau 3.3 Sources des données utilisées dans l'étude.

3.1.3.3 Résultats

1- Analyse des facteurs d'érosion :

Une analyse approfondie des facteurs influençant l'érosion a été réalisée. Cela inclut l'examen de la topographie, de la pente, de l'occupation des sols, de la végétation, des précipitations et d'autres paramètres pertinents.

a) précipitations

Les précipitations jouent un rôle déterminant dans le déclenchement de l'érosion, car elles surviennent lorsque les eaux de pluie tombent et lorsque l'infiltration dans le sol devient limitée en raison d'une intensité de pluie supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol .

- Selon la carte de variabilité des précipitations présentée à la figure 3-3, les valeurs des précipitations varient de 216 à 346 par an.

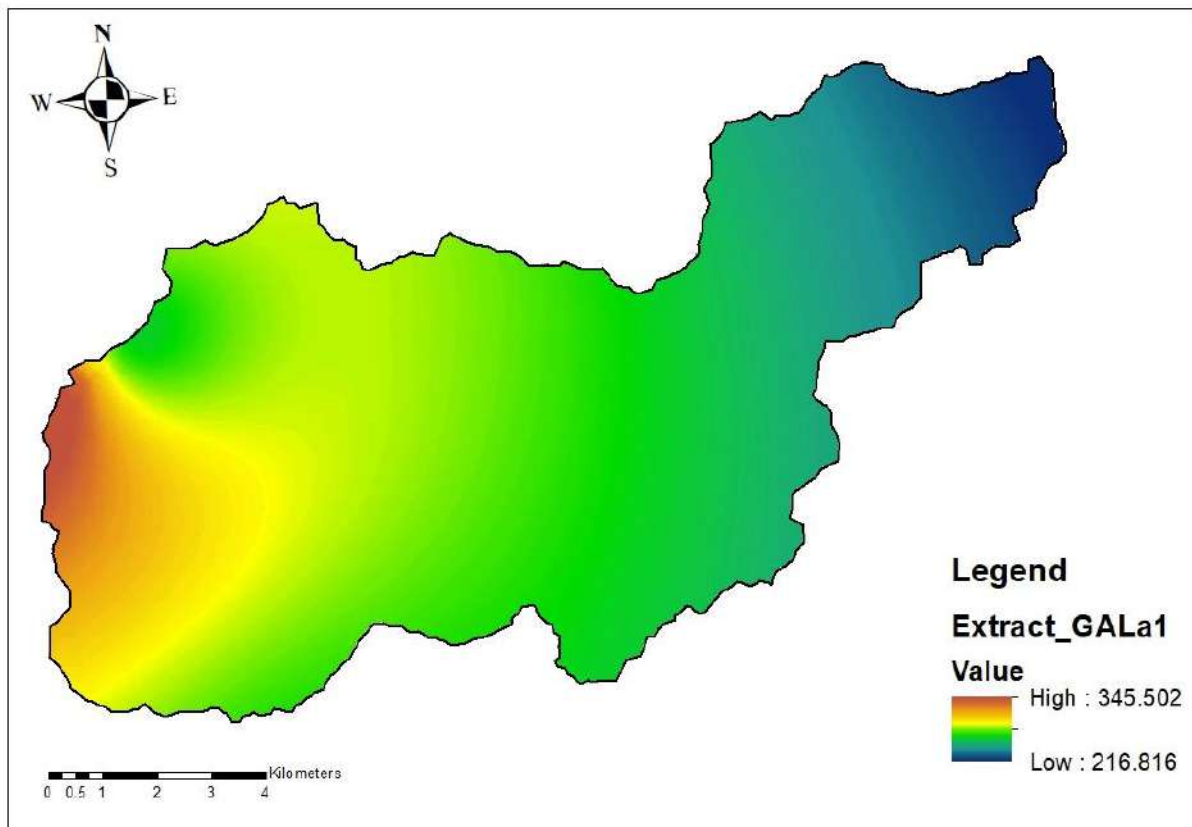


Fig 3-1 cartede pluie

b) Facteur K

Le facteur K dépend de plusieurs propriétés du sol, notamment la structure, la texture, la grosseur des grains, la quantité de matière organique et la perméabilité.

- L'estimation du facteur K a donné des valeurs qui varient de 0.0161 à 0.0194 fig. 3-4. les valeurs les plus élevées sont observées au nord -ouest et sud de la zone ; elles diminuent progressivement en allant vers le nord et l'est.

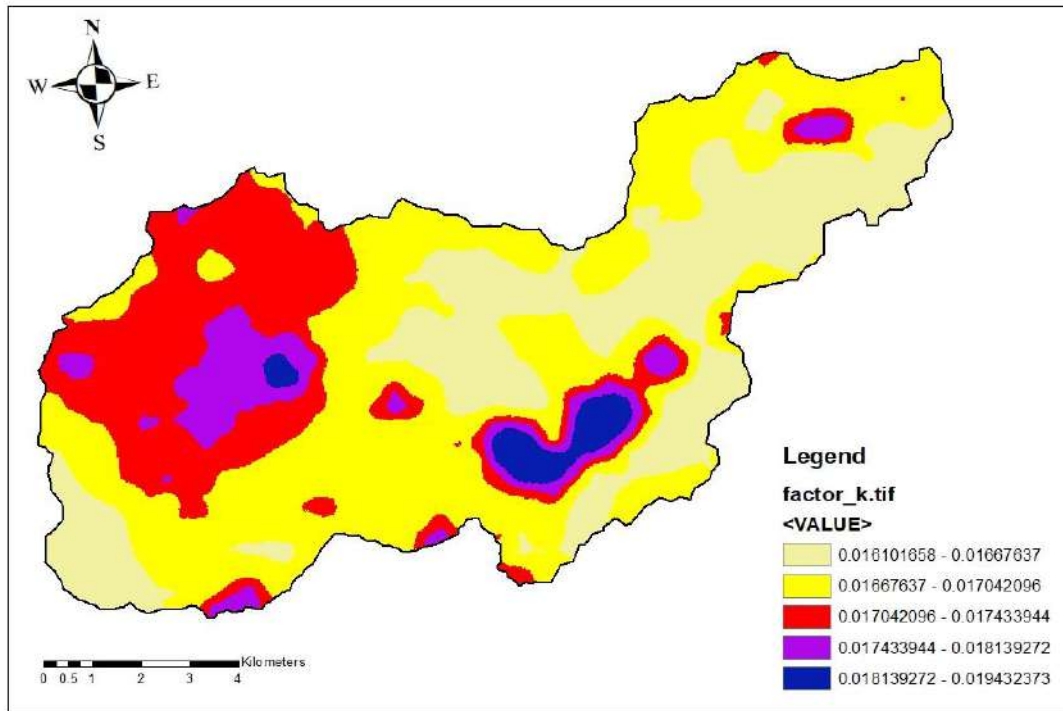


Fig 3-2 carte facteur K

c) Stream power index

Il représente une mesure du potentiel érosif de l'écoulement de l'eau. En général, il prédit l'érosion nette dans les zones de convexité du profil (zones d'accélération et de convergence de l'écoulement) et le dépôt net dans les zones de concavité du profil (zones de décélération de l'écoulement).

- La distribution spatiale de SPI est marquée par une forte variabilité avec des valeurs oscillant de - 13.8155 à 10.0719.

