

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOAT

جامعة عمار تليجي _ الأغواط

FACULTE DE GÉNIE CIVIL ET ARCHITECTURAL

كلية الهندسة المدنية والهندسة المعمارية

DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

قسم الهندسة المدنية



Projet de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : science et technologie

Filière : Hydraulique

Option : Ressources hydrauliques

THEME

Contribution à la cartographie de l'érosivité des pluies dans un bassin du Nord algérien : Comparaison des différentes méthodes d'évaluation

Présenté par :

Rezzoug Khadija

Jury :

Mr Djehiche Abdelkader

Mr Guidoum Azzedine

Mme Kheira Yamani

Qualité :

Président

Encadreur

Examinatrice

Septembre-2022

Remerciements

Je tiens à remercier au terme de mon présent travail, tous ceux qui ont coopéré de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais remercier mon encadreur de mémoire Mr Azzedine Guidoum pour sa patience sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui a contribué à alimenter ma réflexion

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, les membre du jury intervenants, et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches

Je remercie ma chère maman, qui est toujours été là pour moi, je remercie mes sœurs khadija et Hanane pour leurs encouragements








Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide





Dédicace

Je dédie ce travail à :

-  *Mon père Que Dieu bénisse son âme*
 -  *Ma chère mère pour son sacrifice et son encouragement durant toute ma vie.*
 -  *Mes frères Hocine et Sofiane*
 -  *Toute ma grande famille*
 -  *Les étudiants de ma promotion*
 -  *Mes neveux et nièces*
- 

Sommaire

Introduction Générale.....	01
-----------------------------------	-----------

Chapitre I : Processus de l'érosivité des pluies : état de l'art

I-1 Mécanismes et genèse de l'érosion hydrique	04
I-2-1 Erosion par impact (splash).....	04
I-2-2 Erosion par ruissellement.....	05
a- Erosion en nappe (sheet érosion).....	06
b-Erosion linéaire (rill erosion)	07
I-3 Les principaux agents de l'érosion hydrique en Algérie.....	08
I-3-1 La lithologie et nature du sol.....	08
I-3-2 Le climat.....	09
I-3-3 Les précipitations.....	09
I-3-4 Le couvert vegetal.....	09
I-3-5 L'effet amplificateur des actions anthropiques.....	10
I-4 Approches de calcul de l'érosivité des plu.....	10
I-4-1 Indice de Wischmeier.....	11
I-4-2 formule de Rango-Arnoldus (1987).....	11
I-4-3 Indice d'érosivité de Hudson.....	12
I-4-4 Indice de Deffontaines (1968)	12
I-4-5 Indice de Fournier (1960)	12
I-4-6 Formule de Cormary, (1964).....	13
I-4-7 Formule de Roose (1981).....	13
I-5 Quelques exemples d'Etude de l'érosivité des pluies.....	15

Chapitre II : Présentation du bassin d'étude

II-1 Situation géographique.....	17
II-2 Morphométrie et hydrographie.....	17
II-3 lithologie et type de sols.....	20
II-4 Végétation et occupation des sols.....	21
II-5 Les facteurs climatiques.....	22
II-5-1 Les précipitations et leur variabilité.....	23
a- Les précipitations annuelles et leur évolution.....	23
b- Les précipitations mensuelles et les régimes saisonniers.....	29
II-5-2 Les températures et ses nuances.....	34
II-5-3 Régime climatique.....	35

Chapitre III : Evaluation est cartographie de l'érosivité

III-1 Estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier et Smith (1978).....	38
III-2 Formules adoptées pour l'évaluation de l'érosivité des pluies.....	39
III-2-1 Indice de Fournier (1960).....	39
III-2-2 Indice de Fournier-Arnoldus (1987).....	39
III-3 Formules utilisées pour l'estimation de l'indice d'érosivité de Wischmeier.....	40
III-3-1 Formule Arnoldus (1977).....	40

III-3-2 Formule Rango-Arnoldus (1987).....	40
III-3-3 Formule Renard-freimund (1994).....	41
III-4 Interprétation et comparaison.....	41
III-5 Cartographie de l'érosivité.....	48
III -5 -1 Données de base.....	48
III-5-2 Régression Indices d'érosivité-paramètres topo-géographiques.....	50
III -5-3 Le Krigeage comme méthode d'interpolation.....	51
III -5-4 Élaboration des cartes des iso-érodent.....	51
III -5-5 Interprétation des cartes des iso-érodent.....	53
Conclusion Général.....	56
Références bibliographiques.....	59

Liste de Figure

Figure n° 1 : Mécanisme de l'érosion hydrique.....	04
Figure n° 2 : Rejaillissement du sol et de l'eau par suite de l'impact d'une goutte d'eau, ou effet splash. Photos.....	05
Figure n° 3 : Effet de rejaillissement ou effet « splash ».....	05
Figure n°4 : Les trois théories qui expliquent la naissance du ruissellement cité.....	06
Figure n°5 : Érosion en nappe.....	07
Figure n° 6 : Erosion linéaire.....	08
Figure n°7 : Effet de la forêt.....	10
Figure n° 8 : Localisation du bassin du Chott Hodna.....	17
Figure n°9 : Réseau hydrographique du bassin de Chott El Hodna.....	20
Figure n°10 : La géologie du Hodna au 1/500.000 ^e	21
Figure n°11 : Les sols du Hodna	22
Figure n°12 : Position des 44 stations pluviométrique et MNT couvrant le bassin d'étude.....	23
Figure n°13 : Précipitations moyennes interannuelles pour les 44 postes pluviométriques.....	24
Figure n° 14 : Coefficient de variation interannuelle (1975 -2017).....	24
Figure n°15 : Relations pluie annuelle, latitude, longitude, altitude et distance à la mer.....	25
Figure n°16 : Évolution interannuelles des précipitations (1975-2017).....	27
Figure n°17 : Évolution interannuelles des précipitations (1975-2017).....	28
Figure n°18 : Les variations moyennes mensuelles des précipitations (1975-2017).....	32
Figure n°19 : Les variations moyennes mensuelles des précipitations (1975-2017).....	33
Figure n°20 : Répartition saisonnière des pluies dans les stations retenues dans l'étude.....	34
Figure n°21 : Variation des moyennes mensuelles minimales (<i>m</i>), maximales (<i>M</i>) et moyennes ($(M + m)/2$) pour la station de M'Sila (1988/2013)	35
Figure n°22 : Diagrammes Ombrothermiques à la station de M'Sila (1988/2013).....	36
Figure n°23 : Comparaison de différents indices d'érosivité des pluies.....	47
Figure n°24 : Position des 44 stations pluviométrique et MNT couvrant le bassin d'étude.....	49
Figure n°25 : distance à la mer.....	49
Figure n°26 : Étapes d'élaboration des esquisses cartographiques de l'indice d'érosivité de Wischmeier.....	51
Figure n°27 : Indice d'érosivité de Wischmeier selon Formule Arnoldus (1977) : (R_A).....	52
Figure n°28 : Indice d'érosivité de Wischmeier selon Formule Rango-Arnoldus (1987) : (R_{RA}).....	52
Figure n°29 : Indice d'érosivité de Wischmeier selon Renard-freimund (1994) : (R_{RF}).....	53

Liste de Tableaux

Tableau n° 1 : Formes de l'érosion linéaire.....	07
Tableau n°2 : Approches et Formules utilisées pour l'estimation du facteur R.....	14
Tableau n°3 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques des unités hydrologiques.....	19
Tableau n°4 : Précipitations moyennes interannuelles aux postes pluviométriques retenus (1975-2017).....	26
Tableau n°5 : Précipitations moyennes mensuelles (1975-2017).....	30
Tableau n°6 : Précipitations moyennes mensuelles (1975-2017).....	31
Tableau n°7 : Précipitation et températures moyennes mensuelles à la station de M'Sila (1988/2013)..	35
Tableau n°8 : Classification de l'érosivité (Fournier1960).....	39
Tableau n°9 : Classification de l'érosivité (Arnoldus1980).....	40
Tableau n°10 : (a) Estimation des différents indices d'érosivité des pluies.....	43
Tableau n°11 : (b) Estimation des différents indices d'érosivité des pluies.....	44
Tableau n°12 : (c) Estimation des différents indices d'érosivité des pluies.....	45
Tableau n°13 : (d) Estimation des différents indices d'érosivité des pluies.....	46
Tableau n°14 : Matrices de corrélation Indices d'érosivité-paramètres topo-géographiques.....	47
Tableau n°15 : Régression Indices d'érosivité-paramètres topo-géographiques.....	50

Résumé

La pluie est le principal facteur de l'érosion hydrique, et son érosivité dépend surtout de sa hauteur et son intensité ou de l'énergie cinétique qui en résulte directement. L'érosivité de la pluie est souvent quantifiée sur la base de l'indice R de l'équation de Wischmeier et Smith (1978). Dans le calcul de cet indice interviennent l'intensité maximale des précipitations ainsi que l'énergie cinétique de la pluie. Comme ces données ne sont généralement pas disponibles dans la plupart des stations météorologiques algériennes, une démarche simplifiée a été proposée pour estimer et cartographier ce paramètre. La démarche consiste à évaluer l'indice d'érosivité des pluies par différentes formules alternative et à faire une analyse comparative. Des esquisses de la répartition des différents indices d'érosivité dans le bassin ont été également proposées et comparées. Ceci afin de choisir l'indice le plus adapté aux conditions topo-géographiques et climatiques de notre bassin d'étude et de révéler ses variations spatiales. Pour cela, une série de précipitations mensuelle sur la période 1975/2017, de 44 stations pluviométriques, a été exploitée. L'application des trois formules alternatives pour l'estimation de l'indice de l'érosivité de Wischmeier a permis de caractériser le bassin d'étude entre 8 et 92 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

Mots Clés : érosivité des pluies, indice de Wischmeier, cartographie, bassin versant, Algérie.

Summary

Rain is the main factor of water erosion, and its erosivity depends mainly on its height and intensity or the kinetic energy that results directly from it. Rain erosivity is often quantified based on the R index of the Wischmeier and Smith (1978) equation. The calculation of this index involves the maximum intensity of precipitation as well as the kinetic energy of the rain. As these data are generally not available in most Algerian meteorological stations, a simplified approach has been proposed to estimate and map this parameter. The approach consists of evaluating the erosivity index of rainfall using different alternative formulas and carrying out a comparative analysis. Sketches of the distribution of the different erosivity indices in the basin were also proposed and compared. This is to choose the index most suited to the topo-geographical and climatic conditions of our study basin and to reveal its spatial variations. For this, a series of monthly precipitation over the period 1975/2017, from 44 rainfall stations, was used. The application of the three alternative formulas for estimating the Wischmeier erosivity index makes it possible to characterize the study basin between 8 and 92 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$)

Keywords: rainfall erosivity, Wischmeier index, cartography, watershed, Algeria.

ملخص

تعتبر الامطار عامل رئيسي للتعرية المائية، كما تتوقف هجوميتها او عدوانيتها بشكل اساسي على كميتها وشدتها، أو على الطاقة الحركية الناتجة عنها مباشرة. غالباً ما يتم تقدير هجومية الامطار على أساس مؤشر (R) لويشماير وسميث (1978). يدخل في حساب هذا المؤشر كل من الحد الأقصى لشدة هطول الأمطار وكذلك طاقتها الحركية. نظراً لأن هذه المعطيات غير متوفرة عموماً في معظم محطات الأرصاد الجوية الجزائرية، فقد تم اقتراح نهج مبسط لتقدير هذا العنصر المناخي وكذا رسم الخريطة الخاصة به. يتمثل هذا النهج في تقدير مؤشر هجومية الأمطار بالاعتماد على عدة معادلات بديلة، ثم إجراء تحليل مقارنة فيما بينها. كما تم كذلك اقتراح خرائط توزيع لمختلف المؤشرات وإجراء تحليل مقارنة. يهدف كل هذا إلى اختيار المؤشر الأكثر ملاءمة للعوامل الطبوغرافية والمناخية لحوض دراستنا، وكذلك التعرف عن اختلافاته المكانية. لهذا الغرض، تم استغلال سلسلة من المعطيات المتعلقة بالتساقطات المطرية الشهرية خلال الفترة (1975/2017)، والخاصة ب(44) محطة مطرية. ان تطبيق الصيغ الثلاثة البديلة لتقدير مؤشر ويشماير الخاص بهجومية الامطار اتاح لنا إمكانية توصيف حوض الدراسة بين 8 و 92 (ميغا جول.مم.هكتار⁻¹ ساعة⁻¹ عام⁻¹).

الكلمات المفتاحية: هجومية الأمطار، مؤشر ويشمييار، رسم الخرائط، حوض تجميعي، الجزائر

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction générale

L'érosion hydrique constitue une contrainte majeure en Algérie et dans les régions méditerranéennes, qui menace les potentialités en eau et en sol. Il est l'un des phénomènes de dégradation qui affecte de larges surfaces, en particulier dans les zones intertropicales et méditerranéennes (Barthès et Roose, 2001). Avec une érosion spécifique moyenne annuelle variant entre 2000 et 4000 t/km², l'Algérie se classe parmi les pays les plus érodables du monde (Demmak, 1982).

Ce phénomène érosif se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, le ruisselle 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, soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe d'eau (ruissellement par saturation), (Maamar Kouadri K., 2012).

La détermination et la zonalité des potentialités d'érosion fait appel à différentes méthodes, dont la plus connue est l'équation universelle de perte en sol « Universal Soil Loss Equation (USLE) » proposé par Wischmeier et Smith (1960,1978).

Cette équation regroupe toutes les variables sous six facteurs érosifs majeurs, elle s'exprime : $A = R K L S C P$ où A est la perte en terre exprimée en t/ha/an, R l'indice d'agressivité de la pluie, K l'indice d'érodabilité du sol, L l'indice de pente, S l'indice d'inclinaison de pente et C l'indice de végétation et de culture, incluant la régie des cultures et des sols et les pratiques culturales.

Le suivi du régime des pluies et la détermination de son potentiel et de ses effets érosifs sur le sol, constituent un élément de base dans toutes les stratégies de conservation des eaux et des sols, de développement agricole et d'aménagement hydraulique. Appelé aussi facteur d'érosivité des pluies, l'index R de Wischmeier caractérise l'agressivité des pluies et permet d'estimer à partir d'une averse, la quantité de terre pouvant être arrachée à un sol, dans des conditions standard (sol nu, pente 9%, longueur 75 pieds), (Touaibia et al., 2000).

Ce travail concerne l'évaluation de l'érosivité des pluies dans le bassin de l'Oued el Hodna dans le Nord Algérien.

L'évaluation de ce paramètre climatique par différentes formules permis de faire une analyse comparative, de choisir l'indice le plus adapté aux conditions

Introduction Générale

physico-géographiques de notre bassin d'étude et de révéler ses variations spatiales. Ceci afin d'orienter les phases ultérieures servira de base au diagnostic de l'aléa érosion. Des esquisses de la répartition des différents indices d'érosivité dans le bassin ont été proposées et comparées. Le modèle cartographique adopté est fondé sur la régression statistique multiple et sur le Système de l'Information géographique (SIG) en tant qu'outil d'analyse spatiale et d'aide à la décision (Furlan et al. 2011).

Notre étude s'articule autour des trois chapitres :

Le premier chapitre concernera une présentation de l'état de l'art et de connaissances en matière d'érosion hydrique et de l'érosivité des pluies. Celle-ci nous permettra de donner les définitions des différents phénomènes de l'agressivité climatique ainsi qu'appréhender le risque érosif et présenter les bases théoriques qui déterminent les indicateurs de l'érosivité des pluies.

Le second chapitre tente d'analyser le complexe physique du bassin d'étude, notamment, la Morphométrie, l'hydrographie, la lithologie, l'occupation du sol et la couverture végétale.

Le troisième chapitre de notre travail concerne l'étude comparative et la cartographie des différents indices d'érosivité. Un intérêt particulier portera sur l'étude de l'évolution spatiale de ces indices, en faisant recours aux de l'interpolation spatiale et de la cartographie automatique.

CHAPITRE I

Processus de l'érosivité des pluies : État de l'art

I-1 Mécanismes et genèse de l'érosion hydrique :

L'érosion hydrique est un processus complexe qui emporte et redistribue le sol. Il est causé généralement par l'action combinée de pluie et de ruissellement. C'est la désagrégation, le détachement, le transport et/ou le dépôt des particules du sol sous l'action combinée des précipitations et du ruissellement (Foster et Meyer 1972, Mounirou 2012). Ce phénomène résulte de l'ensemble des processus de déplacement du sol sous l'action de l'eau (le détachement, le transport et la sédimentation).

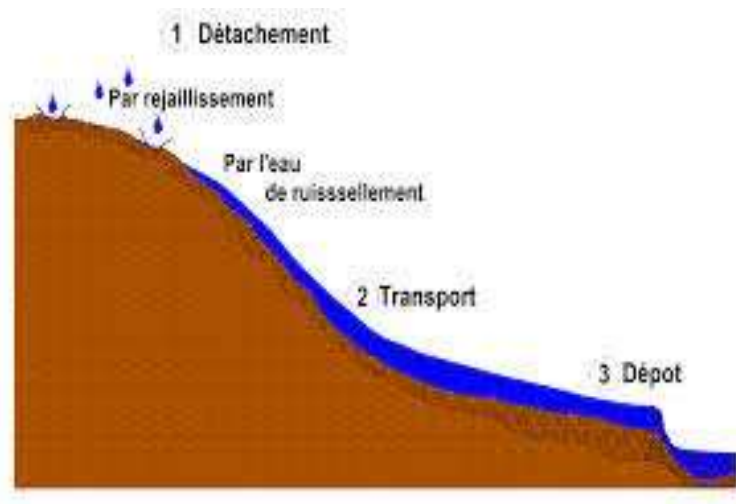


Figure n° 1 : Mécanisme de l'érosion hydrique (Remmas, 2014)

I-2-1 Erosion par impact (splash):

La pluie est l'agent causal primaire des phénomènes d'érosion par son énergie cinétique qui fait intervenir à la fois la hauteur et l'intensité des précipitations pendant un certain temps (Roose, 1973).

La mise en mouvement de fragments de terre par l'impact des gouttes de pluie (le splash consécutif à l'impact des gouttes) est un processus qui a lieu aussi bien sur une surface de sol libre que sous une lame d'eau peu épaisse (Green, et Houk, 1980). L'intensité de la mise en mouvement par le « splash » est fonction de la cohésion interne du matériau, de la vitesse de la chute des gouttes de pluie, de leur dimension, de l'intensité et de la durée de la pluie.



Figure n° 2 : Rejaillissement du sol et de l'eau par suite de l'impact d'une goutte d'eau, ou effet splash.

Photos : [Pierre-Olivier](#)

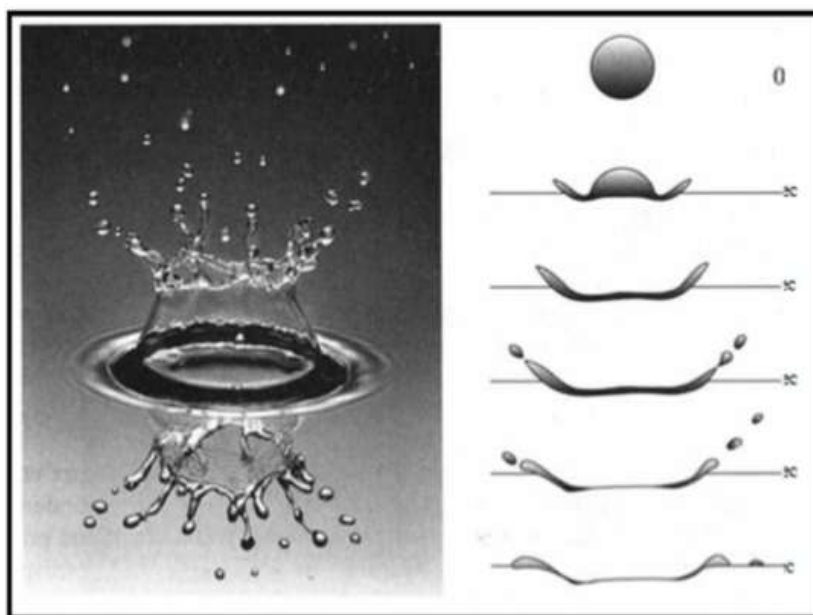


Figure n° 3 : Effet de rejaillissement ou effet « splash » [Souter et al. \(1978\)](#)

I-2-2 Érosion par ruissellement :

Le ruissellement est un moteur essentiel de l'érosion, il détache, transporte et exporte des fragments de sol ([Leguédois, 2003](#)). Les principales variables qui contrôlent l'action du ruissellement sur le détachement et le transport de particules sont la pente, la vitesse et

Chapitre I : Processus de l'érosivité des pluies : État de l'art

l'épaisseur de la lame écoulee. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes.

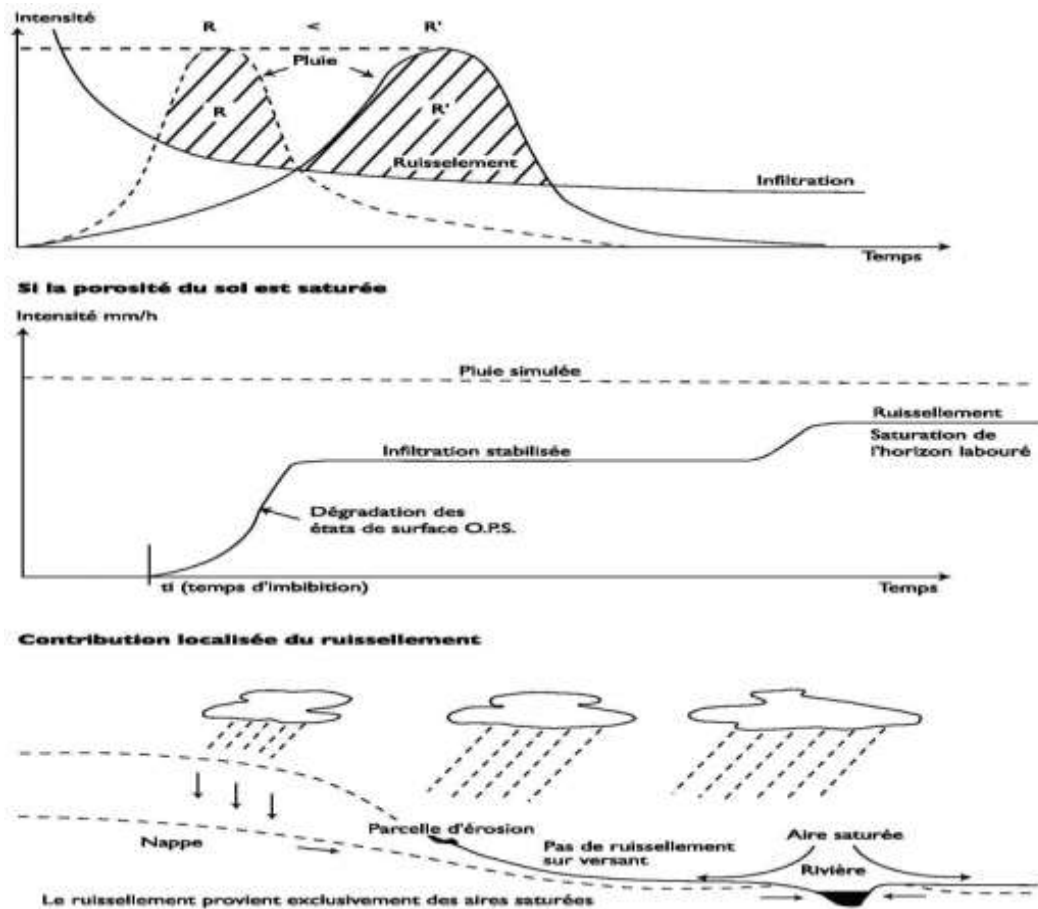


Figure n°4 : Les trois théories qui expliquent la naissance du ruissellement citée par Roose (1994).

a. Érosion en nappe (sheet érosion) :

L'érosion en nappe est le stade initial de la dégradation des sols par l'érosion hydrique. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies tandis que les cailloux, trop lourds pour être emportés, s'accumulent à la surface du sol (Roose, 1973). Ce phénomène est observé sur les pentes faibles, où l'eau ne peut pas se concentrer. Il déplace les particules du sol à courte distance par effet « splash » (Roose, 1994).



