

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

Ecole nationale polytechnique

Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherches Sciences de l'Eau



Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Thème

**Identification et évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de  
Oued Safsaf (Nord-Est Algérien).**

**Réalisé par :**

M. BOUFEDJI Rachid Rami

M. KHELIFA Bilel

Sous la direction de M. TACHI Salah Eddine et M. BOUGUERRA Hamza

Présenté et soutenu publiquement le 11/07/2021

**Composition de jury :**

Présidente :	M <sup>me</sup> BENMAMAR Saâdia	Pr	ENP Alger.
Promoteur :	Mr. TACHI Salah Eddine	M.C.A	ENP Alger.
Co-Promoteur :	Mr. BOUGUERRA Hamza	M.C.B	UBM Annaba.
Examinatrice :	M <sup>me</sup> MAROUF Zineb	Doctorante	ENP Alger.
Examineur :	Mr. ALIRAHMANI Salah	M.C.B	USTHB.
Examineur :	Mr. BELHADJ Omar	M.A.A	ENP Alger.

**ENP 2021**



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

Ecole nationale polytechnique

Département d'Hydraulique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Laboratoire de Recherches Sciences de l'Eau

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Thème

**Identification et évaluation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de  
Oued Safsaf (Nord-Est Algérien).**

**Réalisé par :**

M. BOUFEDJI Rachid Rami

M. KHELIFA Bilel

Sous la direction de M. TACHI Salah Eddine et M. BOUGUERRA Hamza

Présenté et soutenu publiquement le 11/07/2021

**Composition de jury :**

Présidente :	M <sup>me</sup> BENMAMAR Saâdia	Pr	ENP Alger.
Promoteur :	Mr. TACHI Salah Eddine	M.C.A	ENP Alger.
Co-Promoteur :	Mr. BOUGUERRA Hamza	M.C.B	UBM Annaba.
Examinatrice :	M <sup>me</sup> MAROUF Zineb	Doctorante	ENP Alger.
Examineur :	Mr. ALIRAHMANI Salah	M.C.B	USTHB.
Examineur :	Mr. BELHADJ Omar	M.A.A	ENP Alger.

**ENP 2021**

## ملخص :

التعرية مشكلة طبيعية تهدد مناطق واسعة من شمال الجزائر، يهدف عملنا إلى تقدير الخسائر الأرضية على مستوى مستجمع مياه واد الصفصاف في نظام المعلومات الجغرافية باستخدام المعادلة العالمية المعدلة لخسارة الأرض (RUSLE). يأخذ تطبيق هذا الأخير في الاعتبار خمسة عوامل: التآكل الناجم عن هطول الأمطار (R)، والتضاريس (LS)، وقابلية تآكل التربة (K)، والغطاء النباتي (C) وممارسات مكافحة التعرية (P). سمحت لنا نتيجة هذه العوامل بإنشاء خريطة خسارة لمستجمع المياه بأكمله وتحديد المناطق الحرجة التي تتطلب تدخلاً فورياً، تظهر النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام نموذج RUSLE أن التآكل يؤثر على الحوض بأكمله ولكن على مستويات مختلفة. بمتوسط معدل خسارة [25.12 طن / هكتار / سنة] في 2003 و [24 طن / هكتار / سنة] في 2017. تتجاوز القيمتان متوسط حد تحمل التربة فيما يتعلق بالتعرية المائية (7 طن / هكتار / سنة)، فإن غالبية منطقة الدراسة تخضع لمعدل تآكل أكبر من أو يساوي 20 طن / هكتار / سنة، وبالتالي فإن حوض وادي الصفصاف مهدد بشكل خطير بظواهر التآكل.

**الكلمات المفتاحية:** التعرية المائية، الخرائط، الحساسية، واد الصفصاف، معادلة العالمية المعدلة لخسارة الأرض، نظام المعلومات الجغرافية

## Abstract:

Erosion is a natural problem that threatens large areas of northern Algeria, Our work aims at estimating the soil losses at the level of the Oued Safsaf watershed In a Geographic Information System using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) of Wischmeier. The application of the latter takes into account five factors: rainfall erosivity (R), topography (LS), soil erodibility (K), vegetation covers (C) and anti-erosion practices (P). The result of these factors allowed us to create a map of losses over the entire watershed and to identify critical areas that require immediate intervention, The results obtained using the RUSLE model show that erosion affects the entire watershed but at different levels. With an average loss rate [25.12 t/ha/yr.] in 2003 and [24 t/ha/yr.] in 2017. Both values exceed the average limit of soil tolerance to water erosion (7 t/ha/year), the majority of the study area suffers an erosion rate greater than or equal to 20 t/ha/year, so the basin of Wadi Safsaf is seriously threatened by erosive phenomena.

**Keywords:** Water erosion, mapping, sensitivity, Wadi Safsaf, RUSLE, GIS.

## Résumé :

L'érosion est un problème naturel qui menace de vastes zones de l'Algérie du nord. Notre travail vise à estimer les pertes au sol au niveau du bassin versant Oued Safsaf à l'aide d'un environnement SIG en utilisant l'équation universelle des pertes au sol révisées (RUSLE) de Wischmeier. L'application de cette dernière prend en compte cinq facteurs : l'érosivité des pluies (R), la topographie (LS), l'érodabilité du sol (K), la couverture végétale (C) et les pratiques antiérosives (P). Les résultats de la spatialisation de ces facteurs nous ont permis de créer une carte des pertes sur l'ensemble du bassin versant et d'identifier les zones critiques qui nécessitent une intervention immédiate, Les résultats obtenus en utilisant le modèle RUSLE montrent également que le risque érosif touche l'ensemble du bassin mais à des niveaux différents. Avec un taux moyen de pertes [25,12 t/ha/an] en 2003 et de [24 t/ha/an] en 2017. Les deux valeurs dépassent la limite de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion hydrique (7 t/ha/an), la majorité de la zone d'étude subit un taux d'érosion supérieur ou égal à 20 t/ha/an, donc le bassin d'oued Safsaf est sérieusement menacée par le phénomène d'érosion.

**Mots clés:** Érosion hydrique, cartographie, sensibilité, Oued Safsaf, RUSLE, SIG.

## Remerciements :

*Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à nos promoteurs  
Mr TACHI Salah Eddine et Mr BOUGHERRA Hamza, qui  
nous ont encadrés, guidés, assistés et conseillés.*

*Nous tenons également à remercier M<sup>me</sup> Saida BENMAMAR  
Merci à elle de nous fourni les outils nécessaires à la réussite de  
ce mémoire.*

*Nous remercions tout particulièrement M<sup>me</sup> MAROUF Zineb  
pour son aide.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous les personnes  
et intervenants qui, par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils  
et leurs critiques, ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous  
rencontrer et de répondre à nos questions lors de nos  
investigations.*

*Enfin, nous tenons à remercier aussi :*

- \* Les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer  
notre travail.*
- \* L'ensemble des enseignants qui nous ont suivis  
durant notre cycle d'étude.*
- \* Le corps enseignant et les étudiants de l'ENP  
Alger.*

## Dédicace :



*Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail, en signe  
de respect et de reconnaissance envers :*

*Ma mère : SOUAD*

*Mon père : TOUFIK*

*Pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils  
ont fait preuve pour que je réussisse. Je le dédie également à :*

*Mes sœurs : AYA et MELISSA*

*Mes tantes : KARIMA et SAMAH*

*Mes Cousins : SIDALI ; ABDELLEAH, KARIM ;  
NOREDINE ; RYM, NAILA et SARAH.*

*Mes amis : SIDALI, MEHDI, AHMED, HAKIM,  
YASSINE, RAOUF, MOHAMED et BILEL.*

*En un mot, à toute ma famille BOUFEDJI, mes amis et ceux  
qui ont*

*Contribué de près ou de loin à ma formation*

**RAMI 2021**

## Dédicace :



*Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail, en signe  
de respect et de reconnaissance envers :*

*Mon père : DJELLOUL.*

*Ma mère : NACERRA.*

*Pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils  
Ont fait preuve pour que je réussisse. Je le dédie également à :*

*Mes sœurs : AHLLEM et MERIEM*

*MON frère : HAMZA.*

*Ma grand-mère : BAIDA*

*Mes cousins : ALI ; WASSIM, ABDELKADER et AHMED*

*Mes amis : NADJIB, RAOUF, RIADH, HILLEL,  
HOUCINE et RAMY.*

*Mes neveux : ABDERRAHMANE, OUBAYE, SOHEIB,  
SOUMAYA, LOKMANE et RIMES.*

*En un mot, à toute ma famille KHELIFA, mes amis et ceux qui  
Ont contribué de près ou de loin à ma formation.*

**BILEL 2021**

# SOMMAIRE

Liste des tables

Listes des figures

Liste des photos

Liste des abréviations

Nomenclature

**Introduction générale..... 16**

**Chapitre 1 : Aperçu bibliographique des processus d'érosion.... 19**

1.1 Introduction.....19

1.2 L'érosion.....19

**1.2.1 Définitions de l'érosion.....19**

1.3 Types d'érosion.....19

**1.3.1 L'érosion éolienne .....19**

**1.3.2 L'érosion aratoire ou mécanique sèche .....20**

**1.3.3 L'érosion hydrique .....21**

1.4 Méthodes pour l'identification de l'érosion.....25

    1.4.1 Méthode USLE .....25

**1.4.2 Méthode MUSLE.....26**

**1.4.3 Méthode RUSLE .....26**

1.5 Exemple des travaux sur l'érosion .....27

Conclusion.....28

**Chapitre 2 : Description de la zone d'étude ..... 30**

2.1. Introduction.....30

2.2. Situation géographique .....30

2.3. Géologie.....32

2.4. L'hydrographie.....33

2.5. La nappe alluviale de l'Oued Safsaf.....34

**2.5.1. Situation géographique .....34**

**2.5.2. Substratum .....35**

**2.5.3. L'exutoire .....35**

2.6. Pluviométrie .....35

2.7.	Caractéristiques climatologiques .....	36
2.7.1.	La température.....	37
2.7.2.	L'ensoleillement .....	38
2.7.3.	L'évaporation .....	39
2.7.4.	Les Vents.....	40
2.7.5.	L'humidité.....	41
2.7.6.	L'évapotranspiration.....	42
2.7.7.	Synthèse climatique .....	43
	Conclusion.....	45
<b>Chapitre 3 : Matériels et Méthodes des facteurs d'érosion .....</b>		<b>47</b>
3.1.	Introduction.....	47
3.2.	Méthodologie .....	47
3.2.1.	Facteur d'érosivité des pluies (R) .....	48
3.2.2.	Facteur topographique (LS) .....	50
3.2.3.	Facteur du couvert végétal (C).....	51
3.2.4.	Facteur d'érodabilité du sol (K) .....	54
3.2.5.	Facteur pratiques antiérosives (P) .....	56
	Conclusion.....	57
<b>Chapitre 4 : Discussion des résultats d'érosion .....</b>		<b>59</b>
4.1.	Introduction.....	59
4.2.	Facteur R.....	59
4.3.	Facteur LS.....	60
4.4.	Facteur C.....	62
4.5.	Facteur K .....	66
4.6.	Facteur P .....	68
4.7.	Taux d'érosion .....	70
	Conclusion.....	73
<b>Conclusion générale .....</b>		<b>75</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>		<b>77</b>

# **LISTES DES TABLEAUX**

## **CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE**

<b>TABLEAU2-1 :MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLE DES PRECIPITATIONS DU BASSIN VERSANT OUED SAFSAF :</b> .....	35
<b>TABLEAU 2- 1:</b> MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLE DES PRECIPITATIONS.....	35
<b>TABLEAU 2- 2:</b> CARACTERISTIQUES DES STATIONS DE REFERENCE (SOURCE ANRH 2018).....	36
<b>TABLEAU 2- 3:</b> MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES DES TEMPERATURES .....	37
<b>TABLEAU 2- 4:</b> MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES DE L'ENSOLEILLEMENT. ....	38
<b>TABLEAU 2- 5:</b> MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLE DE L'EVAPORATION.....	39
<b>TABLEAU 2- 6:</b> MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLE DE LA VITESSE.....	40
<b>TABLEAU 2- 7:</b> DIRECTION ET FREQUENCE DES VENTS.....	41
<b>TABLEAU 2- 8:</b> MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLE DE L'HUMIDITE .....	42
<b>TABLEAU 2- 9:</b> MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLE DE L'EVAPOTRANSPIRATION .....	42
<b>TABLEAU 2- 10:</b> INDICE D'ARIDITE .....	44

## **CHAPITRE 3 : MATERIELS ET METHODES DE CALCUL DES FACTEURS D'EROSION**

<b>TABLEAU 3- 1:</b> VALEURS NDVI.....	52
<b>TABLEAU 3- 2:</b> CLASSIFICATION DU FACTEUR P .....	56

## **CHAPITRE 4 : DISCUSSION DES RESULTATS**

<b>TABLEAU 4- 1:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR D'EROSIVITE DES PLUIES.....	60
<b>TABLEAU 4- 2:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR TOPOGRAPHIQUE.....	61
<b>TABLEAU 4- 3:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR C EN 2003.....	63
<b>TABLEAU 4- 4:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR C EN 2017.....	64
<b>TABLEAU 4- 5:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR K EN 2003 .....	67
<b>TABLEAU 4- 6:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR P EN 2003 .....	68
<b>TABLEAU 4- 7:</b> REPARTITION DES CLASSES DU TAUX D'EROSION EN 2003 .....	70
<b>TABLEAU 4- 8:</b> REPARTITION DES CLASSES DU TAUX D'EROSION EN 2017 .....	72

## **LISTES DES FIGURES**

### **CHAPITRE 1 : APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE DES PROCESSUS D'ÉROSION**

<b>FIGURE 1- 1: MECANISMES DE L'ÉROSION HYDRIQUE.....</b>	<b>22</b>
---	-----------

### **CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE**

<b>FIGURE 2- 1: CARTES GEOGRAPHIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE (OUTIL SIG).....</b>	<b>31</b>
<b>FIGURE 2- 2: MOYENNES MENSUELLES DES PRECIPITATIONS. ....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURE 2- 3: CARTE GEOLOGIQUE DE LA PLAINE ALLUVIALE DE L'OUED SAFSAF .....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURE 2- 4: CARTE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE (OUTIL SIG).....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURE 2- 5: MOYENNES MENSUELLES ET ANNUELLES DES TEMPERATURES. ....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURE 2- 6: MOYENNES MENSUELLES DE L'ENSOLEILLEMENT. ....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURE 2- 7: MOYENNES MENSUELLES DE L'ÉVAPORATION. ....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURE 2- 8: MOYENNES MENSUELLES DE LA VITESSE DES VENTS .....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURE 2- 9: MOYENNES MENSUELLES DE L'HUMIDITE. ....</b>	<b>42</b>
<b>FIGURE 2- 10: MOYENNES MENSUELLES DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION.....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURE 2- 11: DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE. ....</b>	<b>44</b>

### **CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES DE CALCUL DES FACTEURS D'ÉROSION**

<b>FIGURE 3- 1: ORGANIGRAMME DE LA METHODOLOGIE UTILISEE. ....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURE 3- 2: CARTE DES PLUIES DU BASSIN VERSANT OUED SAFSAF (OUTIL SIG).....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURE 3- 3: CARTE DES PENTES DU BASSIN VERSANT OUED SAF SAF (OUTIL SIG).....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURE 3- 4: CARTE NDVI 2003 (OUTIL SIG).....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURE 3- 5: CARTE NDVI 2017 (OUTIL SIG).....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURE 3- 6: TRIANGLE DE CODE DE TEXTURE DU SOL BASE SUR LA CLASSIFICATION TEXTURALE (CENTRE ONTARIEN D'ÉVALUATION DES RESSOURCES EN SOLS ,1993).....</b>	<b>55</b>

### **CHAPITRE 4 : DISCUSSION DES RESULTATS**

<b>FIGURE 4- 1: CARTE DE REPARTITION DU FACTEUR R DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED SAF SAF (OUTIL SIG) .....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURE 4- 2: REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR D'ÉROSIVITE DES PLUIES (FACTEUR R).60</b>	

<b>FIGURE 4- 3:</b> CARTE DE REPARTITION DU FACTEUR LS DANS LE BASSIN VERSANT D'OUED SAFSAF (OUTIL SIG).....	61
<b>FIGURE 4- 4:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR TOPOGRAPHIQUE (FACTEUR LS). .....	62
<b>FIGURE 4- 5:</b> CARTE DE REPARTITION DU FACTEUR C DANS LE BASSIN VERSANT D'OUED SAF SAF EN 2003(OUTIL SIG).....	62
<b>FIGURE 4- 6:</b> CARTE DE REPARTITION DU FACTEUR C DANS LE BASSIN VERSANT D'OUED SAF SAF EN 2017(OUTIL SIG).....	63
<b>FIGURE 4- 7:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR C EN 2003 .....	64
<b>FIGURE 4- 8:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR C EN 2017.....	65
<b>FIGURE 4- 9:</b> CARTE DE REPARTITION DU FACTEUR K DANS LE BASSIN VERSANT D'OUED SAF SAF EN 2003(OUTIL SIG).....	66
<b>FIGURE 4- 10:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR K EN 2003 .....	67
<b>FIGURE 4- 11:</b> CARTE DE REPARTITION DU FACTEUR P DANS LE BASSIN VERSANT D'OUED SAF SAF EN 2003(OUTIL SIG).....	68
<b>FIGURE 4- 12:</b> REPARTITION DES CLASSES DU FACTEUR P EN 2003 .....	69
<b>FIGURE 4- 13:</b> CARTE DE REPARTITION DU TAUX D'EROSION EN 2003 (OUTIL SIG) .....	70
<b>FIGURE 4- 14:</b> REPARTITION DES CLASSES DU TAUX D'EROSION EN 2003 .....	71
<b>FIGURE 4- 15:</b> CARTE DE REPARTITION DU TAUX D'EROSION EN 2017 (OUTIL SIG) .....	71
<b>FIGURE 4- 16:</b> REPARTITION DES CLASSES DU TAUX D'EROSION EN 2017 .....	72

# **LISTES DES PHOTOS**

## **CHAPITRE 1 : APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE DES PROCESSUS D'ÉROSION**

- PHOTO 1- 1:** UNE TEMPÊTE DE SABLE EN SOMALIE EN 2011. (JOURNAL PRESSAFRIK 13/10/2013) .....20
- PHOTO 1- 2:** LE TRACE CARACTÉRISTIQUE LAISSÉ PAR LES EAUX DE RUISSELLEMENT EST UN SYMPTÔME DE L'ÉROSION RIGOLE QUI A ENGLOUTI LE SOL. (FICHE TECHNIQUE NO 12-052 DU MAAARO).....21
- PHOTO 1- 3:** UN CHARRIAGE IMPORTANT DANS LA RIVIÈRE LABIOD PENDANT LES CRUES (BENGUEMOUZA, 2011). .....24

## **CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE**

- PHOTO 2- 1:** BARRAGE ZERDEZAS (CLICHE ANRH). .....31

## **CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES DE CALCUL DES FACTEURS D'ÉROSION**

- PHOTO 3- 1:** EXEMPLE DE CALCUL (BANDE SPECTRALES) .....52

## **LISTE DES ABREVIATIONS :**

- **ANBT** : Agence Nationale des Barrages et de Transfert.
- **ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
- **BV** : Bassin versant.
- **MAAARO** : Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation et des affaires Rurales de l'Ontario Canada.
- **MNT** : Modèle Numérique de terrain.
- **MUSLE** : version modifiée de l'équation universelle des pertes au sol.
- **ONM** : Office National de Météorologie.
- **USDA** : Département de l'Agriculture des états Unis.
- **USLE** : Universal Soil Loss Equation (équation universelle des pertes au sol).
- **RUSLE** : Revized Universal Soil Loss Equation (version révisée de l'équation universelle des pertes au sol).
- **SIG** : Système d'information géographique

## Nomenclature :

	Définition	Unité
<b>A</b>	Perte en terre	[t/ha/an]
<b>A<sub>ij-in</sub></b>	Surface contributive à l'entrée de la cellule (i,j) (Flow accumulation)	m <sup>2</sup>
<b>A<sub>MUSLE</sub></b>	Perte en terre par le modèle (MUSLE) ( <i>CINNIRELLA et al., 1998</i> )	[t/ha/an]
<b>ai,j</b>	Aspect (direction des pentes)	/
<b>C</b>	Le facteur du couvert végétal	/
<b>C</b>	Pourcentage de carbone dans le sol	%
<b>CLA</b>	Pourcentage d'argile dans le sol	%
<b>D</b>	Taille des cellules de la grille (Résolution spatiale)	m
<b>ENS</b>	Moyennes mensuelles et annuelles d'ensoleillement	h
<b>ET</b>	Moyennes mensuelles et annuelle d'évapotranspiration	mm
<b>F</b>	La valeur de l'indice modifié ( <i>Indice de Fournier</i> )	/
<b>Hu</b>	Moyennes mensuelles et annuelle de l'humidité	%
<b>I</b>	Indice d'aridité	°C
<b>K</b>	Le facteur d'érodabilité du sol	[t. ha.h/ha.Mj.mm]
<b>L</b>	Longueur de la pente	m
<b>L<sub>i,j-in</sub></b>	Longueur de la pente pour la cellule de grille (i,j)	/
<b>LS</b>	Le facteur topographique	/
<b>M</b>	Exposant de longueur du facteur L (USLE)	/
<b>NDVI</b>	Indicateur de végétation par différence normalisé	/
<b>P</b>	Facteur pratiques antiérosives	/
<b>P</b>	Pluviométrie mensuelle moyenne.	mm
<b>p<sub>i</sub></b>	La moyenne du mois le plus pluvieux	mm
<b>Q</b>	Volume du ruissellement	m <sup>3</sup>
<b>q<sub>p</sub></b>	Débit de pointe pendant la crue.	m <sup>3</sup> /s
<b>R</b>	Le facteur d'érosivité des pluies	[Mj.mm/ha.h.an].
<b>R<sub>i</sub></b>	band Rouge.	/
<b>S</b>	Inclinaison de la pente	/

<b><math>S_i</math></b>	Slope(pente)	%
<b>SAN</b>	Pourcentage de sable dans le sol	%
<b>SIL</b>	Pourcentage de limon dans le sol	%
<b>T</b>	Température mensuelle moyenne	°C
<b>Tmax</b>	Température maximale	°C
<b>Tmin</b>	Température minimale	°C
<b>Tmoy</b>	Température moyenne	°C
<b>V moy</b>	Moyennes mensuelles et annuelle de la vitesse du vent	m/s
<b>Xij</b>	Rapport de l'érosion	/
<b><math>\alpha</math> et <math>\beta</math></b>	Paramètres déterminants la forme de la courbe de NDVI-C	/
<b><math>\alpha_m</math> et <math>\beta_m</math></b>	Deux paramètres du modèle MUSLE	/
<b><math>\Theta</math></b>	Pente en degré	°

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Nombreuses catastrophes naturelles menacent le monde entier, parmi ces derniers c'est l'érosion hydrique, selon (*WHITE, 1986*) l'érosion est un problème naturel qui détruit une section de terre pendant un temps géologique. Cette érosion des sols est entraînée à cause des changements climatiques et culturels à la suite des croissances démographique qui ont contribué un accroissement du ruissellent de la surface (*VEZENA et BONN, 2006*). Elle est causée par la séparation et le transports des fragments, des particules de sol, ou des roches de leur emplacement initial par l'eau, ces actions peuvent dégradés la qualité de l'eau et la fertilité du sol, et réduisent la capacité des réservoirs. D'après (*WACHAL, 2007*) la majorité des activités humaines ont un impact très important sur l'érosion telles que l'agriculture, la sylviculture, le pâturage, la construction de routes et de bâtiments.