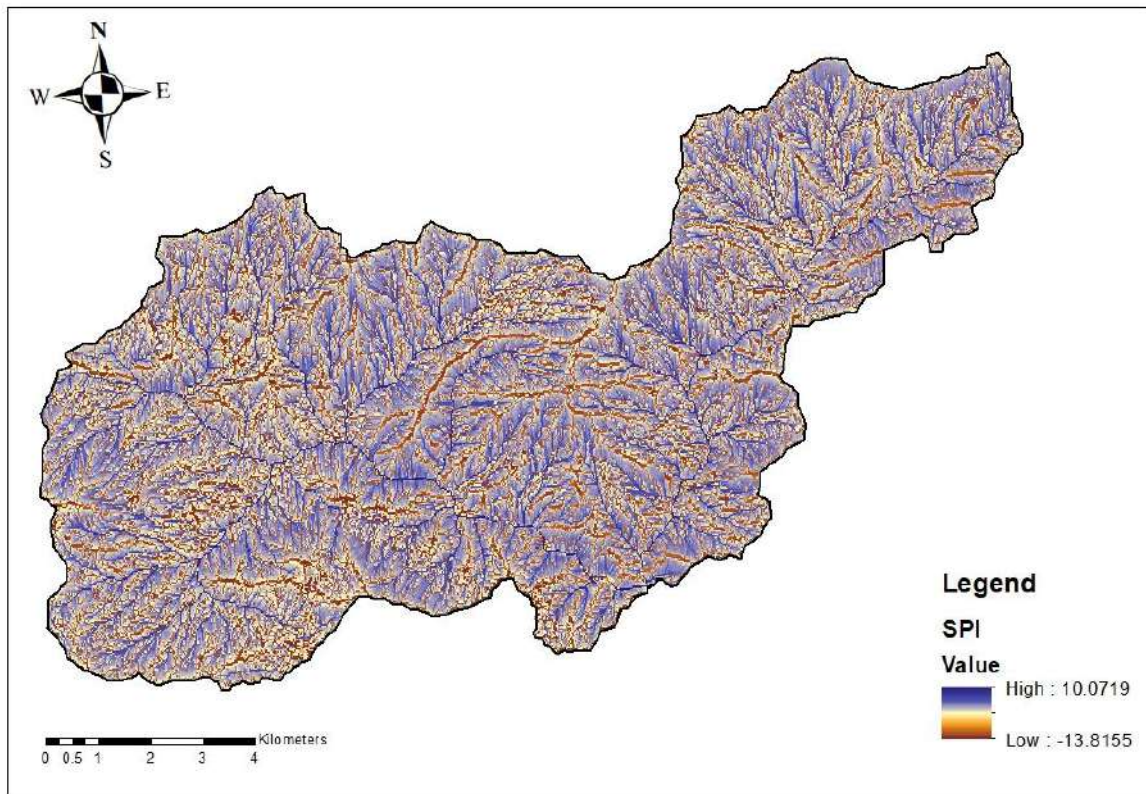


Fig 3-3 carte SPI

d) Indice d'humidité topographique

L'indice d'humidité topographique, également appelé facteur d'humidité topographique, est un indicateur hydrologique couramment utilisé pour identifier les zones présentant une homogénéité hydrologique et quantifier l'impact de la topographie sur les processus hydrologiques, tels que l'engorgement des sols, ainsi que sur d'autres processus biologiques et chimiques qui en découlent. Cet indice met en évidence les zones relativement plates et naturellement humides en fonction de leur position dans le bassin versant.

- La distribution spatiale du TWI est marquée par une grande variabilité avec des valeurs allant de 3.28 à 21.83 .

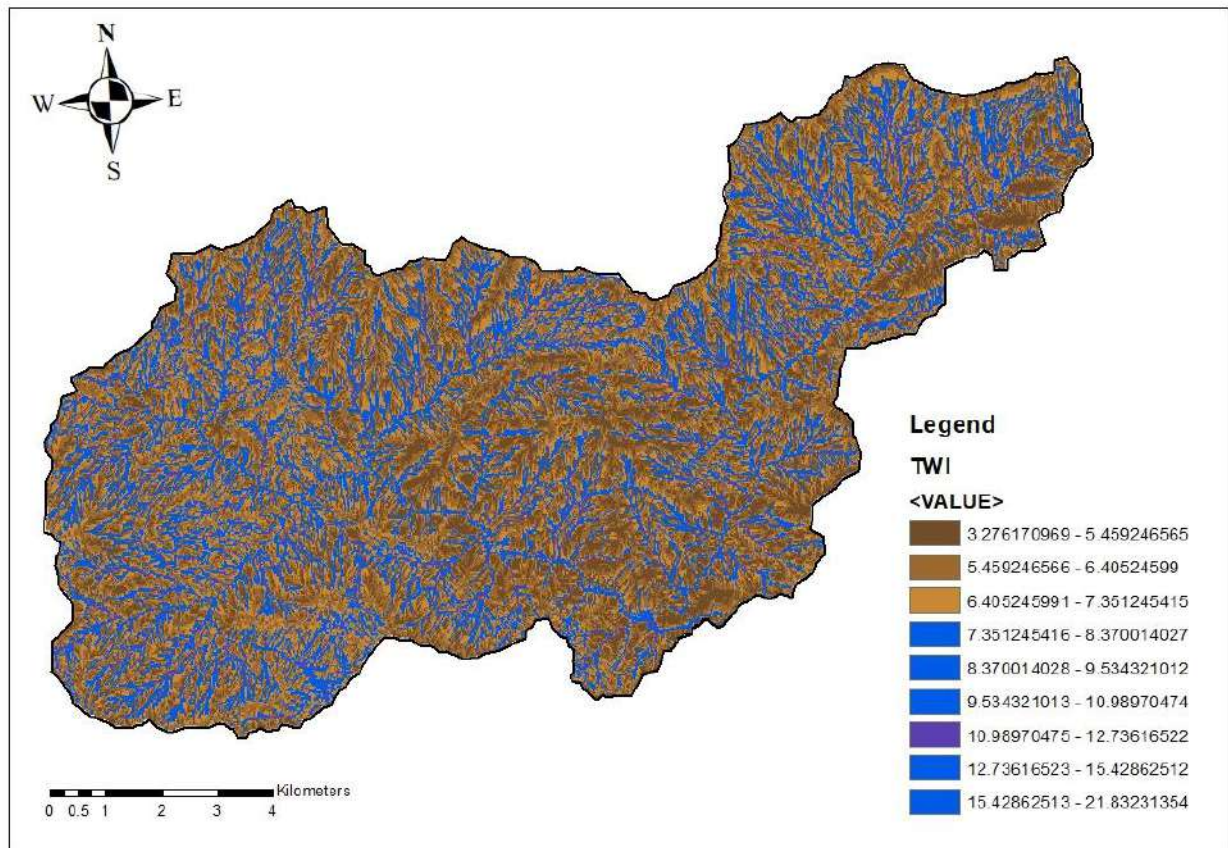


Fig 3-4 :carte TWI

e) Longueur de la pente

Longueur de la pente est un paramètre essentiel dans l'analyse de la stabilité d'une pente (Lee & Min, 2001). Il est fréquemment utilisé dans les études de susceptibilité à l'érosion des sols, car il est directement lié à l'érosion des sols (Lee, 2005; Nefeslioglu, Gokceoglu et al., 2008; Yalcin, Reis, Aydinoglu et Yomralioglu, 2011).