Figure n°5 : Érosion en nappe (Maktite et Faleh, 2020)

b. Érosion linéaire (rill érosion):

Une érosion linéaire se produit quand le ruissellement en nappe se concentre et acquiert une capacité érosive suffisante pour entraîner les fragments de sol, par augmentation de la vitesse d'eau, ce qui provoque des incisions linéaires dans le sol de plus en plus profondes (Foster, 1990 et Moore et Foster, 1990). Il est exprimé par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, Rills, rigoles, ravines, etc...)

Tableau n° 1 : Formes de l'érosion linéaire (Hadir, 2010)

Formes	Tracé	Longueur	Largeur	Profondeur
Griffe	Sinueux	<1 m	< 10 cm	5-6 cm
Rill	Rectiligne	Centaine de m	10-20 cm	5-10 cm
Rigole	Sinueux	Dizaine de m	5-70 cm	10-30 cm
Ravine	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1m	30-50 cm
Petit ravin	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1m	50-200 cm



Figure n° 6 : Erosion linéaire (Melalih, 2012)

I-3 Les principaux agents de l'érosion hydrique :

L'érosion hydrique des sols résulte de l'interaction entre les facteurs statiques reliés à la vulnérabilité des terrains et les facteurs dynamiques qui peuvent être soit naturels (climat et couverture végétale), soit relatifs aux activités humaines (Roose, 1994).

I-3-1 La lithologie et nature du sol :

La lithologie est considérée comme le facteur principal contrôlant la stabilité des versants. On trouve les déclivités les plus fortes, des couverts végétaux denses et des transports de sédiments faibles, là où les roches sont résistantes. Par ailleurs, sur les roches tendres, on découvre généralement, des pentes relativement modérées, des activités anthropiques intenses, une couverture végétale peu dense et des transports abondants de sédiments (Roose et Sabir, 2002).

Ainsi, l'érodibilité du sol qui désigne sa susceptibilité face aux processus d'érosion, est fonction des propriétés physico-chimiques du sol (texture, profondeur, porosité, teneur en matière organique...) et de la cohésion qui existe entre ces particules. Une faible cohésion va entraîner une forte érodibilité (Govers, 1987 ; Poesen et Govers, 1990). Alors que cette dernière diminue avec l'augmentation de la teneur en matière organique (Cazenaves et al, 1989).

Il existe trois propriétés essentielles permettant de l'érodibilité d'un sol :

- ✓ La teneur en limon et surtout en argile,
- ✓ La matière organique qui assure la cohésion du sol,

Chapitre I : Processus de l'érosivité des pluies : État de l'art

- ✓ Les caractéristiques minéralogiques et chimiques des sols qui ont un rapport avec la cohésion.

I-3-2 Le climat :

Les facteurs climatiques constituent la cause et la source d'énergie érosive. Parmi ces facteurs climatiques les brusques variations de température (forte amplitude thermique entre les températures diurnes et nocturnes), l'opposition entre saisons humide et sèche, l'évaporation de l'eau contenue dans la roche, l'action du gel et du dégel entraînant une désagrégation mécanique des roches et le régime de vents (White, 1986).

I-3-3 Les précipitations :

Les précipitations constituent le facteur prépondérant du phénomène d'érosion du sol. L'érosion le plus important est généralement due aux averses de très forte intensité et de faible étendue, aux pluies continues de longue durée de moindre intensité et d'extension régionale, et aux périodes de réchauffement brusque accompagnées de précipitations entraînant la fonte rapide de la neige et le dégel du sol (Starkel, 1976 in Guidoum 2017).

I-3-4 Le couvert végétal :

Le couvert végétal agit dans le sens de retarder l'érosion du sol (Mansouri, 1991). Ce rôle peut être direct, la végétation protège le sol de l'impact des gouttes de pluie, elle tente à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement (Bochet et al 1998, Richard et Mathys 1999, Descroix et Gautier 2002). Il peut également être indirect, le couvert végétal assurant une amélioration du bilan hydrique et des propriétés physiques du sol (Dunne et al 1991, Bergkamp et al 1996, Cerdá, 1998).

L'efficacité du couvert végétal contre l'érosion hydrique dépend aussi du stade de développement de la végétation (Rovéra et al., 1999). Ainsi, tant que le couvert végétal est continu, les phénomènes érosifs sont modestes malgré l'agressivité des pluies, la fragilité des sols et la déclivité du relief.

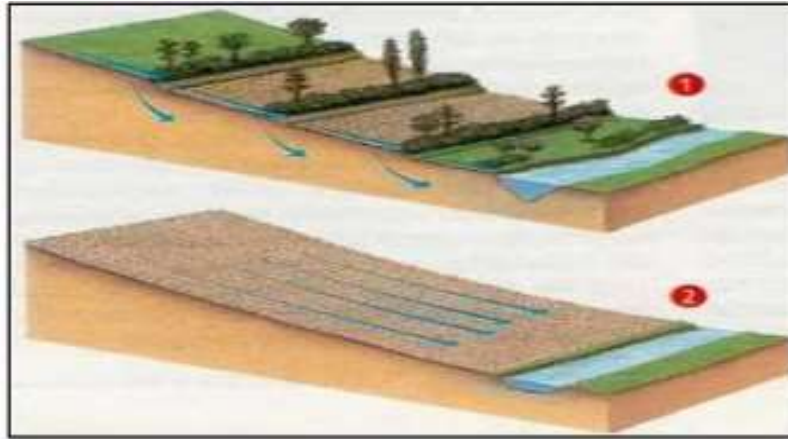


Figure n°7 : Effet de la forêt (Dernancourt, 1995)

I-3-5 L'effet amplificateur des actions anthropiques :

L'érosion hydrique des sols peut être amplifiée par des actions anthropiques. Certaines activités humaines provoquent l'accélération de rythme naturel de ce phénomène érosif par la modification de l'usage des sols pratiques, l'intensification de l'agriculture, le défrichage des forêts, la dégradation de la végétation par le feu, l'exploitation minière, le pâturage extensif et l'augmentation des surfaces imperméables (routes, urbanisation)

(CNEA 2007, Lefrançois 2007, Roose et al. 2012).

I-4 Approches de calcul de l'érosivité des pluies :

L'érosivité de la pluie est souvent quantifiée sur la base du facteur R de l'équation de Wischmeier et Smith (1978).

$$R = Eg. I_{30}(mm) = \sum_i^n (Eu. h) . I_{30}mm$$

Dans le calcul de R, interviennent l'intensité maximale des précipitations pendant 30 minutes (I_{30}) ainsi que l'énergie cinétique de la pluie, pour toutes les averses dépassant un certain seuil pluviométrique (E_{30}).

Comme ces données ne sont généralement pas disponibles dans les stations météorologiques classiques notamment en Algérie, des méthodes simplifiées ont été proposées pour estimer ce paramètre

Chapitre I : Processus de l'érosivité des pluies : État de l'art

I-4-1 Indice de Wischmeier :

L'index R caractérise l'agressivité des pluies et permet d'estimer à partir d'une averse, la quantité de terre pouvant être arrachée à un sol, dans des conditions standard (sol nu, pente 9%, longueur 75 pieds. Il s'obtient en sommant, pour une période donnée, les valeurs R_i caractérisant un épisode pluvieux (Wischmeier, 1978).

Le calcul de l'indice d'érosivité de Wischmeier (R) nécessite la connaissance du produit de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité maximum en 30 minutes.

$$R = Eg \cdot I_{30}(mm) = \sum_i^n (Eu \cdot h) \cdot I_{30}mm$$

Où

Eg : Energie globale Eg en m. Tonne/ha qui peut représenter la somme des énergies unitaires Eu .

I_{30} (mm) : Intensité maximale observée en 30 mm en cm/h.

h : lame d'eau précipitée pendant la durée de l'intensité homogène I_h

Eu : Energie unitaire donnée par Wischmeier :

$$Eu = 210 + 89 \log Ih$$

L'index R est exprimé en m.t.m/ha.h.

I-4-2 formule de Rango-Arnoldus (1987) :

C'est la forme modifiée de l'équation d'Arnoldus 1980, basée sur les précipitations mensuelles et annuelles et adaptée à l'Afrique du Nord (El-Bouqdaoui et al, 2006).

$$\log R = 1,74 \cdot \log \sum (pi^2/p) + 1,29$$

Où :

Pi : précipitations mensuelles

P : précipitations annuelles en mm

I-4-3 Indice d'érosivité de Hudson (1971) :

Chapitre I : Processus de l'érosivité des pluies : État de l'art

Hudson (1971), d'après ses travaux réalisés au Zimbabwe, a proposé un index d'érosivité

($Ke > 1$ inch/h) qui représente l'énergie cinétique de la pluie tombant à des intensités supérieures à 1 inch (1 inch/h = 25mm/h). Ke est exprimé en (j/m) ou (T.m/ha). Hudson a trouvé un coefficient de corrélation de 0,94 entre ($Ke > 25$ mm/h) et la quantité du sol érodée. Le calcul de l'indice d'érosivité de Hudson (1971) est semblable à l'index « R » de Wischmeier pour ($I > 25$ mm/h). Cet indice est simplement déterminé par la somme des énergies cinétiques des tranches de pluie, calculées sur la base de l'expression (Roberto et al, 2013) :

$$Ke = 0.119 + 0.0873 \log I$$

Ke : énergie cinétique, MJ.ha-1.mm-1 ;

I = intensité des précipitations, mm.h-1.

I-4-4 Indice de Deffontaines et De Montard (1968) :

L'indice de Deffontaines et De Montard (1968) permet de classer les mois de l'année selon les risques d'érosion :

$$Id = N. C$$

Où

N : la somme des jours de pluie torrentielles (≥ 20 mm / 24 h)

C : Le pourcentage (%) de pluies mensuelles tombées sous forme torrentielle

En Algérie, selon Arabi et Roose (1989) et de Kouri (1993), les pluies torrentielles provoquant des ruissellements et des transports solides sont les pluies journalières supérieures à ou égale 20 mm par 24 heures.

I-4-5 Indice de Fournier (1960) :

L'indice d'érosivité proposé par Fournier (1960) permet uniquement de caractériser de manière relative le caractère érosif de régimes climatiques dans leur ensemble. Cet indice s'exprime par le rapport du carré de la pluviométrie moyenne (Pi) du mois le plus arrosé, à la pluviométrie annuelle moyenne (P) :

$$F = \frac{Pi^2}{P}$$

F : L'indice de Fournier ;

Pi : Pluie moyenne du mois le plus pluvieux (mm) ;

Chapitre I : Processus de l'érosivité des pluies : État de l'art

P : Précipitation moyenne annuelle.

Cet indice est simple il met en corrélation la dégradation spécifique avec un paramètre

Travaillant au Maroc, (Arnoldus, 1977) a trouvé que l'indice de Fournier $F = \frac{Pi^2}{P}$

(1960) n'est pas suffisamment corrélé ($r^2 = 0,55$) avec les valeurs de R dans 178 stations (164 stations d'Amérique et 14 de l'Afrique de l'Ouest) alors il a modifié l'indice de

$$\text{Fournier à : } FA = \frac{\sum_1^{12} Pi^2}{P}$$

FA : L'indice de Fournier-Arnoldus ou indice de Fournier modifié ;

Pi: Pluie moyenne de chaque mois (mm) ;

P : Précipitation moyenne annuelle.

I-4-6 Formule de Cormary, (1964) :

Ce facteur est obtenu à partir du dépouillement des données de la pluviométrie Portant sur plusieurs années (Cormary et al, 64) :

$$R = k . A . B . C$$

Où :

R : Agressivité des pluies ; **k** : coefficient régional (en méditerranée, $k = 35.10^{-5}$ selon Masson, (1971).

A : Pluviométrie moyenne interannuelle ;

B : Pluie maximale d'une heure et de période de retour 2 ans ;

C : L'intensité maximale de 24 heures et de période de retour 2 ans.

Avec le nombre important de paramètres qu'elle exige, les résultats de cette formule sont plus fiables que d'autres formules, toutefois, il faudra un suivi spécifique de la variation des précipitations afin de pouvoir calculer les paramètres B et C.

I-4-7 Formule de Roose (1975 à 1981) :

Une Compilation et analyse de 20 à 50 années de mesures, ont abouti à la proposition de relations empiriques simples, liant l'indice d'érosivité selon Roose (R_{am}), à la hauteur de pluie

Chapitre I : Processus de l'érosivité des pluies : État de l'art

annuelle moyenne (H_{am}) mesurée sur la même période (5 à 10 ans sont nécessaires au minimum). La formule de Roose ne prend en considération que la hauteur de pluie annuelle moyenne.

Les relations suivantes sont adoptées :

$$R_{am} = 0,50H_{am} \pm 0,05$$

En fonction des régions étudiées, on distingue :

$$R_{am} = 0,35H_{am} \pm 0,05 \text{ (En région montagneuse)}$$

$$R_{am} = 0,60H_{am} \pm 0,05 \text{ (Sur la frange côtière)}$$

$$R_{am} = 0,50H_{am} \pm 0,05 \text{ (Pour les autres zones)}$$

Tableau n°2 : Approches et Formules utilisées pour l'estimation du facteur R (Bouderbala D., 2019)

Méthode	Auteur (s)	Variables
$R = EI$ USLE : $E = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I$ $R = 0.30 \times F^{1.93}$	Wischmeier and Smith (1978)	e : Energie cinétique I : Intensité
	Arnoldus, Exponential (1977)	F : Indice de Fournier Pi : précipitation du mois i (mm) P : précipitation annuelle de l'année j (mm)
$R = 1.3735 \times 10 \times \left(1.5 \times \log \sum \frac{P_i}{P} \right) - 0.8188$ $R = 4.17 \times F - 152$	Arnoldus 1980 (pour le Maroc)	R: Coefficient d'érosivité moyenne de pluie (ft.tons.in/acre.hr) Pi : Précipitation mensuelle moyenne P : Précipitation annuelle moyenne F : indice de fournier
Indice de concentration de précipitation $PCI = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} P_i)^2}$ $R = 0.13 \times (M_x^{1.24})$	Oliver (1980)	Pi : Précipitations mensuelles (mm) Pt : Précipitations annuelles (mm)
	Leprun (1981)	Mx : Précipitations mensuelles (mm)
$R = 12.592 \times \left(\frac{M_x^2}{P} \right)^{0.6030}$	Val et al. (1986)	Mx : Précipitations mensuelles (mm) P: Précipitations annuelles (mm)
$R = 3.76 \times \left(\frac{M_x^2}{P} \right) + 42.77$	Oliveira Jr. and Medina (1990)	Mx= précipitation mensuelle (mm) P= précipitation annuelle (mm)
MMFI, Morais Modification of Fournier Index $R = b_0 \left(\frac{P_m}{P} \right)^{b_1}$	Morais et al. (1991)	Pm : Précipitations mensuelles (mm), P : Précipitations annuelles (mm), b 0, b1 coefficients empiriques estimés respectivement 36.849 et 1.0852.
$R = 36.849 \times \left(\frac{M_x^2}{P} \right)^{1.0852}$ $R = P \times 0.5$	Morais et al. (1991)	Mx : Précipitation mensuelles (mm), P : Précipitations annuelles (mm)
	Roose in Morgan and Davidson (1991)	P : précipitations annuelles (mm)
$R = 117.6 \times (1.00105^{MAR})$	Kassam et al. (1992)	MAR : meanannualrainfall (mm)
$R = 0.0483p^{1.610}$ si P < 850 mm	Renard and Freimund (1994)	P: Précipitation annuelle (mm)
$R = 3.82F^{1.41}$	Yu&Rosewell (1996)	F : Indice de Fournier
$R = 42.307 * \left(\frac{M_x^2}{p} \right) + 69.763$	Silva (2001)	Mx : précipitations mensuelles (mm) P : précipitation annuelles (mm) Pm (mm/mois).

Chapitre I : Processus de l'érosivité des pluies : État de l'art

I-5 Exemples d'Étude de l'érosivité des pluies :

[Toumi, \(2013\)](#) a utilisé la méthode de Rango-Arnoldus (1987) pour estimer (R) au niveau du bassin versant de l'oued mina. Cette étude a montré que les valeurs de (R), les plus élevées sont localisées dans la partie Sud-est du bassin avec environ 60 MJ.mm/ha.h.an, tandis que les valeurs faibles se localisent dans la partie Sud-Ouest.

[Mostephaoui et al, \(2013\)](#) ont trouvé une valeur de $R = 7 \text{ t/h/an}$ calculé selon la formule de [Roose \(1977\)](#) permettant de connaître la valeur annuelle de R lorsqu'on ne dispose que des données de précipitations.

[Maaliou et al, \(2014\)](#) a fait une synthèse cartographique de l'indice d'érosivité de pluie et son impact sur le transport solide de deux grands bassins versants du nord algérien (Côtier algérois et Isser. Ils ont utilisé les formules proposées par Arnoldus, (1980) [Rango-Arnoldus \(1987\)](#) et [Renard et Freimund \(1994\)](#)

Pour estimer ce facteur [Bouderbala, \(2019\)](#), a appliqué trois méthodes différentes sur 42 stations pluviométriques réparties sur l'ensemble du bassin versant d'Oued El Hammam, dans le Nord-Ouest algérien et sur une période de 41 années (1970-2011), à savoir : la formule d'[Arnoldus, \(1980\)](#), [Rango & Arnoldus \(1987\)](#) et celle de Fournier modifié par [Arnoldus, \(1980\)](#). La comparaison entre les 3 méthodes, a montré une même tendance, où l'érosivité augmente avec l'augmentation de la pluviométrie, tout de même, les valeurs obtenues par les 3 méthodes restent relativement différentes avec des écarts importants.

[Maamar Kouadri, \(2019\)](#) a sélectionné l'indice de Fournier modifié ([Arnoldus, 1980](#)) pour estimer le facteur R . Le choix de cette équation parmi d'autres revient selon l'auteur à son adaptation aux variations de terrain à l'échelle mondiale, contrairement aux autres méthodes qui sont généralement des équations déterministes locales.

Conclusion :

En somme, cette étude bibliographique nous a permis à mieux connaître le phénomène de l'érosivité des pluies, de bien comprendre la problématique qui en découle, et de maîtriser le sujet qu'on aborde, afin d'arriver aux objectifs tracés.

Chapitre II :

Présentation du bassin d'étude

Introduction :

Cette section est consacrée à une description générale du bassin versant du Hodna afin de déterminer les caractéristiques physico-graphiques, bases indispensables à la compréhension des mécanismes mécanisme pluviométrique du bassin.

II-1 Situation géographique :

D'une superficie de 25 840 km², Le bassin versant endoréique du Hodna est le 5^{ème} grand ensemble hydrographique Algérien. C'est une cuvette qui fait partie des hautes plaines steppiques algériennes. Il est situé au centre de l'Algérie, entre 34° 23' 17'' et 36° 09' 44" de latitude nord, et 03° 11' 01" et 06° 08' 07 de longitude est. Le bassin est limité au nord par les montages de Bibans et le plateau Sétifien, à l'Ouest par les hautes plaines algéroises, à l'Est par les monts de Belazma, tandis qu'au sud, il est limité par les monts des Ouled Naïl et du Zab formant l'Atlas Saharien.

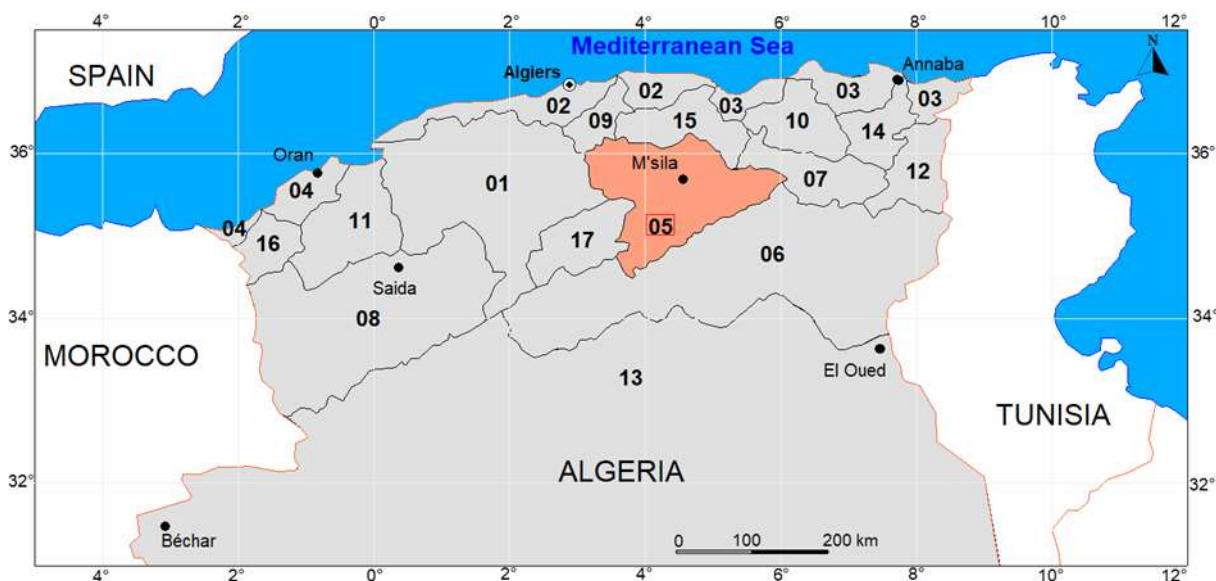


Figure n° 8 : Localisation du bassin du Chott Hodna

II-2 : Morphométrie et hydrographie :

Le relief est le résultat d'une conjugaison de plusieurs facteurs et particulièrement par l'évolution géologique et par l'action de l'érosion à une grande échelle.

