

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques et Biotechnologie



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Sciences Agronomiques

Par

**Abderrezak Kamel TOUBAL**

Thème :

---

**Evaluation de l'érosion hydrique et du transport solide du bassin  
versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert,  
nord-ouest Algérien.**

---

Soutenue le 12/09/2019, devant le jury composé de :

Adda ABABOU	Professeur	Université Hassiba Benbouali - Chlef	Président
Mohammed ACHITE	Professeur	Université Hassiba Benbouali - Chlef	Directeur de thèse
Sylvain OUILLON	Directeur de Recherche	Université de Toulouse - France	Co-Directeur de thèse
Abdelmalek BERMAD	Professeur	École Nationale Polytechnique - Alger	Examineur
Azeddine MEBARKI	Professeur	Université Frères Mentouri - Constantine	Examineur
Abdesselam MEGNOUNIF	Professeur	Université Aboubekr Belkaid - Tlemcen	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ﴾

سورة البقرة: الآية 32

## Evaluation de l'érosion hydrique et du transport solide du bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert, nord-ouest Algérien.

### Résumé :

L'érosion hydrique des sols et le transport solide sont des phénomènes très complexes vues leurs discontinuités spatio-temporelles. Le présent travail a pour objectif principal de quantifier la distribution spatiale de l'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert (nord-ouest de l'Algérie) ainsi que d'évaluer le transport solide en suspension au droit des stations hydrométriques situées à quelques kilomètres à l'amont du barrage de Ouizert.

L'étude du régime pluviométrique de 20 stations pluviométriques réparties sur toute la superficie du bassin versant durant une période de 45 ans (1970/71 - 2014/15), montre une variabilité spatio-temporelle bien distincte à différentes échelles. Des méthodes statistiques de détection de ruptures au sein des séries chronologiques nous ont permis de mettre en évidence des tendances à la hausse et à la baisse.

Le régime hydrométrique au droit des stations de jaugeage, à savoir la station de l'oued Taria et la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13), montre une similarité de l'écoulement entre les deux stations. Le débit liquide moyen interannuel est de  $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de l'oued Taria et de  $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$  à la station de Sidi Boubeker. La tendance des débits moyens interannuels est à l'augmentation pour les deux stations.

L'étude du transport solide de ces deux stations hydrométriques avec le modèle Sediment Rating Curve (SRC) révèle la très grande variabilité temporelle des apports solides. Dans l'année, le transport le plus important a lieu au mois d'octobre. L'analyse de la répartition saisonnière révèle que l'automne se caractérise par un transport solide très élevé dans les deux oueds, dû aux averses éclairées et aux conditions de la couverture végétale en cette période. La dégradation spécifique du bassin versant au droit de la station hydrométrique de l'oued Taria (H1) ( $D_s = 143,42 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ) est plus élevée que celle trouvée pour le sous-bassin voisin contrôlé par la station de Sidi Boubeker (H2) ( $D_s = 73,29 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ).

L'application du modèle Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) au niveau du bassin versant nous a permis de quantifier l'érosion dans un intervalle allant de 0 à  $255 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  avec une moyenne de  $16,75 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Le découpage de la zone d'étude en 32 sous-bassins et la prise en compte du tonnage moyen de chaque sous-bassin ainsi que la distance par rapport au barrage nous ont permis de dresser la carte des zones prioritaires d'intervention. La confrontation des résultats trouvés avec le modèle RUSLE et la méthode SRC au droit des stations H1 et H2 révèle un ratio d'apports sédimentaires (ou SDR, sediment delivery ratio) respectivement de 7,8 % et 4,7 %.

**Mots clés:** Erosion hydrique des sols - Transport solide - bassin versant de l'oued Sahouat - Algérie - barrage de Ouizert - RUSLE - SRC.

## تقييم انجراف التربة و نقل الرواسب في حوض وادي صحوة على مستوى سد ويزرت، شمال غرب الجزائر.

### ملخص :

إن انجراف التربة ونقل الرواسب في الاودية ظاهرتان معقدتان للغاية، بالنظر إلى الانقطاع الفضائي والزمني لهاتان الظاهرتان. هذا العمل يقدم هدفا رئيسيا يتمثل في التوزيع الفضائي لانجراف التربة في حوض وادي صحوة عند سد ويزرت شمال غرب الجزائر وتقييم نقل الرواسب على مستوى محطتنا القياس اللتان تقعا على بعد بضعة كيلومترات من السد.

تبين دراسة نمط سقوط الأمطار في 20 محطة من محطات قياس الأمطار موزعة على كامل منطقة الحوض خلال فترة تقدر ب: 45 سنة (71/1970 - 15/2014) تبايناً فضائياً وزمانياً مميزاً على مستويات مختلفة. لقد سمحت لنا الطرق الإحصائية للكشف عن الانقطاع ضمن السلسلة الزمنية المدروسة بالكشف الأخير عن زيادة أو انخفاض مفاجئ في تساقط الامطار خلال سنوات محددة.

النظام الهيدرومتري على مستوى نقطتنا القياس: محطة وادي تاغية ومحطة سيدي بو بكر (92/1991 - 13/2012) يدل على تجانس واضح في التدفق بين المحطتين. متوسط معدل تدفق الماء بين السنين هو  $0.56 \text{ م}^3/\text{ثا}$  لمحطة وادي تاغية و  $0.55 \text{ م}^3/\text{ثا}$  في محطة سيدي بوبكر. كلا المحطتين تبينا زيادة في التدفق عبر الزمن.

على أساس دراسة نقل الرواسب لمحطتي القياس المذكورتين أعلاه مع نموذج (SRC)، يمكننا القول أن كمية الرواسب متغيرة للغاية عبر الزمن. شهر اكتوبر هو الذي يحمل اكبر قيمة في نقل الرواسب. يكشف تحليل التوزيع الموسمي أن الخريف يتميز بنقل الرواسب بكمية كبيرة جداً في الاودية، بسبب تساقط الامطار المفاجئ و العنيف و ايضا ظروف الغطاء النباتي في هذه الفترة. يقدر الانجراف السنوي على مستوى حوض وادي تاغية (H1) ب:  $143.42 \text{ طن/كم}^2/\text{سنة}$  هي أعلى من تلك الموجودة في الحوض المجاور على مستوى محطة سيدي بوبكر (H2) المقدر ب:  $73.29 \text{ طن/ كم}^2/\text{سنة}$

تطبيق نموذج RUSLE على مستوى الحوض سمح لنا لقياس الانجراف في مجال بين 0 إلى  $255 \text{ طن/هكتار/سنة}$  بمعدل  $16.75 \text{ طن/هكتار/سنة}$ . إن تقسيم منطقة الدراسة إلى 32 حوضاً فرعياً مع الأخذ بعين الاعتبار متوسط الانجراف لكل حوض فرعي بالإضافة إلى المسافة بينه وبين السد سمح لنا بالكشف عن خريطة مناطق التدخل ذات الأولوية لمعالجة هذه الظاهرة. توضح مقارنة النتائج التي تم العثور عليها مع نموذج RUSLE و نموذج SRC في محطتي H1 و H2 نسبة Sediment Delivery Ratio (SDR) بنسبة 7.8% و 4.7% على التوالي.