En Algérie, l'érosion se manifeste comme l'un des grands problèmes, avec des degrés de gravité variables d'une région à l'autre. Elle devient dangereuse dès qu'elle dépasse la limite tolérable. Pendant la période de colonialisme environ 1930 les colons et les agronomes, ont luttés contre l'érosion, ont estimé que plus de 120 millions de tonnes du sol sont rejetés dans la mer chaque année, cette quantité réduit l'espérance de vie des barrages (*DEMMAK,1982*), ainsi qu'elle provoque la qualité des sols et des eaux. Selon (*DEMMAK ,1982*), l'érosion hydrique des bassins versants a augmenté le taux de sédimentation ces dernières années, du 47 % de la surface de la terre en particulier dans l'ouest du pays. Environ 120 millions de tonnes de sédiments se déposaient annuellement au niveau des affluents nord-algériens au début des années 1970 (*DEMMAK ,1982*).

Le but de cette étude est de déterminer les pertes de sol causées par l'érosion hydrique sous l'action de l'eau dans le bassin de la rivière Safsaf, en utilisant le modèle empirique USLE (Universal Soil Loss Equation) de **Wischmeier et Smith** avec sa version révisée RUSLE (**Revised Universal Soil Loss Equation**).

L'approche méthodologique adoptée consiste à calculer et à cartographier de nombreux facteurs qui influencent le processus d'érosion, tels que l'agressivité des pluies, la longueur des pentes, l'érodabilité du sol, la couverture végétale et les pratiques antiérosives.

### Présentation des chapitres :

Cette étude se déroulera selon les étapes suivantes :

- Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique des processus d'érosion hydrique et de leur modélisation ;

- Le deuxième chapitre est une présentation de la zone d'étude, qui comprend une description des caractéristiques physiques (typologie et occupation du sol) et climatiques (pluviométrie, température) du bassin adjacent de l'oued Safsaf.
- Le troisième et le quatrième chapitre consiste à cartographier la perte de sol causée par l'érosion hydrique au niveau du bassin fluvial de Safsaf en utilisant le modèle empirique RUSLE dans un système d'information géographique (SIG) , puis à créer une carte de vulnérabilité hydrique sur l'ensemble du bassin fluvial.
- Enfin, une conclusion générale qui résume les résultats les plus importants des chapitres.

# **Chapitre 1 : Aperçu bibliographique des processus d'érosion.**

# Chapitre 1 : Aperçu bibliographique des processus d'érosion

## 1.1 Introduction

Le problème de l'érosion hydrique existe en Algérie et dans les pays voisins comme un phénomène naturel agressif pour les ressources en sol et en eau (*BOUGUERRA et al*). L'ensemble des résultats des études sur le phénomène d'érosion montrent que ce phénomène contribue à la dégradation progressive des régions agro-pédologiques ; en effet, des quantités massives de sol sont perdues dans les bassins inondés à cause de l'évaporation hydrique (*BOUHADEB et al, 2018*).

Le développement rapide de la désorganisation de la structure des sols est causé principalement par un ensemble de facteurs naturels et humains qui influence le processus d'érosion, cet ensemble de facteurs peut être divisé en deux catégories : l'une qui ont des facteurs de caractère quasi-statique comme (erodabilité, infiltration et la morphologie) et d'autre qui sont variables dans le temps comme (couverture végétale, occupation du sol, intensité des pluies et pratiques agricoles) (*BOUHADEB et al, 2018*).

## 1.2 L'érosion

### 1.2.1 Définitions de l'érosion

LATRILLE en 1979 a dit que l'érosion vient d'après un verbe latin "ERODER" C'est-à-dire détériorer, aussi elle est considérée comme un déplacement des quantités du sol à l'aide de l'eau ou bien du vent.

Elle est considérée aussi selon (*GRECO, 1966*) comme un ensemble des événements chimiques et biologiques qui conduisent l'éboulement et le glissement des particules du sol qui mènent la formation des falaises ; L'érosion est le travail des agents mobiles comme l'eau et le vent sur la couche supérieure de l'écosystème terrestre, afin de provoquer des pertes de sol sur ces couches.

## 1.3 Types d'érosion

La nature érosive des sols peut être décrite de différentes manières :

### 1.3.1 L'érosion éolienne

Elle est définie comme résultats du travail mécanique du vent sur le sol, on peut atteindre cette érosion si la vitesse du vent est supérieure à la résistance des particules des sols, cette

érodabilité est caractérisée par (texture, structure, humidité), lors l'évaluation d'une parcelle, il est très important de protéger cette parcelle contre la vitesse du vent.



**Photo 1- 1:** Une tempête de sable en SOMALIE en 2011. (Journal électronique pressafrik 2013).

### 1.3.2 L'érosion aratoire ou mécanique sèche

C'est un arrachement, transport et disposition des particules du sol sur le fond de la parcelle ou bien dans les pentes par lui-même sans intervention du vent ou bien du l'eau.

#### ✓ Facteurs d'érosion mécanique :

Ce transport de la parcelle est influencé par :

- \* Le type de matériel
- \* La régularité des passages
- \* La pente.

Plus la pente est forte, plus les mottes de terre meuble roulent vers le sol. C'est pourquoi les sommets des collines sont fréquemment décapités.

### ✓ L'orientation du travail du sol :

Généralement, il existe deux orientations de ce travail, le premier peut être considéré du haut vers le bas exemple du travail d'un tracteur sur une pente égale ou supérieur à 15 %, le deuxième est dans le sens contraire du premier du bas vers le haut exemple d'un travail manuel. Il est assez rare que la terre soit ressuscitée par les outils. En revanche, en montagne et dans les zones où la terre est rare, il est nécessaire de récupérer la terre mécaniquement, ou dans de petits paniers de la terre vers la plaine, afin de gravir la montagne, comme c'est le cas pour les vignes. Le déplacement et le retour des outils peuvent également ralentir de manière significative la vitesse de décomposition causée par l'oxydation sèche.

### 1.3.3 L'érosion hydrique

C'est un phénomène naturel causé principalement par la pluie, l'agressivité de cette dernière provoque la résistance des particules du sols est les transportes.



**Photo 1- 2:** Le tracé caractéristique laissé par les eaux de ruissellement est un symptôme de l'érosion en rigole qui a englouti le sol. (Fiche technique no 12-052 du MAAARO).

#### 1.3.3.1 Les facteurs de l'érosion hydrique

L'intensité des processus de détachement, de transport et de stockage est influencée par les facteurs de corrosion. Par conséquent, les facteurs ont une incidence sur les processus qui conduisent à des formes spécifiques d'érosion.

Nous pouvons en citer cinq :

- La végétation,
- La pluie.
- La topographie,
- Le sol,
- Les techniques culturales.

### 1.3.3.2 Mécanisme de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique est basée sur une série de processus complexes et interconnectés qui provoquent la séparation et le transport des particules du sol. Elle est définie comme la perte de sol causée par l'érosion par l'eau et le transport de la terre vers un lieu de stockage.



**Figure 1- 1:** Mécanismes de l'érosion hydrique.

#### A. Détachement

Lorsque les agrégats jaillissent de la surface du sol sous l'action des gouttes de pluie, ou lorsque la puissance de cisaillement du ruissellement dépasse la résistance au détachement du sol, les particules se détachent.

#### B. Transport

Les particules dissociées, qu'elles soient grandes ou petites, sont finalement poussées dans l'aval par la gravité. Certains objets, comme les cailloux d'éboulis et les blocs d'éboulement, en sont victimes. D'autres, les plus élités, sont conduits par un agent de transport, le plus souvent de l'eau.

La taille des sédiments est naturellement régulée par la force du véhicule ; le vent ne peut déplacer que des poussières et des grains de sable fin, alors que les torrents transportent du sable, du gravier et des galets. (*DEMANGEOT, 2000*)

## **C. Dépôt**

Il se produit lorsque l'énergie cinétique qui déplace les matériaux résultant du détachement diminue ou disparaît. Les particules arrachées se déposent entre le point d'origine et les mers. (*DEMANGEOT, 2000*) (*GEORGES, 2008*).

### **1.3.3.3 Les conséquences de l'érosion hydrique**

#### **a) Les pertes des terres arables et la diminution de la fertilité des sols**

De vastes étendues de terres agricoles disparaissent d'une année sur l'autre en raison de l'expansion de diverses formes d'érosion. La diminution de la fertilité des sols (appauvrissement des horizons supérieurs) causée par la détérioration des qualités physiques et chimiques et de l'extension des parcours, s'observe de plus en plus sur ces terres (*MORSLI, 1996*).

#### **b) Envaselement des barrages**

L'envasement des barrages est considéré comme un aboutissement du processus de l'érosion des bassins versants, la vitesse de l'érosion ces dernières années a causé une disposition de 120 millions de tonnes de sédiment au niveau des bassins nord-algérien, avec un dépôt évalué de 45 millions de m<sup>3</sup> par an dans les 57 grands barrages en Algérie (*REMINI et HALLOUCHE*,

En Algérie, la majorité des barrages ont une durée de vie d'environ un quart de siècle. Il est cependant rare que l'on puisse accepter, au terme d'une courte période, l'abandon d'un aménagement hydraulique, notamment lorsqu'il s'agit de réservoirs d'eau potable ou d'irrigation, où les intérêts socio-économiques justifient une garantie de service indéfinie. (*KOUDEDED, 2012*).



**Photo 1- 3:** Un charriage important dans la rivière Labiod pendant les crues (Benguemouza, 2011).

#### **c) La dégradation des infrastructures**

La majorité des ravins se forment sur les crêtes qui longent les routes. Lorsque ces routes ne sont pas protégées comme elles devraient l'être, des ravins profonds se développent sur les bords des routes, et les ramifications qu'ils produisent engloutissent les champs environnants (*MORSLI, 1996*)

#### **d) Les conséquences sur l'agriculture**

En effet, l'érosion hydrique réduit la capacité du sol à retenir l'eau et à la mettre à la disposition des plantes. Par conséquent, les cultures sont soumises à des déficits hydriques plus fréquents et plus sévères. Physiquement, la perméabilité des sols se détériore et la structure devient compacte et asphyxiante pendant la saison humide. Pendant la saison sèche, l'eau ne s'accumule pas en profondeur, et aucune réserve ne se forme dans le sol. D'un point de vue chimique et biologique, la faune et la microflore disparaissent, les réserves d'humus s'amenuisent, ce qui entraîne une nutrition déficiente en azote. Les éléments fins qui constituent la majorité du complexe absorbant disparaissent, ne laissant sur place que le tramway stérile des éléments plus gros. Le sol perd rapidement sa fertilité initiale (*GRECO, 1966*). (*KOUDEDED, 2012*)

### 1.3.3.4 La modélisation de l'érosion hydrique

La quantification et la spatialisation de l'érosion des sols est une étape critique dans la compréhension des processus qui se déroulent sur les bassins en mouvement. De nombreuses simulations des processus de transport de sédiments ou de polluants ont été proposées. Elles sont basées sur des représentations mathématiques des processus fondamentaux hydrologiques et érosifs (*AIT ELKADI & EL KEDMIRI, 2014*)

Plusieurs méthodes ont été intégrées au SIG ces dernières années pour mieux décrire l'environnement et étudier le phénomène d'érosion. Ces méthodes, fréquemment basées sur l'analyse de photographies aériennes et de photos satellites, permettent de mieux comprendre et évaluer les enjeux environnementaux. En fonction des risques rencontrés, et des systèmes de surveillance et de contrôle peuvent être mis en place pour assurer la sécurité des personnes, de l'environnement et des biens. Les méthodes les plus appropriées pour un environnement méditerranéen seront brièvement discutées.

## 1.4 Méthodes pour l'identification de l'érosion

### 1.4.1 Méthode USLE

L'équation universelle de perte de sol (**USLE**) prédit le taux moyen d'érosion à long terme sur la pente d'un champ en fonction des modèles de précipitations, du type de sol, de la topographie, des systèmes de culture et des pratiques de gestion.

Elle est représentée par l'équation suivante :

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1.1)$$

Où :

**A** est une unité de mesure de la moyenne annuelle des pertes de terres dans le temps, exprimée en tonnes/hectare (tonnes impériales/acre) chaque année.

Combiné avec :

- **R** : correspond à la pluviométrie et au facteur de ruissellement pour chaque zone géographique [Mj.mm/ha.h.an] ;
- **K** : représente le facteur d'opacité du sol [t. ha.h/ha.MJ.mm] ;
- **LS** : le facteur longueur de la pente et angle d'inclinaison. **LS** : est le facteur de longueur et d'inclinaison de la pente [sans dimension] ;
- **C** : correspond au facteur culture-végétation-gestion [sans dimension] ;
- **P** : correspond à un facteur de pratique de conservation [sans dimension]

### 1.4.2 Méthode MUSLE

Ce modèle MUSLE n'est qu'une version modifiée du modèle USLE qui calcule l'érosion hydrique pendant la crue A(MUSLE) sur la base de cinq facteurs érosifs :

$A_{MUSLE}$  est en fonction de cinq facteurs d'érosion :

$$A = \alpha_m (Qq_p)^{\beta_m} * K * LS * C * P \quad (1.2)$$

$\alpha_m$  et  $\beta_m$  : Deux paramètres du modèle MUSLE.

Q : volume du ruissellement ( $m^3$ ).

$q_p$  : débit de pointe ( $m^3 s^{-1}$ ) pendant la crue.

K : facteur d'érodibilité du sol ( $t h MJ^{-1} mm^{-1}$ ).

LS : facteur topographique (sans unité).

C : facteur de gestion de la couverture végétale (sans unité).

P : facteur d'aménagement antiérosif (sans unité).

### 1.4.3 Méthode RUSLE

Vue la complexité du processus de l'érosion hydrique et la gravité de ses conséquences, la lutte contre ce phénomène nécessite une hiérarchisation des zones menacées pour implanter des plans d'aménagement antiérosifs visant à réduire surtout la dégradation et la fertilité des terres agricoles ainsi que l'envasement des ouvrages hydrauliques. Actuellement nombreux chercheurs ont utilisé différentes méthodes de prévisions ; parmi ces méthodes, la cartographie des facteurs intervenant dans le processus érosif par l'utilisation des outils d'aide à la décision, auquel s'ajoute l'intelligence artificielle sous l'appellation des réseaux neuronaux artificiels.

L'équation RUSLE a été développée sur la base des travaux de (*WISCHMEIER & SMITH, 1965*). Il s'agit d'un modèle empirique dans lequel l'érosion (A), mesurée en (t/ha/an), est le résultat de cinq facteurs : l'érosivité des pluies (R), l'inclinaison et la longueur des pentes (LS), l'érodabilité du sol (K), le couvert végétal (C) et les mesures de prévention (P). Cependant, les données peuvent être extrapolées pour cartographier l'érosion sur de plus grandes zones, comme des régions agricoles entières (*BONN, 1998 cite SPANNER et al 1982*). La méthode consiste à appliquer chaque facteur RUSLE à un ensemble de données spatiales géoréférencées. Une carte du risque d'érosion pour chaque cellule est obtenue en multipliant toutes les couches d'information.

## 1.5 Exemple des travaux sur l'érosion

L'utilisation du modèle empirique, avec sa version révisée (RUSLE) à l'échelle du bassin versant, est particulièrement remarquable, notamment dans les pays d'Afrique (*ADEDEJI et al, 2010*) ; (*ANYS, 1991*) ; (*ANYS, BONN, & MERZOUK, 1994*) ; (*ANGIMA, STOTT, O'NEILI, ONG, & WEESIES, 2003*) ; (*CHEN et al, 2008*) ; (*EL GAROUANI et al, 2008*) ; (*MATI & VEIHE, 2001*) ; (*MHANGARA et al, 2012*) ; (*MHANGARA et al. 2012*). Dans la plupart des études, l'utilisation de RUSLE a donné des résultats significatifs.

Entre 1992 et 2009 (*ALKHARABSHEHA et al, 2013*) ont utilisé le modèle RUSLE conjointement avec le SIG pour étudier l'impact des changements de la couverture végétale (facteur C) sur l'érosion dans les zones agricoles du nord de la Jordanie. La perte annuelle moyenne de sol était comprise entre 9,53 t/ha/an et 8,97 t/ha/an. Ils ont conclu que la différence entre les deux périodes indique que le changement de la couverture végétale a un impact significatif sur le taux d'érosion du sol.

(*BENKADJA et al, 2015*) a appliqué trois modèles différents : GRAVILOVIC, ICONA et RUSLE pour évaluer les pertes en sol et identifier les zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin du K'sob, au nord-est de l'Algérie, dans le but de parvenir à une gestion adéquate. Ils ont constaté que 90 % de la superficie totale du bassin était soumise à un risque d'érosion faible à modéré, et que le reste était vulnérable à l'érosion avec une perte moyenne annuelle de sédiments estimée à 4,6 t/ha/an. Ils ont montré qu'il y a une bonne connexion entre les méthodes RUSLE et ICONA qui ont 3/4 du bassin avec une sensibilité faible à très faible à l'érosion. quelle que soit l'échelle spatiale. En revanche, 70% du bassin est considéré comme moyennement sensible à très sensible à l'érosion par la méthode GRAVILOVIC. En conclusion, les différences spatiales des taux d'érosion dans le bassin versant étudié par les auteurs sont principalement dues à des différences dans le type de couverture terrestre et de relief.

(*BOUHADEB et al, 2018*) Dans leurs travaux ont estimé le taux annuel d'érosion de sol et sa distribution spatiale dans le bassin versant de l'oued Bou-Namoussa située dans le Nord-est de l'Algérie par l'application de l'équation universelle révisée de perte en sols (RUSLE) généré dans un système d'information géographique (SIG). La combinaison des facteurs de modèle RUSLE résulte un taux moyen annuel d'érosion de 7,8 t/ha/an. Les domaines, montrant des taux d'érosion modéré, élevé à très élevé représentent plus de la moitié de la superficie du bassin versant, On les trouve surtout dans les zones où le sol est très érodable, où il y a des affleurements rocheux et où la couverture végétale est faible.

Outre la cartographie, un réseau neuronal artificiel est un système permettant de traiter de grandes quantités de données de manière parallèle (*ZHU et al, 2007*). Il s'agit d'un mécanisme

d'apprentissage non linéaire d'un phénomène complexe. Son utilisation dans la modélisation hydrologique a commencé en 1993 (*HALFF A.H et al, 1993*) où il a été appliqué pour la première fois dans le modèle pluie-débit.

Récemment, certains travaux de recherches ont utilisé l'apprentissage automatique pour la prédiction des transports solides à l'exutoire de quelques bassins versants Algériens. Parmi eux, on cite à titre d'exemple : l'étude de (*LEKFIR A, 2006*) qui ont comparé le système d'Inférence Neuro-Floue Adaptif (Adaptive Neuro-Fuzzy Inférence System ; ANFIS) et la méthode de régression dans la prédiction de matières en suspension (MES) dans le bassin versant Isser-Est ; L'étude a été menée à une échelle instantanée en utilisant des données collectées sur deux ans. Les résultats montrent que le modèle ANFIS donne d'excellents résultats par rapport aux méthodes de régression.

(*TACHI S.E. et al, 2016*) Ils ont comparé la rétropropagation régulière avec la rétropropagation conventionnelle dans le bassin de la rivière Isser-Est sur une période de 30 ans, en utilisant l'approche de l'arrêt précoce. Ils ont confirmé l'efficacité d'un réseau neuronal artificiel (RNA) pour prédire le transport solide. Par conséquent, il est essentiel d'employer des approches de régularisation dans les thérapies à base d'ARN.

(*BOUGUERRA et al. 2018*) Ils ont visés à évaluer les pertes en sol provoquées par le phénomène érosif et cartographier les secteurs potentiellement sensibles à l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Bouhamdane. Pour ce faire, la version révisée de l'équation universelle de perte en sol (RUSLE) a été utilisée.

Les résultats obtenus par l'application du modèle RUSLE montrent que la perte moyenne des sols par l'érosion hydrique de l'ordre de 11,18 t/ha/an au bassin versant de l'oued Bouhamdane dépasse la limite moyenne de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion hydrique (7 t/ha/an). 14,33 % de la zone étudiée marquée par un taux d'érosion supérieur ou égal 20 t/ha/an, sont sérieusement menacées par le phénomène érosif et sont caractérisées par des terres à fortes pentes et plus érodées. Contre 40,15 % des terres qui montrent une perte de sol tolérable inférieur à 7 t/ha/an, ces terres sont bien protégées par une couverture végétale et reposent sur des pentes douces.