- Les résultats obtenus ont révélé une variabilité significative de la pente dans le bassin versant étudié. La pente moyenne a été estimée à 0 % (faible) avec une déviation standard de 49 %.
- Cette variation de la pente est un facteur clé dans l'explication des phénomènes d'érosion observés dans le bassin versant. Des pentes plus prononcées ont été identifiées dans les zones montagneuses, tandis que des pentes plus douces ont été observées dans les zones de basse altitude.

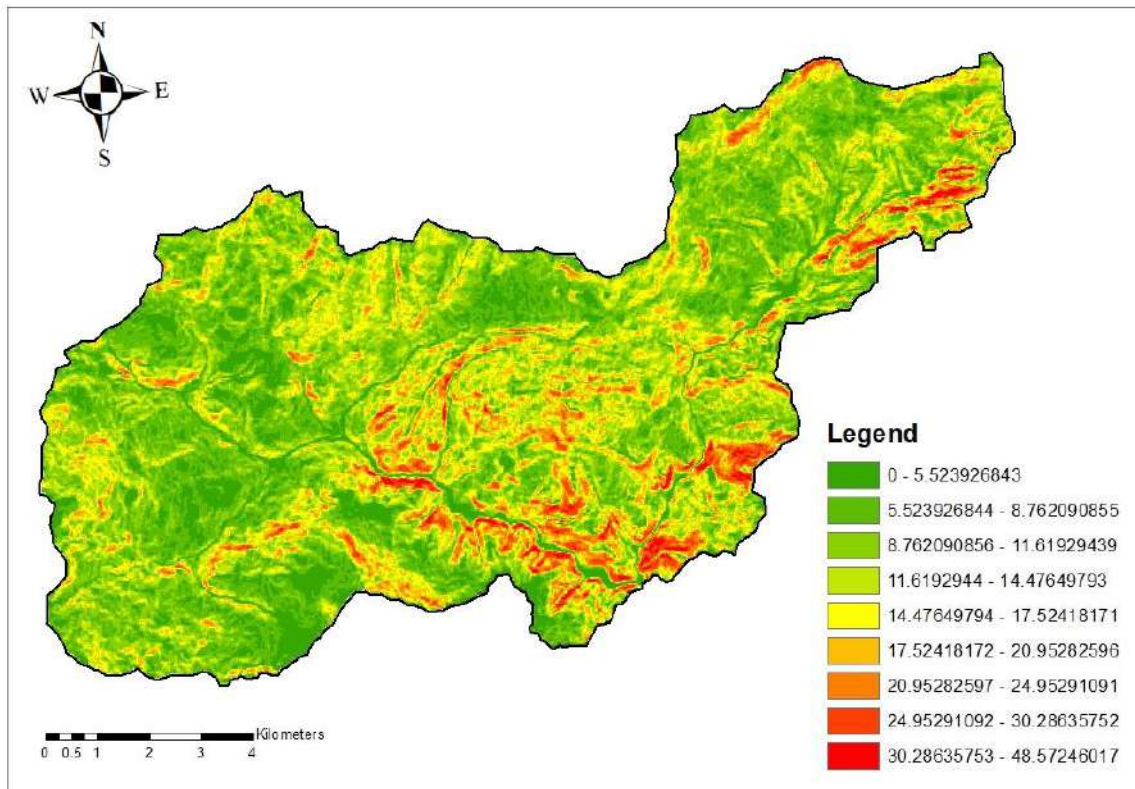


Fig 3-5 : carte Pente en %

f) Elévation

L'altitude joue un rôle important dans la classification du relief local, permettant ainsi d'identifier les points d'élévation maximale et minimale des reliefs.

- Comme le montre la carte ci-dessus, les élévations décroissent vers le réseau fluvial entre 1384 à 504.

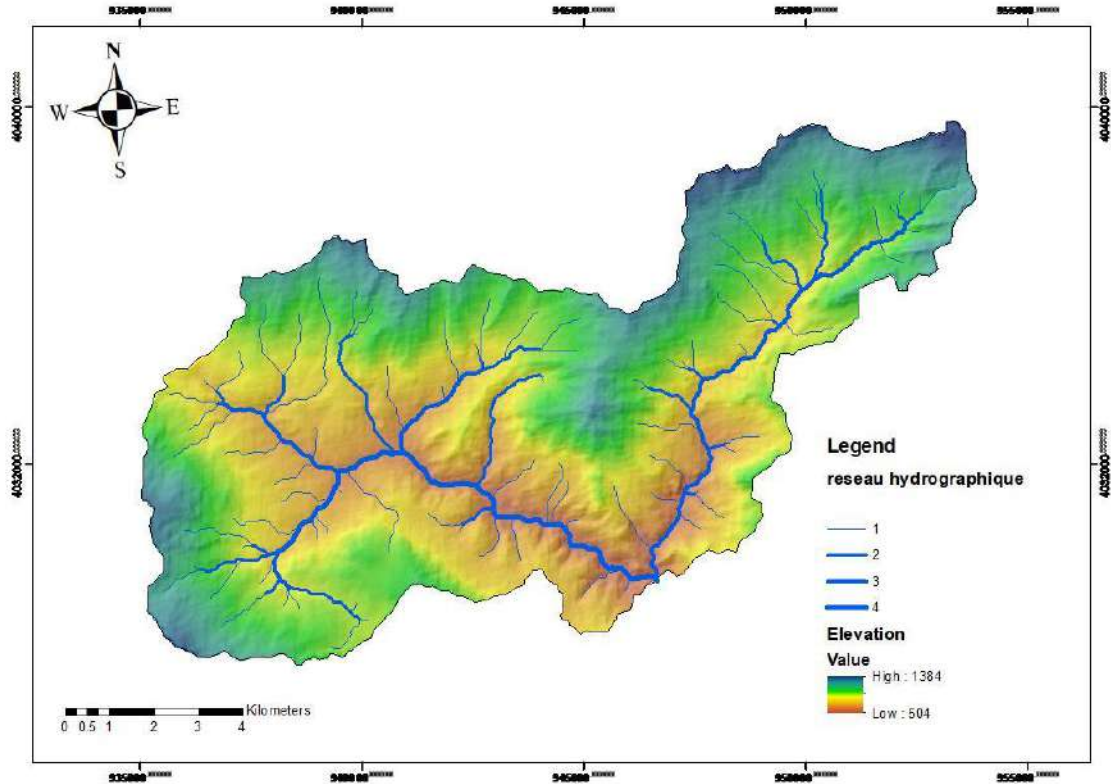


Fig 3-6 : carte de Elévations

g) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

- NDVI est un indice normalisé qui vous permet de générer une image illustrant une couverture végétale (biomasse relative). La valeur de NDVI de notre cas est trouvée dans les zones élevées nord –ouest (fig 3-9) au même temps les zone revient les plus grandes quantités de pluie . les valeur sont entre (-0.030 – 0.453).