### مفتاح الكلمات :

انجراف التربة - نقل الرواسب في الاودية - حوض وادي صحوة - الجزائر - سد ويزرت - RUSLE - SRC.

## **Evaluation of soil erosion and sediment yield in the wadi Sahouat basin at the Ouizert dam, northwestern Algeria.**

### **Abstract:**

Soil erosion and sediment transport are very complex phenomena, due to their spatio-temporal discontinuities. The main objective of the present work is to quantify the spatial distribution of water erosion of the wadi Sahouat basin at the Ouizert dam (north-western Algeria) and to evaluate the sediment yield at the hydrometric gauge stations located upstream the Ouizert dam.

The study of the rainfall pattern of 20 rainfall stations spread over the basin over a 45 years period (1970/71 - 2014/15) shows a distinct spatial and temporal variability at different scales. Statistical methods for detecting ruptures within time series have allowed us to highlight a modification of the rainfall, the latter revealing an increase or even a sudden decrease in rainfall during specific years.

The hydrometric regime at the level of the gauging stations, namely the Taria wadi station and the Sidi Boubeker station (1991/92 - 2012/13), show a similarity in the flow between the two stations. The average interannual flow rate is  $0.56 \text{ m}^3/\text{s}$  at the wadi Taria station and  $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$  at the Sidi Boubeker station. The trend of the interannual average flows tends to increase for both stations.

The study of the sediment transport at these two hydrometric stations with the Sediment Rating Curve (SRC) model shows that the solid discharges are highly variable over time. The highest monthly discharge occurs in October. The analysis of the seasonal distribution reveals that the autumn is characterized by a very high sediment transport in the two wadis, due to the light showers and the vegetation cover at this time. The specific degradation of the basin at the wadi Taria (H1) hydrometric station ( $D_s = 143,42 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ) is higher than that found at the station controlling the sub-basin of Sidi Boubeker (H2) ( $D_s = 73,29 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ).

The application of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model at the basin level allowed us to quantify erosion in the range of  $0$  to  $255 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  with an average of  $16.75 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . The division of the study area into 32 sub-basins and the values of the average soil loss of each sub-basin combined with the distance from the dam allowed us to map the priority areas of intervention. The comparison of the results found with the RUSLE and SRC models at the H1 and H2 stations shows a sediment delivery ratio (SDR) of 7.8% and 4.7%, respectively.

**Keywords:** Soil erosion - sediment transport - wadi sahouat basin - Algeria - dam of Ouizert - RUSLE - SRC.

**DEDICACE**

A la mémoire de mon père Harrag et mon frère Tewfik;

A ma très chère Mère;

A ma Femme et ma Fille Maria Khadidja;

A toute ma Famille et ma Belle-Famille sans exception.

## REMERCIEMENTS

*J'arrive à cette étape de mes études grâce aux efforts conjoints et solidaires d'une pléiade d'enseignants allant du stade primaire à l'université, je rends hommage au corps de l'enseignement pour son dévouement et son attachement au succès de ses élèves.*

*Dans cette optique je remercie :*

**Le Directeur de Thèse, Monsieur le Professeur ACHITE Mohammed**, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, pour m'avoir suivi dans mes démarches durant toutes ces années du cycle du magister au doctorat, un grand merci pour les précieux conseils dans le domaine professionnel, car vous ne m'avez jamais laissé tomber dans des situations circonstanciées.

**Le Co-Directeur de Thèse, Monsieur le Directeur de Recherche OUILLON Sylvain**, Université de Toulouse – France, un honneur de travailler avec vous, j'ai appris beaucoup de choses durant mon cycle de doctorat, un grand merci pour la patience, les conseils et l'acheminement vers le point final. Toute ma profonde reconnaissance envers vous.

**Le Président du Jury, Monsieur le Professeur Adda ABABOU**, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef: Vous me faites l'honneur de présider ce jury et de juger mon travail. Merci pour le temps que vous m'accordez, veuillez recevoir le témoignage de mon profond respect et toute ma reconnaissance.

**Les membres du jury, les juges du couronnement de ces années d'étude :**

**Le Professeur Abdelmalek BERMAD**, École Nationale Polytechnique – Alger;

**Le Professeur Azeddine MEBARKI**, Université Frères Mentouri – Constantine;

**Le Professeur Abdesselam MEGNOUNIF**, Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen;

Merci d'avoir accepté de juger ce modeste travail et de m'avoir accordé un temps pour cela, vous avez le total respect et reconnaissance de ma part.

**Le Président du Comité Scientifique du Département, Monsieur le Docteur BELHADIA Mohammed Abd El Ilah**, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef. Toutes mes sincères considérations, respects et gratitude envers vous, pour avoir étudié mon dossier, en espérant un bon rétablissement et vous retrouver parmi nous rapidement.

**La Directrice Centrale de la Formation Doctorale et de l'Habilitation Universitaire, Madame le Professeur BOUALLOUCHE Rachida née SAADI, (MESRS)**, mes remerciements pour l'accueil chaleureux et prioritaire, ainsi que pour l'aide et le suivi de mon dossier de soutenance et l'avancement de la situation.

**Le Directeur du Laboratoire Eau-Environnement, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Monsieur le Professeur Abdallah OUAGUED**, merci de bien veiller sur le lancement et l'organisation des séminaires, de la première à la cinquième édition, ça m'a permis de connaître d'exceptionnels scientifiques comme le **Pr. BERMAD Abdelmalek** et le **Pr. MEGNOUNIF Abdesselam**.

Je ne cesserai de remercier tous les collaborateurs chacun dans son secteur et sa spécialité pour la réalisation de cette thèse, je cite :

Le Directeur du Barrage de Gargar: **M. MENAD Lakhdar**;

Le Chef de service de l'ANRH Régionale d'Oran : **M. BOUDALIA Mohammed**;

Le Directeur du Barrage de Ouizert: **M. Mokhtar**.