Le bassin du Chott el Hodna est constitué de plusieurs ensembles géomorphologiques, qui vont respectivement du Nord vers le Sud : les montagnes, le glacis, les plaines et le chott el Hodna (Bencherit, 2017).

Le bassin est bordé au Nord par la barrière montagneuse de l'Atlas tellien (Titeri 1780 m, Bibans et Hodna 1840 m), et par l'Atlas saharien (prolongement des monts d'Ouled Naïl 1675 m, les monts du Zab 980 m, Djebel Metlili 1480 m et les monts de Belazma 2178 m) au sud et à l'est.

Au pied de ce cadre montagneux, notamment au Nord et à l'Est du bassin, s'étale une série de glacis, dont l'altitude est de 500 à 700 m et de collines sillonnées de ravins portant le nom de "Chebka" (Kebiche, 1994).

L'isoligne d'altitude 500 m marque assez nettement la transition entre le domaine de piémonts et la plaine (l'unité la plus vaste). Le Chott El-Hodna proprement dit, dont le fond atteint une altitude de 391 m, occupe la partie basse du centre du bassin et sert de niveau de base à ses oueds provenant des deux atlas. Il a une forme elliptique et couvre une superficie de 1150 Km² (Ladgham-Chicouche et Zerguine, 2001).

Les principales caractéristiques géométriques et morphométriques des sous bassins constituant le Hodna sont résumées au tableau n°3

Le réseau hydrographique du Hodna est très dense et diversifié. La majorité des cours d'eau n'ont pas de débits pérennes, à l'exception des oueds Elham, Lougmane, K'sob et Soubella alimentés par des sources et retenues (ceds). A cela s'ajoute une multitude de petits cours d'eau (châaba) à sec pratiquement toute l'année et qui coulent lors des chutes des pluies.

Les divers Oueds se déversent dans la dépression du Chott El Hodna, on distingue : Oued Elham, Oued k'sob, Oued barika, Oued bitam, Oued lougman, Oued Boussaâda Oued Chair et Oued EL Melh (Bencherit, 2017). Au total, il y a au moins 22 cours d'eau permanents et temporaires qui assurent l'alimentation du Chott auxquels il faut ajouter des sources d'eaux douces qui coulent en permanences vers le Chott. La densité de drainage varie entre 1,04 km/km² sur l'oued Barika Aval et 0,43 km/km² sur le sous bassin de l'oued El Karsa (tableau 3).

Selon l'ANRH, le Hodna est divisé en (22) sous bassins (tableau 3) et dispose de (7) stations hydrométriques qui ne sont actuellement pas toutes exploitables.

Tableau n°3 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques des unités hydrologiques

N_sbv	Oued	S (km ²)	P(km)	Lch	Kc	L (lm)	L(km)	Dd	Hmin	Hmax	Hmoy
0501	O. Ham	805,8	176,3	621,46	1,74	77,79	10,36	0,77	550	1800	1175
0502	O. Sbisseb	1851,98	226,62	906,11	1,47	93,5	19,81	0,49	550	1450	1000
0503	O. Guernini	1071,31	171,2	556,19	1,46	70,38	15,22	0,52	550	1150	850
0504	O. Djenane	860,47	183,71	653,97	1,75	81,27	10,59	0,76	500	1700	1100
0505	O. Targa	1026,94	170,81	885,72	1,49	70,93	14,48	0,86	450	1800	1125
0506	O. El Karsa	553,12	152,4	235,98	1,81	68,07	8,13	0,43	450	1100	775
0507	O. Leham	647,99	174,72	443,07	1,92	79,18	8,18	0,68	400	1250	825
0508	O. Lougmane	333,75	107,61	289,88	1,65	46,65	7,15	0,87	575	1850	1212,5
0509	O. K'sob	1471,2	205,63	1005,36	1,5	85,64	17,18	0,68	600	1850	1225
0510	O. M'Sila	2157,52	250,13	1694,23	1,51	104,4	20,67	0,79	400	1850	1125
0511	O. Soubella	1768,97	219,83	1659,68	1,46	90,33	19,58	0,94	0	1850	925
0512	O. Barika Amont	889,77	180,05	665,02	1,69	78,72	11,3	0,75	750	2100	1425
0513	O. Barika Aval	1007,05	161,12	1044,75	1,42	65,09	15,47	1,04	500	2100	1300
0514	O. Berrich	504,4	173,35	450,71	2,16	80,4	6,27	0,89	475	2100	1287,5
0515	O. Bitam-Barika	1403,02	244,37	1010,09	1,83	109,36	12,83	0,72	400	950	675
0516	O. Maiter Amont	672,74	139,3	386,44	1,5	58,06	11,59	0,57	600	1400	1000
0517	O. Bou Saâda	1035,15	194,21	643,61	1,69	84,91	12,19	0,62	600	1600	1100
0518	O. Maiter Aval	1232,86	202,3	787,52	1,61	86,98	14,17	0,64	400	1650	1025
0519	O. Aïn Rich	1130,88	163	671,28	1,36	63,76	17,74	0,59	1000	1450	1225
0520	O. Chair Amont	1597,78	208,27	956,81	1,46	85,43	18,7	0,6	800	1650	1225
0521	O. Chair Aval	877,75	163,73	539,18	1,55	69,18	12,69	0,61	600	1550	1075
0522	O. M'Sif Amont	924,2	183,5	633,29	1,69	80,23	11,52	0,69	450	1450	950
0523	O. M'Sif Aval	792,66	209,42	426,8	2,08	96,5	8,21	0,54	400	1400	900
0524	Chott Hodna	1216,81	339,48	626,18	2,72	162,24	7,50	0,51	400	400	400

N_BV : numéro du bassin versant ; N_SBV : numéro du sous bassin ; S : superficie du bassin en km² ; P : périmètre en km ; L_chév : longueur du chevelu hydrographique en km ; K : indice de compacité de Gravelius ; Lre : longueur du rectangle équivalent en km ; l_re : largeur du rectangle équivalent en km ; Dd : densité de drainage en km/km² ; Hmin : altitude minimale en m ; Hmax : altitude maximale ; Hmoy : altitude moyenne en m. Source : ANRH

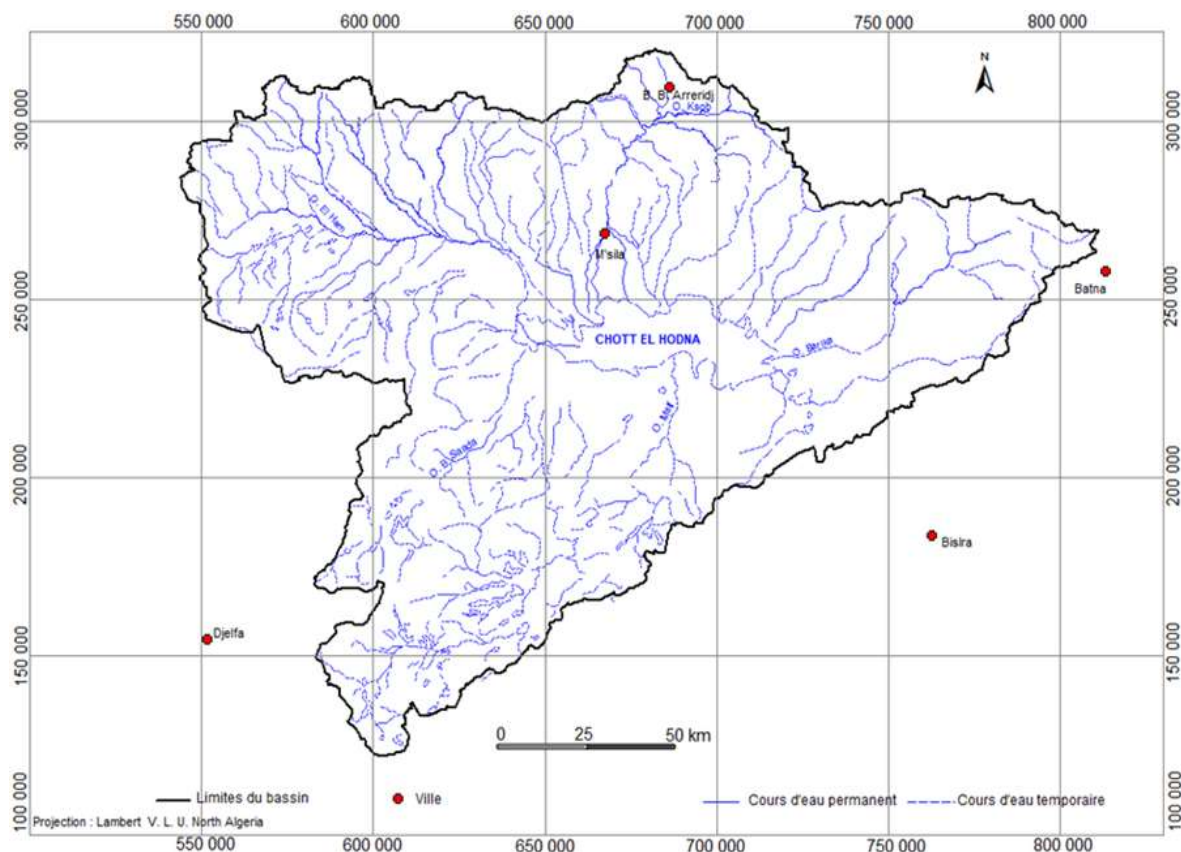


Figure n°9 : Réseau hydrographique du bassin de Chott El Hodna

II-3 lithologie et type de sols :

La géologie du bassin du Chott El Hodna est assez complexe du fait de sa position au contact de l'Atlas Tellien et de l'Atlas Saharien. Elle se caractérise par (Le Houerou et Claudin 1972 in : Hammou, 2014) :

- Les formations du Quaternaire représentées par d'anciennes alluvions et des sédiments fins.
- Les formations du Tertiaire comprenant celles de l'Éocène, de l'Oligocène continental et du Miocène sont essentiellement argilo-gréseuses forment le substratum des formations quaternaires.

Le cadre montagneux est constitué principalement par des formations crétacées comprenant une sédimentation calcaro-marneuse.

Les terrains du Secondaire formant les monts du Hodna sont surtout Crétacés (marnes, grès avec intercalation de calcaires). Ils comportent aussi, ceux du le Trias (marnes gypseuses et sels), et du jurassique (calcaires). Dans ce secteur, les formations mio-plio-quaternaires ne sont bien développées qu'en bordures de cette chaîne.

Le chott El Hodna est un paysage transito-accumulatif de dépôts argileux récents qui bordent la sebkha, il renferme des dépôts alluvionnaires du Quaternaire.

Le Trias riche en sels qui compose les roches de montagnes entourant le bassin est à l'origine des sels du Chott dissous par les eaux des précipitations (Ghefafia, 2019).

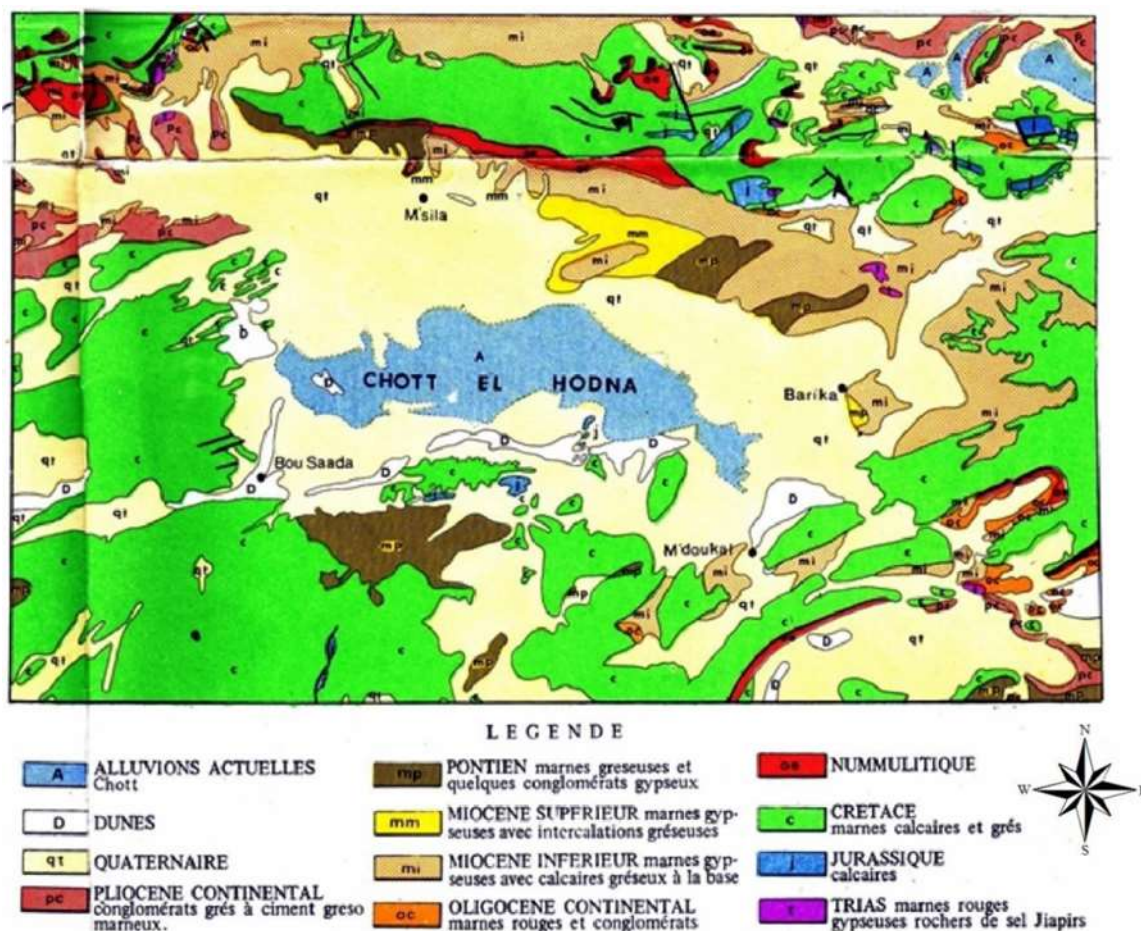


Figure n°10 : La géologie du Hodna au 1/500.000^e (Le Houerou et Claudin 1972 in : Hammou, 2014)

La plaine du Chott el Hodna, sur ces parties septentrionale et méridionale, se caractérise par des sols argilo-limoneux et des sols de nature sableuse respectivement. Le centre représenté par la Sebkha est caractérisé par la présence d'une couche minérale sous forme d'une pellicule blanche de sel. Les sols peu évolués (dépôts alluviaux) occupent les piedmonts méridionaux des monts du Hodna et ceux de djebel Bellzma et djebel Metlili. Ils sont caractérisés par des matériaux calcaro-gypseux ou uniquement gypseux où se développent des sols à texture limoneux sableux (Boyadgiev 1975, Bencherit2017).

II-4 Végétation et occupation des sols :

La végétation joue un rôle essentiel dans la protection du sol, elle exerce une protection mécanique directe sur l'écoulement fluviale, en diminuant la force vive des eaux et en

favorisant leur infiltration ; Cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense.

La répartition du couvert végétal d'un bassin versant dépend de ces caractéristiques physico-géographiques, de ces caractéristiques climatiques qui en déroulent et de l'influence de l'action anthropique. Le bassin du Hodna, est biogéographiquement un représentant assez particulier du milieu steppique (Bencherit, 2017), on distingue :

- Des superficies forestières dominantes à base de Pin d'Alep et Genévrier de Phénicie (Djebels Messaad, Medjedel, Slim, Maadhid, Hammam El Dalaa et Bou Saada).
- Des superficies agricoles dans la plaine de M'sila qui propice aux cultures maraîchères, aux céréales et les arbres fruitiers (Bourenane et Mechri, 2008 in : Makhzoum Y. et Mahdid B., 2019)

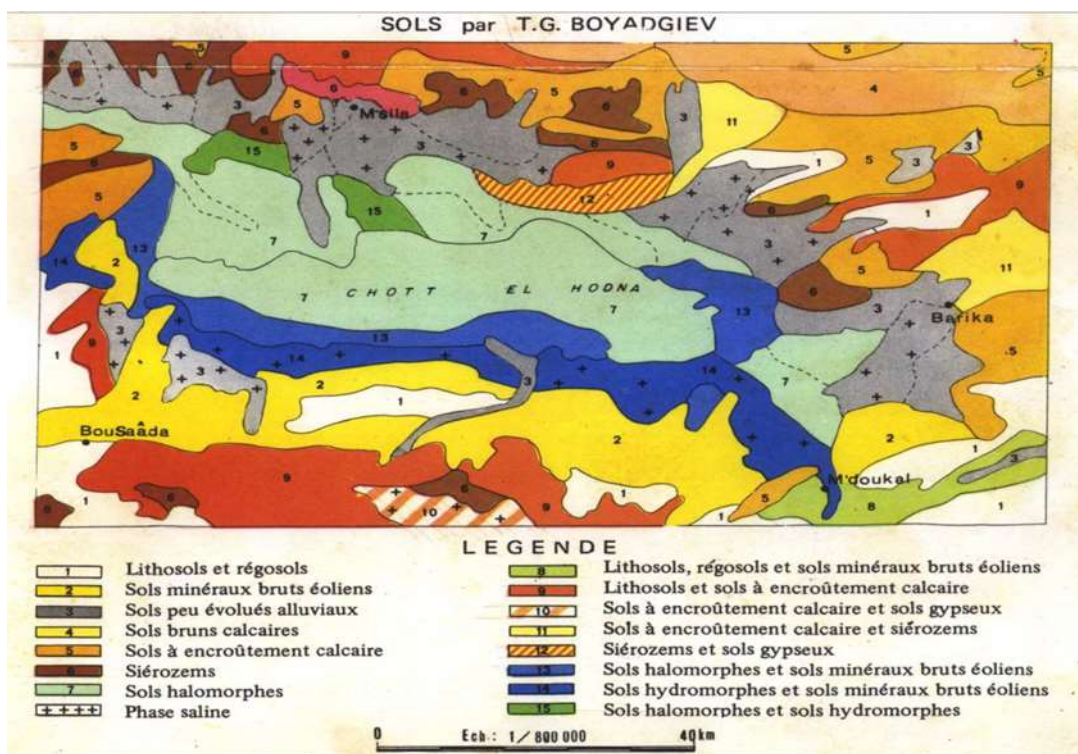


Figure n°11 : Les sols du Hodna. (Boyadgiev 1975).

II-5 Les facteurs climatiques :

Les facteurs climatiques jouent un rôle déterminant dans le régime des cours d'eau, surtout les précipitations qui constituent le facteur essentiel intervenant par leur répartition annuelle et mensuelle, leurs totaux journaliers, et surtout les averses génératrices des crues (Guidoum, 2004).

II-5-1 Les précipitations et leur variabilité :

Le bassin du Chott Hodna dispose de vingt-huit (28) postes pluviométriques, soit un (1) poste pour 923 km² ; Ces stations sont réparties de manière inégale dans le bassin d'étude (figure 13). La densité des stations est particulièrement faible dans les secteurs nord-ouest et sud-est. Pour les besoins de l'étude, nous avons également utilisé seize (16) autres stations pluviométriques situées aux alentours du bassin.

Les données utilisées proviennent de la base de données de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH). Le tableau 3 et la figure 13 Indiquent la position des 44 postes pluviométriques ANRH, leur altitude et leur éloignement de la mer.

Après homogénéisation et comblement de lacunes, accomplies grâce au programme HYDROLAB 98.2 (Laborde et Mouhous, 1998), les séries de données retenues finalement, sont celles des précipitations moyennes mensuelles et annuelles pour une période de 42 ans, allant de septembre 1975 à août 2017.

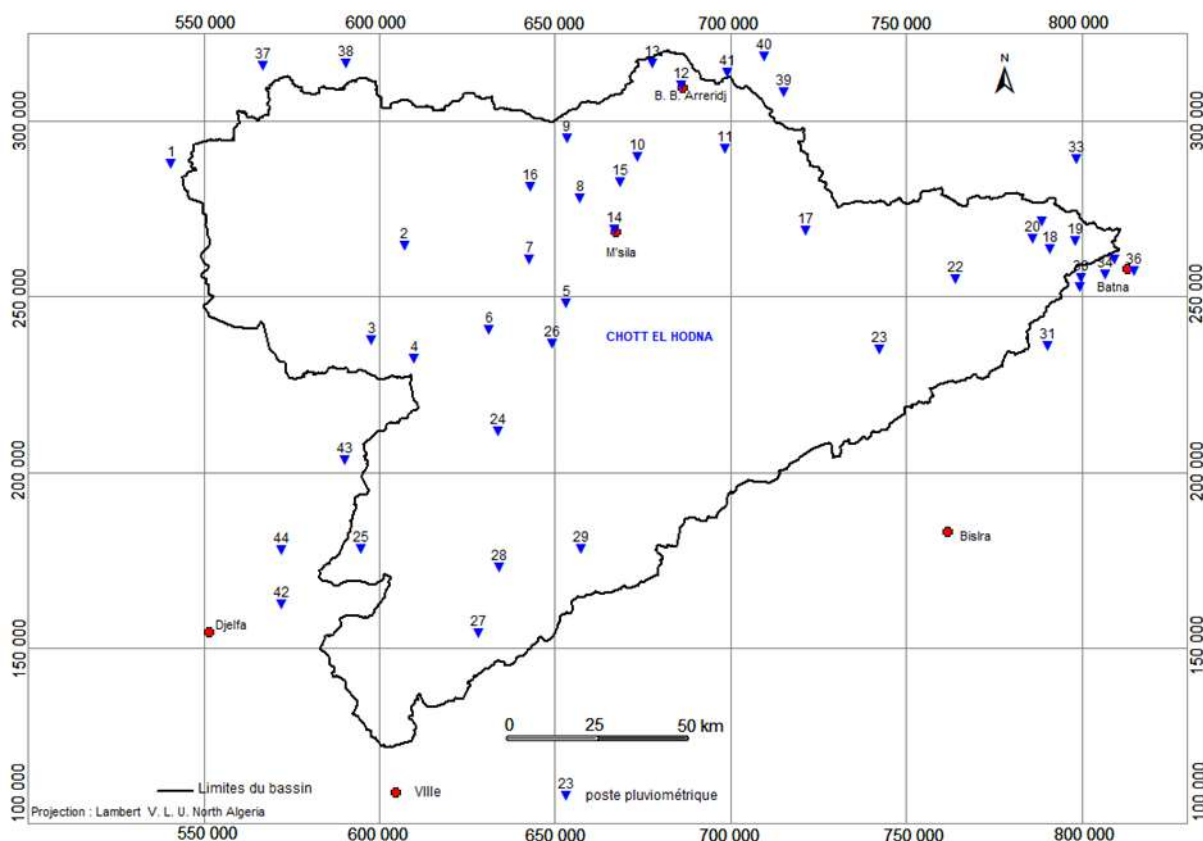


Figure n°12 : Position des 44 stations pluviométrique

a- Les précipitations annuelles et leur évolution :

La figure (14) montre que la pluviométrie peut atteindre les 400 mm (station Medjana : 050906) en zones montagneuse septentrionale du bassin. Elle peut atteindre les 470 mm à

Seguene (070309) située à l'extérieur du bassin. Au centre et au sud, on assiste à une faiblesse remarquable des précipitations : 96 mm à Bel Aroug (05030), 161 mm à Ain El Hadjel (0503020) et 173 mm à Ain Khermane).