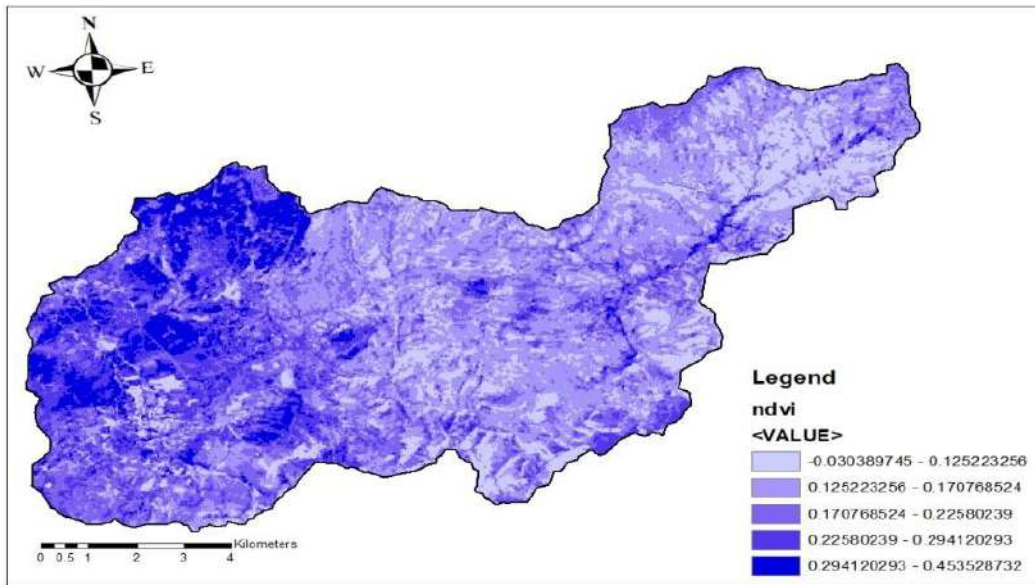


Fig 3-7 : carte NDVI

h) Distance par rapport au cours

- La proximité au réseau de drainage est également un facteur important de stabilité. Les cours d'eau peuvent avoir un effet sur la stabilité en érodant les pentes ou en saturant le fond des matériaux jusqu'à ce que le niveau d'eau augmente.

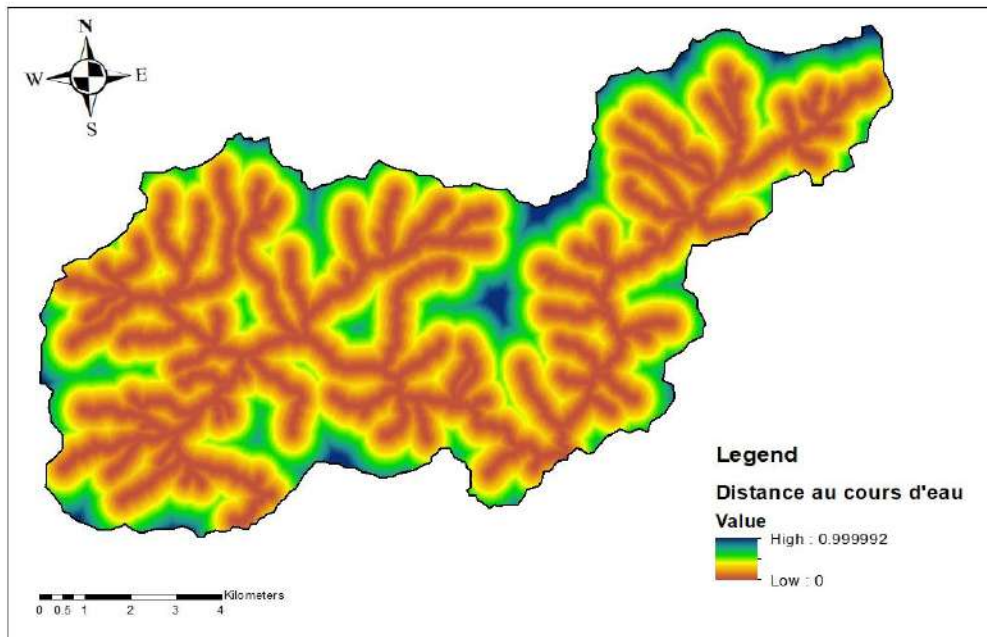


Fig3-8 :CartDistance au cours d'eau

3.2- Standardisation :

La technique de standardisation est utilisée pour rendre les différentes entrées d'un problème de décisions comparables en les traduisant à une échelle commune, afin de surmonter l'incommensurabilité des données (Rahman et al., 2012). Ce processus de standardisation permet de mettre à l'échelle toutes les dimensions d'évaluation entre 0 et 1. Dans cette étude, la standardisation des facteurs a été réalisée en utilisant la logique floue (Fuzzylogic). Les nouvelles fonctionnalités de l'opérateur "Fuzzymembership" d'ArcGIS ont été intégrées dans la modélisation spatiale du risque d'érosion pour standardiser les facteurs sur la même échelle, facilitant ainsi leur mesure. De plus, cette approche permet de convertir la description sémantique du risque d'érosion hydrique en un modèle numérique de prédiction spatiale.

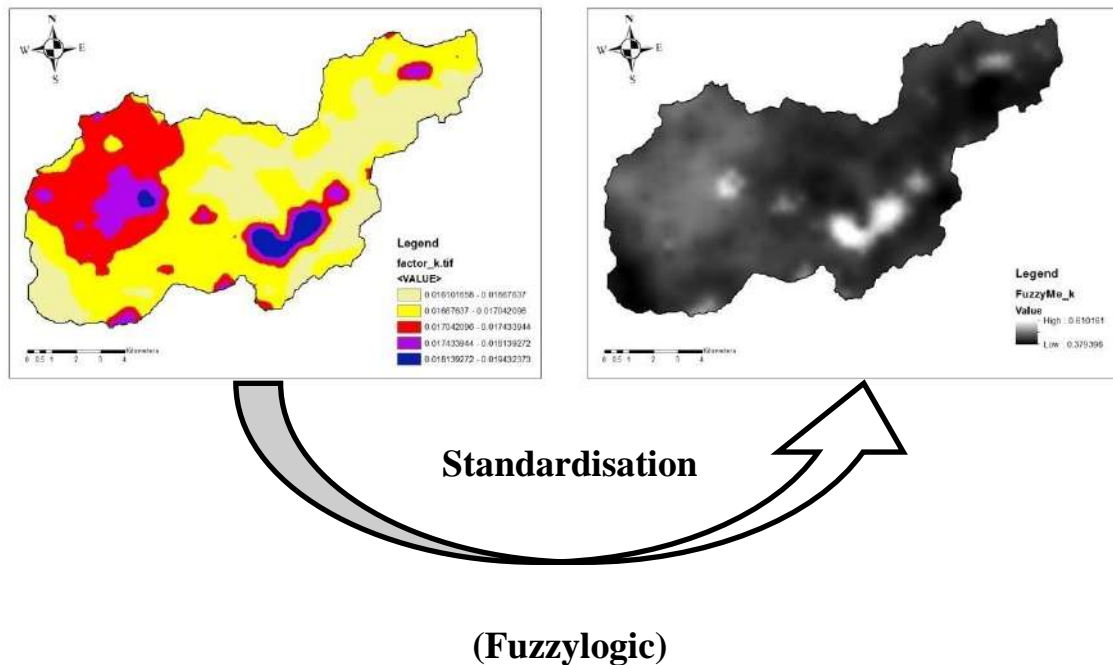
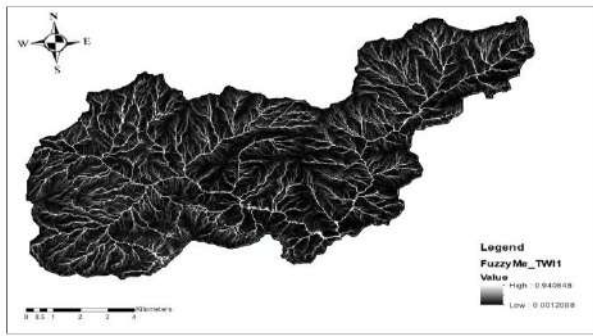
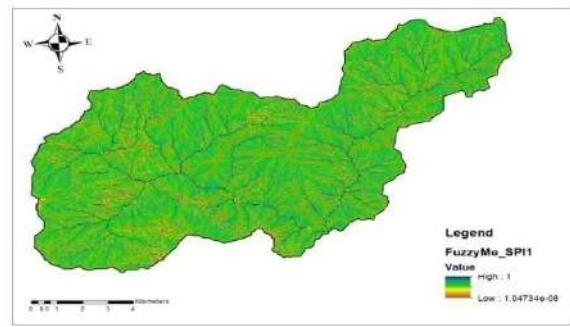


Fig.3.9. Le processus de standardisation.