Chacun dans ses attributions pour l'accueil chaleureux, le dévouement et l'orientation pour chaque visite et transport sur les lieux.

*« Les bienfaits que je dois à mon Père sont hauts comme une Montagne  
mais ceux que je dois à ma Mère sont profonds comme un Océan »*

**Abderrezak**

## **Table des matières**

Résumé .....	II
ملخص .....	III
Abstract .....	IV
Dédicace .....	V
Remerciements .....	VI
Table des matières .....	VII
Liste des figures.....	XIV
Liste des tableaux.....	XVIII
Liste des photos .....	XXI
Liste des abréviations .....	XXIV
Introduction générale.....	1

## **Chapitre I : Synthèse bibliographique**

I.1. Introduction .....	7
I.2. Définition de l'érosion hydrique.....	7
I.2.1. Processus de l'érosion hydrique .....	7
I.2.1.1. Détachement.....	8
I.2.1.2. Transport .....	8
I.2.1.3. Dépôt .....	8
I.2.2. Facteurs de l'érosion hydrique.....	8
I.2.2.1. Facteurs naturels .....	8
I.2.2.1. Facteurs anthropiques.....	9
I.2.3. Formes de manifestation de l'érosion hydrique.....	9
I.2.3.1. Impact Splash .....	9
I.2.3.2. Erosion en nappe.....	9
I.2.3.3. Erosion linéaire.....	10
a/ Erosion en stries (griffes).....	10



b/ Erosion en rigoles .....	11
c/ Ravine .....	11
d/ Ravin.....	12
e/ Ravinement généralisé.....	12
I.2.4. Conséquences de l'érosion hydrique .....	13
I.2.4.1. Conséquences directes.....	13
I.2.4.2. Conséquences indirectes.....	13
I.2.5. Méthodes de mesure de l'érosion hydrique.....	15
I.2.5.1. Mesure de l'effet Splash.....	15
I.2.5.2. Parcelles expérimentales.....	15
I.2.5.2. Méthode des repères (Tige topographique) .....	16
I.2.5.3. Mesure avec le radio-isotope Césium 137 (Cs-137).....	17
<b>I.3. Transport solide dans les cours d'eau .....</b>	<b>18</b>
I.3.1. Processus du transport solide .....	18
I.3.2. Origine des matériaux transportés .....	19
I.3.3. Modes de transport .....	19
I.3.4. Conséquences du transport solide.....	20
I.3.5. Mesure du transport solide dans les oueds.....	22
I.3.5.1. Mesure de la suspension .....	22
a/ Prélèvement à la bouteille .....	22
b/ Saumon creux.....	23
c/ Utilisation des jauges nucléaires avec le Césium 137 .....	24
d/ Protocole expérimental de mesure du transport solide en suspension adopté par l'A.N.R.H.....	24
I.3.5.2. Mesure du charriage .....	26
a/ Préleveur Ehrenberger .....	26
b/ Nasse BTMA .....	27
c/ Nasse Helley-Smith.....	27
d/ Détecteur hydrophonique.....	28
<b>I.4. Estimation de l'érosion hydrique dans la zone d'étude .....</b>	<b>28</b>
I.4.1. Historique de la modélisation de l'érosion hydrique dans le monde.....	28
I.4.1. Modèle Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) .....	28

I.4.1.1. Historique des travaux qui ont abouti à l'USLE .....	28
I.4.2. Description du modèle RUSLE.....	29
I.4.2.1. Facteur d'érosivité (R).....	30
I.4.2.2. Facteur d'érodabilité (K).....	31
I.4.2.3. Facteur de pente et de longueur de pente (LS) .....	31
I.4.2.4. Facteur de couverture végétale (C) .....	31
I.4.2.5. Pratiques agricoles et conservation du sol (P).....	32
I.4.3. Limites d'application du modèle USLE .....	32
<b>I.5. Travaux réalisés avec le modèle RUSLE .....</b>	<b>33</b>
I.5.1. Dans le monde.....	33
I.5.2. En Algérie .....	35
<b>I.6. Apport des nouvelles technologies de télédétection et des SIG à l'étude de l'érosion .</b>	<b>36</b>
<b>I.7. Courbe de transport sédimentaire, modèle Sediment Rating Curve (SRC) .....</b>	<b>37</b>
I.7.1. Limites d'application du modèle SRC.....	38
<b>I.8. Utilisation du modèle SRC.....</b>	<b>39</b>
I.8.1. Dans le monde.....	39
<b>I.9. Synthèse récapitulative des travaux réalisés en Algérie .....</b>	<b>39</b>
<b>I.10. Conclusion .....</b>	<b>40</b>

## ***Chapitre II : Présentation de la zone d'étude***

<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>41</b>
<b>II.2. Bassin versant de l'oued Sahouat .....</b>	<b>41</b>
II.2.1. Caractéristiques géographiques.....	41
II.2.2. Caractéristiques sociodémographiques.....	43
II.2.3. Caractéristiques physiques .....	43
II.2.3.1. Lithostratigraphie .....	43
II.2.3.2. Occupation du sol.....	44
II.2.3.3. Relief.....	46
a/ Modèle numérique de terrain (M.N.T) .....	46
b/ Altitudes .....	46
c/ Classes des pentes .....	47

II.2.4 Réseau hydrométrique.....	48
II.2.5. Etude des paramètres du relief.....	51
II.2.5.1. Indice de compacité $K_c$ .....	51
II.2.5.2. Rectangle équivalent .....	52
II.2.5.3. Courbe hypsométrique.....	52
II.2.5.4. Indice de pente globale $I_g$ .....	54
II.2.5.5. Dénivelée spécifique $D_s$ .....	54
II.2.5.6. Pente moyenne $I_m$ .....	55
II.2.5.7. Densité de drainage $D_d$ .....	55
II.2.5.8. Temps de concentration $T_c$ .....	56
II.2.6. Synthèse récapitulative du bassin versant de l'oued Sahouat .....	56
II.2.7. Hydroclimatologie .....	57
II.2.7.1. Choix de la station .....	57
II.2.7.2. Température.....	57
II.2.7.3. Humidité relative.....	58
II.2.7.4. Vitesse du vent .....	59
II.2.7.5. Insolation .....	60
II.2.7.6. Précipitations.....	60
II.2.8. Indices climatiques.....	61
II.2.8.1. Indice d'aridité annuelle de De Martonne $I$ .....	61
II.2.8.2. Diagramme ombrothermique .....	62
II.2.9 Bilan hydrologique .....	63
II.2.9.1. Evapotranspiration .....	63
II.2.9.2. Evapotranspiration potentielle ETP.....	63
a/ Formule de Thornthwaite .....	63
b/ Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et du bilan hydrologique .....	65
<b>II.3. Présentation du barrage étudié.....</b>	<b>66</b>
II.3.1. Barrage de Ouizert .....	66
II.3.1.1. Situation et rôle .....	66
II.3.1.2. Retenue du barrage.....	67
II.3.1.3. Eléments constitutifs du barrage .....	67
a/ Digue.....	67