## **Conclusion**

L'érosion hydrique reste un problème majeur en Algérie, alors ce chapitre vise à comprendre le phénomène de l'érosion pour pouvoir par la suite : évaluer, quantifier et définir les zones à risques d'érosion hydrique sur l'un des bassins versants importants en Algérie qui est présenté sur le chapitre suivant.

## **Chapitre 2 : Description de la zone d'étude**

## Chapitre 2 : Description de la zone d'étude

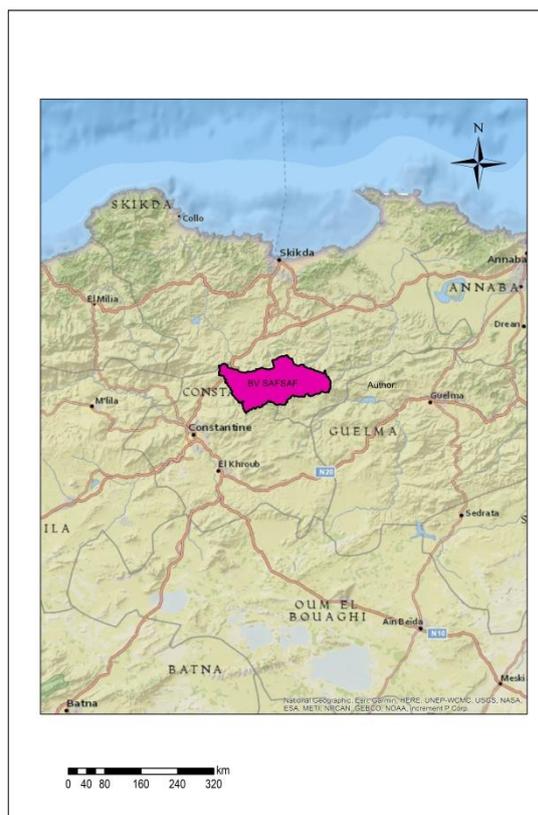
### 2.1. Introduction

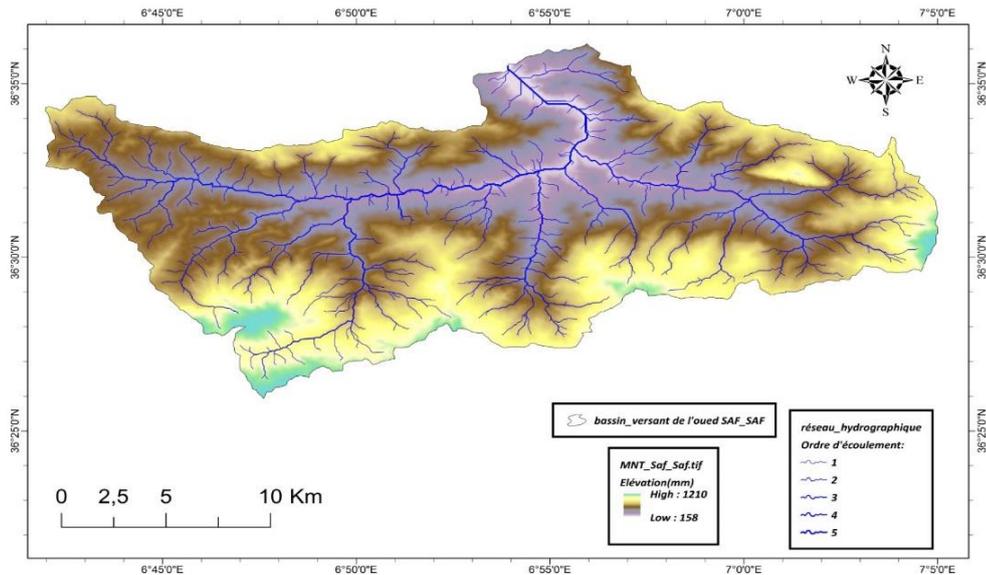
Safsaf est un oued du nord-est de l'Algérie. Cet oued est le principal cours d'eau du bassin oriental éponyme de la ville de Skikda, drainant une superficie de 1 158 kilomètres carrés qui tient en compte les caractéristiques suivantes.

Dans ce chapitre nous présentons les caractéristiques du bassin versant oued Safsaf.

### 2.2. Situation géographique

La vallée de Safsaf appartient au bassin central côtier de Constantine et est située entre le bassin du Guebli à l'ouest et le bassin du Kebir à l'est. Elle est bordée au sud par le djebel El Hadjar et le djebel Oucheni, à l'est par le djebel El Alia et le djebel Tengout et, à l'ouest, par les massifs du louf Collo et Boukha, et au nord par la mer Méditerranée, où le principal affluent de ce bassin coule à l'est de Skikda.





**Figure 2- 1:** Cartes géographiques de la zone d'étude (Outil SIG).

L'exutoire du bassin versant sélectionner pour cette étude est l'axe du barrage Zerdézas est un barrage poids béton construit en 1936 sur la rivière Safsaf, à 35 kilomètres au nord de Constantine et 30 kilomètres au sud de Skikda. Il s'agit d'un ouvrage de régularisation biannuel. Il fournit de l'eau potable à la ville de Skikda et à ses environs industriels, ainsi que cinq villages de la basse vallée de la Safsaf. Il permet également l'irrigation. Environ 1800 hectares ont été récupérés par des lâcheurs dans le lit de l'oued.



**Photo 2- 1:** Barrage Zerdézas (Cliché ANRH).

### 2.3. Géologie

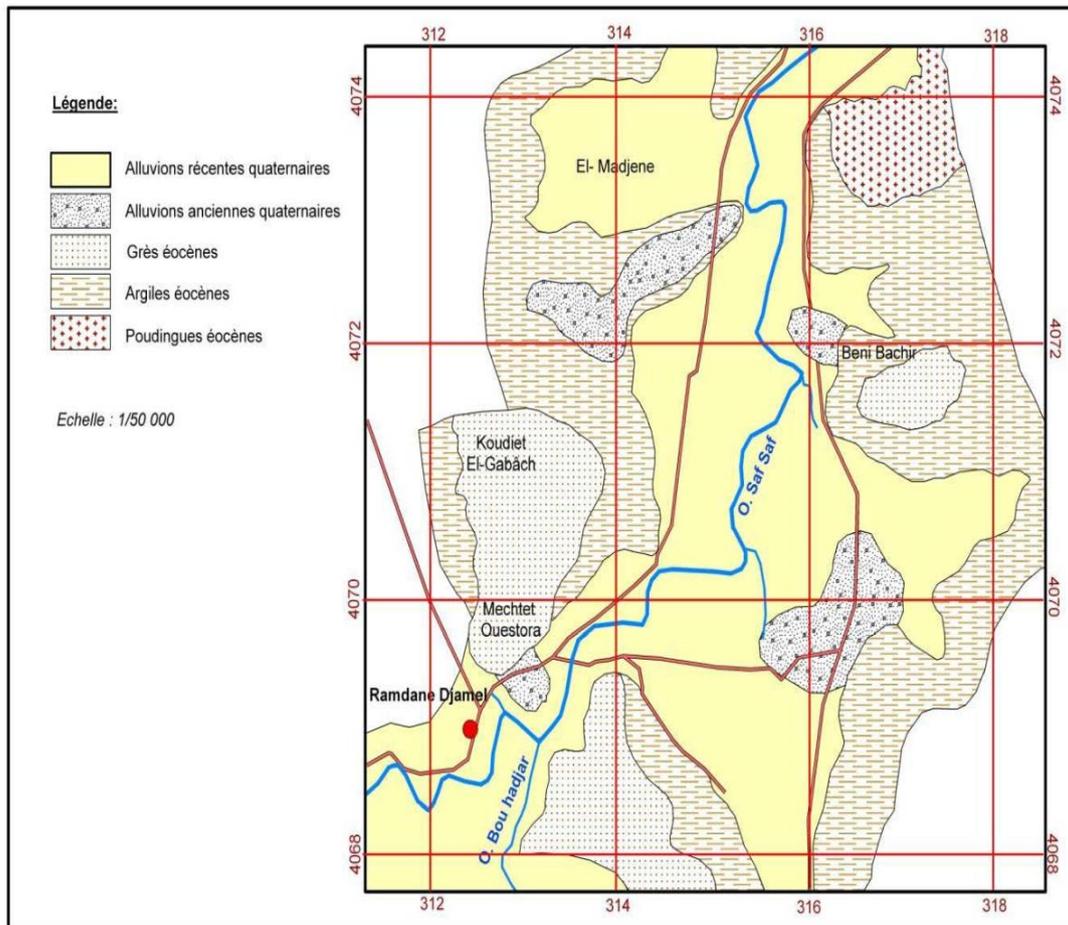
La géologie de la région est très complexe. En effet, des études ont montré que le stock oriental algérien est constitué d'un ensemble avec des nappes allant du nord au sud : le stock kabyle et le kabyle dorsal, les séries de Flysch (mauritanien, massylien, numidien et ultra-tellien), les bâtonnets numidiens et la nappe néritique du constantinien (**carte géologique, INGA, 1962**).

La dépression de l'Oued Safsaf correspond à un axe synclinal WSW ENE qui s'étend entre les gneiss et phyllades primaires des forêts Zermna au nord-est et l'anticlinal au centre triasique de Zerdézas au sud-est. Le synclinal dans la région de Ramdane Djamel est formé par une série de collines gréseuses qui séparent des vallons argileux.

Les affleurements qui caractérisent la zone d'étude sont principalement représentés par :

- Le Numidien (Eocène supérieur Oligocène) : C'est un type flysch qui comprend de bas en haut les éléments suivants :

- Des poudingues affleurant à ciment argileux au nord-est de la dépression.
- Argiles sombres entrecoupées de bancs de grès occupant le centre de la vallée.
- Des grès quartzitiques, plus ou moins altérés en surface, développés sur le Kef Kahrou et à l'est de Beni Bechir.
- Le Quaternaire : Le Quaternaire est distingué par des alluvions récentes recouvrant en discordance les formations du Numidien au niveau de la vallée de l'Oued Safsaf.
- Les limons, les sables et les galets sont utilisés pour les représenter. Les méandres actuels du Safsaf récupèrent également des terrasses d'anciennes alluvions formées par des argiles de sable

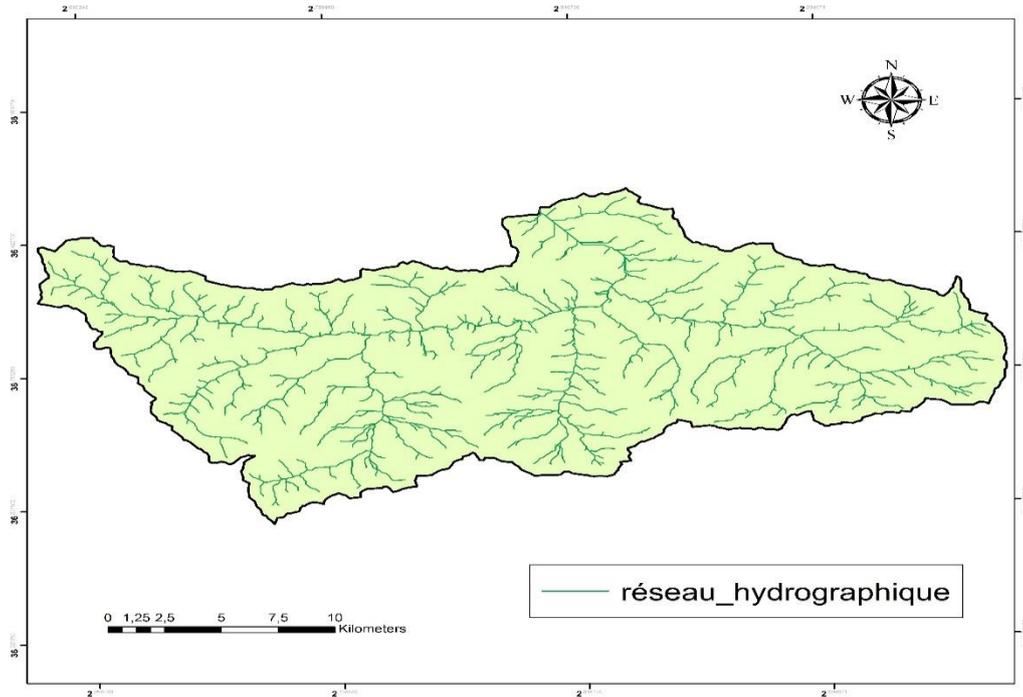


**Figure 2- 2:** Carte géologique de la plaine alluviale de l’Oued Safsaf.

## 2.4. L’hydrographie

Les eaux superficielles de la région de Skikda sont drainées principalement du Sud vers le Nord par Oued Safsaf. Cet oued est alimenté par un réseau hydrographique relativement dense sillonnant les versants des djebels entourant la zone d’étude, à savoir : Oued Kramna, Oued Gouds, Oued Bou Adjeb, etc. Ce réseau s’articule autour de trois principaux oueds, courts et brutaux : Oued Guebli, Oued Safsaf et Oued El Kébir.

La zone d’étude appartient au **bassin versant de l’oued Safsaf (BV 03-09)**. Ce dernier constitue l’axe hydrographique central. Son bassin versant regroupe tous les oueds des versants tournés vers la vallée (voir carte ci-après).



**Figure 2- 3:** Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude (Outil SIG).

## 2.5. La nappe alluviale de l'Oued Safsaf

### 2.5.1. Situation géographique

La source de l'Oued Safsaf est le djebel Ouahch, qui se trouve près de Constantine. Ensuite, il contourne le djebel Sesnou, traverse les plaines à El Harrouch et Ramdane Djamel, puis plonge dans la mer près de Skikda.

Une section sur l'hydrogéologie est également incluse. La dépression de Saf Saf est principalement constituée d'un seul système aquifère, qui est représenté par les alluvions récentes et anciennes du Quaternaire.

Ces dernières couvrent la quasi-totalité du bassin et ont généralement une faible épaisseur comprise entre 10 et 30 mètres.

Le forage Ramdane Djamel au sud-ouest a fournit un débit de 3 l/s et a rencontré les formations suivantes :

- Argiles sableuses de 0 à 7 mètres.
- De 7 à 11 mètres, on trouve des dunes de sable et des affleurements rocheux.
- De 11 à 14 mètres, on trouve des argiles jaunes avec des galets de grès.

Un autre forage, situé au sud de la dépression, son débit est de 18 litres par seconde.

### 2.5.2. Substratum

Les argiles sombres de Numidie constituent le substratum de la nappe alluvionnaire et aquifère.

La majorité du temps, l'aquifère est alimenté par :

- L'impluvium, qui est surtout représenté par les affleurements des alluvions couvrant une surface de l'ordre de 100 km<sup>2</sup>,
- Les rivières qui traversent la région, comme Oued Safsaf.
- Les grès quartzitiques affleurant à Kef kahrou et à l'est de Beni Bechir.

### 2.5.3. L'exutoire

La mer est ce qui constitue l'exutoire de la nappe. L'embouchure de l'Oued Safsaf est située à l'est de la ville de Skikda. Ressources exploitables :

Selon la carte des ressources, les ressources exploitables de la nappe alluviale de l'Oued Safsaf sont de 8,5 Hm<sup>3</sup>/an.

## 2.6. Pluviométrie

Le calcul pluviométrique est basé sur le calcul des données des six stations de mesure entourés sur notre zone d'étude sur une série de 34 ans (de 1985/2018 donnés par ANRH).

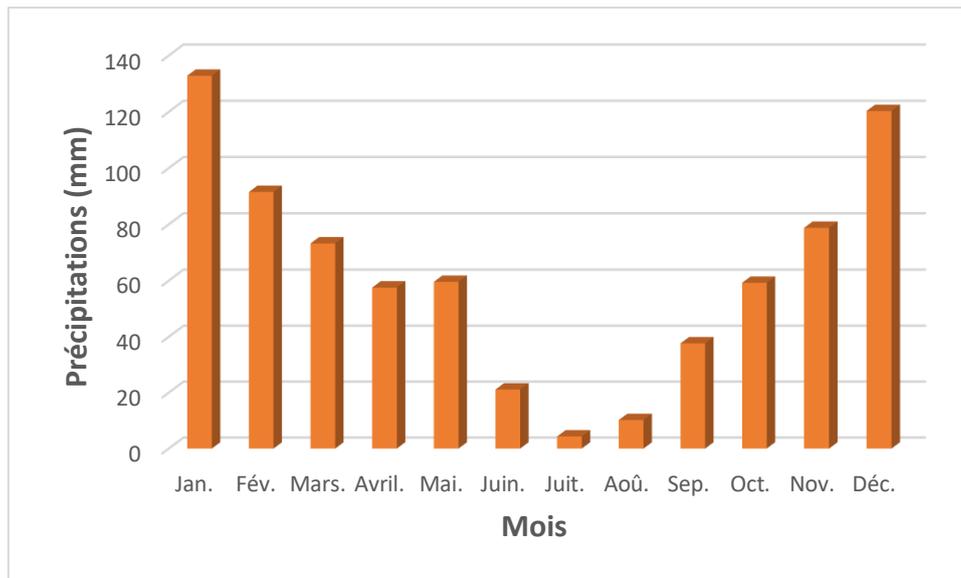
Le (Tableau 2- 1) représente les moyennes mensuelles et annuelle des précipitations du bassin versant oued Safsaf :

**Tableau 2- 2:** Moyennes mensuelles et annuelle des précipitations.

Station	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juit.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total (mm)
Zerdézas	132,19	90,31	73,87	54,53	55,44	17,53	4,68	8,03	32,28	61,54	79,74	112,9	723,08
Ain el Klebe	135,89	91,9	73,182	57,53	60,4	21,88	3,8	10	36,57	57,19	75,85	123,4	747,64
Bou Snib	143,62	98,18	76,297	61,53	64,35	23,4	3,79	11	39,8	60,93	82,24	131,9	797,09
EL Harrouche	133,54	90,94	73,297	51,64	54,49	16,62	4,64	8,02	33,34	61,24	80,22	107,7	715,73
Zighoud Youcef	143,17	100,6	79,947	63,58	59,44	19,79	4,65	11	42,01	67,09	91,73	133,3	816,25
El Alia	109,34	76,64	62,915	50,64	58,28	23,07	4,74	11	37,69	49,48	64,31	99,95	648,07

*Période : 1985-2018 ; Source : ANRH.*

Selon le graphique suivant (Figure 2-4) , la plus grande quantité de précipitations a été enregistrée en janvier (143.61mm), tandis que la plus faible quantité a été enregistrée en juillet (3,785mm). Les précipitations annuelles moyennes dans cette région sont de (741,31 mm).



*Figure 2- 5: Moyennes mensuelles des précipitations.*

## **2.7. Caractéristiques climatologiques**

Le climat est un facteur crucial à prendre en compte lors de l'élaboration d'une étude pour une station d'épuration.

Les 06 stations météorologiques existantes pouvant être considérées comme représentative de la région d'étude et possédant des données fiables est celle du Chef-lieu SKIKDA. Les caractéristiques géographiques de ces stations sont les suivantes :

### **Caractéristiques des stations de référence (SKIKDA)**

Le (Tableau 2- 2) représente les caractéristiques des stations de référence (Source ANRH 2018). Du bassin versant oued Safsaf :

**Tableau 2- 3:** Caractéristiques des stations de référence (Source ANRH 2018).

Numéro	Code	Nom station	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	30903	ZARDESAS BGE	875300	374600	200
2	30904	AIN EL KLEB	888150	363400	750
3	30905	BOU SNIB	882100	362950	900
4	30906	EL HARROUCH	869700	379700	137
5	100619	ZIGHOUD YOUCEF	858100	367100	720
6	30908	EL Aria	870850	343100	104

La zone d'étude fait partie du domaine bioclimatique humide et subhumide. Le climat méditerranéen est marqué par des influences maritimes sur le littoral et des phénomènes orographiques et semi-continentaux à l'intérieur. En effet, l'étage humide couvre toute la chaîne de montagnes occidentale, ainsi que les sommets de l'est et du sud.

Les paramètres météorologiques les plus importants sont les suivants :

### 2.7.1. La température

Le (Tableau 2- 3) représente les moyennes mensuelles et annuelles des températures du bassin versant oued Safsaf :

**Tableau 2- 4:** Moyennes mensuelles et annuelles des températures

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M.A
T <sub>max</sub> (°C)	16,6	16,85	19,11	20,66	23,72	27,06	29,5	30,07	27,56	25,72	21	17,75	22, 96
T <sub>min</sub> (°C)	8,82	8,87	10,86	12,83	15,84	19,27	22,36	22,92	20,31	17,77	13,15	8,82	15,15

**Période : 1985-2018 ; Source : ONM**

La température baisse pendant les mois d'hiver (décembre, janvier, février) et atteint un minimum de 12,42 °C en janvier ; en revanche, elle augmente pendant les mois d'été (juillet,

août, septembre) et atteint un maximum de 25,67 °C en juillet et août. La température moyenne annuelle est de 18,87 degrés Celsius.

La proximité de la mer a un impact direct sur le climat ; par exemple, en été, la forte chaleur est refroidie et humidifiée par la brise, et en hiver, la mer réchauffe la terre.