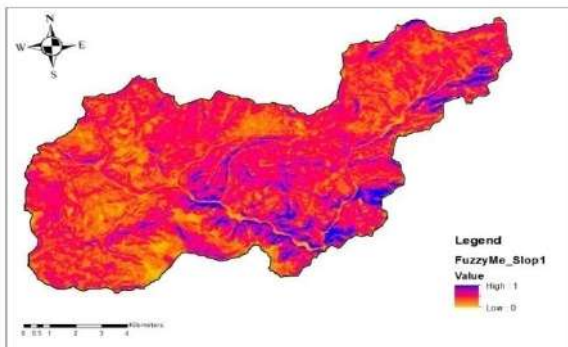
Les résultats de la standardisation des facteurs:



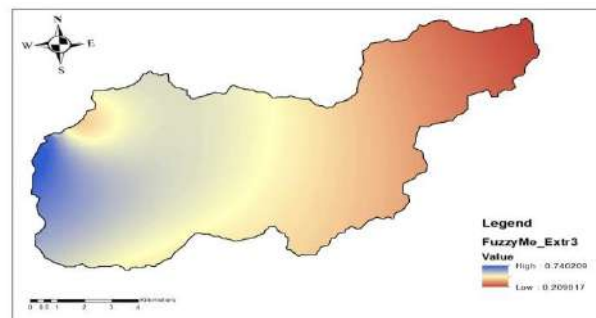
TWI



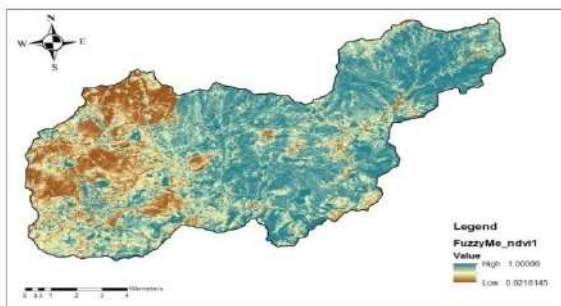
SPI



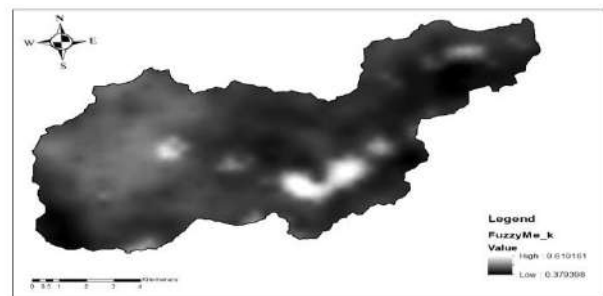
Pente



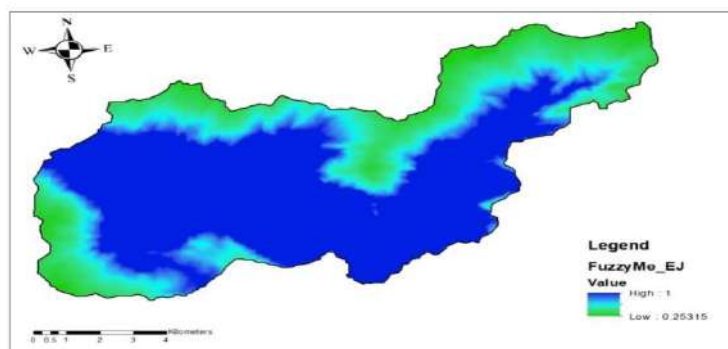
pluie



NDVI



K



Élévations

1. Une fois que la standardisation des facteurs est achevée, la prochaine étape de l'évaluation multicritère consiste à déterminer les poids des facteurs. En effet, tous les facteurs contribuent de manière différente à l'évaluation du risque d'érosion.
2. La méthode AHP (AnalyticalHierarchyProcess) offre une approche simple pour pondérer l'ensemble des facteurs. Son interface prend la forme d'une matrice de comparaison par paires. Les poids sont attribués à chaque paire de facteurs, car il est plus facile de comparer les facteurs deux par deux plutôt que d'évaluer le poids d'un facteur par rapport à l'ensemble des autres couches d'informations.
3. Une fois que les poids ont été déterminés, la technique de la combinaison linéaire Pondérée (CLP) est utilisée pour fusionner les différentes couches du modèle en fonction de leurs poids respectifs.
4. Dans ce cas, il y a une compensation totale entre les facteurs, ce qui signifie qu'un facteur ayant une faible valeur peut être compensé par un autre facteur ayant une valeur élevée. Le degré de compensation dépend des poids attribués à chaque facteur.
5. Cette technique consiste simplement à multiplier chaque facteur standardisé par son poids, puis à les additionner. Ensuite, la somme obtenue est divisée par le nombre total de facteurs.

4- Méthode Hiérarchique Multicritère (AHP)

➤ Résultats obtenues :

La matrice de comparaison :

	R-FACTEUR	PENTE	ELV	K-FACTEUR	DAD	NDVI	TWI	SPI
R-FACTEUR	1	2.00	3.00	4.00	4.00	3.00	6.00	7.00
PENTE	0.50	1	5.00	4.00	3.00	3.00	6.00	5.00
ELV	0.33	0.20	1	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00
K-FACTEUR	0.25	0.25	3.00	1	2.00	0.33	6.00	5.00
DAD	0.25	0.33	2.00	0.50	1	0.33	4.00	5.00
NDVI	0.33	0.33	1.00	3.00	3.00	1	8.00	6.00
TWI	0.17	0.17	0.50	0.17	0.25	0.12	1	4.00
SPI	0.14	0.20	0.33	0.20	0.20	0.17	0.25	1

Les poids des facteurs :