Nous pouvons, en effet, penser que la pluie de la zone d'étude s'explique en fonction des paramètres topo-géographiques du bassin, particulièrement l'altitude (Z), la distance à la mer (DM), et des coordonnées Lambert (X) et (Y)

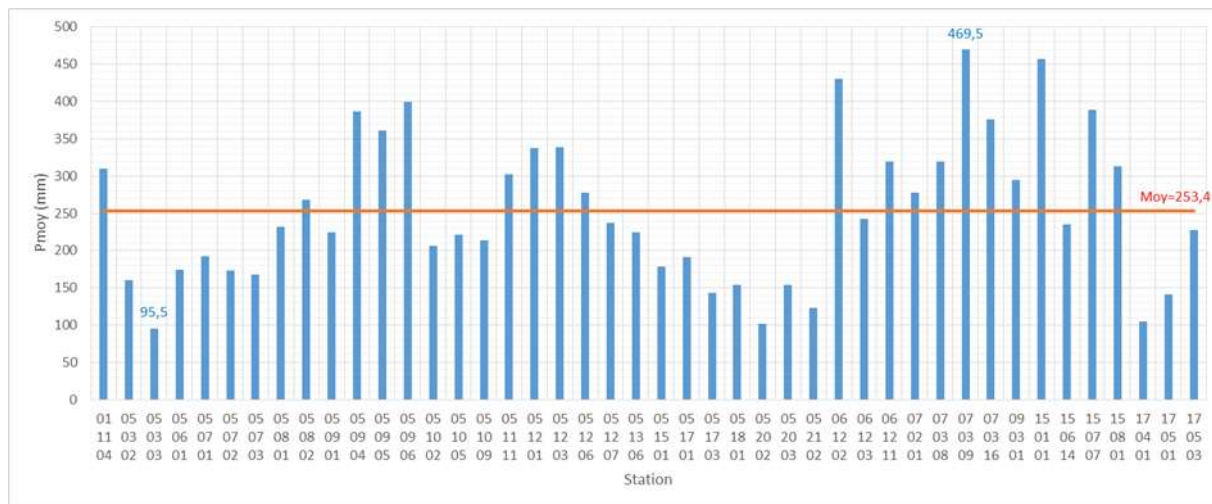


Figure n°13 : Précipitations moyennes interannuelles pour les 44 postes pluviométriques.

Afin de préciser la variation annuelle des précipitations, on s'est basé sur le coefficient de variation (tableau n°4). Nous avons établi également les graphiques ci-dessous (figure n°14). Ce paramètre est très efficace pour la mesure du degré de la dispersion relative des valeurs particulières autour de la moyenne

Les valeurs du coefficient de variation annuelle, oscillent entre 0,16 et 0,82, avec une distribution spatiale qui variée en fonction du domaine « morphoclimatique ». Les coefficients les plus faibles caractérisent des stations en zone montagneuse (B. Arreridj 0.16, Ced Fagues 0.25, Bordj Ghdir 0.26 et Cherfa El Ain 0.26). Ceux les plus forts concerne le sud du bassin bassin (Bordj El l'Agha 0.82, Ain Rich 0.54 et Bel Aroug 0.46)

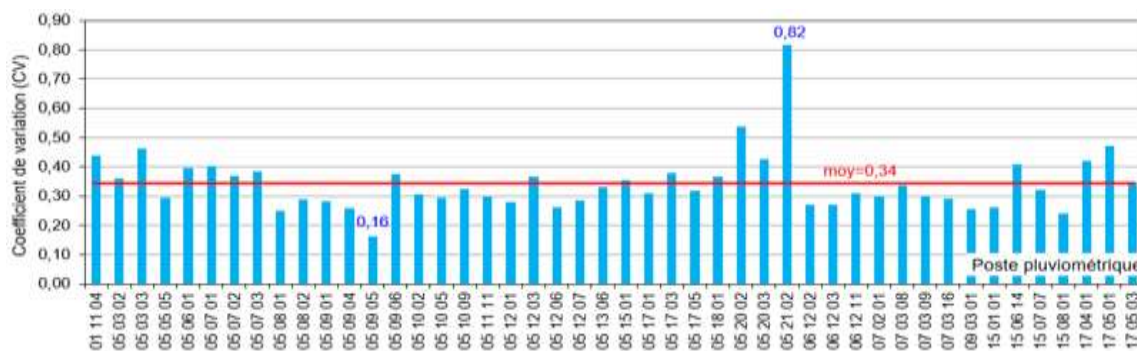


Figure n°14 : Coefficient de variation interannuelle (1975 -2017)

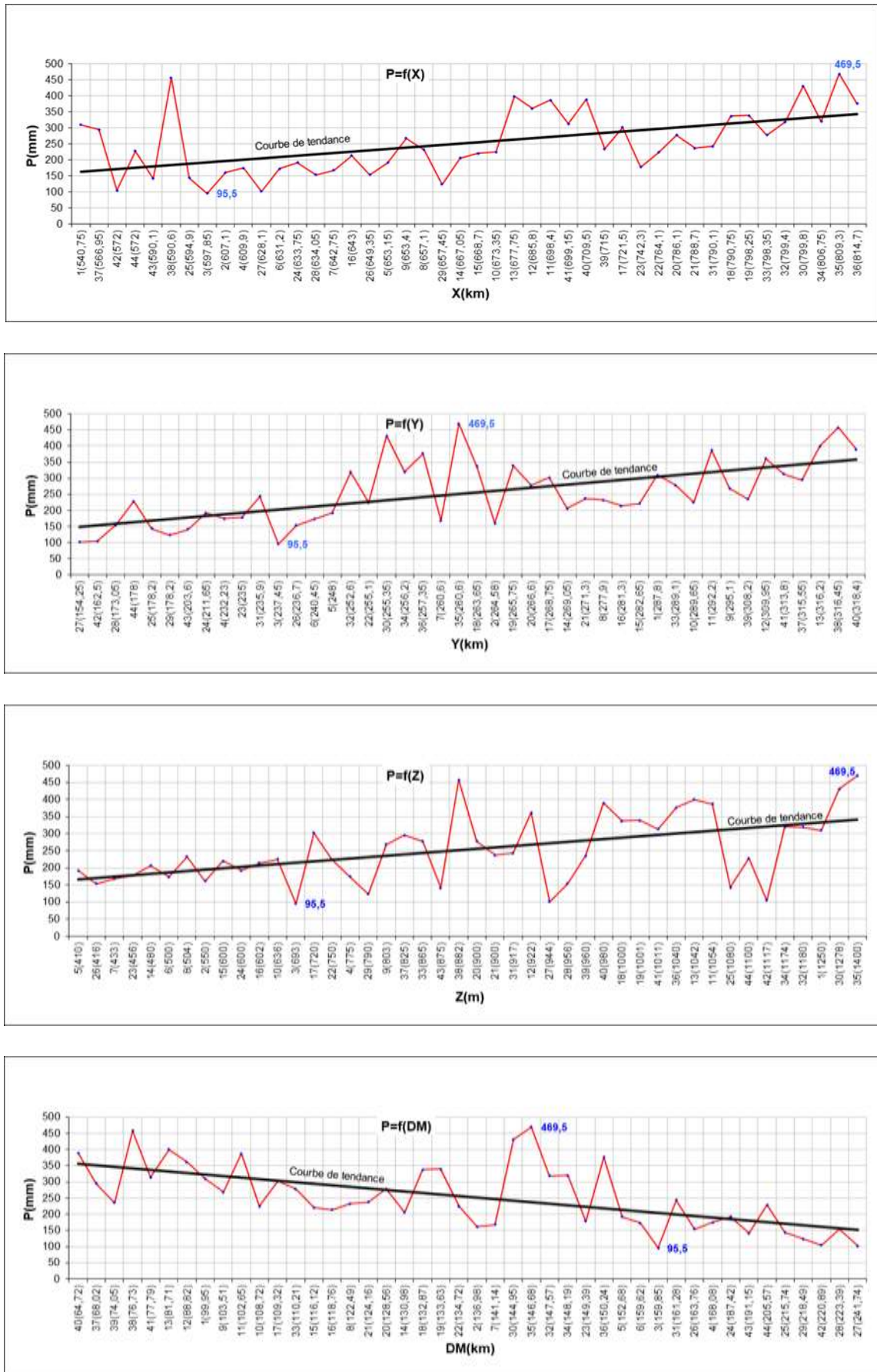


Figure n°15 : Relations pluie annuelle, latitude, longitude, altitude et distance à la mer

Tableau n°4 : Précipitations moyennes interannuelles aux postes pluviométriques retenus (1975-2017)

	Code	Nom	X (km)	Y (km)	Z(m)	DM (km)	P (mm)	CV
1	01 11 04	AIN BOUCIF	540,75	287,8	1250	99,95	309,5	0,44
2	05 03 02	AIN EL HADJEL	607,1	264,58	550	136,98	160,7	0,36
3	05 03 03	BEL AROUG	597,85	237,45	693	159,85	95,5	0,46
4	05 06 01	SIDI AMEUR	609,9	232,23	775	168,08	174,7	0,40
5	05 07 01	CHELLAL (Hodnet O. Msila)	653,15	248	410	152,68	192,2	0,40
6	05 07 02	AIN KHERMANE	631,2	240,45	500	159,62	172,9	0,37
7	05 07 03	ROCADE SUD	642,75	260,6	433	141,14	168,2	0,38
8	05 08 01	CED FAGUES	657,1	277,9	504	122,49	232,2	0,25
9	05 08 02	EL HAOURANE M.F.	653,4	295,1	803	103,51	267,8	0,29
10	05 09 01	MEDJEZ	673,35	289,65	636	108,72	224,8	0,28
11	05 09 04	BORDJ GHDIR	698,4	292,2	1054	102,65	386,6	0,26
12	05 09 05	BB ARRERIDJ DEMRH	685,8	309,95	922	88,82	361	0,16
13	05 09 06	MEDJANA (LA)	677,75	316,2	1042	81,71	399,4	0,38
14	05 10 02	MSILA SAR	667,05	269,05	480	130,98	205,9	0,31
15	05 10 05	KSOB BARRAGE	668,7	282,65	600	116,12	220,7	0,29
16	05 10 09	TARMOUNT	643	281,3	602	118,76	213,8	0,32
17	05 11 11	SIDI OUADAH	721,5	268,75	720	109,32	302,1	0,30
18	05 12 01	MEROUANA	790,75	263,65	1000	132,87	337,1	0,28
19	05 12 03	OUED EL MA	798,25	265,75	1001	133,63	339,1	0,37
20	05 12 06	CHERFA EL AIN	786,1	266,6	900	128,56	278	0,26
21	05 12 07	HAOUARA DJEBEL	788,7	271,3	900	124,16	237,2	0,29
22	05 13 06	NGAOUS	764,1	255,1	750	134,72	224,2	0,33
23	05 15 01	BARIKA	742,3	235	456	149,39	178	0,36
24	05 17 01	MOULIN FERRERO	633,75	211,65	600	187,42	191,7	0,31
25	05 17 03	SLIM	594,9	178,2	1080	215,74	143,6	0,38
26	05 18 01	BANIOU	649,35	236,7	416	163,76	153,8	0,37
27	05 20 02	AIN RICH	628,1	154,25	944	241,74	101,4	0,54
28	05 20 03	AIN EL MELH	634,05	173,05	956	223,39	153,9	0,43
29	05 21 02	BORDJ L AGHA	657,45	178,2	790	218,49	123,4	0,82
30	06 12 02	OUED CHAABA	799,8	255,35	1278	144,95	430,9	0,27
31	06 12 03	AIN TOUTA	790,1	235,9	917	161,28	243	0,27
32	06 12 11	OUED CHELIH	799,4	252,6	1180	147,57	318,9	0,31
33	07 02 01	AIN DJASSER	798,35	289,1	865	110,21	277,5	0,30
34	07 03 08	HAMLA	806,75	256,2	1174	148,19	319,9	0,34
35	07 03 09	SEGUENE	809,3	260,6	1400	146,68	469,5	0,30
36	07 03 16	BATNA FERME EXP.	814,7	257,35	1040	150,24	376,2	0,29
37	09 03 01	DJOUAB	566,95	315,55	825	68,02	295,1	0,26
38	15 01 01	SOUR EL GHOZLANE	590,6	316,45	882	76,73	457	0,26
39	15 06 14	TIXTER	715	308,2	960	74,05	235,2	0,41
40	15 07 07	BIR KASDALI	709,5	318,4	980	64,72	389,3	0,32
41	15 08 01	SIDI EMBAREK	699,15	313,8	1011	77,79	313,2	0,24
42	17 04 01	AIN MOUILLAH	572	162,5	1117	220,89	104,4	0,42
43	17 05 01	MEDJEDEL (Draa Arara)	590,1	203,6	875	191,15	141,6	0,47
44	17 05 03	DAR CHIOUKH	572	178	1100	205,57	228,1	0,34

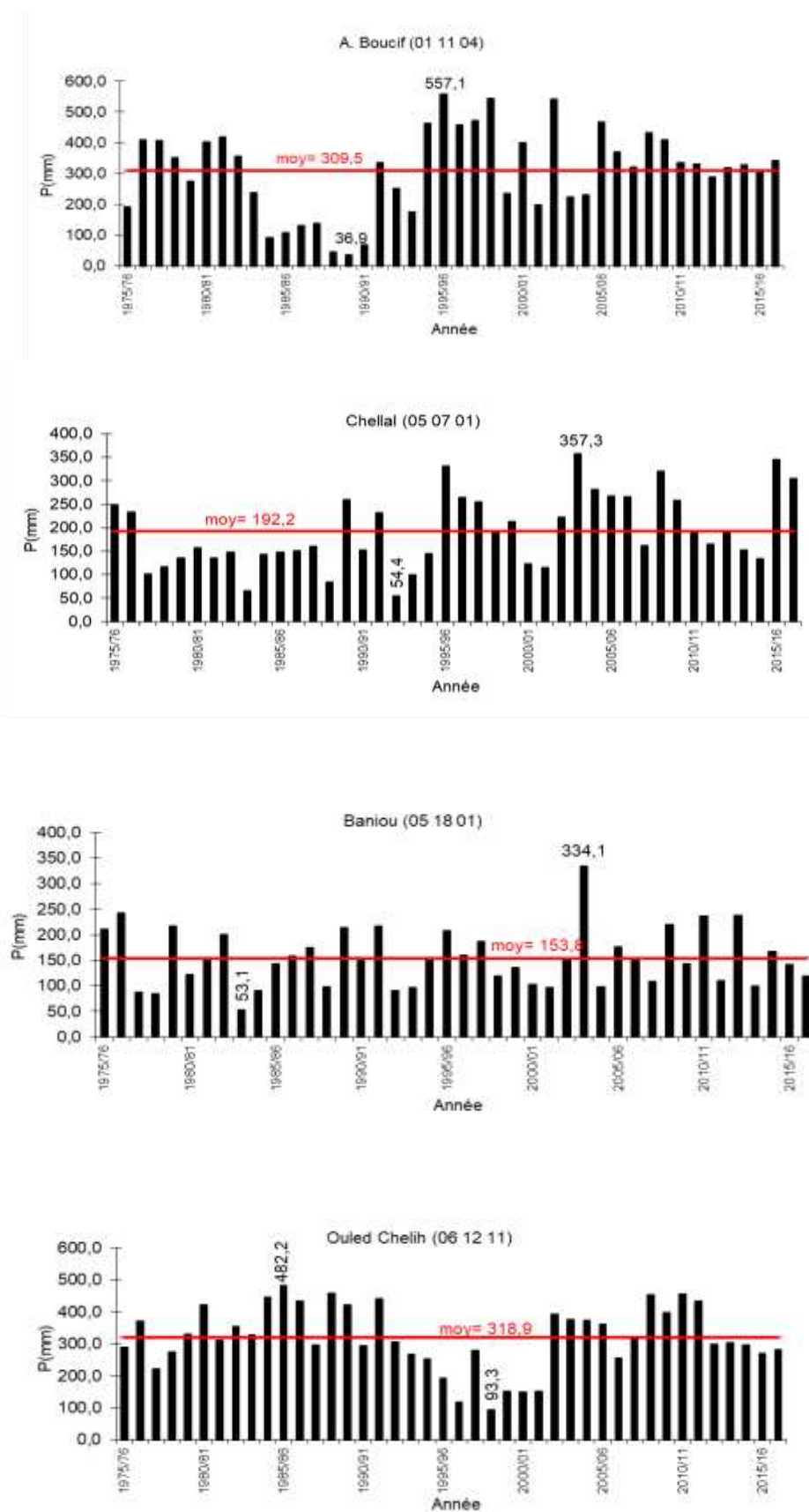


Figure n°16 : Évolution interannuelles des précipitations (1975-2017)

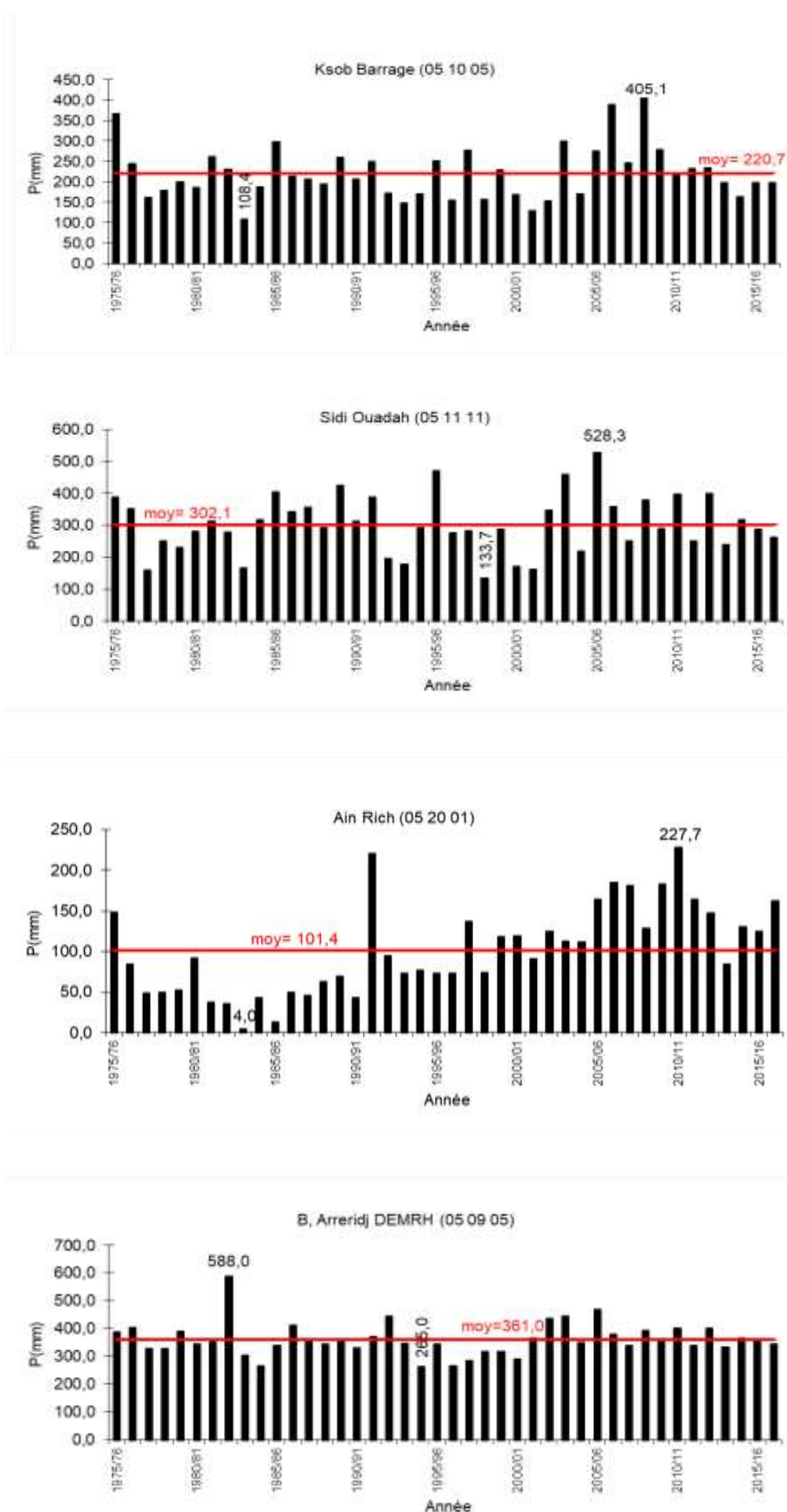


Figure n°17 : Évolution interannuelles des précipitations (1975-2017)

b- Les précipitations mensuelles et les régimes saisonniers :

En général, la plupart des précipitations tombent entre les mois d'octobre et avril, comme dans toute Algérie septentrionale, cependant d'importantes variations ont été observées, pour la hauteur moyenne mensuelle des chutes de pluie et également dans la période durant laquelle elles se produisent (tableau n°5 et 6).

Les valeurs mensuelles pluviométriques relatives à la période 1970-2017 représentées par des Histogrammes (Figure n°18 et 19) traduisent clairement les variations mensuelles de la distribution des précipitations à l'échelle annuelle.

Les hauteurs moyennes mensuelles de pluie dans les stations pluviométriques retenues dans l'étude (Tableau n°5 et 6), montrent clairement la variabilité spatiale des précipitations, elle est relativement plus accentuée dans le Sud du bassin. Cependant, ceci reste très nuancé selon le mois et la réalité géographique des différents secteurs du bassin.

Le coefficient de variation montre clairement une amplitude importante des valeurs pluviométriques, entre les mois de l'année (tableau n°5 et 6). Les stations situées au sud du bassin enregistrent les coefficients les plus élevés avec 0,59 de maximum à Ain Rich. Ceci s'explique d'une part, par l'indigence des précipitations dans ce secteur, et leur caractère orageux (averse) d'autre part. Alors que pour les stations situées au nord ce coefficient est faible qui atteint son minimum de 0,3 à Ain El Hadjel.