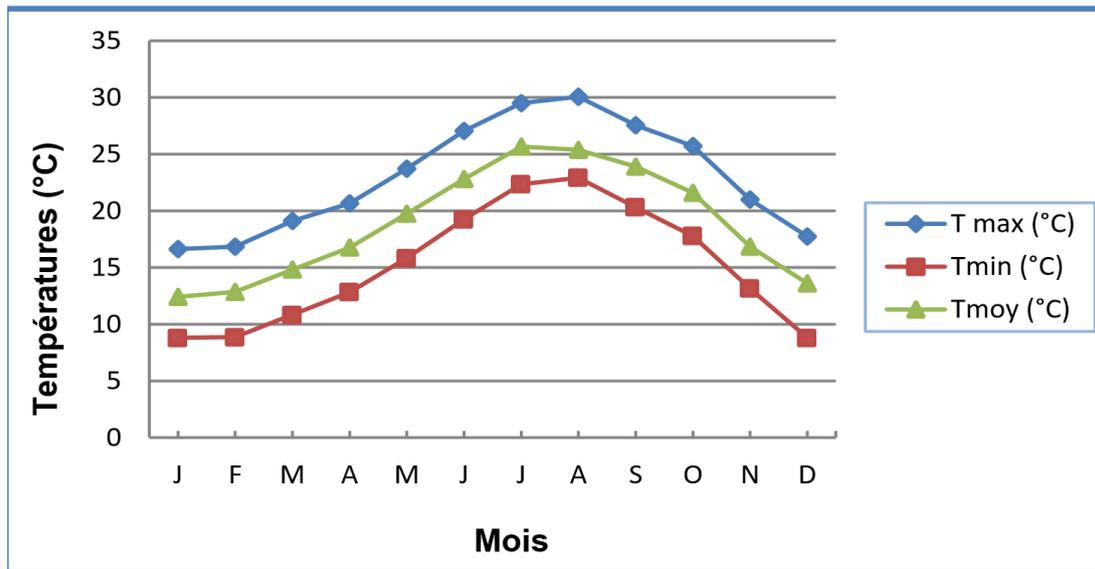


Figure 2- 6: Moyennes mensuelles et annuelles des températures.

### 2.7.2. L'ensoleillement

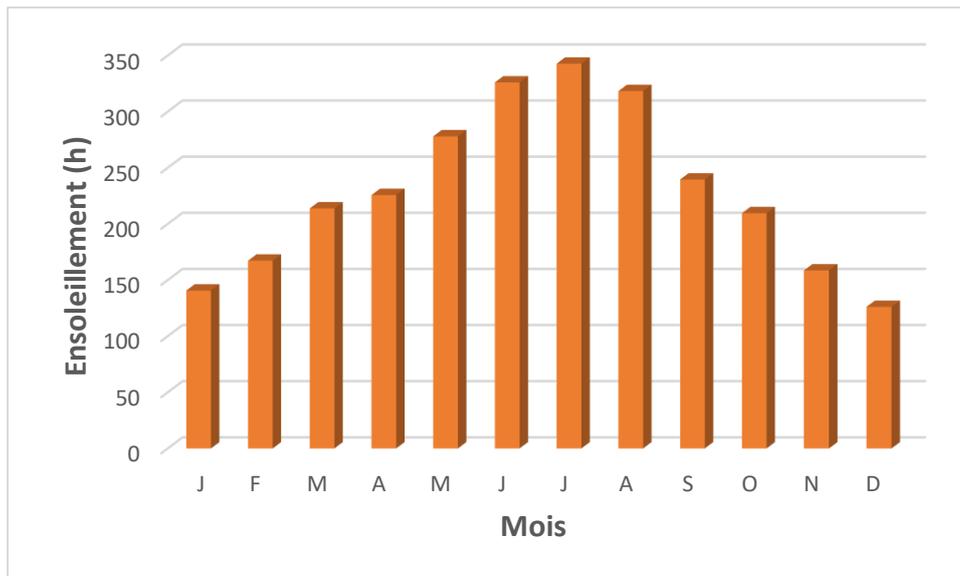
Le (Tableau 2- 4) représente les moyennes mensuelles et annuelles de l'ensoleillement du bassin versant oued Safsaf :

Tableau 2- 5: Moyennes mensuelles et annuelles de l'ensoleillement :

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M.A
Ens(h)	141	167,3	213,8	225,7	278	326	342,7	318,3	239,5	209,5	158,6	126,1	228,8

Période : 1985-2018. Source : ONM

Il convient de noter que les valeurs modérées sont enregistrées pendant les mois de mai et d'août, la valeur la plus élevées étant enregistrées en juillet (342,7 h).



**Figure 2- 7:** Moyennes mensuelles de l'ensoleillement.

### 2.7.3. L'évaporation

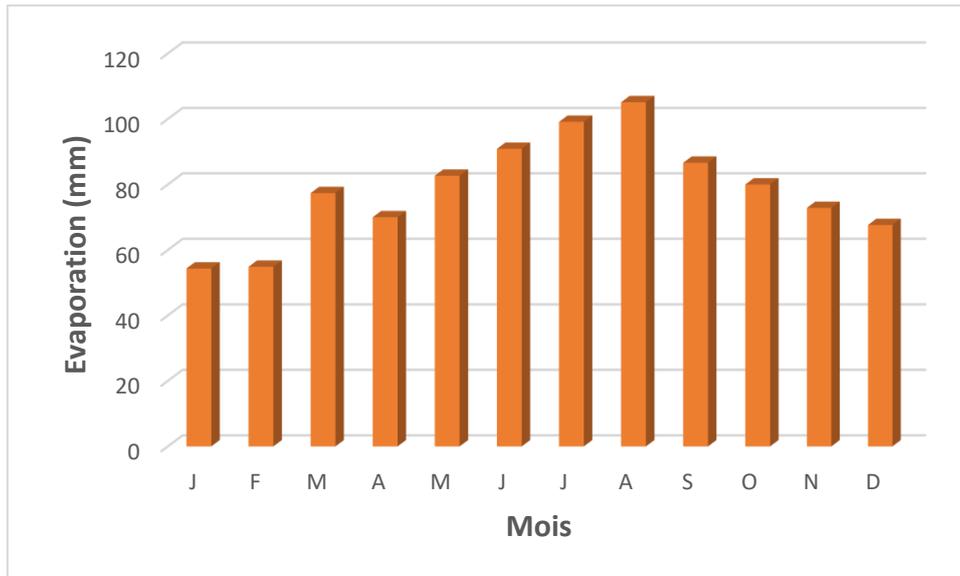
Le (Tableau 2- 5) représente les moyennes mensuelles et annuelle de l'évaporation du bassin versant oued Safsaf :

**Tableau 2- 6:** Moyennes mensuelles et annuelle de l'évaporation

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M.A
Evaporation (mm)	54,3	54,8	77,3	70	82,6	90,8	99,1	105,1	86,6	80	72,8	67,6	941,4

**Période : 1985-2018 ; Source : ONM**

Le graphique ci-dessus montre l'importance de l'évaporation en été. Son maximum a été de 105,12 mm en août, et son minimum de 54,33 mm en janvier. Et 941,44 mm de moyenne annuelle.



**Figure 2- 8:** Moyennes mensuelles de l'évaporation.

#### 2.7.4. Les Vents

- **Vitesse des vents**

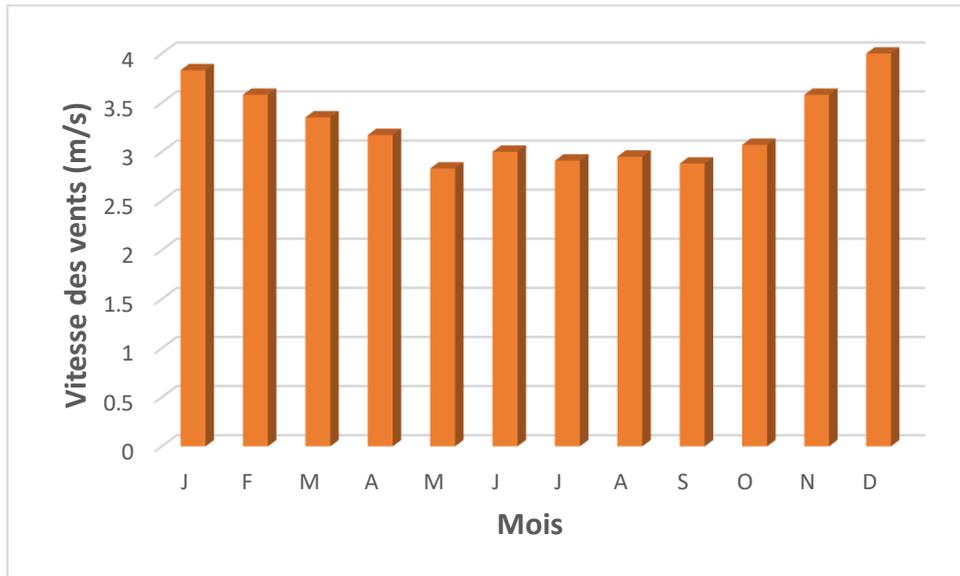
Le (Tableau 2- 6) représente les Moyennes mensuelles et annuelle de la vitesse du bassin versant oued Safsaf :

**Tableau 2- 7:** Moyennes mensuelles et annuelle de la vitesse

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M.A
<b>V moy (m/s)</b>	3,83	3,58	3,35	3,17	2,83	3	2,91	2,95	2,88	3,07	3,58	4	3,26

*Période : 1985-2018 ; Source : ONM*

La vitesse moyenne du vent est inférieure à 4 m/s pour toute l'année.



**Figure 2- 9:** Moyennes mensuelles de la vitesse des vents

- **Direction des vents**

Le (Tableau 2- 7) représente la direction et fréquence des vents dans le bassin versant oued Saf Saf :

**Tableau 2- 8:** Direction et fréquence des vents

	7h								13h								18h								
Direction	N	N	E	S	S	S	W	N	N	N	E	S	S	S	W	N	N	N	E	S	S	S	W	N	W
Année	8	8	1	8	2	3	7	15	2	27	2	4	9	8	5	22	1	1	2	26	1	5	2	22	
	4	3		5	0			3	3	2			8			4	3		6	5			2	2	

*Période : 1985-2018 ; Source : ONM*

D'après les données du tableau ci-dessus, les directions des vents dominants sont :

- 7 heures au sud et au sud-ouest.
- 13 heures au nord, au nord-est et au nord-ouest.
- 18 heures au nord et au sud.

Le siroco se manifeste surtout pendant les mois de septembre et d'octobre, où il contribue à la hausse des températures et influence les changements de saison.

### 2.7.5. L'humidité

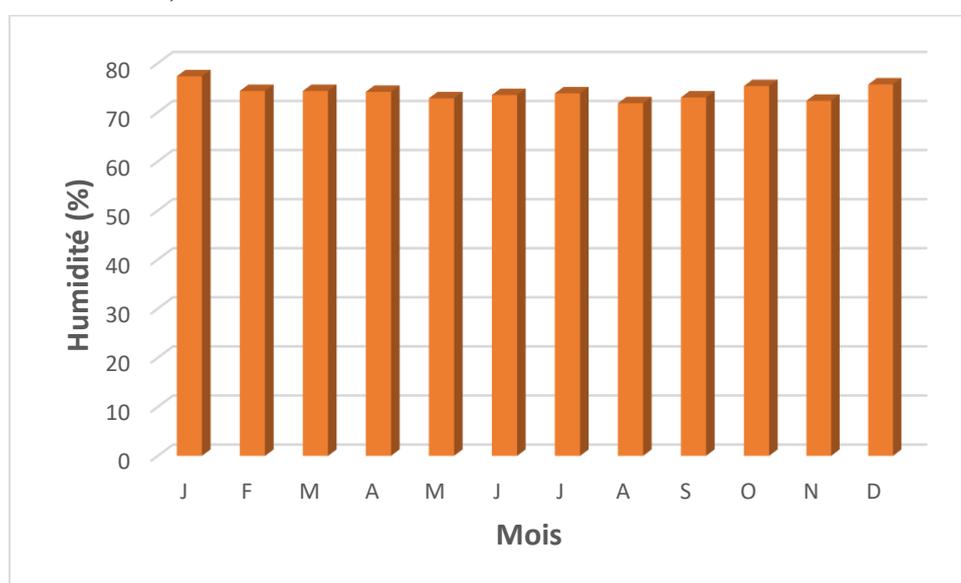
Le (Tableau 2- 8) représente les moyennes mensuelles et annuelle de l'humidité dans le bassin versant oued Safsaf :

**Tableau 2- 9 :** Moyennes mensuelles et annuelle de l’humidité

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M.A
Hu(%) (%)	77,33	74,33	74,33	74,16	72,83	73,50	73,83	71,83	73,00	75,33	72,33	75,66	74, 03

Période : 1985-2018 ; Source : ONM

L’humidité relative de l’air varie entre 72,33 et 77,33 %. La valeur moyenne de l’humidité pour l’année est de 74,03 %.



**Figure 2- 10 :** Moyennes mensuelles de l’humidité.

### 2.7.6. L’évapotranspiration

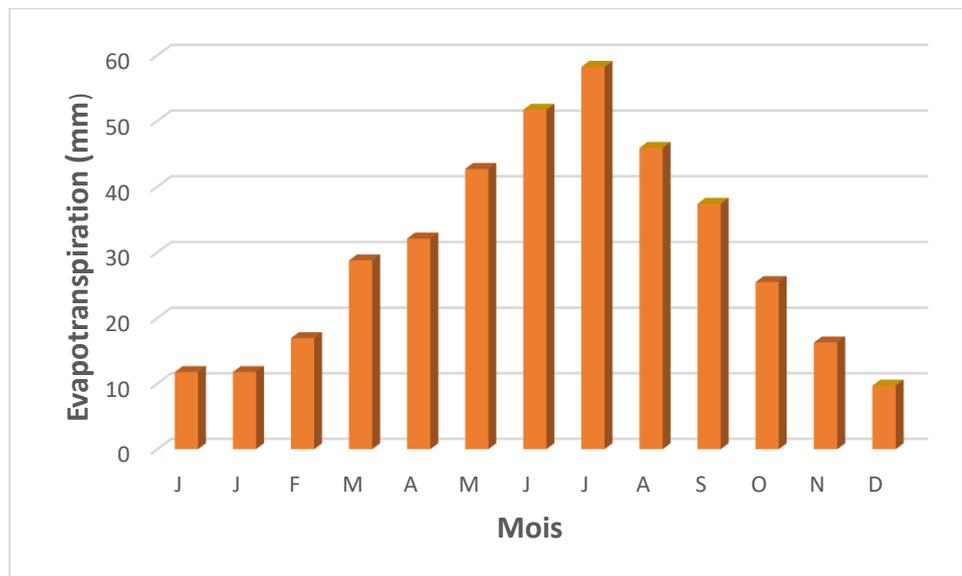
Le (Tableau 2- 9) représente les moyennes mensuelles et annuelle de l’évapotranspiration dans le bassin versant oued Safsaf :

**Tableau 2- 10 :** Moyennes mensuelles et annuelle de l’évapotranspiration

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M.A
ET (mm)	11,77	16,94	28,78	32,1	42,71	51,71	58,25	45,91	37,4	25,48	16,28	9,7	377,03

Période : 1985-2018 ; Source : ONM

L'évapotranspiration mesurée a eu un maximum de 58,25 mm en juillet et un minimum de 9,7 mm en décembre pour les 33 dernières années d'observation. L'évapotranspiration moyenne est de 377,03 millimètres par an.



**Figure 2- 11 : Moyennes mensuelles de l'évapotranspiration.**

### 2.7.7. Synthèse climatique

Trois paramètres peuvent être déterminés à partir des deux facteurs climatiques les plus essentiels, la température et la pluviométrie :

- L'indice d'aridité.
- Le diagramme ombrothermique.
- Le Climagramme d'EMBERGER.

#### 2.7.7.1. Indice d'aridité de DEMARTON

Il est défini par la formule suivante :

$$12 P / (T + 10) = I \quad (2.1)$$

Combiné avec :

P : Pluviométrie mensuelle moyenne.

T : Température mensuelle moyenne.

I : Indice d'aridité.

Le (Tableau 2- 10) représente Indice d'aridité dans le bassin versant oued Safsaf :

**Tableau 2- 11:** Indice d'aridité

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Jui	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
I (°C)	70,5	47,6	34,3	29,9	12,9	3,4	14,8	5,06	19	12,1	43,1	82,7

Période : 1985-2018 ; Source : ONM.

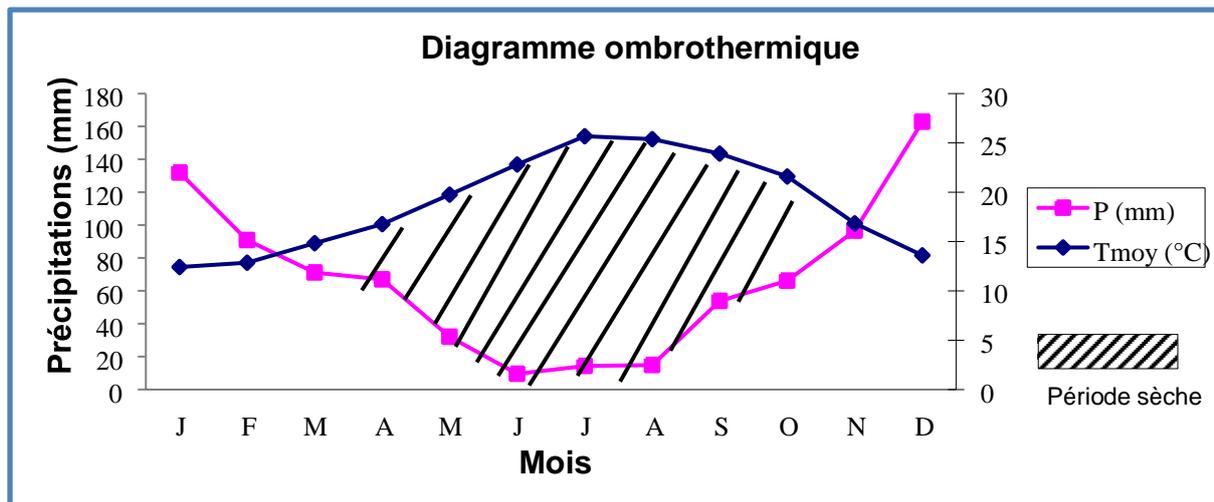
Le tableau précédent met en évidence deux catégories distinctes :

- Une saison humide et longue dure de septembre à mai, avec un indice d'aridité de 82,74°C en décembre.
- Une saison sèche et courte dure de juillet à août, le mois le plus chaud étant juillet (3,49°C).

### 2.7.7.2. Diagramme Ombrothermique

Le graphique peut être utilisé pour déterminer la saison sèche, où la saison sèche est la saison pendant laquelle la moyenne des précipitations totales est inférieure ou égale au double de la température moyenne mensuelle en degrés Celsius.

La zone limitée représente la zone sèche lorsque la courbe de température est supérieure à celle des précipitations, il s'agit d'une période sèche terminée.



**Figure 2- 12:** Diagramme ombrothermique.

## Conclusion

Sur la base des données climatologiques recueillies dans six endroits autour du BV Safsaf nous avons découvert ce qui suit :

- Il y a deux saisons distinctes :
  - Les températures supérieures à 20°C sont caractéristiques de cette saison (juillet à octobre).
  - Une saison au cours de laquelle la température ne dépasse pas 20°C et ne descend pas en dessous de 13°C.
  - Juillet et août sont les mois les plus chauds, avec des températures moyennes de 25,94°C.

Tout au long de l'année, la vitesse du vent dans la région est constante. En effet, le maximum est atteint au mois de décembre, tandis que le minimum est atteint au mois de mai. La vitesse moyenne annuelle du vent est de 3,26 m/s.

- La région, qui est caractérisée par un climat subhumide, reçoit en moyenne 12 pouces de pluie par an (741,31 mm).

La zone d'étude (BV Safsaf), située dans le nord-est de l'Algérie, présente des quantités pluviométriques importantes. Ces quantités peuvent mettre en péril le phénomène d'érosion qui repose sur les cinq facteurs critiques présentés dans le chapitre suivant.

# **Chapitre 3 : Matériels et Méthodes de calculs des facteurs d'érosion.**

## Chapitre 3 : Matériels et Méthodes des facteurs d'érosion

### 3.1. Introduction

L'érosion des sols est la première cause de dégradation des terres dans les bassins versants, ce phénomène est très répandu dans la région du Maghreb, notamment en Algérie, car toutes les conditions sont réunies pour amorcer et accélérer le processus d'érosion (*HALLOUCHE W. 2007*). En raison de l'ampleur du problème et de la gravité de ses conséquences sur et hors sol, l'érosion est au premier plan des efforts de conservation des sols en Ontario. L'agressivité des pluies, la longueur de la pente, l'érodabilité du sol, le couvert végétal et les pratiques culturales influent tous sur la vitesse et l'ampleur de l'érosion induite par l'eau. En fait, la compréhension de ces paramètres physiques ou anthropiques est essentielle dans les études évaluant le degré de dégradation des sols en relation avec l'érosion hydrique.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser et de spatialiser les différents facteurs qui influencent le phénomène d'érosion, ainsi que de cartographier les risques d'érosion et de pertes de sol dans le bassin du Safsaf. La cartographie des facteurs d'érosion des sols et l'identification des zones vulnérables permettraient d'évaluer les risques d'érosion et de développer des stratégies de conservation des sols et de gestion des ressources en eau.

### 3.2. Méthodologie

Le modèle empirique de perte de sol **RUSLE** a été utilisé pour évaluer le potentiel érodé dans le bassin oued Safsaf. Dans la région méditerranéenne, le modèle **RUSLE** est largement utilisé. Il s'agit d'un modèle empirique basé sur le modèle USLE (*WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. 1978*) .... Le principe est d'inclure les facteurs trouvés dans le modèle empirique **RUSLE** dans un système d'information géographique (SIG), dans lequel la perte de terres exprimée en (t/ha/an) est déterminée à l'échelle du pixel. Le produit de cinq facteurs, à savoir l'érosivité des pluies (R), la topographie (LS), l'érodabilité du sol (K), le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives (P) donne une carte des pertes en sol.