R-FACTEUR	PENTE	ELV	K-FACTEUR	DAD	NDVI	TWI	SPI
28.8	24.4	15.5	10.9	8.1	6.5	3.4	2.3

Tableau 3.4 Poids des facteurs

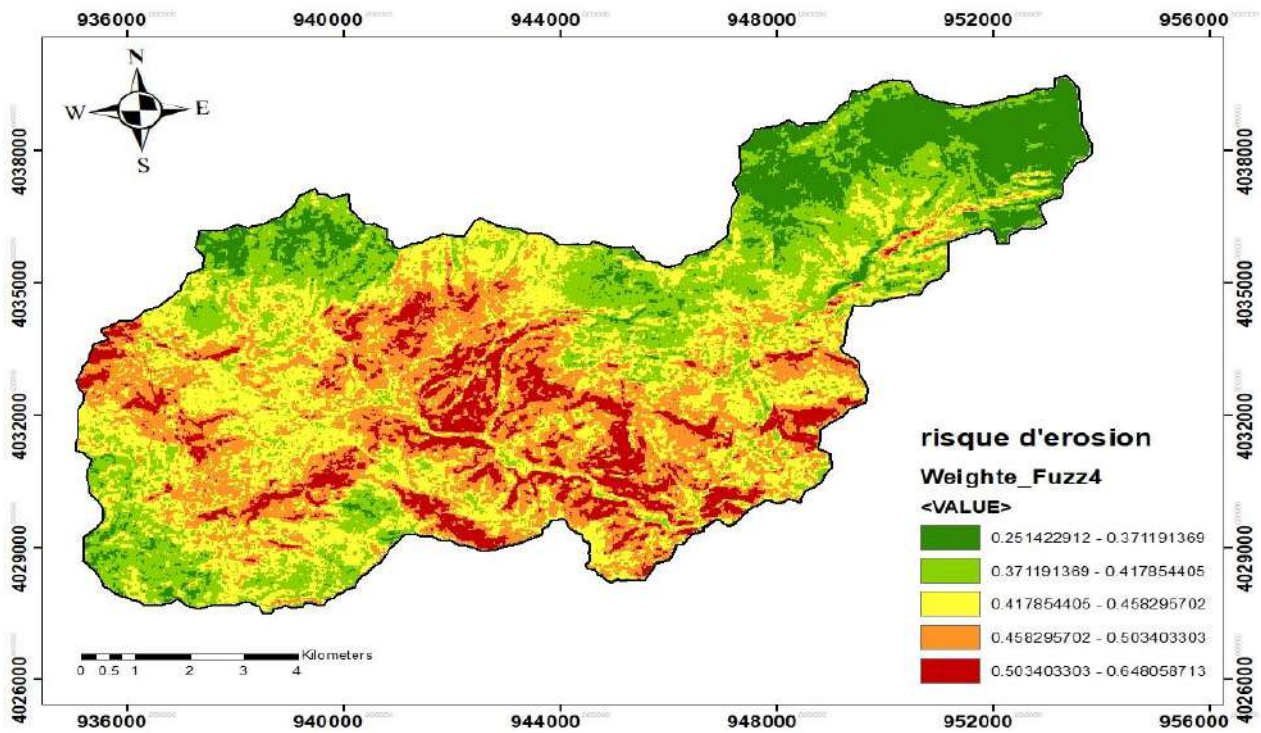


Fig 3-10 : Carte de la sensibilité à l'érosion de bassin versant d'OUADDJEDRA.

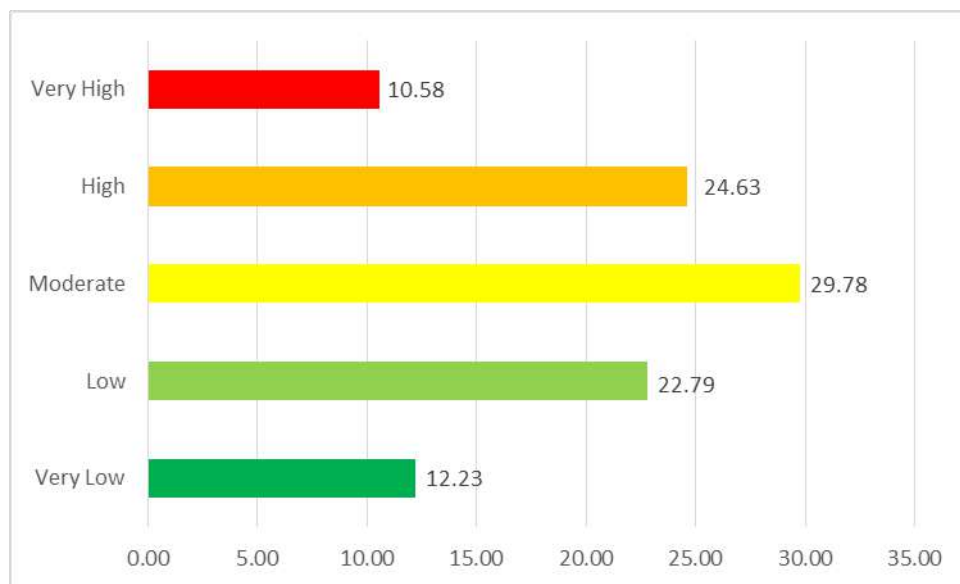


Fig 3-11 : histogramme des classes des surfaces en % de sensibilité à l'érosion de bassin versant d'OUAD DJEDRA.

Discussion :

La méthode AHP intégrée dans un SIG a été utilisée pour identifier les zones à risque d'érosion. La carte obtenue (voir Figure 3.12) a été divisée en cinq classes (fig. 3.13), allant du risque "très faible" au risque "très élevé".

Selon les résultats nous constatons que 10,58% de la superficie totale a été placée dans des classes de susceptibilité très élevées ; 24,63% en grande classe ; 29,78% en classe modérée ; 22,79% en classe basse ; et 12,23% en très faible classe.

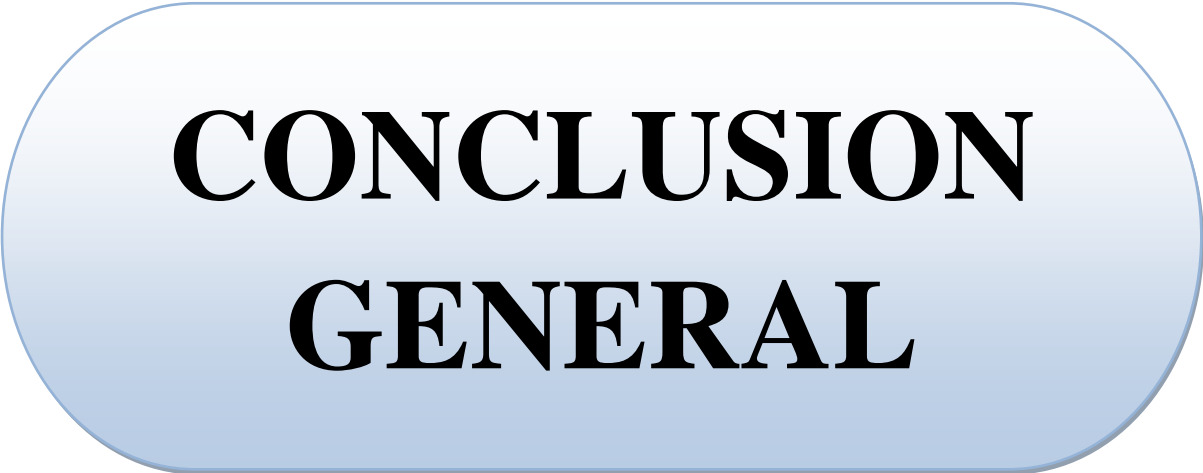
Les résultats montrent que les zones à risque d'érosion sont principalement localisées dans le sud-est du bassin versant. Ces zones se caractérisent par des taux de précipitations moyens à faibles et irréguliers, ainsi que par des pentes relativement élevées.

En revanche, à l'échelle de la région centrale à occidentale du bassin versant, des zones à haut risque ont été identifiées. Ces zones se caractérisent par un climat humide avec des précipitations abondantes et erratiques. Cependant, les cycles hydriques y sont irréguliers et monotones, avec des cours d'eau peu profonds et des sols arides.

À la lumière de ces résultats, on peut conclure que la dérive n'est pas un facteur déterminant pour expliquer sa proportion dans les zones à risque d'érosion.