b/ Ouvrages de prise.....	67
c/ Evacuateur de crues .....	68
d/ Vidange de fond .....	68
II.3.2. Synthèse récapitulative du barrage de Ouizert .....	69
<b>II.4. Conclusion .....</b>	<b>71</b>

### ***Chapitre III: Etude du régime hydro-pluviométrique***

<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>72</b>
III.2. Collecte et mise en forme des données .....	72
III.2.1. Choix des stations .....	72
III.2.2. Période d'étude.....	74
III.2.3. Inventaire mensuel des stations retenues.....	74
III.2.4. Comblement des lacunes .....	75
III.2.5. Erreurs commises dans les séries de données .....	75
<b>III.3. Détection des erreurs systématiques et correction des données.....</b>	<b>76</b>
III.3.1. Méthode des doubles masses.....	76
<b>III.4. Etude du régime pluviométrique.....</b>	<b>79</b>
III.4.1. Distribution mensuelle des précipitations .....	79
III.4.1.1. Répartition spatiale des précipitations moyennes mensuelles (1970/71 - 2014/15).....	81
III.4.1.2. Paramètres statistiques des stations retenues .....	84
a/ Moyenne .....	84
b/ Ecart-type .....	84
c/ Coefficient de variation .....	84
III.4.2. Distribution saisonnière des précipitations .....	86
III.4.2.1. Répartition spatiale des précipitations moyennes saisonnières (1970/71 - 2014/15).....	87
III.4.2.2. Régime pluviométrique saisonnier dominant.....	87
III.4.2.3. Paramètres statistiques des séries pluviométriques saisonnières .....	88
III.4.3. Distribution annuelle des précipitations.....	89
III.5.3.1. Variation de la pluviométrie interannuelle .....	91

<b>III.5. Tests statistiques de détection des ruptures dans les séries pluviométriques.....</b>	<b>94</b>
III.5.1. Définition d'une rupture .....	94
III.5.2. Test de Pettitt (1979) .....	94
III.5.3. Statistique de Buishand (1982, 1984) .....	95
III.5.4. Procédure bayésienne de Lee et Heghinian (1977) .....	95
III.5.5. Procédure de segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989) .....	96
III.5.6. Programme « Khronostat » .....	96
<b>III.6. Etude du régime hydrométrique .....</b>	<b>99</b>
III.6.1. Choix des stations .....	99
III.6.2. Période d'étude.....	99
III.6.3. Précipitation/débit liquide .....	100
III.6.4. Paramètres statistiques des débits liquides des stations étudiées .....	102
III.6.5. Tendances des débits liquides moyens annuels .....	103
III.6.6. Débits liquides moyens saisonniers .....	104
III.6.7. Etude des extrêmes (débits max/débits min) .....	104
III.6.8. Tests de rupture des séries de débits liquides des stations hydrométriques étudiées.....	104
<b>III.7. Conclusion .....</b>	<b>105</b>

## ***Chapitre IV : Evaluation du transport solide en suspension***

<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>107</b>
<b>IV.2. Méthodologie.....</b>	<b>107</b>
IV.2.3. Régression entre les débits solides et les débits liquides.....	107
<b>IV.3. Variation du transport solide .....</b>	<b>109</b>
IV.3.1. Variabilité à l'échelle mensuelle .....	109
IV.3.2. Variabilité à l'échelle saisonnière .....	110
IV.3.3. Variabilité interannuelle .....	112
<b>IV.4. Variabilité temporelle des apports liquide et solide dans le bassin versant .....</b>	<b>114</b>
IV.4.1. Echelle mensuelle .....	114
IV.4.2. Echelle saisonnière .....	115
IV.4.3. Echelle annuelle .....	116

**IV.5. Conclusion..... 117**

## ***Chapitre V : Distribution spatiale de l'érosion hydrique***

**V.1. Introduction ..... 118**

**V.2. Collecte des données ..... 118**

**V.3. Automatisation du modèle RUSLE..... 119**

V.3.1. Présentation et application du modèle Builder .....119

**V.4. Estimation des paramètres du modèle ..... 122**

V.4.1. Facteur d'érosivité (R).....122

V.4.2. Facteur d'érodibilité (K) .....125

V.4.3. Facteur de pente et de longueur de pente (LS) .....128

V.4.4. Couverture végétale (C) .....130

V.4.5. Pratiques agricoles et conservation du sol (P).....132

V.4.7. Estimation du potentiel érosif annuel .....133

**V.5. Paramètres statistiques du modèle RUSLE ..... 134**

**V.6. Impact des pertes en sol sur la retenue du barrage de Ouizert ..... 135**

**V.7. Comparaison entre le modèle RUSLE et les mesures bathymétriques ..... 136**

**V.8. Localisation des zones hiérarchiques de l'érosion hydrique ..... 137**

**V.9. Altitude et sensibilité à l'érosion..... 139**

**V.10. Priorité d'intervention ..... 139**

**V.11. Comparaison entre la dégradation issue du modèle RUSLE et le modèle SRC ..... 144**

**V.12. Conclusion..... 146**

**Conclusion générale et recommandations ..... 147**

**Annexe.**

**Liste des figures**

**Chapitre I :  
Synthèse bibliographique**

<b>Figure I.1</b> : Processus de l'érosion hydrique.....	8
<b>Figure I.2</b> : Processus de l'impact Splash en temps réel ( <a href="#">Leguedois, 2003</a> ).....	9
<b>Figure I.3</b> : Schéma explicatif de l'érosion en nappe.....	10
<b>Figure I.4</b> : Dimensions de la coupe de Morgan pour la mesure de l'effet Splash.....	15
<b>Figure I.5</b> : Schéma explicatif des parcelles expérimentales.....	16
<b>Figure I.6</b> : Schéma explicatif de la tige topographique .....	16
<b>Figure I.7</b> : Teneur en Cs-137 au niveau de différents sites (référence, érosion et dépôt) .....	17
<b>Figure I.8</b> : Modes de transport solide dans les oueds.....	20
<b>Figure I.9</b> : Jauge JTD3 ( <a href="#">Remini, 2005</a> ).....	24
<b>Figure I.10</b> : Fiche signalétique de l'analyse des eaux.....	26
<b>Figure I.11</b> : Exemple du fichier Excel contenant les données instantanées du transport solide en suspension .....	26
<b>Figure I.12</b> : Schéma de principe de la mesure par les ondes acoustiques ( <a href="#">Geay, 2006</a> ) .....	28