On distingue généralement deux grandes périodes pour une année pluviométrique : l'une est sèche où les précipitations sont inférieures à la moyenne mensuelle de l'année, dont le minimum est atteint en juillet. L'autre période est humide où les précipitations sont supérieures à la moyenne mensuelle de l'année qui débute en septembre et s'achève en mai. De maximas sont observés en septembre-octobre-novembre et mars-avril-mai

Cette variabilité reste très nuancée selon le mois et la réalité topo-géographique. La répartition saisonnière des pluies, en pourcentage, dans les stations du bassin est illustrée sur la figure n°20

Tableau n°5 : Précipitations moyennes mensuelles (1975-2017)

Station	N°	Code	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy	Total	σ	Cv
A. EL HADJEL	2	50302	10,9	15,6	15,0	13,8	17,3	12,2	16,8	14,1	19,1	13,6	5,6	6,8	13,4	160,7	4,0	0,30
BEL AROUG	3	50303	4,5	7,2	9,5	6,0	13,8	6,8	17,5	11,5	5,7	3,7	2,9	6,5	8,0	95,5	4,4	0,55
SIDI AMEUR	4	50601	22,3	16,2	21,6	22,1	18,4	12,8	12,4	17,0	16,5	4,5	2,2	8,5	14,6	174,7	6,7	0,46
CHELLAL	5	50701	18,2	23,4	19,9	14,0	19,4	11,4	19,4	18,2	22,8	12,6	4,2	8,6	16,0	192,2	5,9	0,37
A. KHERMANE	6	50702	17,0	19,3	17,4	14,8	14,9	12,7	13,4	14,7	24,6	8,0	5,2	10,8	14,4	172,9	5,1	0,35
ROCADE SUD	7	50703	16,3	19,3	17,9	17,4	16,4	11,8	15,7	17,4	17,9	7,8	3,0	7,4	14,0	168,2	5,3	0,37
EL HAOURANE	9	50802	22,5	28,8	23,9	31,3	32,3	25,5	28,9	26,5	25,6	12,3	4,0	6,1	22,3	267,8	9,6	0,43
MEDJEZ	10	50901	26,8	21,7	25,2	20,7	20,3	17,4	21,1	23,7	25,7	9,2	3,8	9,3	18,7	224,8	7,4	0,40
BORDJ GHDIR	11	50904	34,0	35,7	39,5	43,2	41,6	30,8	38,9	46,4	41,4	19,1	6,8	9,2	32,2	386,6	13,3	0,41
B ARRERIDJ DEMRH	12	50905	31,8	28,6	35,9	39,3	37,3	28,7	32,1	45,3	41,3	21,0	6,8	12,9	30,1	361,0	11,5	0,38
MEDJANA	13	50906	42,8	26,9	39,9	52,0	49,0	39,9	38,0	39,8	39,0	11,2	6,4	14,5	33,3	399,4	15,0	0,45
MSILA SAR	14	51002	25,9	25,6	19,8	19,5	17,9	13,5	15,7	21,9	24,5	10,1	3,8	7,5	17,2	205,9	7,2	0,42
KSOB BARGE	15	51005	13,1	25,3	26,2	22,0	16,9	18,5	22,0	27,2	27,6	11,5	4,6	5,9	18,4	220,7	8,1	0,44
TARMOUNT	16	51009	25,9	23,9	22,6	20,3	18,5	15,7	21,3	23,8	22,6	8,1	4,4	6,8	17,8	213,8	7,4	0,42
SIDI OUADAH	17	51111	29,4	32,3	30,3	33,6	32,3	27,5	30,2	29,3	34,8	11,9	2,1	8,5	25,2	302,1	11,0	0,44
MEROUANA	18	51201	32,1	30,0	29,4	40,6	32,4	27,7	39,0	37,5	41,5	14,0	4,2	8,6	28,1	337,1	12,6	0,45
OUED EL MA	19	51203	28,2	27,6	31,9	42,0	33,4	26,4	36,6	41,9	42,4	15,3	2,0	11,4	28,3	339,1	12,9	0,46
CHERFA EL AIN	20	51206	25,3	28,2	26,9	31,0	30,1	23,7	28,0	31,1	27,6	12,6	4,4	9,2	23,2	278,0	9,1	0,39
HAOUARA DJ.	21	51207	20,2	20,1	25,1	32,0	28,7	22,0	21,9	29,5	21,1	8,3	2,9	5,4	19,8	237,2	9,5	0,48
NGAOUS	22	51306	27,5	28,5	21,8	21,3	21,2	15,8	22,6	26,7	21,3	7,1	2,6	7,9	18,7	224,2	8,5	0,46
BARIKA	23	51501	20,9	21,3	16,6	18,6	31,9	11,0	15,2	16,2	12,6	8,2	1,0	4,4	14,8	178,0	8,3	0,56

Tableau n°6 : Précipitations moyennes mensuelles (1975-2017)

Station	N°	Code	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy	Total	σ	Cv
MOULIN FERRERO	24	51701	35,2	24,8	15,7	16,7	17,2	15,6	11,4	20,8	20,5	4,2	5,4	4,2	16,0	191,7	9,1	0,57
SLIM	25	51703	19,0	15,8	11,6	10,5	15,5	8,6	13,9	15,0	17,4	7,8	3,2	5,2	12,0	143,6	5,0	0,42
BANIOU	26	51801	17,3	18,8	16,3	13,3	14,6	9,5	13,2	16,2	16,4	8,6	3,8	5,9	12,8	153,8	4,8	0,37
AIN RICH	27	52002	20,5	15,8	6,8	6,6	6,0	4,6	5,0	9,1	9,7	5,8	2,9	8,7	8,5	101,4	5,0	0,59
AIN EL MELH	28	52003	30,1	17,3	12,7	9,6	13,7	9,3	7,6	13,6	17,2	11,8	2,5	8,4	12,8	153,9	6,8	0,53
BORDJ L AGHA	29	52102	24,1	16,7	9,9	9,4	10,8	7,8	9,1	11,6	9,7	6,4	1,4	6,6	10,3	123,4	5,6	0,55
AIN TOUTA	31	61203	23,4	27,0	31,5	25,2	25,2	14,4	19,8	18,0	26,1	19,8	8,1	4,5	20,3	243,0	8,0	0,39
OUED CHELIH	32	61211	36,5	26,3	34,0	36,9	29,6	28,9	33,4	32,9	26,9	13,3	4,7	15,5	26,6	318,9	10,2	0,38
AIN DJASSER	33	70201	31,1	24,7	23,2	28,0	25,6	21,5	25,1	31,8	34,9	14,2	4,7	12,7	23,1	277,5	8,8	0,38
HAMLA	34	70308	30,5	25,1	36,1	32,1	36,6	34,4	33,5	33,7	29,7	16,0	2,3	9,9	26,7	319,9	11,2	0,42
SEGUENE	35	70309	44,2	37,0	50,7	52,1	47,4	39,5	57,6	47,6	44,8	24,4	9,0	15,3	39,1	469,5	15,2	0,39
BATNA FERME EXP.	36	70316	43,8	29,6	36,9	36,0	35,2	29,0	40,4	38,2	39,6	23,3	8,2	16,0	31,3	376,2	10,7	0,34
DJOUAB	37	90301	16,7	26,5	32,3	44,5	38,1	28,9	31,3	32,4	24,8	10,7	3,4	5,6	24,6	295,1	12,9	0,52
S, EL GHOZLANE	38	150101	30,9	35,2	50,0	64,2	61,0	51,1	44,3	53,7	37,2	9,5	7,6	12,2	38,1	457,0	19,7	0,52
TIXTER	39	150614	22,7	22,5	21,2	23,1	18,7	17,1	24,7	30,2	29,4	11,1	5,3	9,1	19,6	235,2	7,8	0,40
BIR KASDALI	40	150707	32,2	24,8	37,1	42,8	40,5	34,9	47,0	45,1	42,7	20,8	9,2	12,2	32,4	389,3	12,9	0,40
SIDI EMBAREK	41	150801	28,6	25,6	31,2	34,5	37,0	25,8	31,7	39,0	33,2	16,1	3,6	7,0	26,1	313,2	11,4	0,44
AIN MOUILLAH	42	170401	14,1	9,9	5,6	6,7	11,4	9,5	13,1	12,2	8,0	4,2	6,4	3,5	8,7	104,4	3,5	0,41
MEDJEDEL	43	170501	14,7	13,5	12,8	10,9	15,4	11,7	11,0	16,9	18,4	8,2	3,9	4,2	11,8	141,6	4,6	0,39
DAR CHIOUKH	44	170503	24,3	18,9	17,5	20,6	25,4	14,7	22,5	26,4	22,6	21,4	2,4	11,6	19,0	228,1	6,8	0,36

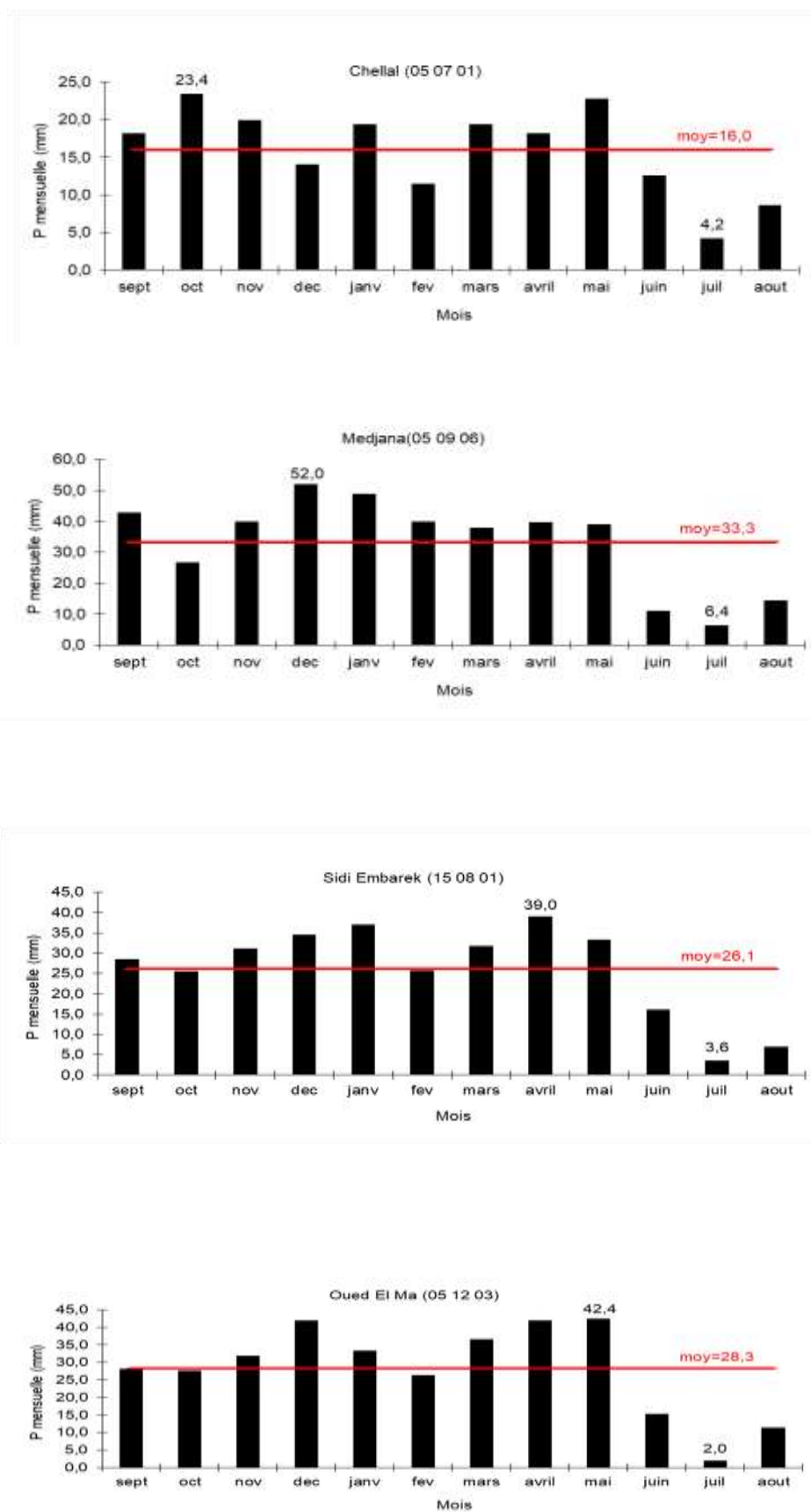


Figure n°18 : Les variations moyennes mensuelles des précipitations (1975-2017)

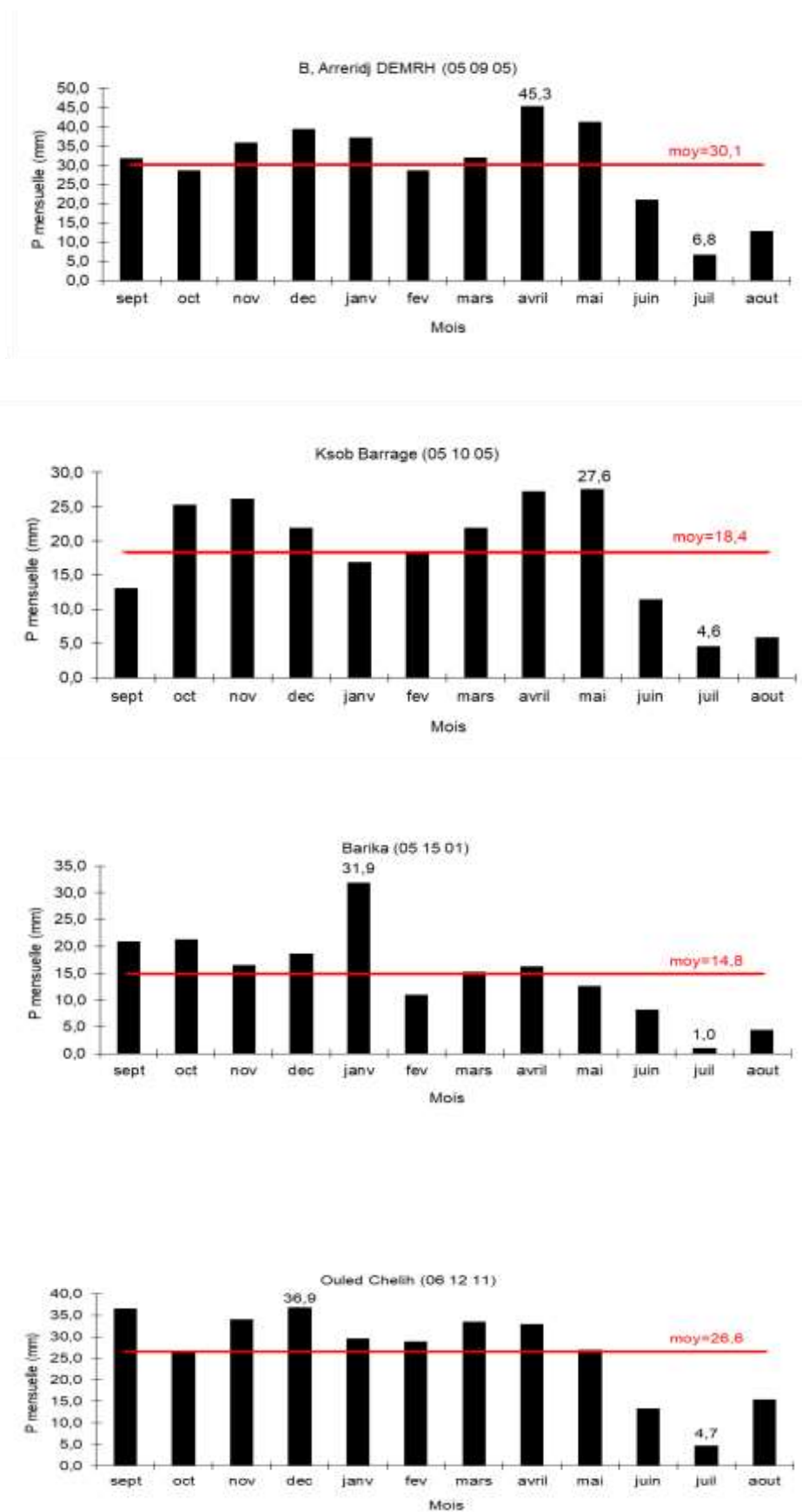


Figure n°19 : Les variations moyennes mensuelles des précipitations (1975-2017)

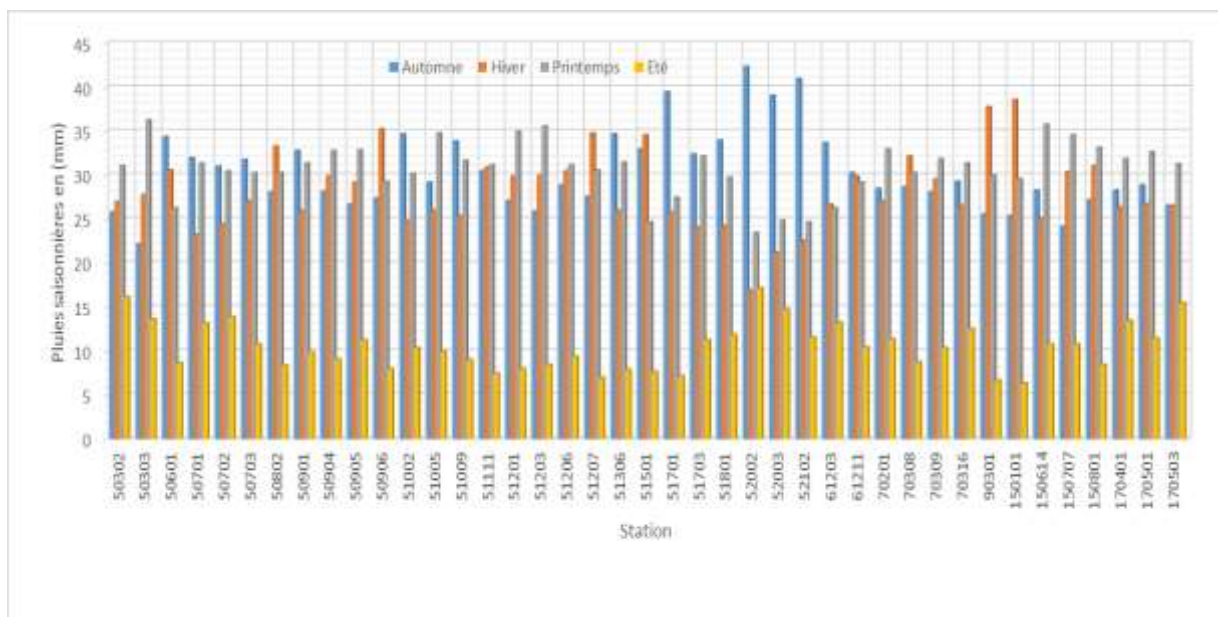


Figure n°20 : Répartition saisonnière des pluies dans les stations retenues dans l'étude.

II-5-2 Les températures et ses nuances

La température est un paramètre important qui régit les déperditions d'eau qui s'opèrent par le phénomène de l'évapotranspiration. L'étude de ce paramètre climatique est primordiale, car c'est lui qui nous permet d'évaluer le déficit d'écoulement d'un bassin versant (Guidoum, 2004). La température est utilisée conjointement avec les précipitations.

On dispose d'une série homogène (1988/2013) des données de températures de la station de M'Sila située au centre du bassin (35° 39'N de latitude, 04° 29'Ed e longitude et 440 m d'altitude), et contrôlée par l'Office national de la météorologie (ONM).

La température moyenne mensuelle maximale (tableau n°7) est atteinte en juillet (39°C). Alors que la température moyenne mensuelle minimale s'observe en février atteignant 4°C. La température moyenne annuelle pour la période (1988/2013) est évaluée à 19,6 °C avec un coefficient de variation de 0,41. Les variations interannuelles sont faibles (le coefficient de variation est inférieur à 0.01).

L'amplitude thermique moyenne annuelle qui traduit la différence entre la température moyenne du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid, et de 22 °C. Il est de 35 °C pour les maximas et 20 °C pour les minimas. (La figure n°21) présente les températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées au niveau de la station climatique de M'Sila.

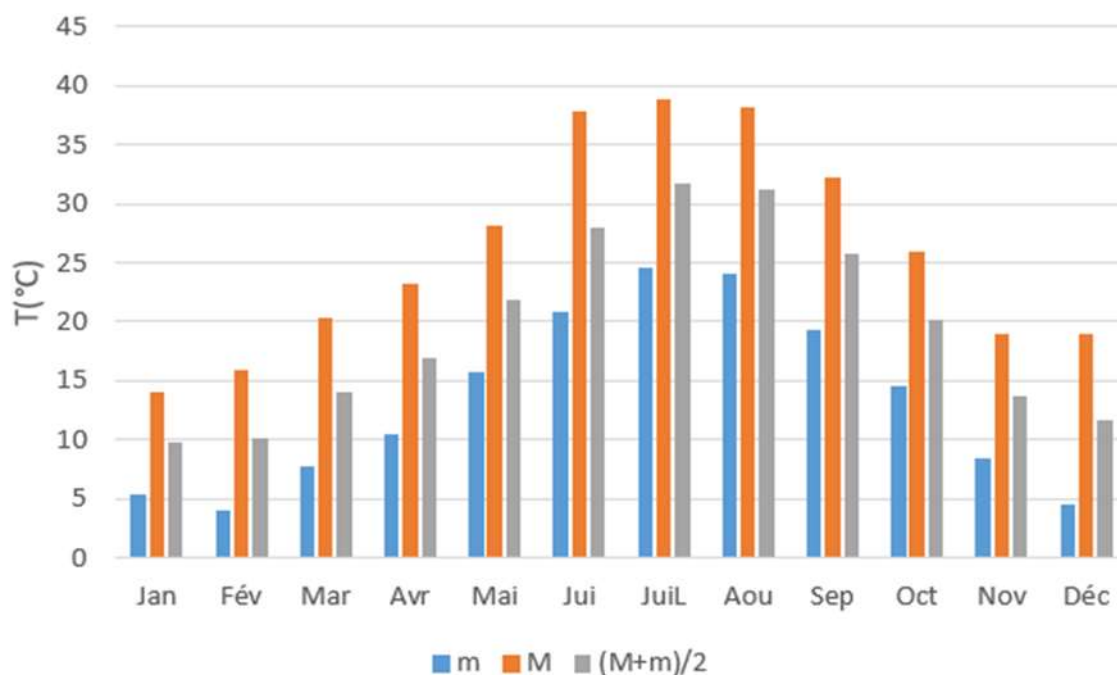


Figure n°21 : Variation des moyennes mensuelles minimales (*m*), maximales (*M*) et moyennes ($(M + m)/2$) pour la station de M'Sila (1988/2013)

Tableau n°7 : Précipitation et températures moyennes mensuelles à la station de M'Sila (1988/2013)

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	JuiL	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
m	5,4	4,1	7,7	10,5	15,8	20,9	24,5	24,1	19,4	14,55	8,4	4,52
M	14,1	16	20,3	23,2	28,1	37,9	38,9	38,2	32,3	25,9	19	19
(M+m)/2	9,8	10,1	14	16,9	21,9	27,9	31,7	31,2	25,8	20,2	13,7	11,7

II-5-3 Régime climatique :

La combinaison des deux principaux facteurs climatiques, températures et précipitations, est intéressante dans la mesure où elle permet de déterminer les mois véritablement secs, qui correspondent selon la définition de [Gausson et Bagnouls \(1952\)](#), au mois où le total de précipitations est inférieur au double de la température moyenne mensuelle.