Conclusion :

Ce chapitre a été dédié à l'établissement de la carte de vulnérabilité à l'érosion des sols. Utilisant un processus d'analyse hiérarchique (AHP) intégrant la télédétection et le système d'informations géographiques (SIG). Pour une étude de cas sur le bassin hydrographique de l'oued Djedra.



**CONCLUSION
GENERAL**

Conclusion général :

L'érosion représente un risque majeur avec des conséquences préjudiciables sur l'environnement, les populations et les infrastructures. Dans le but de prévenir l'érosion, la modélisation est largement utilisée comme outil pour délimiter les zones sensibles dans le bassin versant de Djedra.

Ainsi, la modélisation joue un rôle essentiel dans la compréhension des risques et la réduction des dommages. Cette étude vise à appliquer le modèle AHP pour cartographier les zones à risques d'érosion. Les résultats obtenus ont permis de générer cinq classes de susceptibilité : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée.

Selon les résultats nous constatons que 10,58% de la superficie totale a été placée dans des classes de susceptibilité très élevées ; 24,63% en grande classe ; 29,78% en classe modérée ; 22,79% en classe basse ; et 12,23% en très faible classe.

Les résultats de l'analyse montrent qu'il y a une superficie considérable menacée par l'érosion hydrique surtout dans la partie sud et nord-west à proximité de cours d'eau principale (Oued djedra) ou la déclivité de terrain est haute relativement et la vitesse d'écoulement est différencié.

Selon la valeur moyenne d'érosion générée dans le bassin versant du Medjerda en général (9.36 T/ha/an) est une valeur considérable à cause qu'elle est au-dessus aux taux de tolérance de perte en sol dans le bassin méditerranéen (≈ 7 T/ha/an).

L'application de cette méthode a fourni des résultats respectables, offrant une précieuse aide aux décideurs à moindre coût pour simuler différents scénarios d'évolution et cibler les zones prioritaires nécessitant des mesures de conservation et de lutte contre l'érosion hydrique dans le bassin de Djedra.

Dans les études futures, une attention particulière devrait être accordée aux variations à long terme de la vulnérabilité, en développant un outil capable d'intégrer automatiquement et de manière dynamique les données géographiques. Cela permettra d'améliorer davantage notre compréhension de l'érosion et de renforcer nos capacités de gestion et de protection des zones concernées.

Il est également crucial de sensibiliser et d'éduquer les populations sur l'importance de la protection des sols et de la mise en œuvre de pratiques agricoles durables.

L'érosion doit être abordée de manière holistique, en intégrant des approches scientifiques, techniques, économiques et sociales pour garantir une gestion efficace des terres et une préservation à long terme des ressources naturelles.

En définitive, la lutte contre l'érosion nécessite une action collective et une prise de conscience mondiale de l'importance de préserver nos sols et nos écosystèmes. En agissant de manière responsable et en mettant en œuvre des mesures appropriées, nous pouvons atténuer les effets de l'érosion et préserver un environnement sain et durable pour les générations futures.

Références

Références:

- ❖ Adiat, K.A.N., Nawawi, M.N.M., Abdullah, K., 2012. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool—a case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *J. Hydrol.* 440-441, 75–89.
- ❖ Alexakis, D.D., Grillakis, M.G., Koutroulis, A.G., Agapiou, A., Themistocleous, K., Tsanis, I.K., Michaelides, S., Pashiardis, S., Demetriou, C., Aristeidou, K., Retalis, A., Tymvios, F., Hadjimitsis, D.G., 2014. GIS and remote sensing techniques for the assessment of land use change impact on flood hydrology: the case study of Yialias basin in Cyprus. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14 (2), 413–426.
- ❖ Angima, S.D., Stott, D.E., O'Neill, M.K., Ong, C.K., Weesies, G.A., 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 97 (1-3), 295–308
- ❖ Arabameri, A., Pradhan, B., Lombardo, L., 2019. Comparative assessment using boosted regression trees, binary logistic regression, frequency ratio and numerical risk factor for gully erosion susceptibility modelling. *Catena* 183, 104223. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104223>.
- ❖ Arnoldus, H.M.J., 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *Food Agric. Org. Soils Bull.* 34, 39–51.
- ❖ Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65 (1-2), 15–31.
- ❖ Berteni, F., Barontini, S., Grossi, G., 2021. Evaluating soil erosion by water in a small alpine catchment in Northern Italy: comparison of empirical models. *Acta Geochim.* 1–18.
- ❖ Bergsma, E., Charman, P., Gibbons, F., Hurni, H., Moldenhauer, W. C., & Panichapong, S. (1996). Terminology for soil erosion and conservation. ISSS: ITC: ISRIC.
- ❖ Bhattacharyya, R., Davies, K., Fullen, M. A., & Booth, C. A. (2008). Effects of palm-mat geotextiles on the conservation of loam sand soils in east Shropshire, UK.
- ❖ Boiffin, J. & Sebillotte, M. (1976). ((Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ)). *Annales Agronomiques*, 27(3):295–325.
- ❖ Bouamrane, A., Derdous, O., Dahri, N., Tachi, S.E., Boutebba, K., Bouziane, M.T., 2020. A comparison of the analytical hierarchy process and the fuzzy logic approach for flood susceptibility mapping in a semi-arid ungauged basin (Biskra basin: Algeria).

- ❖ Bougerra, S.A. (2018). Quantification Et Modelisation Du Transport Solide En Climat Semi-Aride, Cartographie Du Risque D'érosion Hydrique Au Moyen D'un Sig: Cas Des Deux Bassins Versants Oued Boukiou Et Oued Boumessaoud (NW De L'algerie) (Doctoral dissertation).
- ❖ Bougerra, S.A. (2018). Quantification Et Modelisation Du Transport Solide En Climat Semi-Aride, Cartographie Du Risque D'érosion Hydrique Au Moyen D'un Sig: Cas Des Deux Bassins Versants Oued Boukiou Et Oued Boumessaoud (NW De L'algerie) (Doctoral dissertation).
- ❖ Bouzeria, H. (2018). Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones `a risques d'érosion hydrique `a partir d'une base de donn'ees g'érées par un SIG: application aux bassins de Bounamoussa et Mellah (Nord-Est algérien) (Doctoral dissertation).
- ❖ Chakraborty, R., Pal, S.C., Sahana, M., Mondal, A., Dou, J., Pham, B.T., Yunus, A.P., 2020. Soil erosion potential hotspot zone identification using machine learning and statistical approaches in eastern India. *Nat. Hazards* 104 (2), 1259–1294. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04213-3>
- ❖ Demangeot, J. (1994). Hommage à Pierre George. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 71(5), 485-485.
- ❖ DRISSI, H. E. (2020). Evaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'utilisation de SIG et le modèle EPM Cas du bassin versant du barrage de Beni Haroun (Doctoral dissertation, Univ M'sila).
- ❖ FAO, 1980. Conservation des ressources naturelles en zones aride et semi- arides Cahiers FAO: conservation des sols, 3: 135 p.
- ❖ FAO, 2017. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management Food and Agriculture. Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- ❖ Free, G. (1952). ((Soil movement by raindrops))). *Agricultural Engineering*, pages 491-494, 496.
- ❖ Gascuel-Oudou, C., Cros-Cayot, S., & Durand, P. (1996). Spatial variations of sheet flow and sediment transport on an agricultural field. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(9), 843-851.
- ❖ Giménez, R., & Govers, G. (2002). Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5), 1475-1483.