**Chapitre II :  
Présentation de la zone d'étude**

<b>Figure II.1</b> : Carte de situation du bassin versant de l'oued Sahouat.....	42
<b>Figure II.2</b> : Modèle numérique de terrain et limites administratives .....	42
<b>Figure II.3</b> : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sahouat.....	44
<b>Figure II.4</b> : Carte d'occupation du sol simplifiée du bassin versant de l'oued Sahouat.....	45
<b>Figure II.5</b> : Carte des altitudes du bassin versant de l'oued Sahouat .....	47
<b>Figure II.6</b> : Carte des pentes du bassin versant de l'oued Sahouat .....	48
<b>Figure II.7</b> : Carte du réseau hydrométrique du bassin versant de l'oued Sahouat .....	49
<b>Figure II.8</b> : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Sahouat .....	53
<b>Figure II.9</b> : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station de Saïda (1977-2010) .....	58
<b>Figure II.10</b> : Humidités relatives mensuelles de la station de Saïda (1977-2010) .....	59

<b>Figure II.11</b> : Moyennes mensuelles des vitesses du vent moyen à la station de Saida .....	59
<b>Figure II.12</b> : Durée mensuelle d'insolation totale en (heures) à la station de Saida .....	60
<b>Figure II.13</b> : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Saida .....	61
<b>Figure II.14</b> : Indice d'aridité à la station de Saida .....	62
<b>Figure II.15</b> : Diagramme ombrothermique à la station de Saida .....	62
<b>Figure II.16</b> : Plan de la retenue du barrage de Ouizert .....	67
<b>Figure II.17</b> : Image satellite du barrage de Ouizert .....	70

### **Chapitre III :** **Etude du régime hydro-pluviométrique**

<b>Figure III.1</b> : Plan de situation des stations pluviométriques étudiées .....	73
<b>Figure III.2</b> : Pourcentage de lacunes au niveau des stations choisies.....	74
<b>Figure III.3</b> : Méthode des doubles masses ( <a href="#">Touaibia, 2004</a> ).....	76
<b>Figure III.4</b> : Double masses des séries pluviométriques étudiées (1970/71 - 2014/15).....	77
<b>Figure III.5</b> : Précipitations moyennes mensuelles des stations étudiées, bassin versant de l'oued Sahouat (1970/71 - 2014/15) .....	80
<b>Figure III.6</b> : Cartes de distribution de la pluviométrie moyenne mensuelles (1970/71 - 2014/15).....	82
<b>Figure III.7</b> : Précipitations moyennes saisonnières des stations étudiées bassin versant de l'oued Sahouat (1970/71 - 2014/15) .....	86
<b>Figure III.8</b> : Cartes de distribution de la pluviométrie moyenne saisonnière (1970/71 - 2014/15).....	87
<b>Figure III.9</b> : Carte de distribution de la pluviométrie moyenne annuelle (1970/71 - 2014/15).....	90
<b>Figure III.10</b> : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance des stations étudiées dans le bassin versant de l'oued Sahouat (1970/71 – 2014/15).....	92
<b>Figure III.11</b> : Découpage des sous-bassins au droit des stations hydrométriques .....	99
<b>Figure III.12</b> : Evolution annuelle de la pluviométrie de la station de l'oued Taria et du débit liquide de la station hydrométrique de l'oued Taria (1991/92 - 2012/13) .....	100



<b>Figure III.13</b> : Evolution mensuelle de la pluviométrie de la station de Sidi Boubeker et du débit liquide de la station hydrométrique de Sidi Boudeker (1991/92 - 2012/13).....	100
<b>Figure III.14</b> : Evolution annuelle de la pluviométrie de la station de l’oued Taria et du débit liquide de la station hydrométrique de l’oued Taria (1991/92- 2012/13) .....	101
<b>Figure III.15</b> : Evolution annuelle de la pluviométrie de la station de Sidi Boubeker et du débit liquide de la station hydrométrique de Sidi Boubeker (1991/92 – 2012/13) .....	101
<b>Figure III.16</b> : Tendances des débits liquides moyens annuels à la station d’oued Taria (1991/92 - 2012/13).....	103
<b>Figure III.17</b> : Tendances des débits liquides moyens annuels à la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13).....	103
<b>Figure III.18</b> : Débits liquides moyens saisonniers à la station d’oued Taria (1991/92- 2012/13).....	104
<b>Figure III.19</b> : Débits liquides moyens saisonniers à la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13).....	104
<b>Figure III.20</b> : Valeurs extrêmes journalières des deux stations hydrométriques étudiées (1991/92 - 2012/13).....	105

### ***Chapitre IV :*** ***Evaluation du transport solide en suspension***

<b>Figure IV.1</b> : Relation débit liquide/débit solide observé à la station de l’oued Taria (1991/92- 2012/13).....	108
<b>Figure IV.2</b> : Relation débit liquide/débit solide observé à la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13).....	108
<b>Figure IV.3</b> : Relation débit liquide instantané/débit solide instantané observés à la station hydrométrique de l’oued Taria à l’échelle saisonnière (1991/92- 2012/13) .....	111
<b>Figure IV.4</b> : Relation débit liquide instantané/débit solide instantané observés à la station de Sidi Boubeker à l’échelle saisonnière (1991/92 - 2012/13).....	112
<b>Figure IV.5</b> : Variabilité mensuelle des apports liquide et solide dans le sous-bassin versant de l’oued Taria (1991/92- 2012/13) .....	115

<b>Figure IV.6 :</b> Variabilité mensuelle des apports liquide et solide dans le sous-bassin versant de l'oued Saïda (1991/92 - 2012/13).....	115
<b>Figure IV.7 :</b> Pourcentage saisonnier des apports liquides des deux stations hydrométriques .....	115
<b>Figure IV.8 :</b> Pourcentage saisonnier des apports solides des deux stations hydrométriques .....	115
<b>Figure IV.9 :</b> Variabilité interannuelle des apports liquide et solide de la station de l'oued Taria (1991/92- 2012/13).....	116
<b>Figure IV.10 :</b> Variabilité interannuelle des apports liquide et solide de la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13) .....	116