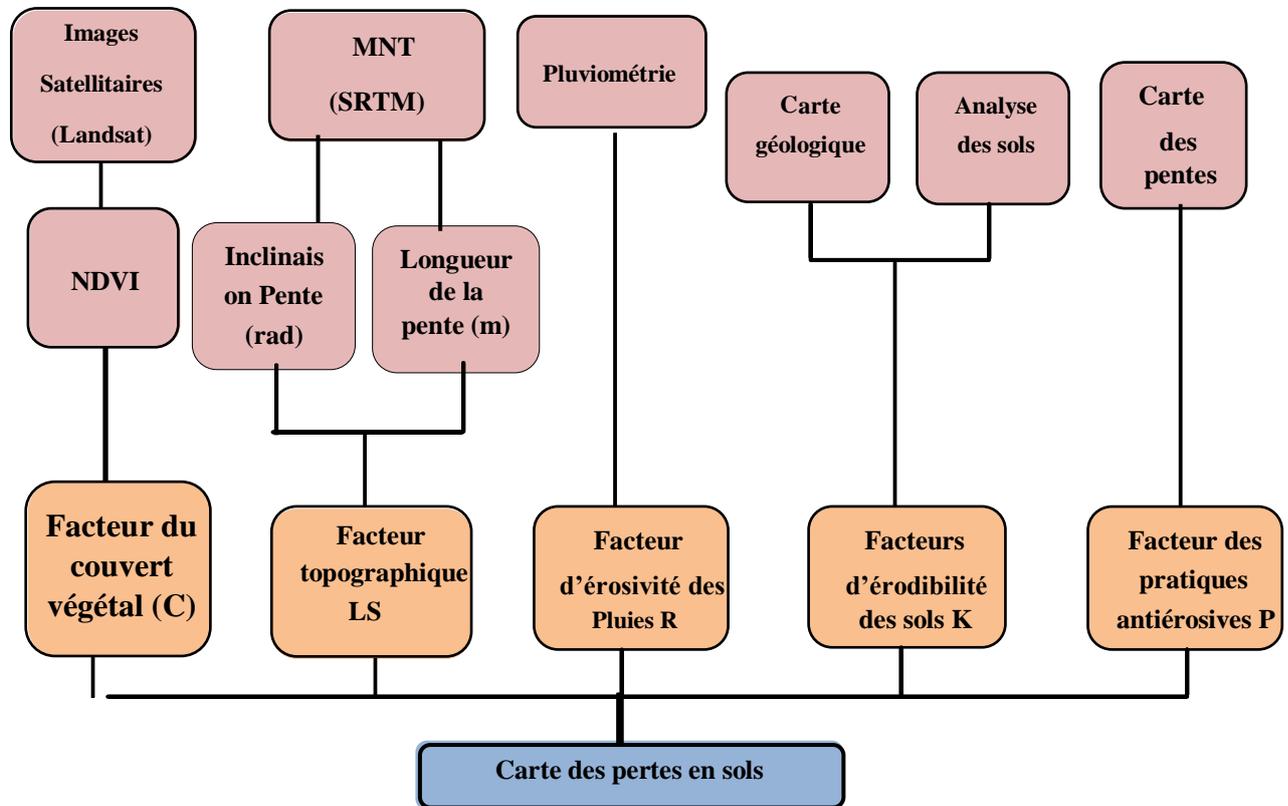
Sous une équation mathématique intégrée sur un outil GIS :

$$A = R \times LS \times K \times C \times P \quad (3.1)$$

Où :

**A** est une unité de mesure de la moyenne annuelle des pertes de terres dans le temps, exprimée en tonnes/hectare (tonnes impériales/acre) chaque année.

Le diagramme ci-dessous (**Figure 3-1**) résume toutes les étapes suivies pour calculer la perte annuelle moyenne de terrain causé par le phénomène érosif et cartographier la vulnérabilité des terrains à l'érosion hydrique sur l'ensemble du bassin fluvial.



**Figure 3- 1:** Organigramme de la méthodologie utilisée.

### 3.2.1. Facteur d'érosivité des pluies (R)

La pluie est le principal agent de l'érosion hydrique. L'érosivité de la pluie est définie comme une capacité à provoquer l'érosion. C'est le paramètre qui a été pris en compte pour évaluer l'impact de l'agression climatique sur les pertes de sol. Elle dépend principalement l'intensité de l'énergie pluviale directe ou cinétique résultante. Cette énergie est dérivée du diamètre des gouttes de pluie et de leur taux de chute. L'efficacité de la pluie par rapport aux processus d'érosion est liée aux rôles qu'elle joue dans le processus d'érosion, le détachement des particules du sol et surtout dans la formation du ruissellement.

Dans cette étude, R est déterminé par la formule suivante (*ARNOLDUS, 1977*). Nous sommes appuyés sur cette relation car elle s'applique sur notre zone d'étude en raison de la similitude entre le climat Algérien et le Marocain, climat méditerranéen.

Les travaux (*ARNOLDUS, 1977*) au Maroc ont montré que l'indice  $p_2/P$  de (*FOURNIER, 1960*) était faiblement corrélé ( $r^2 = 0,55$ ) avec la valeur du facteur R, où P est la pluviométrie

moyenne d'un mois avec la plus forte pluviométrie et P est la pluviométrie moyenne annuelle). À 178 arrêts (164 stations américaines et 14 stations d'Afrique de l'Ouest).  
 Changé en indice de Fournier où :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i}{P} \quad (3.2)$$

(ARNOLDUS, 1977) a obtenu des résultats beaucoup plus satisfaisants basés sur l'équation suivante :

$$R = 0,264F^{1.5} \quad (3.3)$$

Où :

3. F : est la valeur de l'indice modifié.
4. pi : p est la pluviométrie moyenne du mois le plus pluvieux (mm).
5. P : est la moyenne annuelle des précipitations (mm).

La (Figure 3- 1) représente une carte des pluies du bassin versant oued Safsaf réalisé avec (Outil SIG) :

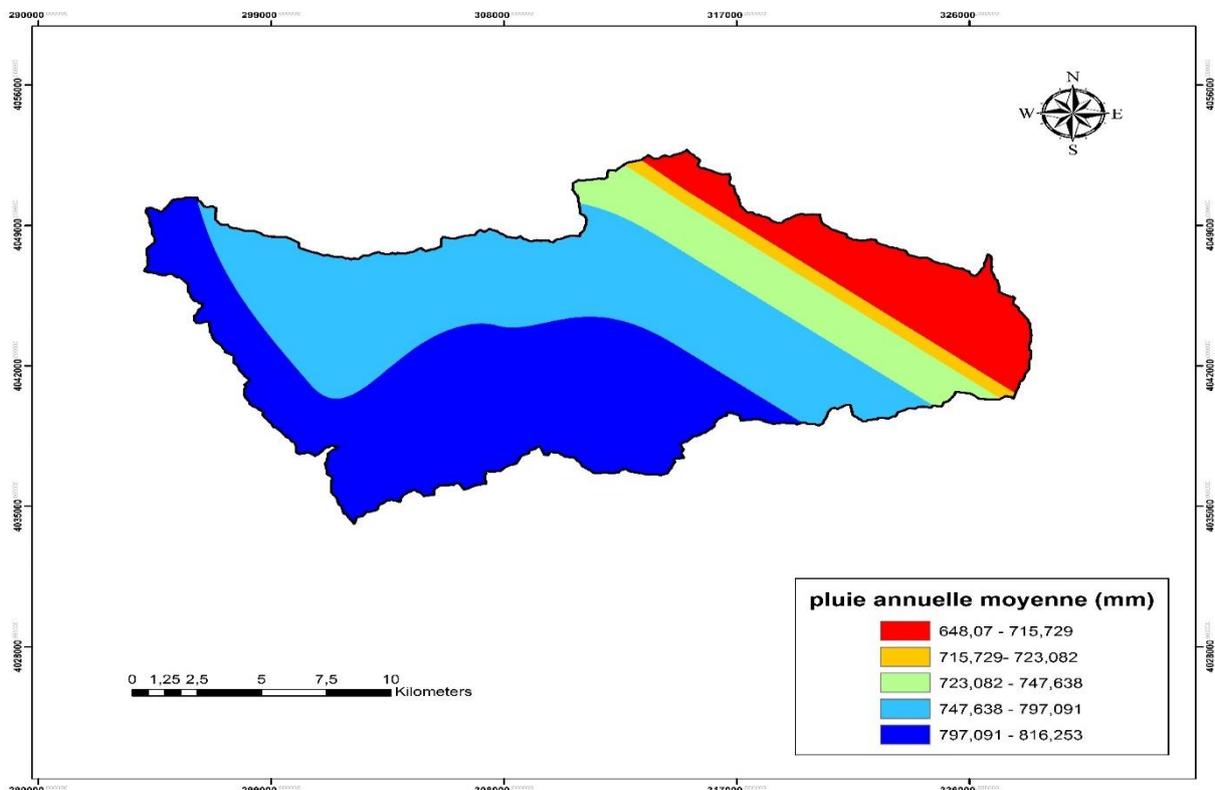


Figure 3- 2: Carte des pluies du bassin versant oued Safsaf (Outil SIG).

### 3.2.2. Facteur topographique (LS)

Le facteur topographique est la contribution générale de la longueur et de la pente du chemin à l'érosion du sol (*WISCHMEIER et SMITH, 1978*). Ce facteur correspond à un rapport de référence de perte de sol de 22,13 m et à une pente d'environ 0,08% (5,14 ou 9%) d'une unité de piste USLE ainsi, l'accumulation des joncs vers la descente conduit à une augmentation importante de l'énergie cinétique des joncs. La carte des pentes et la zone de montée basées sur le modèle numérique d'altitude (MNA) remplacent les mesures de pente standard pour la pente et la longueur. Le MNE provenant du radar de la navette a été utilisé dans cette étude 3 arc second version 4 de la Mission Topographique (SRTM). Le SRTM a été préféré en raison de sa large couverture, de son absence de nuages, de sa grande précision verticale et des meilleures relations spatiales des caractéristiques topographiques. L'extension Spatial Analyste du logiciel ArcGIS a été utilisée pour procéder aux puits artificiels et pour calculer les apports initiaux à l'aide du MNE corrigé (pente en degré, direction du flux et accumulation du flux), principalement utilisé pour l'estimation du LS. Ensuite, l'outil raster calculateur du logiciel ArcGIS situé dans l'extension ArcGIS des analystes de l'espace a été utilisé pour calculer la relation entre (*Dasmet & Govers, 1996*) séparément. Le facteur S a été établi suivant la recommandation de la pente. La cohérence du facteur de pente et d'inclinaison résultant a été testée. Échantillonné à une taille de cellule de 30 m, la pente et le facteur de pente ascendante résultants.

#### Equation de calcul de la Longueur

$$L_{i,j-in} = \frac{(A_{ij-in} + D^2)^{m+1} - A_{ij}^{m+1}}{X_{ij}^m \times D^{m+2} \times 22,13^m} \quad (3.4)$$

Avec :

$$m = \frac{\beta}{1+\beta} \quad (3.5)$$

$$\beta = \frac{\frac{\sin\theta}{0,0896}}{3 \times (\sin\theta)^{0,8} + 0,56} \quad (3.6)$$

$$X_{ij} = (\sin a_{i,j} + \cos a_{i,j}) \quad (3.7)$$

### Equation de calcul de la pente

$$S = \begin{cases} 10,8 \times \text{Sin}\theta_{(i,j)} + 0,3; & \text{si } (\text{Tan}\theta_{(i,j)} < 9\%). \\ 10,8 \times \text{Sin}\theta_{(i,j)} + 0,3; & \text{si } (\text{Tan}\theta_{(i,j)} < 9\%). \end{cases} \quad (3.8)$$

$L_{i,j-in}$  : Longueur de la pente pour la cellule de grille (i, j).

$A_{i,j-in}$  : Surface contributive à l'entrée de la cellule (i, j) (flow accumulation).

D : Taille des cellules de la grille (Résolution spatiale) [mètres].

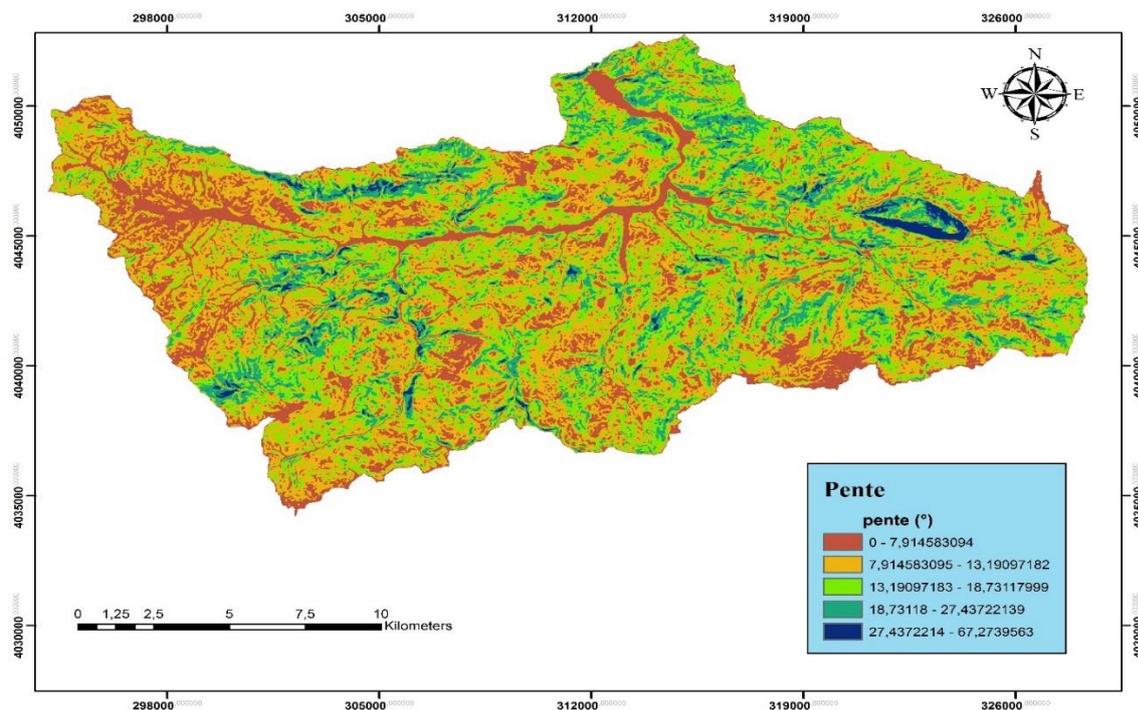
m : Exposant de longueur du facteur L (USLE).

$\Theta$  : l'angle de la pente [degré].

$a_i, j$  : direction des pentes.

$X_{ij}$  : rapport de l'érosion.

La (**Figure 3- 3**) représente une carte des pentes du bassin versant oued Safsaf (Outil SIG)



**Figure 3- 3:** Carte des pentes du bassin versant oued Safsaf (Outil SIG)

#### 3.2.3. Facteur du couvert végétal (C)

Le facteur de couverture (C) est le rapport entre l'érosion d'un sol sous une couverture bien définie et l'érosion d'un sol nu ; il représente l'influence du couvert végétal et des

techniques culturales sur l'érosion hydrique ; ce facteur varie de 1 sur un sol nu à 0,003 dans une forêt dense (*WISCHMEIER, SMITH, 1978*).

Plus le facteur C est élevé, plus la couverture végétale est épaisse et plus le potentiel érosif est faible. Il est calculé à partir de l'INDVI (indicateur de végétation par différence normalisé).

L'indice de végétation NDVI est calculé comme une relation entre les valeurs des bandes rouge (R) et proche infrarouge (PIR) (*TUCKER, 1979*)

**Tableau 3- 1:** Valeurs NDVI.

VALEURS NDVI	
Valeur de NDVI	Descriptions
$\leq 0,1$	Très faible NDVI
0,2 à 0,5	NDVI modéré
0,6 à 0,9	NDVI élevé

$$NDVI = (PIR - R_i) / (PIR + R_i) \quad (3.9)$$

Avec :

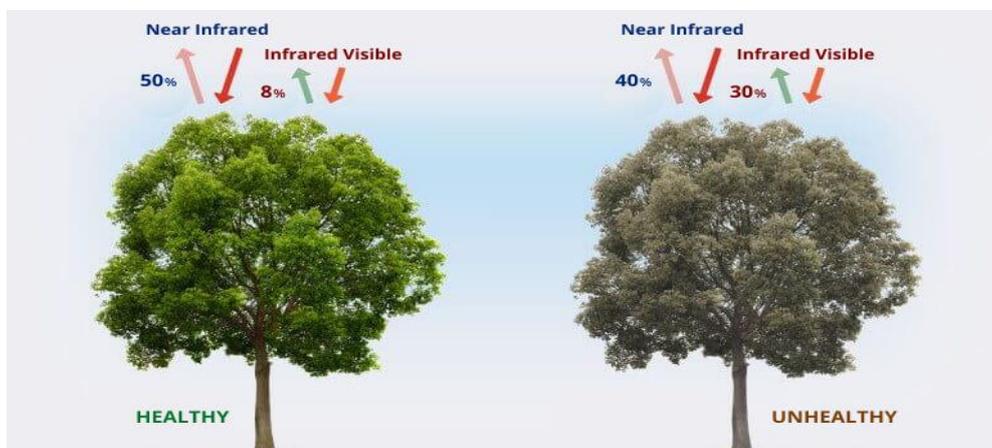
PIR : band Proche Infrarouge.

R<sub>i</sub>: band Rouge.

Pour les images Landsat 4-5 :

$$NDVI = (Bande4 - Bande3) / (Bande4 + Bande3) \quad (3.10)$$

NDVI : Normalized Différence Végétation Index ou bien Indice de végétation par différence normalisée, varie entre -1 et 1.



**Photo 3- 1:** Exemple de calcul (bande spectrales).

$$\text{NDVI} = \frac{(0,5 - 0,08)}{(0,5 + 0,08)}$$

$$\text{NDVI} = 0,72$$

High NDVI.

$$\text{NDVI} = \frac{(0,4 - 0,3)}{(0,4 + 0,3)}$$

$$\text{NDVI} = 0,14$$

Moderate NDVI

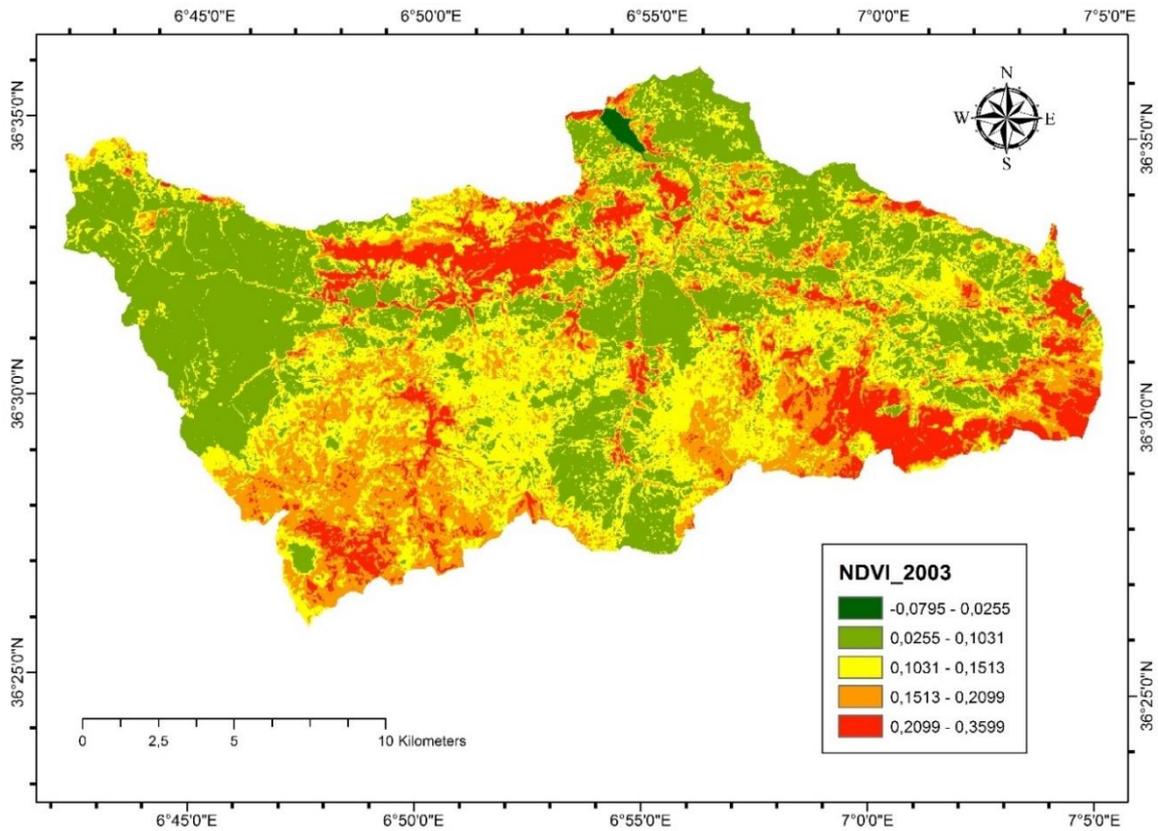
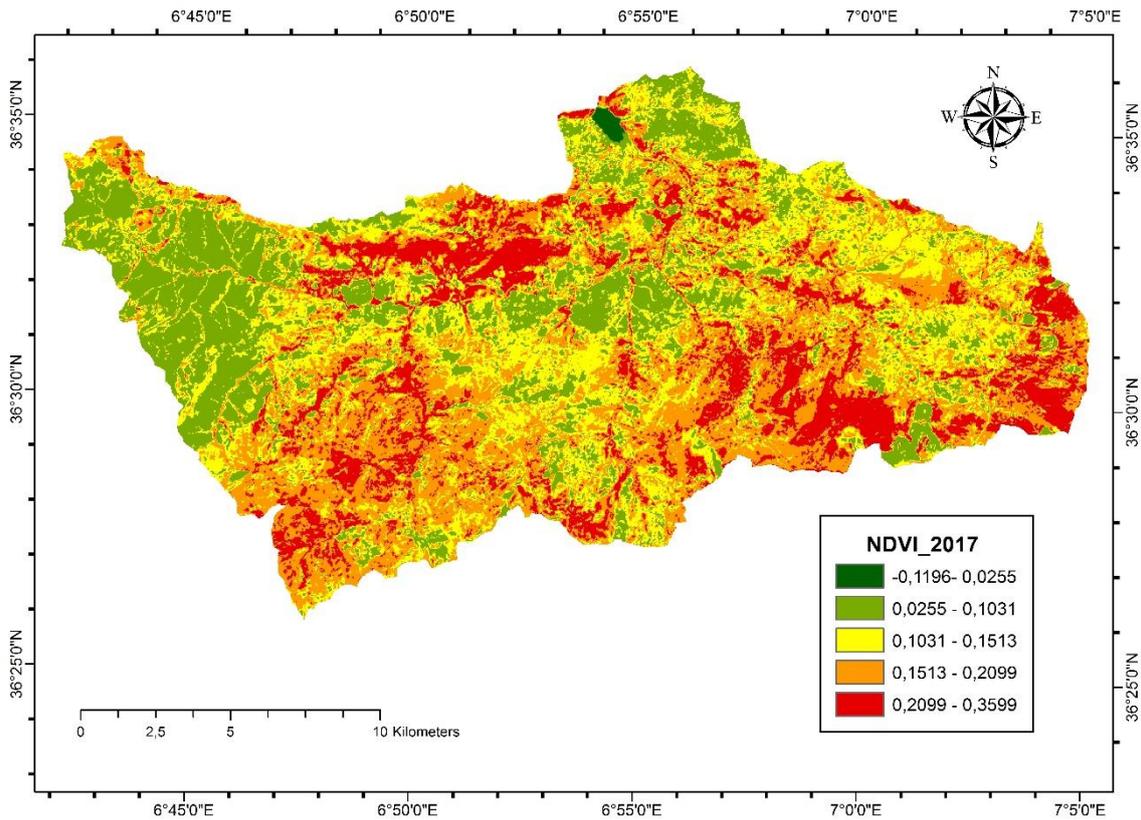


Figure 3- 4: Carte NDVI 2003 (Outil SIG).