- ❖ Govers, G. (1985). Selectivity and transport capacity of thinflows in relation to rillerosion. *Catena*, 12(1), 35-49.
- ❖ Govers, G., & Rauws, G. (1986). Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds. *Earth surface processes and landforms*, 11(5), 515-524.
- ❖ Govers, G., Takken, I. & Helming, K. (2000). ((Soil roughness and overland flow)). *Agronomie*, 20:131–146.
- ❖ Grosh, J. L., & Jarrett, A. R. (1994). Interrillerosion and runoff on very steep slopes. *Transactions of the ASAE*, 37(4), 1127-1133.
- ❖ *Int. J. River Basin Manage.* 1–11.
- ❖ Kinnell, P. I. A. (2013). Modeling of the effect of flow depth on sediment discharged by rain-impacted flows from sheet and interrillerosion areas: a review. *Hydrological Processes*, 27(18), 2567-2578.
- ❖ Leguédois, S. (2003). Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés (Doctoral dissertation, Université d'Orléans).
- ❖ Leguédois, S. (2003). *Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés* (Doctoral dissertation, Université d'Orléans).
- ❖ Ludwig, B. (2000). Les déterminants agricoles du ruissellement et de l'érosion-De la parcelle au bassin versant. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, (22), p-37.
- ❖ Ludwig, B., Auzet, A. V., Boiffin, J., Papy, F., King, D., & Chadoeuf, J. (1996). Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Etude et gestion des Sols*, 3, 53-70.
- ❖ Misra, R. K., & Rose, C. W. (1995). An examination of the relationship between erodibility parameters and soil strength. *Soil Research*, 33(4), 715-732.
- ❖ Moss, A. J. & Green, T. W. (1987). ((Erosive effects of the large water drops (gravity drops) that fall from plants)). *Australian Journal of Soil Research*, 25:9–20.
- ❖ Riezebos & Epema, 1985 ; Salles et al., 2000 ; Erpul et al., 2002)
- ❖ Terry, J. P. (1998). A rainsplash component analysis to define mechanisms of soil detachment and transportation. *Soil Research*, 36(3), 525-542.
- ❖ Touaibia, B. (2010). Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. *Sécheresse*, 21(4), 333-335.
- ❖ <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89rosion>

- ❖ https://www.google.dz/search?q=1%27%C3%A9rosion+de+versant+diffuse&source=lmns&bih=600&biw=1343&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwi6v4as4az_AhWBp0wKHT6eDW0Q_AUoAHoECAEQAA
- ❖ https://www.google.dz/search?q=les+terrasses+en+courbes+de+niveau&tbm=isch&ved=2ahUKEwjSiZ6K2Kz_AhUVpCcCHexYDWkQ2-cCegQIABAA&oq=les+terrasses+en+courbes+de+niveau&gs_lcp=CgNpbWcQDFAAWABgAGgAcAB4AIABAIgBAJIBAJgBAKoBC2d3cy13aXotaW1n&scient=img&ei=1h9-ZNLGAZXInsEP7LG1yAY&bih=600&biw=1343&hl=en - imgrc=hOyLBz5eHkwu-M
- ❖ https://www.google.dz/search?q=g%C3%A9ogrilles&tbm=isch&ved=2ahUKEwis0L2R16z_AhWQnCcCHWnQC9QQ2-cCegQIABAA&oq=g%C3%A9ogrilles&gs_lcp=CgNpbWcQDDoGCAAQCBAeUOYOWOYOYLkhaABwAHgAgAGLAYgBiwKSAQMwLjKYAQCgAQGqAQOtd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&scient=img&ei=2B5-ZKyEMJC5nsEP6aCvoA0&bih=600&biw=1343&hl=en - imgrc=vOoCs3KtPVXwoM
- ❖ https://www.google.dz/search?q=les+g%C3%A9otextiles&tbm=isch&ved=2ahUKEwjNnJL01qz_AhXzpycCHViFAfAQ2-cCegQIABAA&oq=les+g%C3%A9otextiles&gs_lcp=CgNpbWcQDFD8EFj8EGCfH2gAcAB4AIABhwGIAySckgEDMC4ymAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&scient=img&ei=mx5-ZI3jD_PPnsEP2IqGgA8&bih=600&biw=1343&hl=en - imgrc=ULgiyIUePInK5M
- ❖ https://www.provencepaysagisme.com/public/img/big/IMG4114minjpeg_60fe8d3604e99.jpg
- ❖ https://www.google.dz/search?q=les+fascines+&tbm=isch&ved=2ahUKEwj3zYCr1az_AhX9rycCHdRIDZAQ2-cCegQIABAA&oq=les+fascines+&gs_lcp=CgNpbWcQAzIECAAQHjIHCAAQGBCABDIHCAAQGBCABFD5Elj5EmDwI2gAcAB4AIABuwGIAegCkgEDMC4ymAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&scient=img&ei=9Rx-ZLf_Gv3fnsEP1Mu1gAk&bih=600&biw=1343&hl=en - imgrc=GtUEt9Z2hZNMhM&imgdii=HwG8fH3TcuetsM
- ❖ https://www.google.dz/search?q=faisceaux+de+branches+li%C3%A9es&tbm=isch&ved=2ahUKEwiynoPx1Kz_AhUVsCcCHZ2PA_IQ2-cCegQIABAA&oq=faisceaux+de+branches+li%C3%A9es&gs_lcp=CgNpbWcQDFAAWABg5RpoAHAAeACAAZkCiAGZApIBAzItMZgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nWAEB&scient=img&ei=exx-ZPL0M5XgnsEPnZ-OkA8&bih=600&biw=1343&hl=en

- ❖ https://www.google.dz/search?q=les+gabions+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjS87b8zKz_AhV7vicCHQBvAM0Q2-cCegQIABAA&oq=les+gabions+&gs_lcp=CgNpbWcQDDIECAAQHjoFCAAQgAQ6BggAEAgQHIDNE1jNE2DBI2gAcAB4AIABpwGIAcYckgEDMC4ymAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&scient=img&ei=MBR-ZNKbEfv8nsEPgN6B6Aw&bih=600&biw=1343&hl=en
- ❖ <https://www.projetecolo.com/type-de-vegetation-697.html>
- ❖ <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/earthexplorer-help-index>
- ❖ <https://earthexplorer.usgs.gov/order/index/>
- ❖ https://www.google.com/maps/place/Le+Vieux+Pont+De+Oued+Djedra_%D9%82%D9%86%D8%B7%D8%B1%D8%A9+%D9%88%D8%A7%D8%AF+%D8%AC%D8%AF%D8%B1%D8%A9+%D8%A7%D9%84%D9%82%D8%AF%D9%8A%D9%85%D8%A9%E2%80%AD/@36.2957564,7.9757141,15z/data=!4m14!1m7!3m6!1s0x12fa63c4956ac0a9:0xee57116ad1082722!2zTGUGVmlldXggUG9udCBEZSBPdWVkiERqZWRyYV_ZgtmG2LfYsdi pINmI2KfYryDYrNiv2LHYqSDYp9mE2YLyr9mK2YXYqQ!8m2!3d36.2931227!4d7.9898199!16s%2Fg%2F11sdd8dxm4!3m5!1s0x12fa63c4956ac0a9:0xee57116ad1082722!8m2!3d36.2931227!4d7.9898199!16s%2Fg%2F11sdd8dxm4?entry=ttu
- ❖ <https://coursgeologie.com/l-erosion-221/>