## ***Chapitre V : Distribution spatiale de l'érosion hydrique***

<b>Figure V.1:</b> Présentation du Modèle Builder .....	120
<b>Figure V.2 :</b> Modèle BUILDER pour le calcul des différents facteurs du modèle RUSLE .....	121
<b>Figure V.3 :</b> Organigramme pour le calcul des pertes en sols avec le modèle RUSLE.....	122
<b>Figure V.4 :</b> Organigramme de la détermination du facteur R.....	123
<b>Figure V.5 :</b> Carte du facteur d'érosivité R de la zone d'étude (1970/71 – 2014-15) .....	124
<b>Figure V.6 :</b> Carte de la base de données mondiale des sols .....	126
<b>Figure V.7 :</b> Caractéristiques générale d'un type de sol.....	126
<b>Figure V.8 :</b> Organigramme de la détermination du facteur K.....	127
<b>Figure V.9 :</b> Carte du facteur K du bassin versant de l'oued Sahouat .....	127
<b>Figure V.10 :</b> Organigramme de la détermination du facteur LS .....	129
<b>Figure V.11:</b> Carte du facteur topographique LS.....	129
<b>Figure V.12 :</b> Organigramme de la détermination du facteur C.....	131
<b>Figure V.13 :</b> Carte du facteur de couverture végétale C.....	131
<b>Figure V.14 :</b> Organigramme de la détermination du facteur P .....	132
<b>Figure V.15 :</b> Carte du facteur des pratiques antiérosives P .....	132
<b>Figure V.16 :</b> Distribution spatiale des pertes en sols du bassin versant de l'oued Sahouat.	133
<b>Figure V.17 :</b> Courbe Hauteur/Volume /Surface du barrage de Ouizert (2000 et 2004) .....	136
<b>Figure V.18 :</b> Classes de sensibilité à l'érosion hydrique selon le taux d'érosion hydrique...	138

<b>Figure V.19</b> : Découpage de la zone d'étude en sous-bassins versants .....	140
<b>Figure V.20</b> : Priorité d'intervention par sous bassin et localisation des différentes formes de manifestation de l'érosion hydrique dans le bassin versant .....	142
<b>Figure V. 21</b> : Synthèse récapitulative des différentes étapes établies pour la priorité d'intervention pas sous-bassin .....	143
<b>Figure V. 22</b> : Sensibilité à l'érosion au droit des stations hydrométriques.....	145

Liste des tableaux

**Chapitre I :**  
**Synthèse bibliographique**

**Tableau I.1** : Valeurs du facteur C en fonction de l'occupation des sols .....32  
**Tableau I.2** : Valeurs du facteur P en fonction de la pente du terrain ([Panagos et al., 2015b](#)) 32  
**Tableau I.3** : Quelques chiffres de dégradation spécifique en Algérie du nord ..... 40

**Chapitre II :**  
**Présentation de la zone d'étude**

**Tableau II.1** : Superficie totale dans le bassin versant des communes visées ([Tecsult International Limitée, 2004](#)).....43  
**Tableau II.2** : Superficie des classes lithologiques du bassin versant de l'oued Sahouat ..... 44  
**Tableau II.3** : Superficie et pourcentage des classes d'occupation du sol ..... 46  
**Tableau II.4** : Classes des altitudes du bassin versant de l'oued Sahouat..... 47  
**Tableau II.5** : Classes des pentes dans le bassin versant de l'oued Sahouat..... 48  
**Tableau II.6** : Stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Sahouat ..... 49  
**Tableau II.7** : Répartition des superficies cumulées en fonction des classes d'altitudes..... 53  
**Tableau II.8** : Classification du relief ([Laborde, 2000](#)) ..... 55  
**Tableau II.9** : Synthèse des caractéristiques générales du bassin versant de l'oued Sahouat 56  
**Tableau II.10** : Caractéristiques de la station mise en étude ..... 57  
**Tableau II.11**: Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées à la station de Saida en (°C)..... 57  
**Tableau II.12** : Humidités relatives mensuelles minimales, moyennes et maximales en (%). 58  
**Tableau II.13** : Vitesses mensuelles du vent moyen à la station de Saida en (m/s) ..... 59  
**Tableau II.14** : Durée mensuelle de l'insolation totale à la station de Saida (heures) ..... 60  
**Tableau II.15** : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Saida (mm) ..... 61  
**Tableau II.16** : ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Saïda ..... 64  
**Tableau II.17** : Bilan hydrique à la station de Saïda selon la méthode de Thornthwaite..... 65  
**Tableau II.18** : Caractéristiques générales du barrage de Ouizert ..... 70

### **Chapitre III : Etude du régime hydro-pluviométrique**

<b>Tableau III.1</b> : Stations pluviométriques retenues de la zone d'étude.....	73
<b>Tableau III.2</b> : Pourcentage des lacunes des stations pluviométriques étudiées.....	74
<b>Tableau III.3</b> : Estimation de l'influence des principaux changements sur l'homogénéité des mesures de divers paramètres météorologiques ( <a href="#">Heino, 1996</a> ) .....	76
<b>Tableau III.4</b> : Précipitations moyennes mensuelles des stations choisies (1970/71 - 2014/15).....	79
<b>Tableau III.5</b> : Paramètres statistiques des séries pluviométriques mensuelles (1970/71 – 2014/15) .....	85
<b>Tableau III.6</b> : Précipitations moyennes saisonnières des stations étudiées (1970/71 - 2014/15).....	86
<b>Tableau III.7</b> : Pourcentage des régimes saisonniers des stations retenues (1970/71 - 2014/15).....	88
<b>Tableau III.8</b> : Paramètres statistiques des séries pluviométriques saisonnières (1970/71 – 2014/15) .....	89
<b>Tableau III.9</b> : Paramètres statistiques des séries pluviométriques annuelles (1970/71 – 2014/15) .....	90
<b>Tableau III.10</b> : Résultats des tests statistiques (dont les années de ruptures) dans les séries pluviométriques étudiées .....	97
<b>Tableau III.11</b> : Caractéristiques générales des stations hydrométriques mises en étude.....	99
<b>Tableau III.12</b> : Paramètres statistiques des débits liquides moyens mensuels et annuels des deux stations : Oued Taria et Sidi Boubeker (1991/92 – 2012/13) .....	103
<b>Tableau III.13</b> : Paramètres statistiques des valeurs extrêmes journalières des deux stations hydrométriques étudiées .....	104
<b>Tableau III.14</b> : Résultats des tests statistiques (dont les années de ruptures) dans les séries hydrométriques étudiées .....	105