**Figure 3- 5:** Carte NDVI 2017 (Outil SIG).

Le facteur C est calculé par la formule suivante (*VAN DER KNIJFF, 1999*) :

$$C = \exp\left[-\alpha * \left(\frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right)\right] \quad (3.11)$$

Où :  $\alpha$ ,  $\beta$  : Paramètres déterminants la forme de la courbe de NDVI-C, avec  $\alpha = 2$  et  $\beta = 1$ .

#### 3.2.4. Facteur d'érodabilité du sol (K)

L'érodabilité d'un sol est une mesure de sa résistance à l'érosion. Le facteur K est déterminé par les caractéristiques du sol, comme la texture.

Certains sols sont plus sensibles à l'érosion hydrique que d'autres.

Le facteur K est calculé par la formule suivante (*SHARPLEY., & VILLIAMS,1990*) (USDA) :

$$K = A_k * B * C * D \quad (3.12)$$

Avec :

$$A_k = 0.2 + 0.3 * \exp\left(-0.0256 * SAN * \left(1 - \frac{SIL}{100}\right)\right) \quad (3.13)$$

$$B = \left(\frac{SIL}{CLA+SIL}\right)^{0.3} \quad (3.14)$$

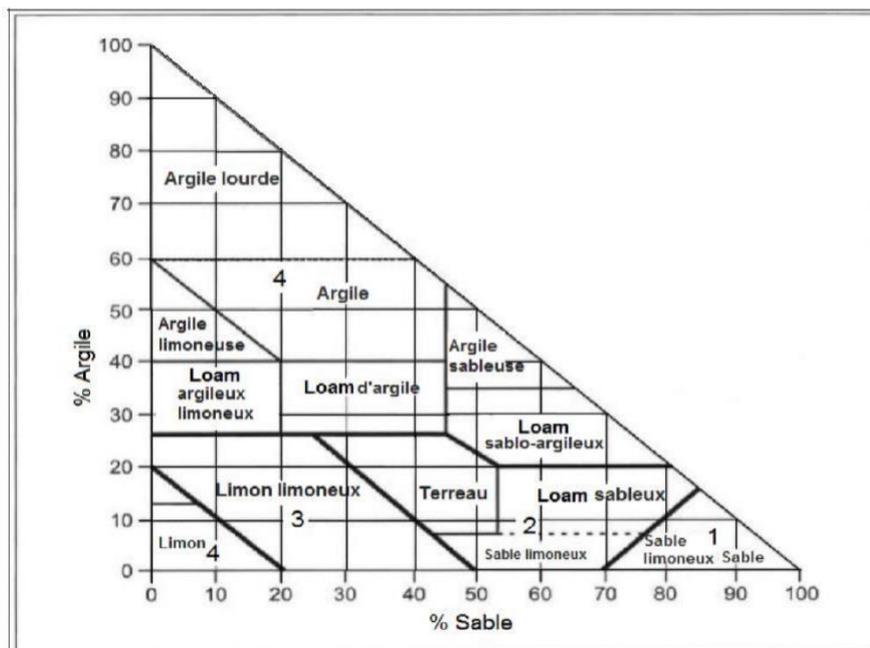
$$C = \left(1 - \frac{0.25*c}{c+\exp(3.72-2.95*c)}\right) \quad (3.15)$$

$$D = \left(1 - \frac{0.7*SN1}{SN1+\exp(-5.51+22.9*SN1)}\right) \quad (3.16)$$

$$SN1 = 1 - \frac{SAN}{100} \quad (3.17)$$

Avec :

- SAN : pourcentage de sable dans le sol (%).
- SIL : pourcentage de limon dans le sol (%).
- CLA : pourcentage d'argile dans le sol (%).
- c : pourcentage de carbone dans le sol (%).
- K : Facteur d'érodibilité du sol.



**Figure 3- 6:** Triangle de code de texture du sol basé sur la classification texturale (Centre ontarien d'évaluation des ressources en sols ,1993).

### 3.2.5. Facteur pratiques antiérosives (P)

Le facteur P reflète les techniques culturales (techniques de gestion des terres telles que le mode de travail et l'orientation des cultures) et les mesures de conservation des sols (revégétalisation des pentes), qui réduisent le volume et la vitesse d'évaporation de l'eau et favorisent l'infiltration en modifiant l'état structurel du sol, réduisant ainsi l'impact négatif.

Les valeurs de ce facteur vont généralement de 0,5 dans les zones développées et protégées à 1 dans les zones où la protection et le développement du sol et du pentacle sont presque inexistantes.

Le facteur P est calculé par la formule suivante (*WENER, 1981*) :

$$P = 0,26 + 0,03 * S \quad (3.18)$$

P : Facteur des pratiques antiérosives.

S : Slope (pente en %).

**Tableau 3- 2:** Classification du facteur P

Cultures	Facteur P
Pratique dans le sens de la pente	1
Pratique à contre-pente	0,75
Pratique suivant les courbes de niveau	0,5
Pratique en bandes, à contre-pente	0,37
Pratique en bandes, suivant les courbes de niveau	0,25

## Conclusion

Dans ce chapitre, l'intégration du modèle de prévision de perte en sol (RUSLE) dans un système d'information géographique "ArcGIS" nous a permis d'établir pour chaque facteur érosif une carte qui les caractérise sur la totalité du bassin versant de l'oued Safsaf et de mettre en évidence les zones présentant un degré critique de sensibilité à l'érosion hydrique et qui doivent être considérées comme priorité dans les éventuels plans d'aménagement antiérosif dans le bassin versant, qui visent à réduire les apports solides au barrage Zerdézas et prolonger sa durée de vie.

Chaque facteur est calculé avec la méthode la plus appropriée et adaptée avec les caractéristiques de la zone d'étude pour obtenir plus de précision dans la quantification du volume de sol érodé. Ce calcul nous a conduits à interpréter et discuter les résultats dans le chapitre suivant.

# **Chapitre 4 : Discussion des résultats d'érosion**

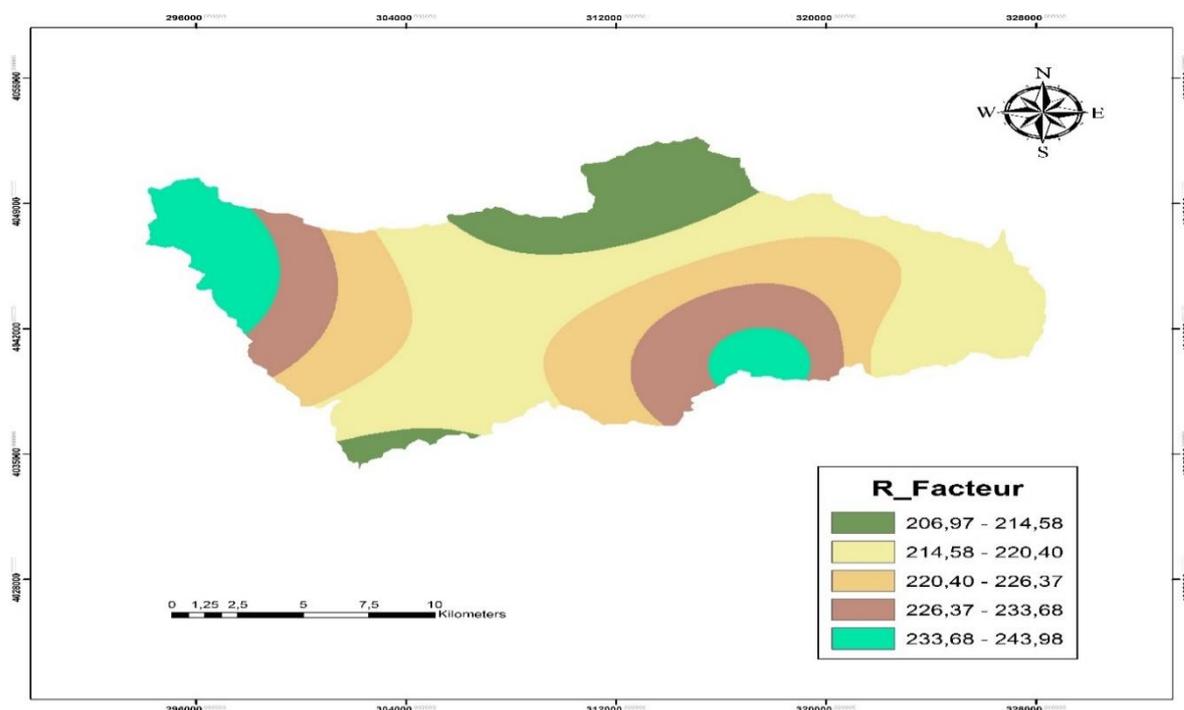
## Chapitre 4 : Discussion des résultats d'érosion

### 4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'intégration du modèle de prédiction des pertes dans un système d'information géographique (SIG) pour élaborer et discuter toutes les cartes des facteurs influençant le taux d'érosion sur l'ensemble du bassin versant de Safsaf. La multiplication de ces cartes nous amène à avoir une carte du risque érosif que nous discuterons afin de planifier des solutions sur l'ensemble du bassin versant pour réduire ce risque.

### 4.2. Facteur R

La Figure ci-dessous (**Figure 4-1**) montre la répartition du facteur R (l'érosivité des pluies) sur le bassin versant d'oued Safsaf :



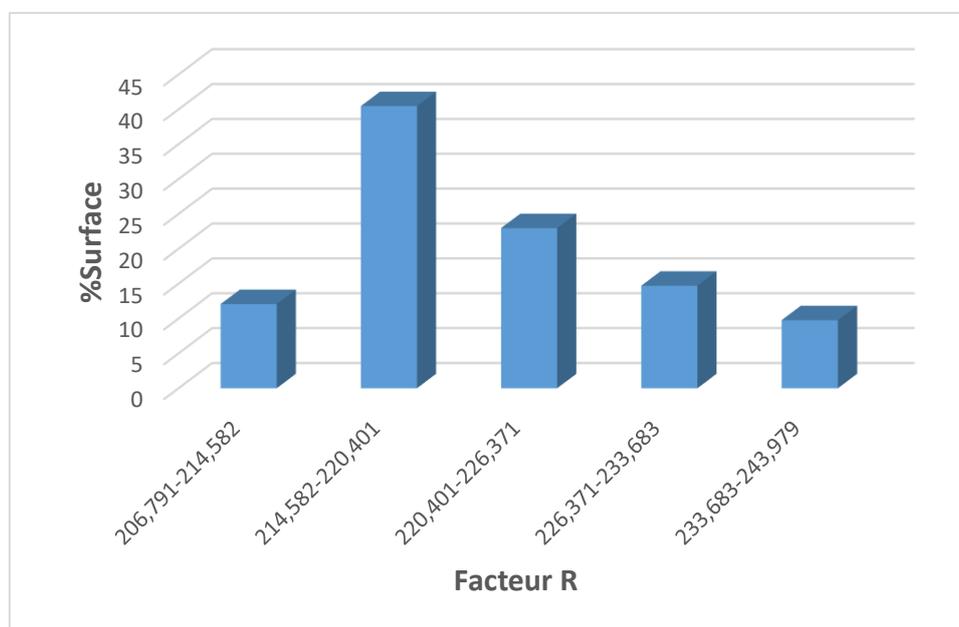
**Figure 4- 1:** Carte de répartition du facteur R dans le bassin versant de l'oued Safsaf (Outil SIG)

Le Facteur R varie entre 206,97 et 243,98 [Mj.mm/ha.h.an] dans le bassin versant d'oued Safsaf, avec une valeur moyenne de 221,578 [Mj.mm/ha.h.an]. Le facteur d'érosion pluviale (Facteur R) est important à l'ouest du bassin versant de l'oued Safsaf.

L'histogramme ci-dessous (**Figure 4-2**) montre la répartition des classes du facteur d'érosivité des pluies (Facteur R)

**Tableau 4- 1:** Répartition des classes du facteur d'érosivité des pluies

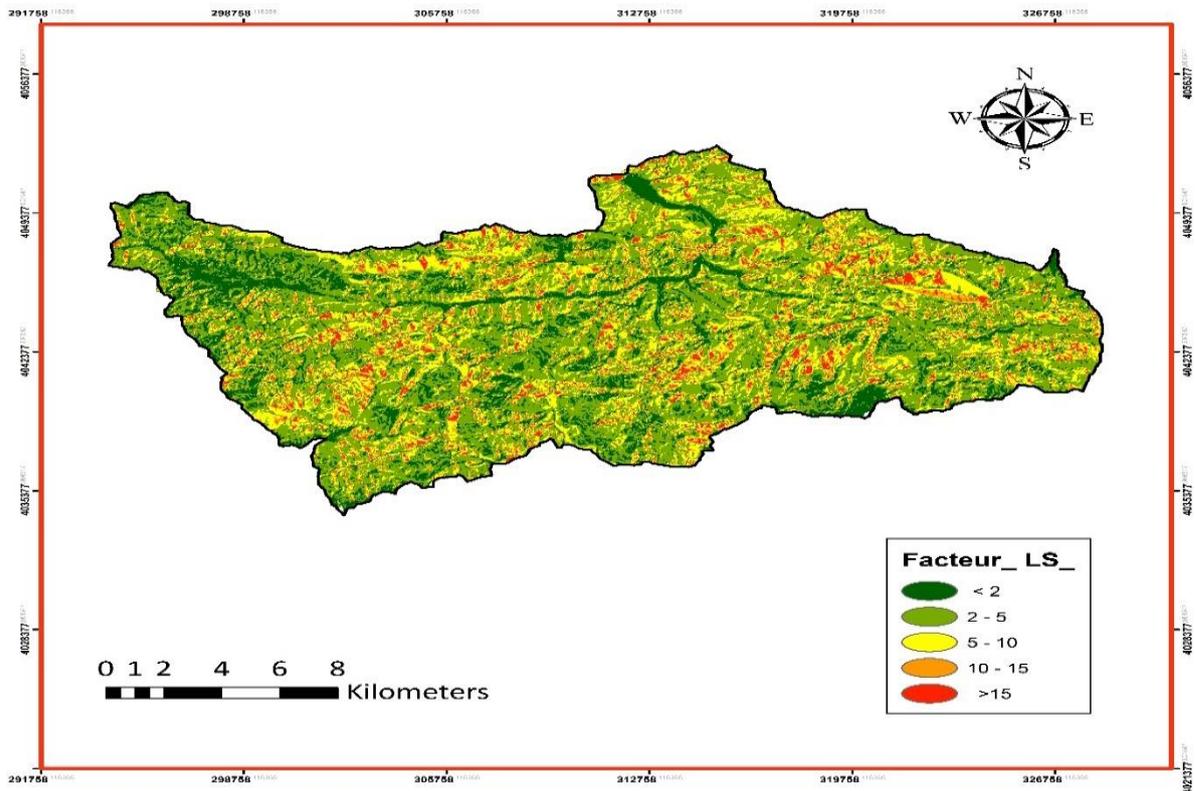
Facteur R	Surface ( $Km^2$ )	% Surface
206,79-214,58	41,57	12,07
214,58-220,40	139,35	40,46
220,40-226,37	79,07	22,96
226,37-233,68	50,63	14,70
233,68-243,97	33,60	9,75



**Figure 4- 2:** Répartition des classes du facteur d'érosivité des pluies (Facteur R).

### 4.3. Facteur LS

La Figure ci-dessous (**Figure 4-3**) montre la répartition du facteur LS (Facteur topographique) sur le bassin versant d'oued Safsaf :



**Figure 4- 3:** Carte de répartition du facteur LS dans le bassin versant d’oued Safsaf (Outil SIG)

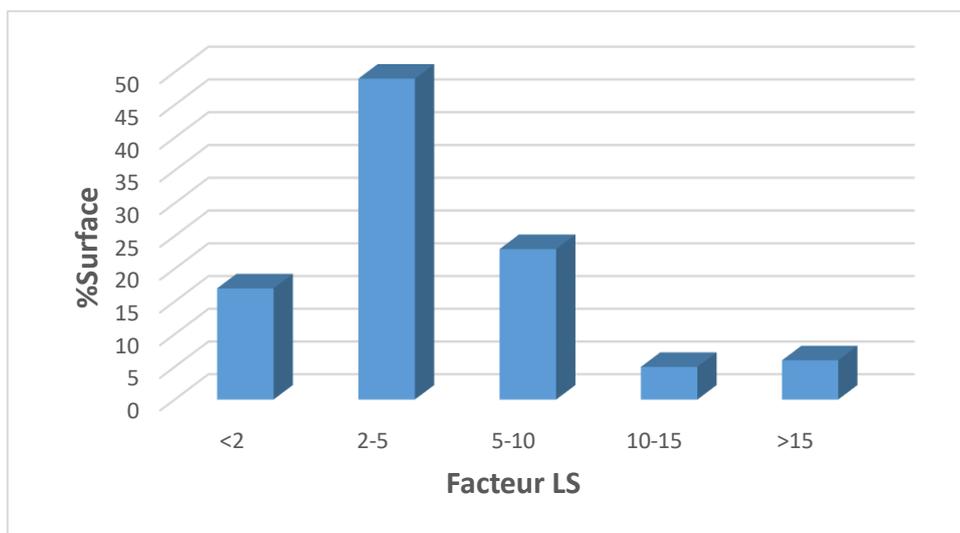
Le facteur topographique LS est déterminé en calculant la longueur de la pente (L) et son inclinaison (S) en utilisant l’MNT du bassin versant de oued Safsaf.

Dans le bassin versant de oued Safsaf le facteur topographique LS varie entre 0,03 et 80 ;cette variance peut être expliquée par l’hétérogénéité du terrain dans notre zone d’étude. La valeur moyenne du facteur LS est de 5,76. Des valeurs plus élevées sont fréquemment trouvées dans la partie ‘Est’ du bassin versant où prédominent les pentes des classes élevées à très élevées.