Le diagramme ombrothermique de Gausson et Bagnouls est l'un des paramètres qui utilise cette combinaison. Il tient compte des moyennes mensuelles des précipitations (*p en mm*) et de la température (*t en °C*) et donne une expression relative de la sécheresse estivale en durée et en intensité ([Gausson et Bagnouls, 1952](#)).

Un mois donné est considéré comme sec quand $p < 2t$, c'est-à-dire quand les pertes en eau sont supérieures aux apports (précipitations). Inversement, quand $p > 2t$, le mois est considéré comme humide.

Comme le montre le diagramme ombrothermique à la station de M'Sila, la période sèche s'étale sur toute l'année. Cependant, cette répartition n'est que moyenne, car les variations interannuelles des précipitations sont très grandes, et certaines années réelles échappent à cette schématisation.

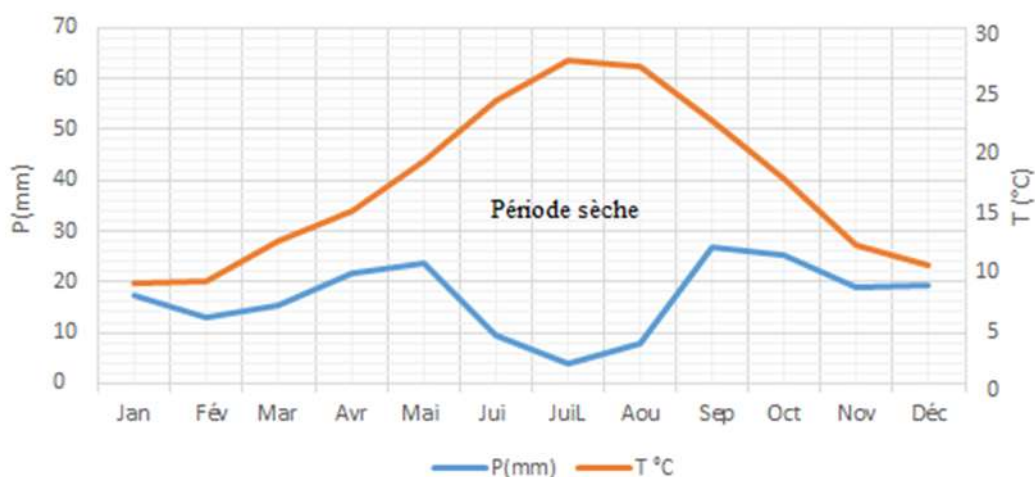


Figure n°22 : Diagrammes Ombrothermiques à la station de M'Sila (1988/2013)

Conclusion :

En somme, le bassin versant de Chott el Hodna présente des ensembles morpho-structuraux bien tranchés et des caractères morphométriques déterminant des différences sensibles dans comportement des terrains vis-à-vis l'agressivité des pluies.

Les caractéristiques climatiques de ce bassin, sont étroitement liées à sa position géographique, et à son relief. Elles sont connues par leur irrégularité d'une année à l'autre et d'une saison à l'autre. Cette irrégularité est marquée notamment par de fortes variabilités spatiales et surtout temporelles des précipitations et des températures.

Chapitre III

Evaluation est cartographie de l'érosivité

Introduction :

Ce chapitre sera divisé en deux parties, la première pour l'estimation des indices d'érosivité des pluies et la deuxième pour l'élaboration des esquisses iso-érodent.

III-1 Estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier et Smith (1978) :

L'estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier & Smith nécessite la connaissance des énergies cinétiques (E) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) des gouttes de pluie de chaque averse. Elles sont données par la formule empirique de [Wischmeier et Smith \(1978\)](#) :

$$R = k \cdot E_t \cdot I_{30_{max}}$$

Où :

R Est l'indice d'érosivité de Wischmeier en (t-m cm ha⁻¹ h⁻¹ an⁻¹)

k Est un coefficient de conservation dépendant du système d'unités de mesure ($k = 1/685$ en système métrique).

E_t Est l'énergie cinétique total de l'averse ; selon [Wischmeier et Smith \(1978\)](#), l'énergie cinétique de la pluviaux phase en (t-m ha⁻¹ mm⁻¹) :

$$E = [210,3 + 89 \log_{10}(I_p)] \cdot H_p$$

Avec :

I_p Est l'intensité de la pluviaux phase en (mm⁻¹ h⁻¹)

H_p Est la hauteur de la pluviaux phase en (mm)

L'averse étant la somme de n pluviophases, donc l'énergie cinétique total de l'averse est :

$$E_t = \sum_{i=1}^n [210,3 + 89 \log_{10}(I_{P_i})] \cdot H_{P_i}$$

L'expression finale de de l'indice d'érosivité de Wischmeier est :

$$R = k \cdot \left[\sum_{i=1}^n [210,5 + 89 \log_{10}(I_{P_i})] \cdot H_{P_i} \right] \cdot I_{30_{max}}$$

Où :

$I_{30_{max}}$ Représente l'intensité maximale pendant 30 minutes en (mm h⁻¹)

Du fait que les données d'énergie cinétique et d'intensité des pluies sont difficiles à obtenir (comme c'est le cas pour notre bassin d'étude), des formules alternatives ne nécessitant que

des données mensuelles et annuelles pour la détermination du facteur R ont été développées (Kalman, 1967 ; Arnoldus, 1980 ; Rango et Arnoldus, 1987)

En effet, les modèles de d'estimation de l'érosivité des pluies, notamment l'indice d'érosivité de Wischmeier, mentionnés ci-après, ont été adoptés. Ceci en exploitant les moyennes mensuelles et annuelles des précipitations mesurées au niveau des 44 stations retenues dans l'étude (seules données disponibles),

III-2 Formules adoptées pour l'évaluation de l'érosivité des pluies :

III-2-1 Indice de Fournier (1960) :

Fournier (1960) a défini un indice de distribution des précipitations (IF), comme étant le rapport entre les précipitations pour le mois le plus pluvieux de l'année (P_m) et les précipitations annuelles (P) en utilisant la formule :

$$IF = \frac{P_m^2}{P}$$

Tableau n°8 : Classification de l'érosivité (Fournier1960)

IF	Classification
0 -20	Très faible
20-40	Faible
40-60	Modérée
60-80	Forte
80-100	Très forte
>100	Extrêmement forte

III-2-2 Indice de Fournier-Arnoldus (1987) :

Une forme modifiée de l'indice de Fournier, consistant à effectuer la somme des indices de Fournier pour les douze mois de l'année, a été proposée par Arnoldus (1987). Cet indice tient compte du rapport entre la somme carrée de la pluviosité moyenne mensuelle de chaque mois de l'année à la pluviosité moyenne annuelle.

$$IFA = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_i^2}{P} \right)$$

P_i : Pluie moyenne de chaque mois (mm)

P : Pluie moyenne annuelle (mm).

Les classes de cet indice sont consignées dans (le Tableau n°9)

Tableau n°9 : Classification de l'érosivité (Arnoldus1980).

IFA	Classification
0 -60	Très faible
60-90	Faible
90-120	Modérée
120-160	Sévère
>160	Très sévère

III-3 Formules utilisées pour l'estimation de l'indice d'érosivité de Wischmeier :

L'approche utilisée généralement pour estimer l'indice d'érosivité de Wischmeier (R) d'une région sans données ou ressources permettant de cet indice, est constituée de 4 étapes :

- Les valeurs de (R) sont calculées par la méthode décrite pour les stations pluviométriques avec enregistrement ;
- Une relation est établie entre les valeurs de (R) calculées et les données pluviométriques mesurées ;
- La de (R) est extrapolée et ensuite extrapolées et les valeurs de (R) sont estimée à partir des donnés pluviométriques associées aux stations ;
- Les valeurs de (R) sont ensuite interpolés à partir des esquisses iso-érodent (Maaliou, 2011).

III-3-1 Formule Arnoldus (1977) :

Une carte des iso érodent pour le Maroc a été développée par Arnoldus (1977) dans ces travaux sur le nord de l'Afrique et le Moyen-Orient, en utilisant La relation suivante (Renard et Freimund, 1994) :

$$R = 0,264(IFA)^{1,5}$$

Où :

IFA : Indice de Fournier-Arnoldus ou Indice de Fournier modifié

III-3-2 Formule Rango-Arnoldus (1987) :

Rango & Arnoldus (1987) ont développé une formule alternative qui n'implique que les précipitations mensuelles et annuelles pour déterminer le facteur R . Cette formule a été appliquée à douze stations se trouvant au grand Maghreb, donc elle correspond bien à notre région d'étude :

$$\log(R) = 1,74 \cdot \log \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{P_i^2}{P} \right) + 1,29$$

Où :

P_i : Représente les précipitations mensuelles et P les précipitations annuelles en mm

III-3-3 Formule Renard-freimund (1994) :

Afin d'estimer l'indice d'érosivité de Wischmeier, nous nous sommes basés également sur la formule de Renard et Freimund, (1994) qui établit une relation entre (R) et l'indice de Fournier-Arnoldus (IFA) :

$$R = 0,07397 \cdot IFA^{1,847} \text{ Pour } IFA < 55 \text{ mm}$$

$$R = 95,77 - 6,081 \cdot IFA + 0,477 \cdot IFA^2 \text{ Pour } IFA > 55 \text{ mm}$$

Où :

IFA : Indice de Fournier-Arnoldus ou Indice de Fournier modifié

R : est l'indice d'érosivité des pluies de de Wischmeier en ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

III-4 Interprétation et comparaison :

Afin de faciliter la compréhension nous avons choisi la notation suivante pour les différents indices d'érosivité ; c'est –à-dire :

IF Pour l'indice de Fournier (1960) ;

IFA Pour l'indice de Fournier-Arnoldus (1987) ;

R_A Pour l'indice d'Arnoldus (1977) ;

R_{RA} Pour l'indice de Rango-Arnoldus (1987) ;

R_{RF} Pour l'indice de Renard-freimund (1994) ;

Les résultats d'estimation de l'indice de l'érosivité des pluies de Wischmeier (R ; R_A ; R_{RA} et R_{RF}), de Fournier (IF) et celui de Fournier-Arnoldus (IFA) pour les 44 postes pluviométriques retenus dans l'étude, sont donnés dans (les tableaux n°10 et 11 et 12 et 13) et illustrés sur la figure n°23.

En observant la figure n°23, nous constatons que les valeurs de R_A et R_{RF} sont relativement proches. Ce qui explique cela, tout simplement, est que les relations de ces deux indices sont basées sur l'indice de Fournier-Arnoldus.

Estimées à partir d'un modèle logarithmique, les valeurs de R_{RA} , sont les plus élevées et bien différentes, à l'exception de 6 stations où la pluie annuelle dépasse les 380 mm

Par ailleurs, les valeurs de l'indice de Fournier IF sont clairement plus faibles que les valeurs de l'indice de Fournier-Arnoldus. Cela s'explique par le fait que l'indice de Fournier-Arnoldus tient en compte la pluie mensuelle de tous les mois de l'année, en intégrant les variations du régime pluviométrique annuel dans le processus érosif des pluies.

Les valeurs de l'indice d'érosivité les plus élevés correspondent aux pluviométries élevées. Les stations du littoral sont caractérisées par une forte pluie reflétant une forte valeur de l'indice d'érosivité.

Selon les classes de l'indice de Fournier-Arnoldus qui varie de 10 pour la station d'Ain Mouillah à 47 pour la station de Sour-el-Ghozlane et qui sont résumées dans le Tableau n°13, le risque d'érosivité des pluies est très faible ($IFA < 60$) pour l'ensemble des stations du bassin de Chott El Hodna.

Tableau n°10 : (a) Estimation des différents indices d'érosivité des pluies

Station	AIN BOUCIF	A. EL HADJEL	BEL AROUG	SIDI AMEUR	CHELLAL	A. KHERMANE	ROCADE SUD	CED FAGUES	EL HAOURANE	MEDJEZ	BORDJ GHDIR
Code ANRH	11104	50302	50303	50601	50701	50702	50703	50801	50802	50901	50904
Précipitations moyennes mensuelles (1975-2017) : P_i											
Sept	30,7	10,9	4,5	22,3	18,2	17,0	16,3	20,6	22,5	26,8	34,0
Oct	29,0	15,6	7,2	16,2	23,4	19,3	19,3	25,2	28,8	21,7	35,7
Nov	32,7	15,0	9,5	21,6	19,9	17,4	17,9	22,1	23,9	25,2	39,5
Dec	32,3	13,8	6,0	22,1	14,0	14,8	17,4	25,6	31,3	20,7	43,2
Janv	31,3	17,3	13,8	18,4	19,4	14,9	16,4	25,6	32,3	20,3	41,6
Fev	24,4	12,2	6,8	12,8	11,4	12,7	11,8	19,8	25,5	17,4	30,8
Mars	30,3	16,8	17,5	12,4	19,4	13,4	15,7	23,5	28,9	21,1	38,9
Avril	35,4	14,1	11,5	17,0	18,2	14,7	17,4	23,2	26,5	23,7	46,4
Mai	33,9	19,1	5,7	16,5	22,8	24,6	17,9	22,9	25,6	25,7	41,4
juin	14,5	13,6	3,7	4,5	12,6	8,0	7,8	11,2	12,3	9,2	19,1
Juil	5,6	5,6	2,9	2,2	4,2	5,2	3,0	4,6	4,0	3,8	6,8
Aout	9,6	6,8	6,5	8,5	8,6	10,8	7,4	7,9	6,1	9,3	9,2
Précipitations moyennes annuelle (1975-2017) : P											
La somme	309,5	160,7	95,5	174,7	192,2	172,9	168,2	232,2	267,8	224,8	386,6
Précipitations pour le mois le plus pluvieux de l'année : P_m											
P_m	35,4	19,1	17,5	22,3	23,4	24,6	19,3	25,6	32,3	26,8	46,4
P_i^2 / P											
Sept	3,1	0,7	0,2	2,9	1,7	1,7	1,6	1,8	1,9	3,2	3,0
Oct	2,7	1,5	0,5	1,5	2,9	2,2	2,2	2,7	3,1	2,1	3,3
Nov	3,4	1,4	0,9	2,7	2,1	1,7	1,9	2,1	2,1	2,8	4,0
Dec	3,4	1,2	0,4	2,8	1,0	1,3	1,8	2,8	3,7	1,9	4,8
Janv	3,2	1,9	2,0	1,9	2,0	1,3	1,6	2,8	3,9	1,8	4,5
Fev	1,9	0,9	0,5	0,9	0,7	0,9	0,8	1,7	2,4	1,3	2,5
Mars	3,0	1,8	3,2	0,9	2,0	1,0	1,5	2,4	3,1	2,0	3,9
Avril	4,0	1,2	1,4	1,7	1,7	1,3	1,8	2,3	2,6	2,5	5,6
Mai	3,7	2,3	0,3	1,6	2,7	3,5	1,9	2,3	2,4	2,9	4,4
Juin	0,7	1,1	0,1	0,1	0,8	0,4	0,4	0,5	0,6	0,4	0,9
Juil	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Aout	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,7	0,3	0,3	0,1	0,4	0,2
Indices d'érosivité des pluies en (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ an⁻¹)											
IF	4,0	2,3	3,2	2,9	2,9	3,5	2,2	2,8	3,9	3,2	5,6
IFA	51,45	25,37	17,67	30,45	31,5	28,17	27,65	38,15	45,67	37,45	65,27
R_A	42,2	14,6	8,5	19,1	20,2	17,0	16,6	27,0	35,1	26,2	60,1
R_{RA}	64,07	27,41	20,93	31,43	32,27	29,62	29,26	37,36	42,70	36,81	55,94
R_{RF}	38,22	10,34	5,35	14,44	15,40	12,49	12,12	22,03	30,53	21,24	59,09

Tableau n°11 : (b) Estimation des différents indices d'érosivité des pluies

Station	B ARRERIDJ DEMRH	MEDJANA	MSILA SAR	KSOB BARGE	TARMOUNT	SIDI OUADAH	MEROUANA	OUED EL MA	CHERFA EL AIN	HAOUARA DJ.	NGAOUS
Code ANRH	50905	50906	51002	51005	51009	51111	51201	51203	51206	51207	51306
Précipitations moyennes mensuelles (1975-2017) : P_i											
Sept	31,8	42,8	25,9	13,1	25,9	29,4	32,1	28,2	25,3	20,2	27,5
Oct	28,6	26,9	25,6	25,3	23,9	32,3	30,0	27,6	28,2	20,1	28,5
Nov	35,9	39,9	19,8	26,2	22,6	30,3	29,4	31,9	26,9	25,1	21,8
Dec	39,3	52,0	19,5	22,0	20,3	33,6	40,6	42,0	31,0	32,0	21,3
Janv	37,3	49,0	17,9	16,9	18,5	32,3	32,4	33,4	30,1	28,7	21,2
Fev	28,7	39,9	13,5	18,5	15,7	27,5	27,7	26,4	23,7	22,0	15,8
Mars	32,1	38,0	15,7	22,0	21,3	30,2	39,0	36,6	28,0	21,9	22,6
Avril	45,3	39,8	21,9	27,2	23,8	29,3	37,5	41,9	31,1	29,5	26,7
Mai	41,3	39,0	24,5	27,6	22,6	34,8	41,5	42,4	27,6	21,1	21,3
Juin	21,0	11,2	10,1	11,5	8,1	11,9	14,0	15,3	12,6	8,3	7,1
Juil	6,8	6,4	3,8	4,6	4,4	2,1	4,2	2,0	4,4	2,9	2,6
Aout	12,9	14,5	7,5	5,9	6,8	8,5	8,6	11,4	9,2	5,4	7,9
Précipitations moyennes annuelle (1975-2017) : P											
La somme	361,0	399,4	205,9	220,7	213,8	302,1	337,1	339,1	278,0	237,2	224,2
Précipitations pour le mois le plus pluvieux de l'année : P_m											
P_m	45,3	52,0	25,9	27,6	25,9	34,8	41,5	42,4	31,1	32,0	28,5
P_i^2/P											
Sept	2,8	4,6	3,3	0,8	3,1	2,9	3,1	2,3	2,3	1,7	3,4
Oct	2,3	1,8	3,2	2,9	2,7	3,4	2,7	2,3	2,9	1,7	3,6
Nov	3,6	4,0	1,9	3,1	2,4	3,0	2,6	3,0	2,6	2,7	2,1
Dec	4,3	6,8	1,8	2,2	1,9	3,7	4,9	5,2	3,5	4,3	2,0
Janv	3,8	6,0	1,6	1,3	1,6	3,4	3,1	3,3	3,3	3,5	2,0
Fev	2,3	4,0	0,9	1,5	1,1	2,5	2,3	2,1	2,0	2,0	1,1
Mars	2,8	3,6	1,2	2,2	2,1	3,0	4,5	3,9	2,8	2,0	2,3
Avril	5,7	4,0	2,3	3,4	2,6	2,8	4,2	5,2	3,5	3,7	3,2
Mai	4,7	3,8	2,9	3,4	2,4	4,0	5,1	5,3	2,7	1,9	2,0
Juin	1,2	0,3	0,5	0,6	0,3	0,5	0,6	0,7	0,6	0,3	0,2
Juil	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Aout	0,5	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,1	0,3
Indices d'érosivité en (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ an⁻¹)											
IF	5,7	6,8	3,3	3,4	3,1	4,0	5,1	5,3	3,5	4,3	3,6
IFA	34,1	39,5	20,0	21,6	20,6	29,6	33,2	33,6	26,5	23,9	22,2
R_A	52,6	65,5	23,5	26,6	24,7	42,5	50,6	51,5	36,0	30,9	27,7
R_{RA}	52,33	58,42	34,88	37,10	35,78	47,01	51,30	51,76	43,19	40,00	37,86
R_{RF}	50,21	65,70	18,63	21,65	19,82	38,63	47,82	48,87	31,40	26,03	22,76

Tableau n°12 : (c) Estimation des différents indices d'érosivité des pluies

Station	BARIKA	MOULIN FERRERO	SLIM	BANIOU	AIN RICH	AIN EL MELH	AGHA	CHAABA	AIN TOUTA	OUED CHELIH	AIN DJASSER
Code ANRH	51501	51701	51703	51801	52002	52003	52102	61202	61203	61211	70201
Précipitations moyennes mensuelles (1975-2017) : P_i											
Ssept	20,9	35,2	19,0	17,3	20,5	30,1	24,1	44,7	23,4	36,5	31,1
Oct	21,3	24,8	15,8	18,8	15,8	17,3	16,7	34,0	27,0	26,3	24,7
Nov	16,6	15,7	11,6	16,3	6,8	12,7	9,9	44,4	31,5	34,0	23,2
Dec	18,6	16,7	10,5	13,3	6,6	9,6	9,4	44,7	25,2	36,9	28,0
Janv	31,9	17,2	15,5	14,6	6,0	13,7	10,8	42,0	25,2	29,6	25,6
Fev	11,0	15,6	8,6	9,5	4,6	9,3	7,8	34,9	14,4	28,9	21,5
Mars	15,2	11,4	13,9	13,2	5,0	7,6	9,1	49,7	19,8	33,4	25,1
Avril	16,2	20,8	15,0	16,2	9,1	13,6	11,6	43,5	18,0	32,9	31,8
Mai	12,6	20,5	17,4	16,4	9,7	17,2	9,7	42,9	26,1	26,9	34,9
Juin	8,2	4,2	7,8	8,6	5,8	11,8	6,4	24,5	19,8	13,3	14,2
Juil	1,0	5,4	3,2	3,8	2,9	2,5	1,4	9,3	8,1	4,7	4,7
Aout	4,4	4,2	5,2	5,9	8,7	8,4	6,6	16,3	4,5	15,5	12,7
Précipitations moyennes annuelle (1975-2017) : P											
La somme	178,0	191,7	143,6	153,8	101,4	153,9	123,4	430,9	243,0	318,9	277,5
Précipitations pour le mois le plus pluvieux de l'année : P_m											
P_m	31,9	35,2	19,0	18,8	20,5	30,1	24,1	49,7	31,5	36,9	34,9
P_i^2/P											
Sept	2,5	6,5	2,5	1,9	4,1	5,9	4,7	4,6	2,3	4,2	3,5
Oct	2,5	3,2	1,7	2,3	2,4	1,9	2,2	2,7	3,0	2,2	2,2
Nov	1,5	1,3	0,9	1,7	0,5	1,1	0,8	4,6	4,1	3,6	1,9
Dec	2,0	1,4	0,8	1,2	0,4	0,6	0,7	4,6	2,6	4,3	2,8
Janv	5,7	1,5	1,7	1,4	0,4	1,2	0,9	4,1	2,6	2,8	2,4
Fev	0,7	1,3	0,5	0,6	0,2	0,6	0,5	2,8	0,9	2,6	1,7
Mars	1,3	0,7	1,3	1,1	0,2	0,4	0,7	5,7	1,6	3,5	2,3
Avril	1,5	2,3	1,6	1,7	0,8	1,2	1,1	4,4	1,3	3,4	3,6
Mai	0,9	2,2	2,1	1,7	0,9	1,9	0,8	4,3	2,8	2,3	4,4
Juin	0,4	0,1	0,4	0,5	0,3	0,9	0,3	1,4	1,6	0,6	0,7
Juil	0,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,3	0,1	0,1
Aout	0,1	0,1	0,2	0,2	0,8	0,5	0,3	0,6	0,1	0,8	0,6
Indices d'érosivité en (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ an⁻¹)											
IF	5,7	6,5	2,5	2,3	4,1	5,9	4,7	5,7	4,1	4,3	4,4
IFA	19,1	20,7	13,9	14,5	11,2	16,2	13,1	40,1	23,1	30,1	26,2
R_A	22,0	24,9	13,6	14,5	9,9	17,2	12,6	66,9	29,4	43,7	35,3
R_{RA}	33,70	35,87	26,49	27,36	22,52	29,76	25,42	59,07	39,02	47,64	42,81
R_{RF}	17,12	19,94	9,50	10,29	6,39	12,64	8,59	67,51	24,49	39,91	30,72