## Chapitre IV :

### *Evaluation du transport solide en suspension*

<b>Tableau IV.1 :</b> Coefficient de détermination ( $R^2$ ) des modèles retenus.....	108
<b>Tableau IV.2 :</b> Modèles retenus pour la totalité de la série de chaque station hydrométrique .....	108
<b>Tableau IV.3 :</b> Résultats des valeurs du coefficient « a » et de l'exposant « b » trouvés dans des bassins versants voisins (pour une relation $Q_s = a Q_t^b$ ).....	109
<b>Tableau IV.4 :</b> Modèles obtenus à l'échelle mensuelle des deux stations hydrométriques.	110
<b>Tableau IV.5 :</b> Modèles obtenus à l'échelle saisonnière des deux stations hydrométriques.	112
<b>Tableau IV.6 :</b> Modèles obtenus à l'échelle annuelle des deux stations hydrométriques....	113
<b>Tableau IV.7 :</b> Quelques résultats des études du transport solide à travers le monde .....	114

## Chapitre V :

### *Distribution spatiale de l'érosion hydrique*

<b>Tableau V.1 :</b> Description des données utilisées. ....	119
<b>Tableau V.2 :</b> Valeurs de l'érosivité des pluies du bassin versant de l'oued Sahouat.....	125
<b>Tableau V.3 :</b> Valeurs du facteur P en fonction de la pente du terrain ( <a href="#">Panagos et al., 2015b</a> ).....	132
<b>Tableau V.4 :</b> Quelques résultats trouvés par quelques auteurs en appliquant le modèle RUSLE .....	134
<b>Tableau V.5 :</b> Superficies des pertes en sols en fonction des classes d'érosion .....	134
<b>Tableau V.6 :</b> Paramètres statistiques des différents facteurs du modèle RUSLE .....	135
<b>Tableau V.7 :</b> Evolution de l'envasement du barrage de Ouizert (1986/2004).....	135
<b>Tableau V.8 :</b> Classification de la sensibilité à l'érosion hydrique selon le taux d'érosion ...	137
<b>Tableau V.9 :</b> Classes de sensibilité à l'érosion en fonction des altitudes.....	139
<b>Tableau V.10 :</b> Matrice de décision pour la priorité d'intervention .....	140
<b>Tableau V.11 :</b> Priorité d'intervention par sous-bassin de la zone d'étude .....	141
<b>Tableau V.12 :</b> Classes de sensibilité à l'érosion au droit des stations hydrométriques.....	146

Liste des photos

Chapitre I :  
Synthèse bibliographique

Photo I. 1 : Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact Splash .....	9
Photo I.2: Erosion en nappe, bassin versant de l'oued Mina .....	10
Photos I.3 : Erosion en griffes .....	10
Photos I.4 : Erosion en rigoles.....	11
Photos I.5 : Erosion en ravine, bassin versant de l'oued Mina.....	12
Photos I.6 : Formation de ravins.....	12
Photos I.7 : Ravinement généralisé .....	13
Photos I.8 : Conséquences de l'érosion hydrique .....	14
Photo I.9 : Dispositif de mesure de l'effet Splash (Stroosnijder, 2005).....	15
Photo I.10: Parcelles expérimentales à Madagascar (Razafindramanana et al., 2012) .....	16
Photo I.11: Mesure du niveau de la surface du sol à l'aide de la Tige d'érosion .....	16
Photos I.12 : Ensablement du canal de protection contre les inondations, Chef-lieu de la wilaya de Relizane .....	18
Photos I.13: Oued Khloug, B.V. de l'oued Mina.....	19
Photos I.14 : Conséquences du transport solide .....	21
Photos I.15 : Station hydrométrique d'oued El-Abtal, B.V. de l'oued Mina.....	22
Photos I.16 : Bouteille d'échantillonnage (Source : <a href="https://www.usgs.gov/">https://www.usgs.gov/</a> ).....	23
Photo I.17 : Saumon creux (Source : <a href="https://www.usgs.gov/">https://www.usgs.gov/</a> ).....	23
Photos I.18 : Laboratoire de l'A.N.R.H de Tizi Ouzou .....	25
Photo I.19 : Préleveur Ehrenberger (Camenen, 2011) .....	26
Photo I.20: Nasse BTMA (Photo courtesy Roy Frings) (Van Rijn et Gaweesh, 1992).....	27
Photo I.21: Nasse Helley-Smith (Photo Ph Belleudy) (Recking et al., 2008) .....	27
Photo I.22 : Hydrophone monté sur un saumon hydraulique (Geay, 2006) .....	28

**Chapitre II :**  
**Présentation de la zone d'étude**

<b>Photos II.1</b> : Station hydrométrique de l'oued Taria .....	50
<b>Photos II.2</b> : Station hydrométrique de Sidi Boubeker .....	50
<b>Photo II.3</b> : Confluence entre l'oued Taria et l'oued Saida .....	51
<b>Photo II.1</b> : Eléments constitutifs du barrage de Ouizert .....	69

**Chapitre III :**  
**Etude du régime hydro-pluviométrique**

<b>Photos III.1</b> : Ecoulement des eaux usées en période estivale au niveau de l'oued Saida ...	102
---	-----



## **LISTE DES ABREVIATIONS**

- A.N.B.T** : Agence Nationale des Barrages et Transferts;
- A.N.R.H** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques;
- BTMA** : Bedload Transport Metre Arnhem;
- C.E.S** : Conservation des Eaux et des Sols;
- C.T.H** : Contrôle Technique de la Construction Hydraulique;
- D.R.S** : Défense et Restauration des Sols;
- Da** : Déficit Agricole;
- ETM+**: Enhanced Thematic Mapper Plus;
- ETP** : Evapotranspiration Potentielle;
- ETR** : Evapotranspiration Réelle;
- EXC** : Excédent;
- F.A.O** : l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture;
- G.A.R.O** : Groupement Algéro-Roumain de Ouizert;
- GPS** : Global Positioning System;
- HWSD** : Harmonized World Soil Database;
- IDW** : Inverse Distance Weighting;
- I.N.C.T** : l'Institut national de cartographie et de télédétection;
- I.R.D** : Institut de Recherche pour le Développement;
- L.E.M** : Laboratoire des Etudes Maritimes;
- M.N.T** : Modèle Numérique du Terrain;
- N.G.A** : Nivellement Général de l'Algérie;
- M.E.S** : Matières en suspension;
- MUSLE**: Modified Universal Soil Loss Equation;
- NDVI**: Normalized Difference Vegetation Index;
- NPHE** : Niveau des Plus Hautes Eaux;
- O.N.M** : Office Nationale de la Météorologie;
- O.R.S.T.O.M** : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer;
- OLI** : Opérationnel Land Imager;