L’histogramme ci-dessous (**Figure 4-4**) montre la répartition des classes du facteur topographique (Facteur LS) :

**Tableau 4- 2:** Répartition des classes du facteur topographique

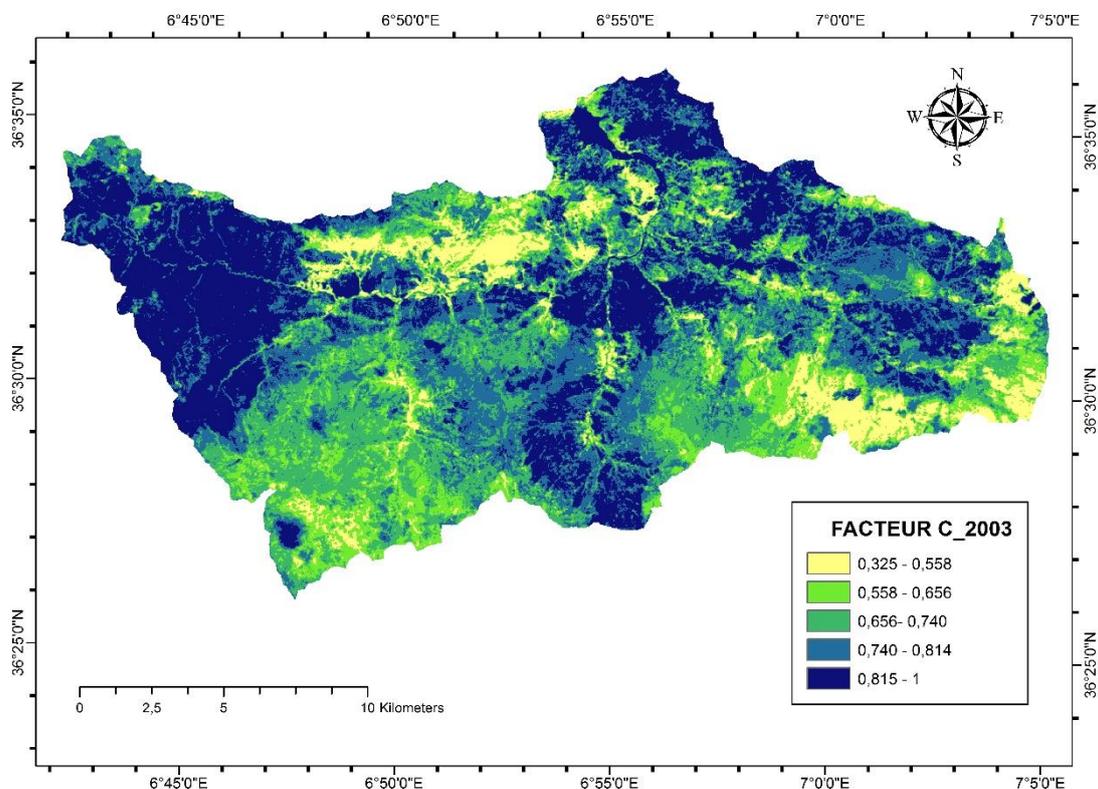
Facteur LS	Surface ( $Km^2$ )	% Surface
<2	59,23	17,00
2,0-5,0	168,03	49,00
5,0-10,0	78,14	23,00
10,0-15,0	18,10	5,00
>15,0	19,48	6,00



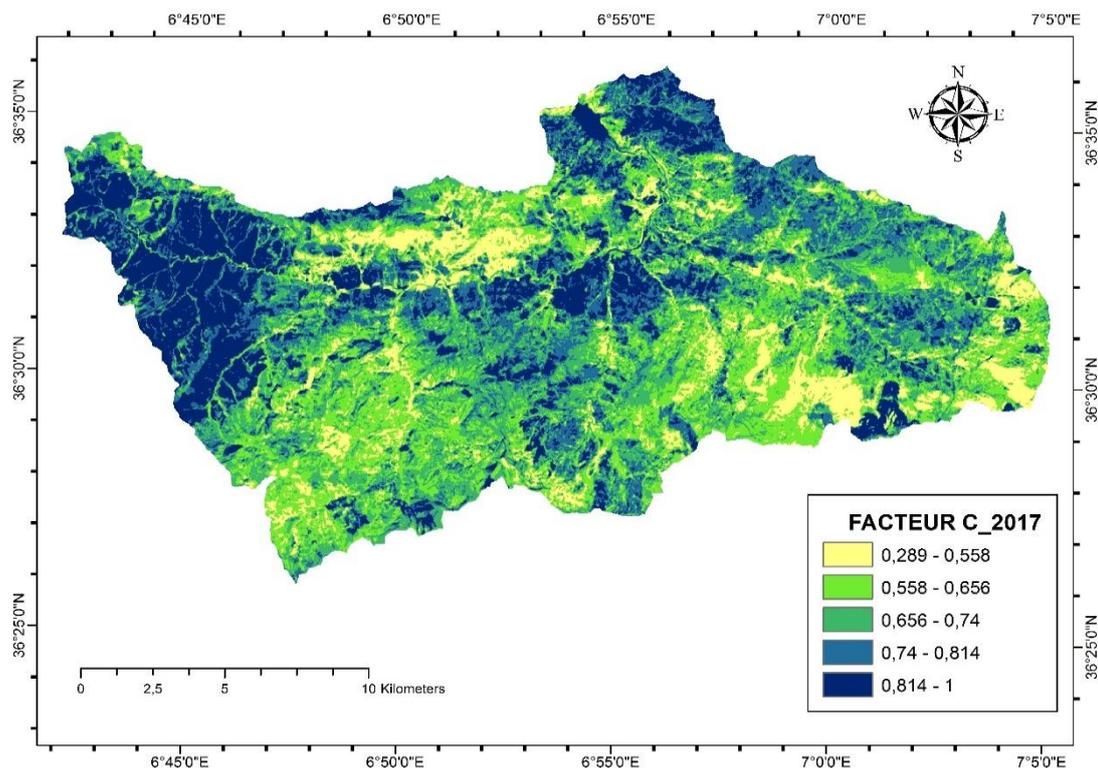
**Figure 4- 4:** Répartition des classes du facteur topographique (Facteur LS).

#### 4.4. Facteur C

Les Figures ci-dessous (**Figure 4-5**) et (**Figures 4-6**) montrent la répartition du facteur C (Facteur du couvert végétale) en 2003 et 2017 sur le bassin versant d’oued Safsaf :



**Figure 4- 5:** Carte de répartition du facteur C dans le bassin versant d’oued Safsaf en 2003(Outil SIG)



**Figure 4- 6:** Carte de répartition du facteur C dans le bassin versant d’oued Safsaf en 2017(Outil SIG)

### **En 2003**

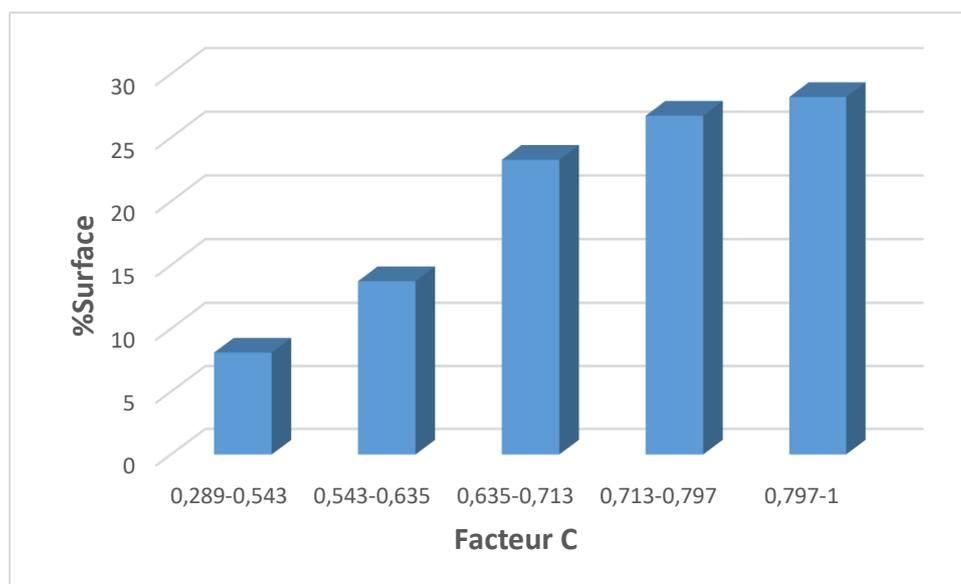
Dans la présente étude nous avons utilisé des données de télédétection pour l’estimation du facteur C du couvert végétale et cela avec le satellite Landsat 5.

Dans cette zone le facteur C varie entre 0,32 à 1 et une moyenne de 0,735 qui est estimé élevée, les faibles valeurs du facteurs C (0,32) correspondent aux zones fortement végétalisées (une couverture dense) situé au Nord-ouest et au Sud-Est du bassin versant,les fortes valeurs du facteur C (1) correnspndent aux zones nus (dans notre bassin versant une très grande surface nu située a l’ouest à proximité de la ville zighoud youcef).

L’histogramme ci-dessous (**Figure 4-7**) montre la répartition des classes du facteur C (Facteur du couvert végétale) : (en 2003)

**Tableau 4- 3:** Répartition des classes du facteur C en 2003

Facteur C	Surface ( $Km^2$ )	% Surface
0,32-0,55	27,91	8,10
0,55-0,65	47,28	13,72
0,65-0,74	80,10	23,25
0,74-0,81	92,02	26,72
0,79-1	97,07	28,18



**Figure 4- 7:** Répartition des classes du Facteur C en 2003

L’histogramme montre que plus de (1/2) de la superficie du bassin versant de oued Safsaf est caractérisée par un facteur C élevé (plus de (1/2) de la superficie du BV a une couverture végétale faible en générale ces terres sont improductive).

### En 2017

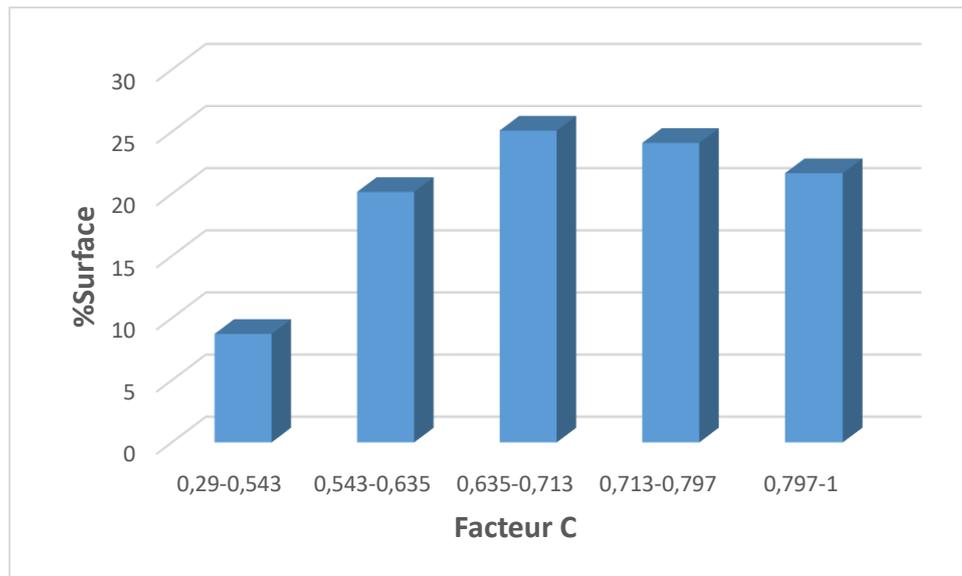
Nous avons utilisé les donnée de teledetection pour l’estimation du facteur C avec le satellite Landsat 8.

Le facteur C varie entre 0,289 et 1, La valeur moyenne relativement élevée estimée à 0,697 du facteur C s'explique par la présence d’une vaste zone agricole, Les faibles valeurs des facteurs C (0,289) correspondent à des zones à végétation dense (une couverture dense), Les valeurs élevées du facteur C (1) correspondent à des zones nus (dans notre bassin, une grande zone de terres nus est située à l’est, près de la ville de Zighoud Youcef).

L’histogramme ci-dessous (**Figure 4-8**) montre la répartition des classes du facteur C (Facteur du couvert végétale) : (en 2017).

**Tableau 4- 4:** Répartition des classes du facteur C en 2017

Facteur C	Surface ( $Km^2$ )	% Surface
0,289-0,55	30,08	8,73
0,55-0,65	69,43	20,16
0,65-0,74	86,44	25,10
0,74-0,81	83	24,10
0,79-1	74,62	21,67



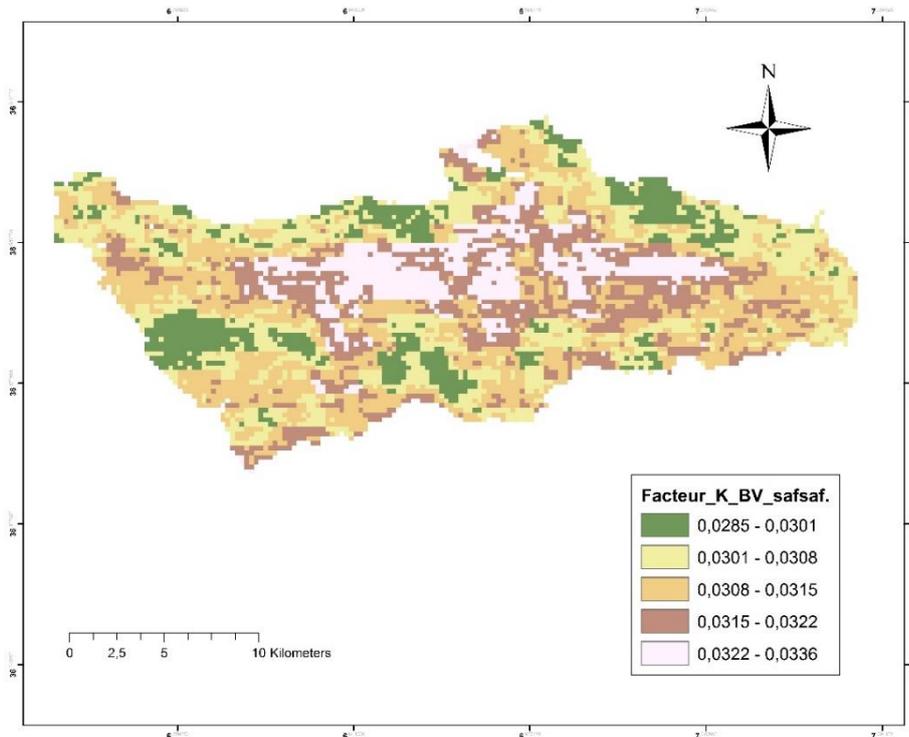
**Figure 4- 8:** Répartition des classes du facteur C en 2017

Plus de 70% de la superficie des terres ayant un facteur C modéré est occupée par des terres agricoles (cultures et cultures associées au chemin). Néanmoins, moins de 20% de la surface du bassin des affluents de la rivière Safsaf est caractérisée par un facteur C élevé.

Très élevées en général, ces terres sont improductives.

## 4.5. Facteur K

La Figure ci-dessous (**Figure 4-9**) montre la répartition de l'érodibilité du sol (Facteur K) sur le bassin versant d'oued Safsaf :



**Figure 4- 9:** Carte de répartition du facteur K dans le bassin versant d'oued Safsaf en 2003(Outil SIG)

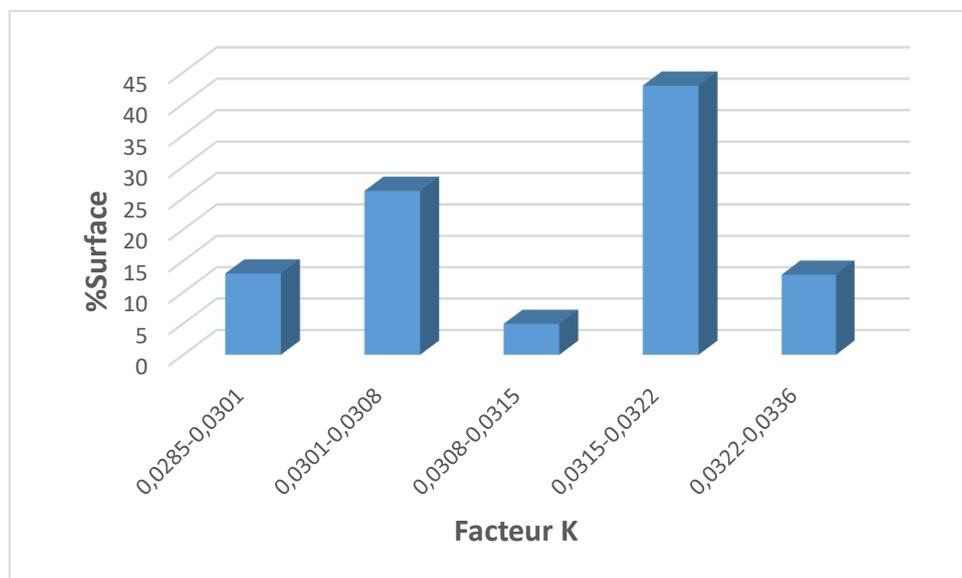
Le facteur K est déterminé à partir des cartes de sols (argile-sable-limon et carbon).

Le facteur K varie entre 0.0285 et 0.0336 [t. ha.h/ha.MJ.mm], les faibles valeurs du facteur K s'expliquent par la texture grossière des sols qui favorisent l'infiltration aux dépens du ruissellement, la valeur moyenne de l'érodibilité du sol dans le bassin versant d'oued Safsaf est 0.0311 [t. ha.h/ha.Mj.mm] (pour les zones moyennement sensibles à l'érosion).

L'histogramme ci-dessous (**Figure 4-10**) montre la répartition des classes du facteur K (Facteur d'érodibilité du sol) : (en 2003).

**Tableau 4- 5:** Répartition des classes du facteur K en 2003

Facteur K	Surface ( $Km^2$ )	% Surface ( $Km^2$ )
0,0285-0,0301	44,60	12,95
0,0301-0,0308	89,94	26,12
0,0308-0,0315	16,98	4,93
0,0315-0,0322	147,61	42,86
0,0322-0,0336	43,95	12,76

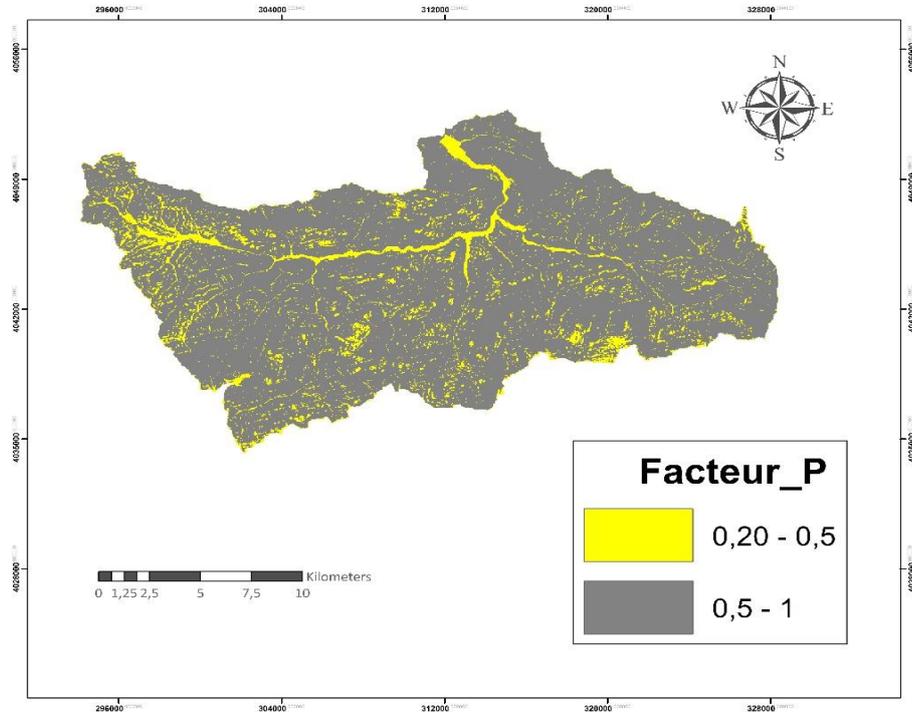


**Figure 4- 10:** Répartition des classes du facteur K en 2003

Selon (**BOLLINE & ROUSSEAU, 1978**), la classification de la résistance des sols basée sur le facteur k montre que près de 75 % de la surface du bassin étudié est sensible à l'érosion hydrique, alors que seulement 25 % de la surface totale du bassin est résistante à l'érosion hydrique. Cette forte corrodabilité s'explique par la texture dominante limoneuse à limono-argileuse du site d'étude (Safsaf).

## 4.6. Facteur P

La Figure ci-dessous (**Figure 4-11**) montre la répartition de l'érodibilité du sol (Facteur P) sur le bassin versant d'oued Safsaf :



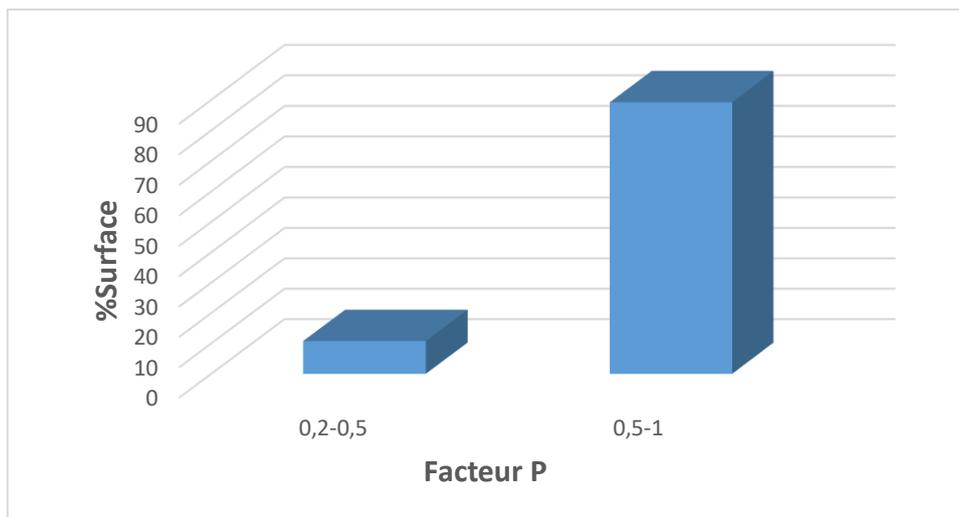
**Figure 4- 11:** Carte de répartition du facteur P dans le bassin versant d'oued Safsaf en 2003(Outil SIG)

Le facteur P est déterminé à partir du modèle numérique de terrain MNT du bassin versant d'oued Safsaf et la carte des pentes du bassin versant. Avec une valeur comprise entre 0.2 et 1 et une valeur moyenne de 0.796.