Tableau n°13 : (d) Estimation des différents indices d'érosivité des pluies

Station	HAMLA	SEGUENE	EXP.	DJOUAB	E	TIXTER	KASDALI	EMBAREK	H	L	CHIOUKH
Code ANRH	70308	70309	70316	90301	150101	150614	150707	150801	170401	170501	170503
Précipitations moyennes mensuelles (1975-2017) : P_i											
Sept	30,5	44,2	43,8	16,7	30,9	22,7	32,2	28,6	14,1	14,7	24,3
Oct	25,1	37,0	29,6	26,5	35,2	22,5	24,8	25,6	9,9	13,5	18,9
Nov	36,1	50,7	36,9	32,3	50,0	21,2	37,1	31,2	5,6	12,8	17,5
Dec	32,1	52,1	36,0	44,5	64,2	23,1	42,8	34,5	6,7	10,9	20,6
Janv	36,6	47,4	35,2	38,1	61,0	18,7	40,5	37,0	11,4	15,4	25,4
Fev	34,4	39,5	29,0	28,9	51,1	17,1	34,9	25,8	9,5	11,7	14,7
Mars	33,5	57,6	40,4	31,3	44,3	24,7	47,0	31,7	13,1	11,0	22,5
Avril	33,7	47,6	38,2	32,4	53,7	30,2	45,1	39,0	12,2	16,9	26,4
Mai	29,7	44,8	39,6	24,8	37,2	29,4	42,7	33,2	8,0	18,4	22,6
Juin	16,0	24,4	23,3	10,7	9,5	11,1	20,8	16,1	4,2	8,2	21,4
Juil	2,3	9,0	8,2	3,4	7,6	5,3	9,2	3,6	6,4	3,9	2,4
Aout	9,9	15,3	16,0	5,6	12,2	9,1	12,2	7,0	3,5	4,2	11,6
Précipitations moyennes annuelle (1975-2017) : P											
La somme	319,9	469,5	376,2	295,1	457,0	235,2	389,3	313,2	104,4	141,6	228,1
Précipitations pour le mois le plus pluvieux de l'année : P_m											
P_m	36,6	57,6	43,8	44,5	64,2	30,2	47,0	39,0	14,1	18,4	26,4
P_i^2/P											
Sept	2,9	4,2	5,1	0,9	2,1	2,2	2,7	2,6	1,9	1,5	2,6
Oct	2,0	2,9	2,3	2,4	2,7	2,2	1,6	2,1	0,9	1,3	1,6
Nov	4,1	5,5	3,6	3,5	5,5	1,9	3,5	3,1	0,3	1,2	1,3
Dec	3,2	5,8	3,4	6,7	9,0	2,3	4,7	3,8	0,4	0,8	1,9
Janv	4,2	4,8	3,3	4,9	8,1	1,5	4,2	4,4	1,2	1,7	2,8
Fev	3,7	3,3	2,2	2,8	5,7	1,3	3,1	2,1	0,9	1,0	0,9
mars	3,5	7,1	4,3	3,3	4,3	2,6	5,7	3,2	1,6	0,9	2,2
Avril	3,5	4,8	3,9	3,5	6,3	3,9	5,2	4,8	1,4	2,0	3,1
Mai	2,8	4,3	4,2	2,1	3,0	3,7	4,7	3,5	0,6	2,4	2,2
Juin	0,8	1,3	1,4	0,4	0,2	0,5	1,1	0,8	0,2	0,5	2,0
Juil	0,0	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,4	0,1	0,0
Aout	0,3	0,5	0,7	0,1	0,3	0,4	0,4	0,2	0,1	0,1	0,6
Indices d'érosivité en (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ an⁻¹)											
IF	4,2	7,1	5,1	6,7	9,0	3,9	5,7	4,8	1,9	2,4	3,1
IFA	31,0	44,5	34,7	30,8	47,4	22,4	37,1	30,7	10,0	13,4	21,2
R_A	45,6	78,4	54,0	45,1	86,3	28,0	59,7	44,9	8,4	13,0	25,8
R_{RA}	48,67	63,98	53,01	48,43	67,13	38,09	55,77	48,31	20,72	25,86	36,57
R_{RF}	42,05	82,03	51,80	41,54	92,26	23,09	58,64	41,29	5,22	8,96	20,91

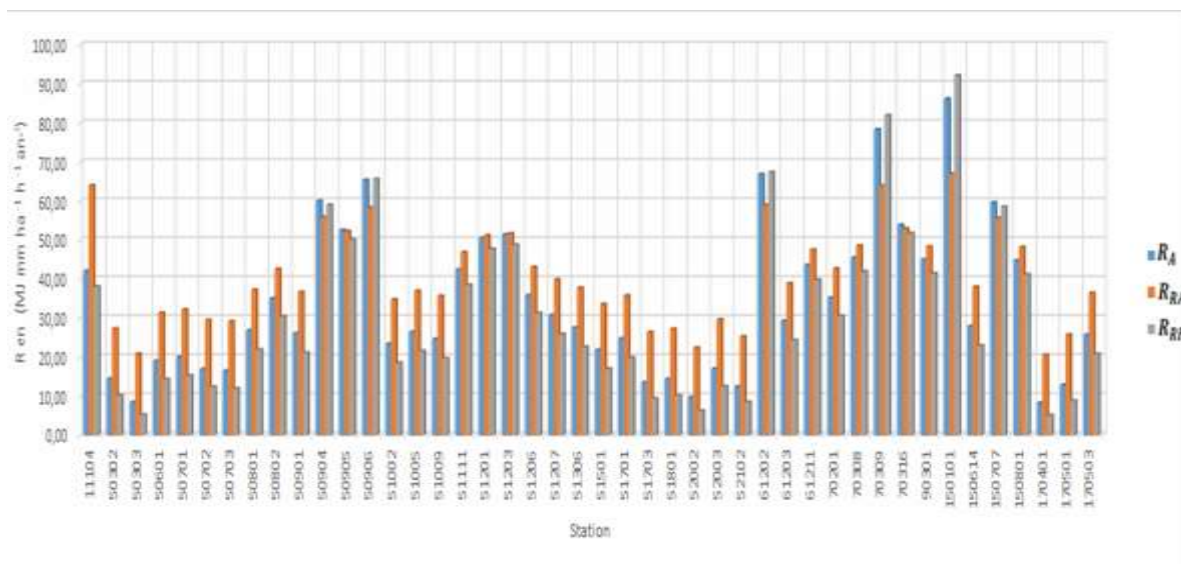


Figure n°23 : Comparaison de différents indices d'érosivité des pluies

Aussi, (le tableau n°14) explique les corrélations existantes entre les différents indices d'érosivité des pluies et montre les relations entre ces indices et les différents paramètres topo-géographiques.

La corrélation entre les différents indices est hautement significative au seuil de 5 % et 1 % (le coefficient de corrélation varie entre 0,700 et 0.998), cela signifie qu'il existe un lien très fort entre ces indices. Ce lien existe aussi entre les différents indices et les paramètres topo-géographiques caractérisant les stations pluviométriques, mais nettement avec moins de signification.

Tableau n°14 : Matrices de corrélation Indices d'érosivité-paramètres topo-géographiques

	<i>P(mm)</i>	<i>IF</i>	<i>IFA</i>	<i>R_A</i>	<i>R_{RA}</i>	<i>R_{RF}</i>
<i>P(mm)</i>	1,00					
<i>IF</i>	0,700	1,00				
<i>IFA</i>	0,994	0,757	1,00			
<i>R_A</i>	0,987	0,774	0,995	1,00		
<i>R_{RA}</i>	0,973	0,711	0,975	0,963	1,00	
<i>R_{RF}</i>	0,977	0,782	0,987	0,998	0,950	1,00
<i>X(km)</i>	0,499*	0,255*	0,474*	0,441*	0,412*	0,416*
<i>Y(km)</i>	0,657	0,354*	0,655	0,62**	0,667	0,597**
<i>Z(m)</i>	0,550**	0,381*	0,536*	0,551*	0,555*	0,554*
<i>DM(km)</i>	-0,636	-0,355*	-0,640	-0,605	-0,657	-0,580*

* : Corrélation non significative à un seuil de 5% ; ** : Corrélation non significative à un seuil de 1%

De ce fait et en cas de non-disponibilité des données pluviométriques, les relations mentionnées dans le tableau, peut être exploitée pour prédire la valeur de l'érosivité des pluies.

III-5 Cartographie de l'érosivité :

La démarche cartographique consiste à présenter les résultats de l'estimation de l'indice d'érosivité de Wischmeier (R_A , R_{RA} et R_{RF}) sur des esquisses cartographiques à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG) selon une méthode géostatistique. A l'inverse des autres techniques d'interpolation (classiques), la géostatistique utilise, en effet, une combinaison linéaire des données mesurées et elle tient compte en même temps de la position géographique du point considéré et le caractère aléatoire du phénomène en question.

III-5-1 Données de base

Ce travail s'est appuyé sur les données de précipitations moyennes mensuelles relatives à la période 1975-2017 de 44 postes pluviométriques représentatives de différents régimes pluviométriques du bassin versant de Chott el Hodna, Ces données ont été fournies par l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH).

La cartographie automatique des indices d'érosivité nécessite un modèle numérique du terrain d'espace étudié. La Figure n°24, présente le modèle numérique de terrain (MNT) de la région d'étude que nous avons utilisée. Il s'agit du MNT de la SRTM (Shuttle Radar Topographie Mission) à 30 secondes d'arc, dont les archives peuvent être téléchargées à l'adresse suivante : <http://glcfapp.glc.f.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>, qui a été rétablie, par interpolation, en utilisant les SIG GLOBAL MAPPER et MAPINFO.

La grille des distances à la mer (Figure n°25) a été établie sous SIG MapInfo, en partant des coordonnées géographiques des points de la ligne de côte et des nœuds de la grille MNT (Guidoum, 2017).

$$dm = \min \left[\sqrt{(x_0 - x_{\text{côte}})^2 + (y_0 - y_{\text{côte}})^2} \right]$$

x_0, y_0 : Coordonnées géographiques des nœuds de la grille MNT ;

$x_{\text{côte}}, y_{\text{côte}}$: Coordonnées géographiques des points de la ligne de côte.

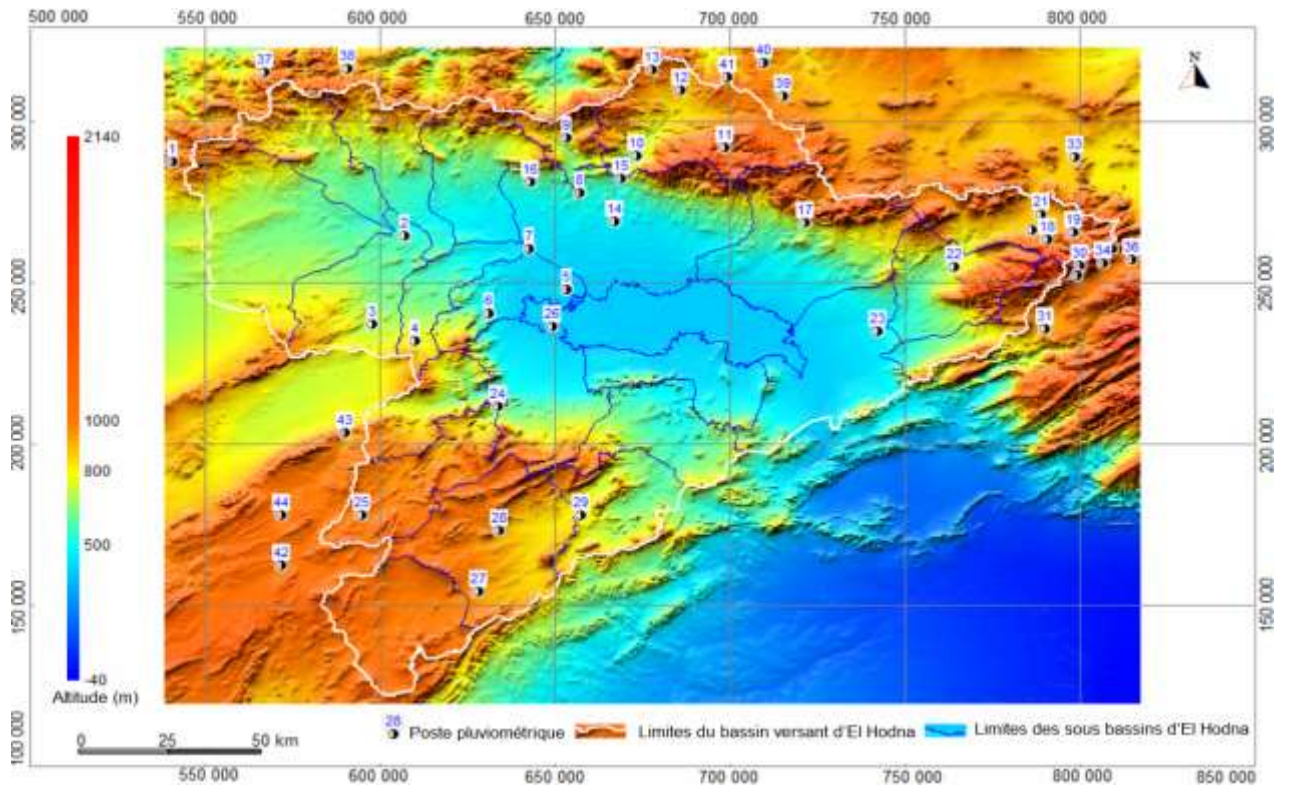


Figure n°24: MNT couvrant le bassin d'étude

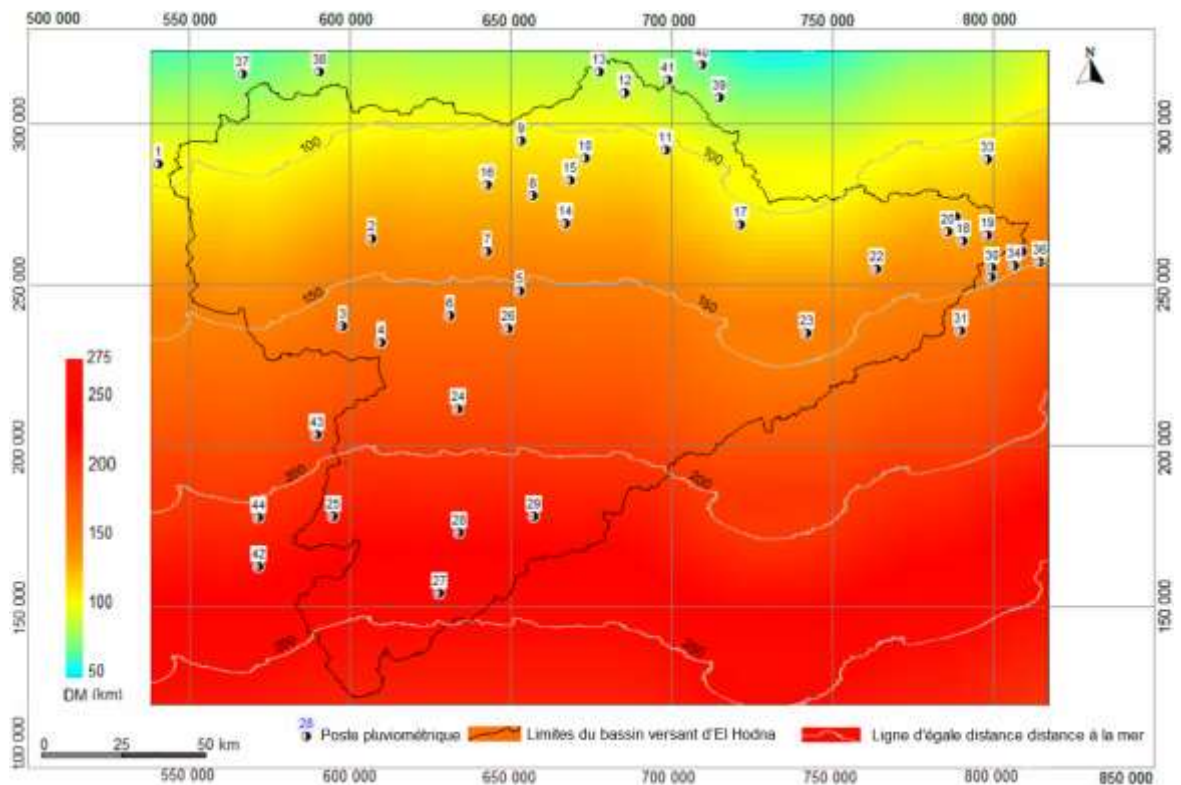


Figure n°25 : distance à la mer

III-5-2 Régression Indices d'érosivité-paramètres topo-géographiques :

L'agressivité des pluies s'explique en grande partie par des facteurs topo-géographiques généralement connus en tout point d'un bassin versant. L'érosivité des pluies peut donc être expliquée par l'altitude (Z), la distance à la mer (DM), et les coordonnées géographiques (X) et (Y).

Dans notre cas, par exemple (tableau 15), et en termes de variance, la latitude (Y) explique 44% de la distribution spatiale de l'indice d'érosivité de Wischmeier (R_{RA}) développée par Rango-Arnoldus (1987), soit ($r_m^2 = 0,44$). De même pour l'altitude, dont 31% de la variance sont expliquées pour cet indice. La distance de la mer explique seulement 37% de la distribution spatiale de l'indice d'érosivité de Wischmeier (R_A) développée par Arnoldus (1977), soit ($r_m^2 = 0,37$). L'impact de la longitude est moins net, on trouve qu'elle est peu corrélée, par exemple, avec l'indice d'érosivité de Wischmeier (R_{RF}) développée par Renard-freimund (1994), soit ($r_m^2 = 0,17$).

Par ailleurs, ces différents paramètres explicatifs sont liés entre eux : une partie de l'effet d'un paramètre topo-géographique se retrouve dans un autre. Une régression multiple « pas à pas » nous a permis de choisir ceux à retenir dans cette étude. Finalement, nous avons été amenés à retenir une dernière itération dont les indices d'érosivité se corrèlent mieux avec les quantités mentionnées dans le tableau n°15.

Tableau n°15 : Régression Indices d'érosivité-paramètres topo-géographiques

	r_m	Equation de régression
IF	0,64	$IF = -28,1 - 0,0214X + 0,0980Y + 0,00127Z + 0,175\sqrt{DM} + 6,87 \frac{x}{y}$
IFA	0,87	$IFA = -69,9 + 0,0178 X + 0,215 Y + 0,0193 Z + 0,079 DM$
R_A	0,86	$R_A = -199 + 0,517Y + 0,0402 Z + 3,45 \sqrt{DM} + 9,43 \frac{X}{Y}$
R_{RA}	0,89	$R_{RA} = 19,6 + 0,0667 Z - 0,0247 DM - 9,28 \frac{Z}{Y}$
R_{RF}	0,84	$R_{RF} = -245 + 0,676 Y + 0,0445 Z + 0,295 DM + 8,74 \frac{X}{Y}$

Les corrélations sont significatives à un seuil de 1%

III -5-3 Le Krigeage comme méthode d'interpolation :

Le Krigeage porte le nom de son précurseur, l'ingénieur minier sud-africain D.G. Krige. Cette méthode d'interpolation est largement préférée pour l'interpolation des paramètres climatiques. Elle part de l'idée que la valeur de la variable en un site non échantillonné dépend exclusivement de son positionnement dans le semis des points qui l'entourent et dont la valeur est connue (Lebel et Laborde 1988 ; Gratton 2002 in : Guidoum, 2017).

III -5-4 Élaboration des cartes des iso-érodent :

L'interpolation des valeurs des indices d'érosivité de Wischmeier calculées sur les 44 postes pluviométriques, a été effectuée aux 7400 nœuds d'une grille de 270 x 200 km². La mise en application du Krigeage a été réalisée par le logiciel Golden Surfer. La démarche cartographique a été appliquée pour l'élaboration de trois esquisses pour R_A , R_{RA} et R_{RF} . Les trois cartes élaborées sont des esquisses d'érosivité des pluies selon l'indice d'érosivité de Wischmeier (figure 27,28et 29).