L'histogramme ci-dessous (**Figure 4-12**) montre la répartition des classes du facteur (Facteur P) :

**Tableau 4- 6:** Répartition des classes du facteur P en 2003

Facteur P	Surface ( $Km^2$ )	% Surface
0,2-0,5	37,19	10,79
0,5-1	307,20	89,20



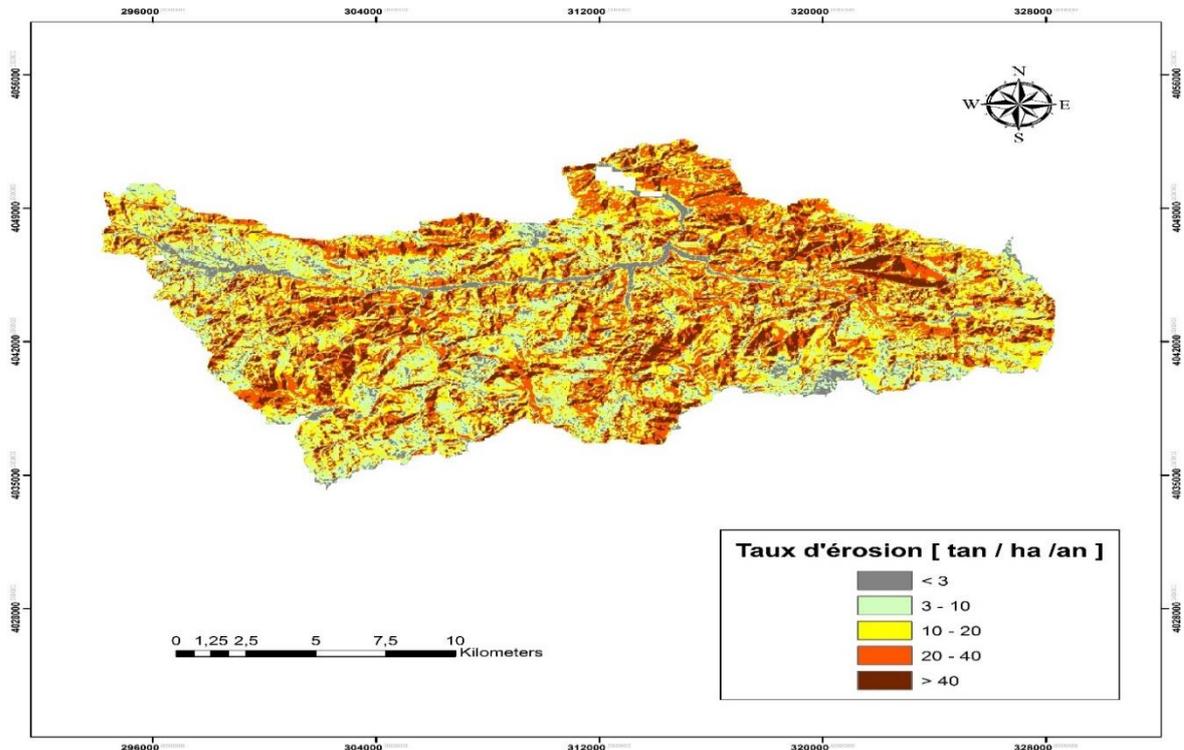
**Figure 4- 12:** Répartition des classes du facteur P en 2003

Le facteur P est grand dans la majorité de la surface du bassin versant, cette valeur s'explique par l'absence de pratiques culturales antivirales sur (89,03%) de la surface totale du bassin.

Les principales pratiques culturales rencontrées dans la zone d'étude comprennent un système de polyculture basé sur l'arboriculture de montagne associée à une large gamme d'agriculture annuelle, le travail dans le sens inverse de la pente, et quelques fourragères (plantations en bandes parallèles aux courbes de niveau) sur des terrains reposant sur des pentes moyennes et basses.

## 4.7. Taux d'érosion

Après multiplication des cinq facteurs (R-LS-C-K-P) sur ArcGIS, on a obtenu les cartes d'érosions suivantes (**Figure 4-13**) et (**Figure 4-15**) :

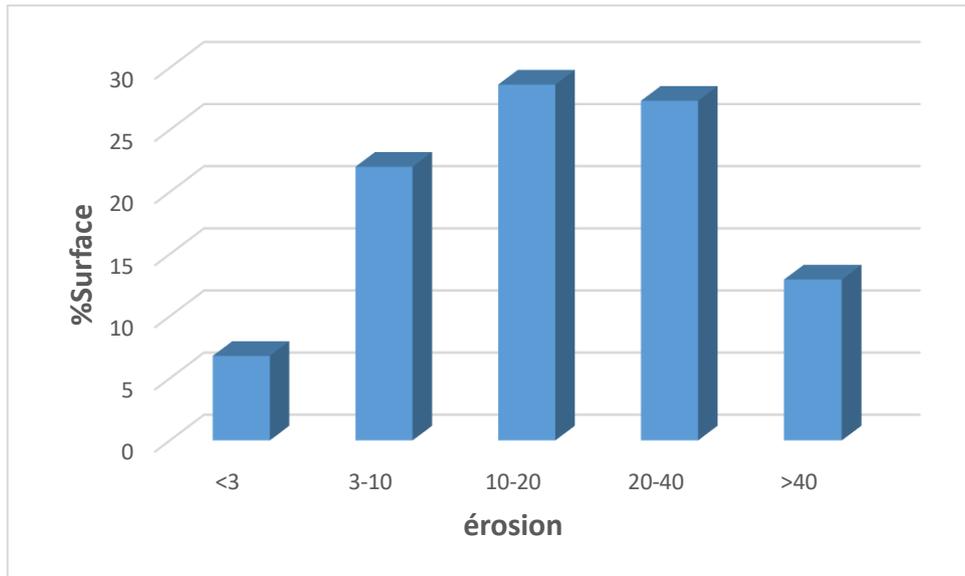


**Figure 4- 13:** Carte de répartition du taux d'érosion en 2003 (Outil SIG).

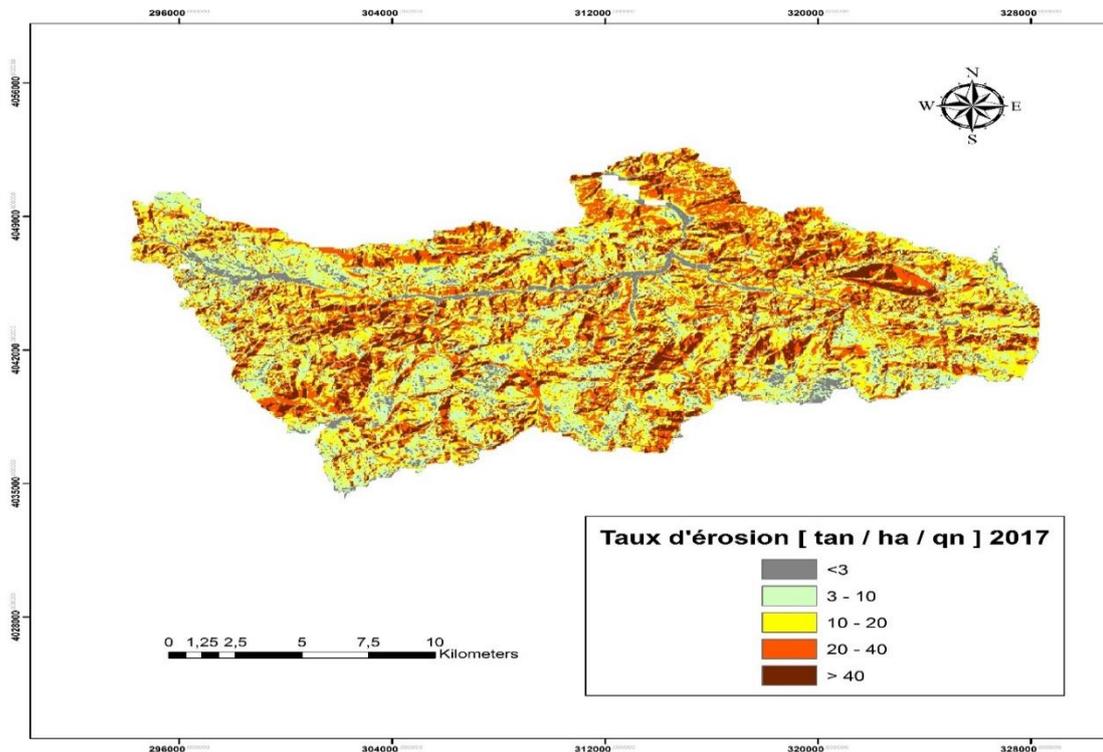
L'histogramme ci-dessous (**Figure 4-14**) montre la répartition des classes du taux d'érosion (en 2003) :

**Tableau 4- 7:** Répartition des classes du taux d'érosion en 2003

Érosion	Surface ( $Km^2$ )	%Surface
<3	23,43	6,80
3-10	75,86	22,03
10-20	98,62	28,64
20-40	94,14	27,33
>40	44,58	12,94



**Figure 4- 14:** Répartition des classes du taux d'érosion en 2003.

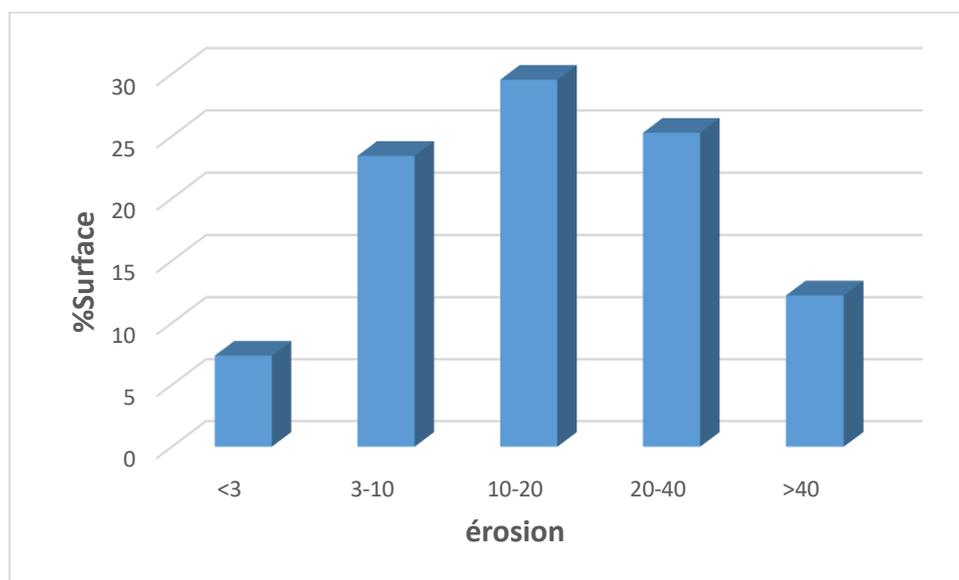


**Figure 4- 15:** Carte de répartition du taux d'érosion en 2017 (Outil SIG).

L'histogramme ci-dessous (**Figure 4-16**) montre la répartition des classes du taux d'érosion (en 2017) :

**Tableau 4- 8:** Répartition des classes du taux d'érosion en 2017

Érosion	Surface ( $Km^2$ )	%Surface
<3	7,37	25,38
3-10	23,42	80,66
10-20	29,54	101,72
20-40	25,28	87,06
>40	12,22	42,07



**Figure 4- 16:** Répartition des classes du taux d'érosion en 2017.

Dans cette étude, nous avons pu estimer l'ensemble des facteurs qui influencent le phénomène érosif en 2003 et 2017 ; la combinaison de ces facteurs en mode raster sous ArcGIS nous a permis de créer une carte des pertes au sol pour toute la zone de l'Oued Safsaf.

Le taux d'érosion varie d'un site à l'autre, mais il est important (plus de 20 t/ha/an) dans les zones proches du bassin versant du barrage Zerdézas. Ces zones, qui se distinguent par des sols plus érodés et des pentes plus fortes, sont sérieusement menacées par le phénomène érosif.

La perte moyenne de sol due à l'érosion hydrique dans le bassin versant Safsaf a été calculée à 25,12 t/ha/an en 2003 et à 24 t/ha/an en 2017, On remarque une diminution de 1,12 t/ha/an entre les deux intervalles de calcul, ces valeurs dépassent la tolérance moyenne du sol à l'érosion hydrique qui est de 7 t/ha/an (*SADIKI, 2009*). Cependant, ensuite nous avons regroupés ces résultats ont plusieurs classes. La première classe porte des zones à faible vulnérabilité couvrent 6,80% de la zone d'étude, la deuxième les zones de vulnérabilité moyenne couvrent 22,02%, la troisième les zones de forte vulnérabilité couvrent 56% et la dernière assemble les zones de vulnérabilité extrêmement forte couvrent 12.93% du bassin versant oued Safsaf.

## **Conclusion**

Les résultats obtenus, présentés sous la forme de cartes de pertes annuelles de sol, ont permis d'identifier les zones sensibles nécessitant des interventions prioritaires pour la gestion, le développement et la conservation des sols ainsi que pour réduire les apports solides au barrage de Zerdézas et prolonger sa durée de vie (réduire le phénomène de l'envasement).

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

Notre travail vise à évaluer et quantifier le taux d'érosion hydrique sur le bassin versant oued Safsaf en utilisant le modèle développé par Wheichmeir et Smith l'équation universelle de perte de sol révisé RUSLE dans un système d'information géographique (SIG). Ce travail nous a mené à conclure les points suivants :

✓ Le travail nous a permis l'élaboration de la carte de répartition du taux d'érosion après avoir la multiplication des cinq facteurs : l'érosivité des pluies (R), la topographie (LS), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives (P), sur la région de Zerdézas qui se situe au nord-est de l'Algérie caractérisée par une superficie de 343.78 km<sup>2</sup>.

✓ L'utilisation de l'équation universelle de perte de sol révisée (RUSLE) permet de mieux comprendre la distribution spatiale de l'érosion dans le bassin étudié. Les résultats indiquent que les valeurs les plus élevées ont été observées dans les zones à fortes pentes et sans végétation à côté du barrage Zerdézas.

✓ La cartographie nous a permis d'estimer un taux d'érosion annuel moyen de [25,12 t/ha/an] en 2003 et de [24 t/ha/an] en 2017. La différence entre ces deux taux se résume à la réduction du facteur de couverture végétale (C) de 0,735 à 0,697, ce qui nous a amené à dire que le facteur du couvert végétal (C) est un facteur plus important qui a un impact très important sur l'influence de l'érosion parmi les quatre autres facteurs.

✓ Les taux d'érosion dépassent la limite moyenne de tolérance des sols vis-à-vis de l'érosion (7 t/ha/an) dans chaque pixel divisé en quatre classes de vulnérabilité multifactorielle dans le bassin versant. Les zones à faible vulnérabilité couvrent 6,80% de la zone étudiée, les zones à vulnérabilité moyenne 22,02%, les zones à haute vulnérabilité 56% et les zones à haute vulnérabilité à très haute couvrent 12,93%, des bassins versants Safsaf.

La mise en œuvre de cette approche a donné des résultats respectables qui peuvent fournir une aide précieuse à très faible coût aux décideurs pour simuler des scénarios d'évolution et cibler les zones prioritaires qui nécessitent une action de conservation et de contrôle de l'érosion, Ainsi pour l'élaboration d'un nouveau plan d'aménagements anti érosif dans le bassin versant de oued Safsaf.

# **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- ADEDIJI A., TUKUR A.M., ADEPOJU K.A. 2010.** Assessment of Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Katsina Area, Katsina State of Nigeria using Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS). *Iranica Journal of Energy and Environment*. Vol. 1. Iss. 3. p. 255-264.
- AIT ELKADIM, EL KEDMIRI .A.** Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant du barrage Mly Abdallah ( Haut atlas occidental, Maroc). P 8 ,29
- ALKHARABSHEHA M.M., ALEXANDRIDISA T.K., BILASB G., MISOPOLINOSB N., SILLEOSA N. 2013.** Impact of land cover change on soil erosion hazard in northern Jordan using remote sensing and GIS. *Procedia Environmental Sciences*. Vol. 19. p. 912 – 921
- ANGIMA S.D., STOTT D.E., O'NEILI M.K., ONG C.K., WEESIES G.A. 2003.** Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. 97. Iss. 1. p. 295-308
- ANYS H. (1991).** Utilisation des données de télédétection dans un système d'information géographique pour l'étude de l'érosion hydrique du bassin versant de l'Oued Aricha (Settat - Maroc). Mémoire de Maîtrise, Département de géographie et télédétection. Université Sherbrooke, Québec. Canada.
- ANYS H., BONN F., MERZOUK A. 1994.** Remote Sensing and GIS Based Mapping and Modeling of Water Erosion and Sediment Yield in a Semi-Arid Watershed of Morocco *Geocarto International*. Vol. 9. Iss. 1. p. 31-40.
- ARNOLDUS, H.M.J. (1977)** Methodology Used to Determine the Maximum Potential Range Average Annual Soil Loss to Sheet and Rill Erosion in Morocco. *Assessing Soil Degradation, FAO Soils Bulletin (FAO)*, 34, 39-48.
- BENKADJA R., BOUSSAG F., BENKADJA A. 2015.** Identification et évaluation du risque d'érosion sur le bassin versant du K'sob (Est Algérien). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Vol. 74. Iss. 1. p. 91-102.
- BOLLINE, & ROUSSEAU. (1978).** Erodibilité des sols de moyenne et haute Belgique. Utilisation d'une méthode de calcul du facteur K de l'équation universelle de perte en terre. *Bull. Soc. Géog. de Liège*. 14.4, 127-140.
- BOUGUERRA et al. (2018).** Quantification et modélisation des transports solides, cartographie des zones à risques d'érosion hydrique par utilisation d'un SIG: application aux bassins de Bouhamdane et Ressoul (Nord-Est Algérien). Thèse de doctorat .Université aboubakr belkaid -Telemcen, Telemcen.,164p

- BOUHADEB C.H.E., MENANI M.R., BOUGUERRA H., DERDOUS O. 2018.** Assessing soil loss using GIS based RUSLE methodology. Case of the Bou Namoussa watershed – North-East of Algeria. *Journal of Water and Land Development*. No. 36 p. 27–35.
- BOUSSAMA. (1996).** Système d'information pour la conservation et la gestion des ressources naturelles ; Colloque International sur le rôle des technologies de télécommunication et de l'information en matière de protection de l'environnement, Tunis, 12 Novembre 1996.
- CHEBBANI, R., DJELLIL, K., ROSSE, E. (1999).** Etude des risques d'érosion dans le bassin versant Isser, Algérie. *Bulletin Réseau Erosion* 19 : 85-95.
- CHEN H., EL-GAROUANI A., LEWIS L.A. 2008.** Modelling soil erosion and deposition within a Mediterranean mountainous environment utilizing remote sensing and GIS – Wadi Tlata, Morocco. *Geographica Helvetica*. Vol. 63. Iss. 1. p. 36-47.
- CHEVALIER, J. J., POULIOT, J., THOMSON, K., BOUSSEMA, M. R. (1995).** Système d'aide à la planification pour la conservation des eaux et des sols (Tunisie). Système d'information géographique utilisant les données de télédétection. Act du colloque scientifique international, Hammamet. Tunisie, 1-2 Novembre 1994, 4-12
- DESMET P.J.J., GOVERS G. 1996.** A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 51. Iss. 5. p. 427-433
- DEMAGEOT J., 2000.** Les milieux naturels du globe. P 300.
- DEMAK A.1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie - France, 323 p.
- DUTIL, P. (1984).** L'érosion en grande culture, revue technique des agriculteurs dynamique, N°169, France. p.118-119
- EL-GAROUANI A., CHEN H., LEWIS L., TRIBAK A.L., ABAHROUR M. 2008.** Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG IDRISI au Nord-Est du Maroc. *Télédétection*, Editions scientifiques GB. Vol. 8. Iss. 3. p. 193-201.
- FOURNIER F. (1960).** Climat et Erosion. Thèse de doctorat. Université de Paris-Faculté des lettres et sciences humaines, Paris, 241p
- GRECO. (1966).** L'érosion, la défense et la restauration des sols, le reboisement en Algérie. MARA. Alger.
- HALFF A.H., HALFF H.M., AZMOODEH M. 1993.** Predicting runoff from rainfall using neural networks. *Engineering hydrology*. p. 760-765.
- HALLOUCHE W. 2007.** Prévion du transport solide et sédimentation des barrages. Thèse de doctorat en sciences. Université Mohamed Khider - Biskra. 105 p.
- KOUDDÉD.M. 2012** Cartographie des risques d'érosion hydrique des sols au moyen du Système d'Information Géographique Cas du bassin versant de l'oued Fergoug. p14 ,p15.

- LEKFIR A., ALI T., DECHEMI N. 2006.** Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Béni Amrane (Algérie). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*. Vol. 19. Iss. 3. p. 247-257.
- MATI B.M., VEIHE A. 2001.** Application of the USLE in a savannah environment : comparative experiences from east and west Africa. *Singapore Journal of Tropical Geography*. Vol. 22. Iss. 2. p. 138-155.
- MHANGARA P., VINCENT K., KYOUNG J.L. 2012.** Soil erosion risk assessment of the Keiskamma catchment, South Africa using GIS and remote sensing. *Environ Earth Science*. Vol. 65. p. 2087–2102
- MORSLI B., 1996.** Caractérisation, distribution et susceptibilité a l'érosion des sols de montagne « cas des monts de Béni-Chougrane – Mascara ». Thèse de magistère I.N.R.F EL, Harrach. p170.
- SADIKI A., FALEH A., ZÉZERE J.L., MASTASS H. 2009.** Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla Rif central Maroc. *Cahiers Géographiques*. Vol. 6. p. 59-70.
- SHARPLEY, A., & VILLIAMS, J. (1990).** EPIC--Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin .No.1768 .235pp
- TUCKER, C. J., 1979:** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8, 127–150
- VAN DER KNIJFF J.M., JONES R.J.A. & MONTANARELLA L. 1999.** Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau, Joint Research Center of the European Commission. 54p.  
<https://pdfs.semanticscholar.org/18f2/cb0145c0c027d8d27c280b533d7aa6fef5f3.pdf>
- VEZENA, K. et BONN, F. (2006).** Modélisation et analyse de la dynamique spatio-temporelle des relations société – érosion et pollution diffuse en milieu agricole – étude de cas en Vietnam et au Québec ; Interaction Nature-Société, analyse et modèles. UMR6554 LETG, LaBaule, 6p.
- WACHAL, D.J. (2007).** Integrating GIS and erosion modeling – A tool for watershed management, ESRI international user conference, Paper N° UC1038, 11p
- WENER, C.G. (1981).** Soil Conservation In Kenya, Nairobi. Ministry of Agriculture, Soil Conservation Extension Unit. 49 pages.
- WHITE, W.R., 1986.** Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants, Projet 5.3 du programme hydrologique international. Paris: UNESCO, Etudes et rapports d'hydrologie no. 35. [http://hydrologie.org/BIB/Publ\\_UNESCO/SR\\_035\\_F\\_1986.pdf](http://hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SR_035_F_1986.pdf) [accédé le 8 juillet 2013]
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. 1965.** Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains : Guide for selection of practices for soil and water conservation. U. S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook No. 282.

**WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. 1978.** Predicting rainfall erosion losses : A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook No. 537.

**ZHU Y.M., LU X.X., ZHOU Y. 2007.** Suspended sediment flux modeling with artificial neural network : An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. *Geomorphology*. Vol. 84. Iss. 1-2. p. 111-125