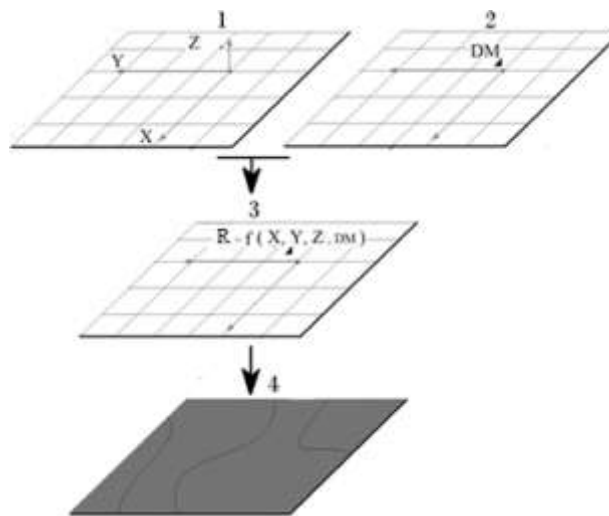


Figure n°26 : Étapes d'élaboration des esquisses cartographiques de l'indice d'érosivité de Wischmeier

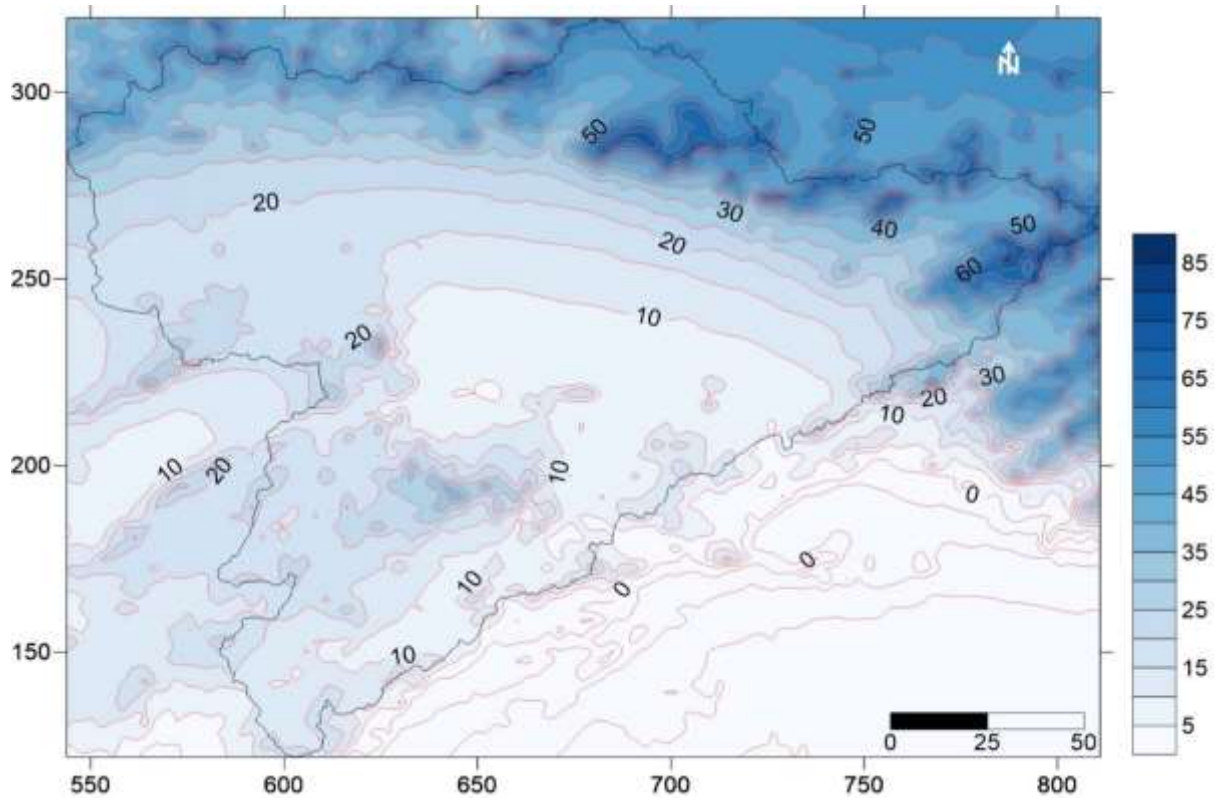


Figure n°27 : Indice d'érosivité de Wischmeier selon Formule Arnoldus (1977) : (R_A)

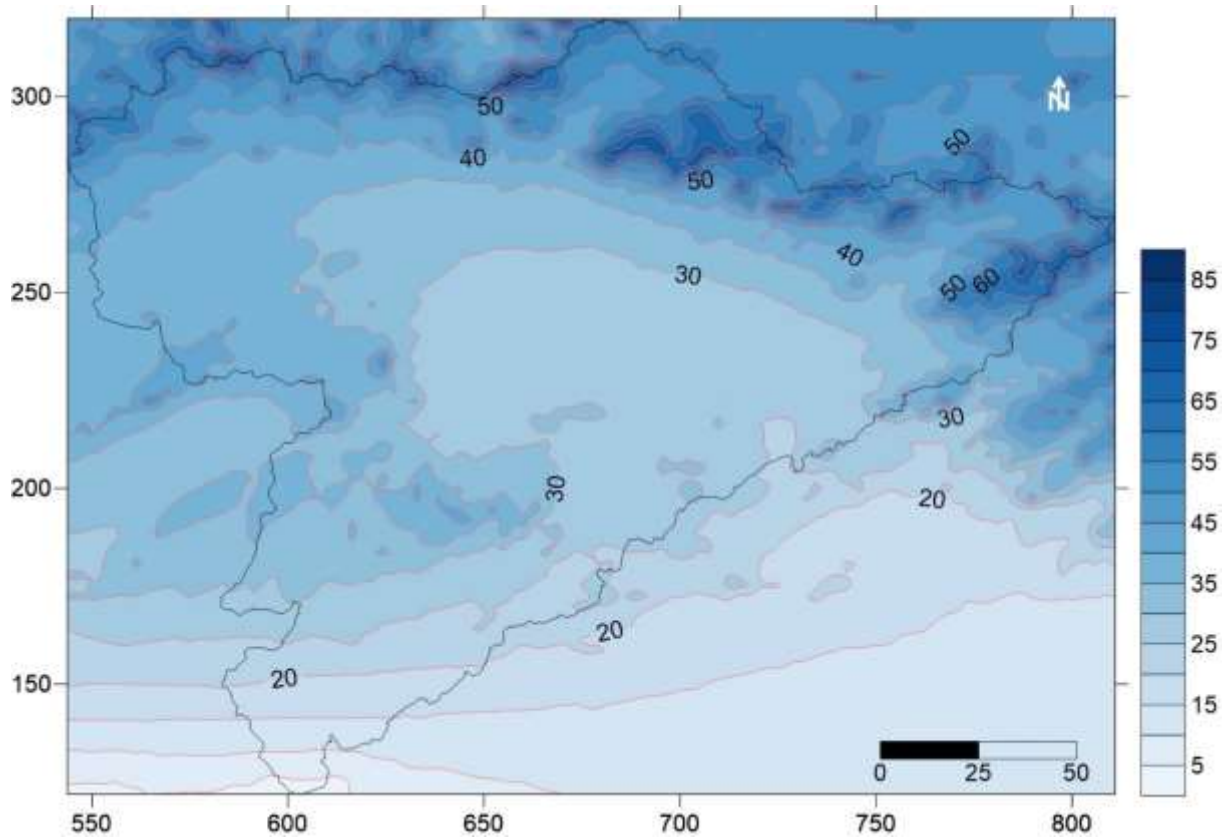


Figure n°28 : Indice d'érosivité de Wischmeier selon Formule Rango-Arnoldus (1987) : (R_{RA})

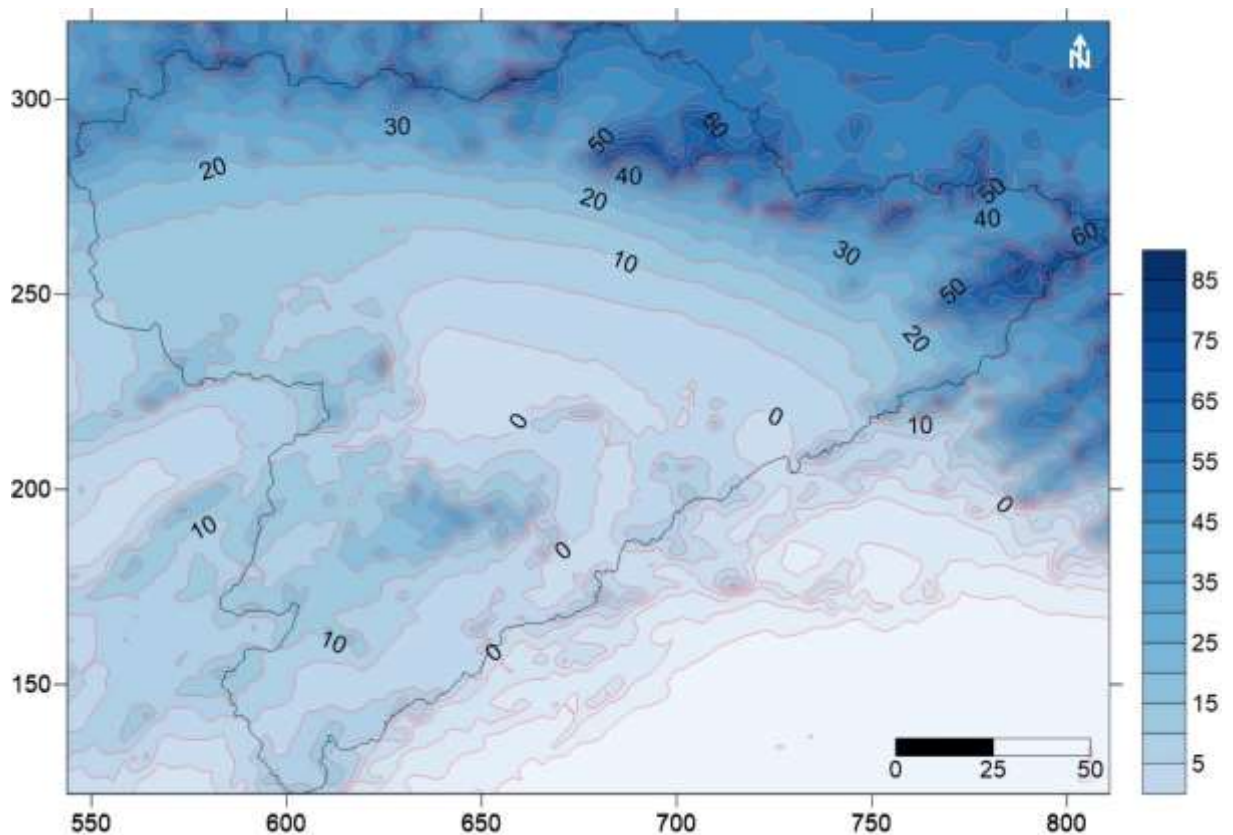


Figure n°29 : Indice d'érosivité de Wischmeier selon Renard-freimund (1994) : (R_{RF})

III -5-5 Interprétation des cartes des iso-érodent :

Les figures 27, 28, 29 représentent les trois esquisses des iso-érodent du bassin versant de Chott el Hodna avec les trois indices d'érosivité des pluies de Wischmeier (R_A , R_{RA} et R_{RF}) respectivement. De l'observation de ces esquisses des iso-érodent (1975/2017) ressortent les constatations suivantes :

- Notre cartographie des iso-érodent montre une variabilité spatiale de l'érosivité, caractérisée généralement par une diminution des indices de Wischmeier (R_A , R_{RA} et R_{RF}) du nord vers le sud du bassin. Ceci s'explique par l'affaiblissement des précipitations, vers le sud, en raison du dessèchement progressif des masses d'air chargées d'humidité.
- l'effet orographique de l'écran montagneux formé par, des monts du Titteri, la chaîne du Hodna et les monts de Belezma accentue le phénomène d'érosivité.
- En comparant les tracés des iso-érodent obtenus par trois indices, (figure 28, 29 et 30) la constatation qui s'impose est que les tracés sont semblables pour la majorité de la surface du bassin.

- Pour les trois indices cités précédemment, la forme générale des isohyètes se maintient sur l'ensemble du bassin d'étude. En plaine, les isohyètes sont globalement parallèles aux chaînes montagneuses. Dans la zone de montagne les isohyètes épousent la forme du relief.

- l'esquisse établie pour l'indice d'érosivité de Wischmeier selon Formule Rango-Arnoldus (1987), (R_{RA}) présente les valeurs les plus élevées par rapport aux deux autres indices (R_A et R_{RF}). On remarque un net décalage des iso-érodot 20, 25 et 30 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ an⁻¹ de l'indice (R_{RA}) vers le sud et une disparition quasi-totale des iso-érodot 5, 10 et 15 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ an⁻¹.

- Les deux autres esquisses (R_A et R_{RF}) ont relativement des tracés semblables avec des valeurs de l'indice d'érosivité de Wischmeier largement proches.

En somme, on a pu élaborer des esquisses des iso-érodot du grand bassin versant de Chott el Hodna qui nous permettrons de connaître d'une manière assez facile et simplifiée la valeur de l'érosivité des pluies dans n'importe quel point du bassin.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'indice d'érosivité des pluies est un outil précieux pour la prévision de l'érosion potentielle d'une région.

Ce travail a fait ressortir l'opportunité de l'estimation du facteur de l'érosivité des pluies R sur le bassin de Chott el Hodna au biais du système d'information géographique (SIG), et des séries pluviométriques mensuelles pour la période (1975-2017).

Visant à mettre en évidence la spatialisation de l'érosivité des pluies du bassin de Chott el Hodna sur un support cartographique simple, permettant une représentation synthétique facile à analyser, une bonne connaissance de la structuration des champs de l'indice d'érosivité de Wischmeier dans l'espace s'avère nécessaire.

Le bassin versant endoréique de Chott el Hodna, est situé au centre de l'Algérie, à l'extrême des hauts plateaux. Il est caractérisé par un climat semi-aride capricieux, marqué par une irrégularité spatiotemporelle remarquable des précipitations et de leur agressivité. Les températures fortes en saison estivale et basses en saison hivernale.

L'observation et l'analyse des résultats d'estimation de l'indice de l'érosivité des pluies de Wischmeier, nous a permis de constater que les valeurs de l'indice utilisé par Arnoldus (1977) et celui proposé par Renard-freimund (1994) sont relativement proches. Ces deux indices sont basés sur l'indice de Fournier-Arnoldus.

Alors que, les valeurs estimées à partir de l'approche de Rango-Arnoldus (1987) sont les plus élevées et bien différentes. En effet, la majorité des auteurs qui ont utilisé le modèle de Wischmeier pour la quantification de l'érosion au Maghreb, adopte pour l'estimation de l'érosivité des pluies, la formule de Rango-Arnoldus (1987)

Par ailleurs, du fait que l'approche de Fournier-Arnoldus (1987) tient compte les variations du régime pluviométrique annuel, elle donne des valeurs d'érosivité clairement plus élevées que les celles de Fournier (1960).

Une forte valeur de l'indice d'érosivité caractérise la partie nord du bassin proche de la mer méditerranéen et à particularité montagneuse. Les valeurs de l'indice d'érosivité les plus élevés correspondent aux pluviométries élevées.

La présente approche a mis en évidence l'influence de la géo-morphométrie sur le phénomène de l'érosivité des pluies. En effet, la régression multiple a permis d'élaborer les meilleurs modèles statistiques pour l'indice R à cartographier et de tracer trois esquisses d'iso-érodent (1975-2017). Ces dernières fait ressortir le rôle prépondérant du relief et de la position

Conclusion Générale

géographique dans la répartition spatiale de l'érosivité. En plus, elles peuvent être utilisées dans les zones démunies d'informations pluviographiques.

En générale, les indices d'érosivité estimés augmente lorsque l'on se rapproche de la méditerranée et des chaînes montagneuses, ce qui est naturel car ces zones sont davantage soumises aux précipitations que le reste du bassin d'étude.

En fin, l'indice de Fournier-Arnoldus (1987), varie de 10 et 47. De ce fait et selon la classification proposée par ces auteurs le risque d'érosivité des pluies est très faible ($IFA < 60$) pour l'ensemble des stations du bassin de Chott El Hodna.

Cependant, malgré des valeurs d'indice d'érosivité inférieur à 60 dans ce bassin, l'érosion continue à prendre des proportions considérables. Cette situation semble indiquer que la vulnérabilité des terrains, l'alternance de périodes sèches et humides et l'impact défavorable des activités humaines favorisent l'effet de l'érosivité des pluies sur le sol.

Des solutions devront être misent en place afin de limiter et réduire le risque érosif de la pluie, et lutter contre les dégâts causés par l'érosion hydrique.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

1. Arabi M. et Roose E., 1989- Influence de quatre systèmes de production en zone méditerranéenne en moyenne montagne en Algérie. Bull. Réseau Erosion, (9), 39-51.
2. Arlundus H. M. J., 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco, FAO Soils Bulletin.
3. Arnoldus, H. M. J. (1980). Methodologie used to determine the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco, Bulletin F.A.O.
4. Barthès B, Roose É (2001) La stabilité de l'agrégation, un indicateur de la sensibilité des sols au ruissellement et à l'érosion : validation à plusieurs échelles. Les Cahiers d'études et de recherche francophones, l'Agricultures, 10.
5. Bouderbala D., (2019).Analyse et suivi du phénomène de l'érosion hydrique dans le bassin versant de Oued El Hammam, dans le Nord-Ouest algérien. Thèse de Doctorat en Sciences de l'eau et de l'environnement. Université Mustapha STAMBOULI, Mascara.
6. Bouderbala Dj., (2019). Analyse et suivi du phénomène de l'érosion hydrique dans le bassin versant d'Oued El Hammam, dans le Nord Ouest algérien. Thèse de Doctorat en Sciences de l'eau et de l'environnement.
7. Cormary Y. et al, 1964 : Erosion, ruissellement, travail du sol. Résultats de 18 mois d'expérimentation sur parcelle. C .E . S. D. 15, N° 91.
8. Deffontaines, J.P. and De Montard, F., 1968. Essai d'appréciation du danger d'érosion dans les vergers de fortes pentes en moyen Vivarais. Ann. Agron., 19.
9. Demmak A (1982) Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Paris VI.
10. Dernancourt, 1995). MODELISATION DE L'EROSION HYDRIQUE PAR LE MODELE SEAGIS. CAS DU BASSIN VERSANT DU BARRAGE SILIANA Présenté en vue de l'obtention du MASTERE DE RECHERCHE EN SCIENCES DE LA TERRE
Parcours : Géologie Appliquée à l'Environnement
11. Elbouqdaoui K., Ezzine H., Zahraoui M. et al. 2006. Évaluation du risque potentiel d'érosion dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen Atlas, Maroc). Science et changements planétaires/Sécheresse, 17, 3.
12. Fournier F., (1960) : Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. PUF, Paris, France.
13. Fournier F., (1960). Climat et Erosion. PUF, Paris. France.

Références Bibliographiques

14. Furlan A, Bonotto DM, Gumiere SJ (2011) Development of environmental and natural vulnerability maps for Brazilian coastal at Saõ Sebastiaõ in Saõ Paulo State. *Environ Earth Sci* 64.
15. Gaussen H, Bagnouls F (1952) L'Indice xérothermique. *B. de l'Association des Géographes français*, 222 et 223
16. Green, T. & Houk, D. (1980). The resuspension of underwater sediment by rain. *Sedimentology*, 27.
17. Guidoum A, Nemouchi A, Hamlat A (2014) Modeling and mapping of water erosion in northeastern Algeria using a seasonal multicriteria approach. *Arab J Geosci* 7.
18. Helioui Y., Hajri J., 2015. (Érosivité des pluies dans la région du cap bon (Tunisie). XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège.
19. Hudson, N. W. (1971). *Raindrop Size in Soil conservation* Cornell University Press. Ithaca. New York. USA
20. Kalman, R. (1967). Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin de Sebou. *Projet Sebou, Rapp. Ronéo*, 40p.
21. Kouri L., 1993- L'érosion hydrique des sols dans le bassin versant de l'oued Mina. Etude des processus et type de fonctionnement des ravins dans la zone des marnes tertiaires. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
22. Laborde J P, Mouhous M (1998) Logiciel Hydrolab, version 98.2, équipe Gestion et valorisation de l'environnement de l'UMR 5651 « Espace » du CNRS.
23. Lefrançois J (2007) Dynamiques et origines des matières en suspension sur de petits bassins versants agricoles sur schiste. Thèse de Doctorat, Sciences de la Terre, Université de Rennes I.
24. Maaliou A. (2011). Contribution à l'étude de l'impact de l'érosivité des pluies sur le transport solide de quelques grands bassins versants. Mémoire de Magister en Hydraulique, Université des sciences de la technologie, Houari Boumediene, 87 p.
25. Maaliou A., Liatim M., Bouhade M., (2014). Evaluation et cartographie de l'indice d'érosivité de pluie « R » de deux grands bassins versants en Algérie (Côtier algérois et Isser). Project: Experimental Study of Soil Erosion, LEGHYD's Lab, Algérie Equipment n°53.
26. Maamar Kouadri K., (2019). Développement d'outils spatiaux et cartographie des risques d'érosion hydrique des sols dans le tell oranais. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, université Abdelhamid ben Badis Mostaganem.

Références Bibliographiques

27. Maamar Kouadri K., 2012. Étude de l'érosivité des pluies et de l'érodibilité des sols dans le tell oranais. Mémoire de magister : Gestion Conservatoire des Eaux, des Sols et de l'Environnement. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
28. Masson J. M., 1971, L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthode expérimentale pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ. Thèse, Université des Sciences et Techniques de Languedoc.
29. Mostephaoui T., Merdas S., Sakaa B., Hanafi M. T et Benazzouz M.T. (2013) Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant d'el Hamel (Boussaâda) Algérie. Journal Algérien des Régions Arides N° Spécial.
30. Mounirou L A (2012) Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : Quantification et transposition des données. Thèse de doctorat : Hydrologie appliquée, Université Montpellier II.
31. Pierre-Olivier Mécanismes de l'érosion diffuse des sols Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université de d'orléans
32. Rango A. et Arnoldus H. M. J., (1987). Aménagement des bassins versants. Chiers techniques de la F.A.O.
33. Renard, K.G. and Freimund, J.R. (1994) Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R Factor in the Revised USLE. Journal of Hydrology, 157.
34. Roberto A. Cecílio, Michel C. Moreira, José Eduardo M. Pezzopane, Fernando F. Pruski, Danilo C. Fukunaga, (2013). Assessing rainfall erosivity indices through synthetic precipitation series and artificial neural networks. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 85(4).
35. Roose (1994). ETUDE DE L'EROSIVITE DES PLUIES ET DE L'ERODIBILITE DES SOLS DANS LE TELL ORANAIS MEMOIRE DE MAGISTER.
36. Roose E, Sabir M (2002) Stratégies traditionnelles de conservation de l'eau et des sols dans le bassin méditerranéen : classification en vue d'un usage renouvelé. Bulletin Réseau Érosion, 21.
37. Roose E., Sabir M, Arabi M, Morsli B, Mazour M (2012) Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. Géographie Physique et Environnement, 6.

Références Bibliographiques

38. Roose E.J., 1973. Natural mulch or chemical conditioner for reducing soil erosion in humid tropical areas (Symposium ((Uses of and experimental methods for Chemical Soil Conditioners» at the annual meeting of the Soil Science Society of America, Las Vegas, Nevada, 16-11-1973). Soil Science Society of America, Special Publication, 4, chap. 12.
39. Roose, E. (1977). Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest - Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales ; Paris.
40. Touaïbia B, Inegliz S, Ould Amara A (2006) Couplage d'une analyse en composantes principales et d'une approche géostatistique pour l'élaboration de cartes pluviométriques du centre de l'Algérie du nord. Rev Sci Eau 19(3).
41. Toumi, (2013) .Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued mina.Thèse de Doctorat en Hydraulique.
42. Wischmeier WH, Smith DD (1960) A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm-planning. In: Proc. 7th Intern Congress on Soil Science, Brussels, Belgium.
43. Wischmeier WH, Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agric. Handbook 537. Department of Agriculture, Washington, DC.