**RUSLE:** Revised Universal Soil Loss Equation;  
**S.D.R :** Sediment Delivery Ratio;  
**S.I.G :** Système d'Information Géographique;  
**S.M.B.A:** Sidi M'hamed Benaouda;  
**S.R.T.M :** Shuttle Radar Topography Mission;  
**SRC :** Sediment Rating Curve;  
**TIRS :** Thermal Infrared Sensor;  
**U.S.D.A:** United States Department of Agriculture;  
**USGS:** The United States Geological Survey;  
**USLE:** Universal Soil Loss Equation.

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les sols forment l'épiderme de notre planète et constituent le support des activités humaines (De Noni et al., 2001; Raissouni, 2012). Bien que le sol soit une ressource naturelle essentielle, il se dégrade à une échelle sans précédent par l'érosion hydrique, forme la plus courante du processus de dégradation des sols. Selon des estimations empiriques faites sur une base annuelle, elle entraîne en moyenne de 5 à 10 tonnes de sol par hectare en Europe et en Australie, de 10 à 20 t/ha sur tout le continent américain, et près de 30 t/ha en Asie (Brown et al., 1996). Dans le monde, les superficies cultivables sont estimées seulement à 2,97 milliards d'hectares, soit 22% des 13,5 milliards d'hectares de surfaces exondées. Ces dernières décennies, les pertes en terres cultivables ont augmenté de 7 à 10 millions d'hectares par an et à ce rythme-là, deux siècles suffiraient pour détruire toutes les terres cultivables (Kanwar, 1982).

L'érosion hydrique qui résulte du détachement des particules de sol sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluies (impact Splash) ou du ruissellement, est un phénomène complexe par son caractère irrégulier, aléatoire et par sa discontinuité spatio-temporelle (Achite et al., 2006). Elle est devenue un problème important à l'échelle mondiale et un défi majeur ces dernières décennies (Prasannakumar et al., 2012), sa maîtrise est devenue donc un enjeu prioritaire (Morsli et al., 2012). L'érosion nuit non seulement à la gestion durable des terres, mais elle peut aussi causer des dommages hors site, ses conséquences néfastes sont nombreuses (Achite et Ouillon, 2007), notamment sur la réduction de l'épaisseur du sol (Blanco et Lal, 2010 ; Zhao et al., 2013), l'appauvrissement en nutriments, la perte de matière organique (Blanco et Lal, 2010; Verheijen et al., 2009), le compactage du sol et la diminution du rendement des cultures (Blanco et Lal, 2010, Pimentel, 2006). Au niveau mondial, environ 30% des terres arables sont devenues improductives (Lang, 2006).

Les zones semi-arides subissent une érosion particulièrement forte (Bayramin et al., 2008) due à la faible protection des sols par le couvert végétal et à l'occurrence de pluies rares mais très productives en sédiments, qui engendre le transport solide dans les oueds et la

sédimentation des retenues artificielles (Dutta, 2016; Wilkinson et Mc Elroy, 2007) laissant à l'amont des sols totalement dégradés. L'envasement des barrages est une des conséquences les plus graves de ce phénomène. Il constitue en Algérie un obstacle majeur aux capacités de stockage et de régénération de ressources en eau superficielles. Les barrages faisant l'objet d'un envasement accéléré verront leur capacité de régulation diminuer au fil du temps (Demmak, 2010). Les flux transportés par les oueds sont souvent analysés à partir des séries temporelles de débit et de concentration (El-Mahi, 2012). L'érosion dans certains bassins augmente sensiblement ces dernières décennies, à cause du changement du climat (arrivée précoce des pluies d'été) et du changement de régime hydrologique des oueds (Achite et Ouillon, 2016).

Face à cette situation alarmante, vers les années 1930, la communauté scientifique s'est mobilisée pour la recherche de solutions susceptibles d'assurer la conservation des sols (Aké et al., 2012). Des chercheurs à travers le monde ont été contraints de développer des modèles d'estimation de l'érosion hydrique à partir des expérimentations au niveau des parcelles, parmi eux: Duley et Ackerman (1934), Zingg (1940), Smith (1941), Browning et al. (1947), Smith et Whitt (1947), Musgrave (1947), Smith et Whitt (1948). Les facteurs influençant l'érosion hydrique peuvent être représentés par différents paramètres, à savoir : la topographie, la couverture végétale, l'agressivité des précipitations, la pédologie et les pratiques antiérosives. Ces derniers ont été pris en compte dans un modèle développé par Wischmeier et Smith (1978) : le modèle Universal Soil Loss Equation (USLE). Une version révisée d'USLE développée par Renard et al. (1991) nommée Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) a vu le jour, et a commencé à être utilisée de plus en plus, surtout avec le développement des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et de la télédétection par l'emploi des images satellitaires. Comme l'indiquent De Roo (1996) et Chatterjee et al. (2014), l'application du modèle RUSLE couplé aux SIG donne l'avantage de son applicabilité sur de grandes superficies.

Dans cette optique, plusieurs travaux ont été réalisés à travers le monde notamment aux *Etats-Unis* : Wu et al. (2005) suggèrent que le choix de la résolution du modèle numérique de terrain a une influence considérable sur l'estimation des pertes en sols avec les modèles empiriques ; en *Italie* : Fagnano et al. (2012) ont montré que le taux d'érosion du bassin versant étudié est principalement affecté par les conditions locales de couverture du sol, les

pertes en sols varient principalement entre 53 et 73 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>; en *Chine* : Pan et Wen (2014) ont quantifié l'effet des techniques de conservation de l'eau et du sol sur l'érosion hydrique d'un bassin entre les années 2002 et 2010, où les pertes en sols ont été estimées respectivement à 78,78 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et 70,58 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>; en *Turquie* : selon Bayramov et al. (2019), la répartition spatiale des taux d'érosion est essentiellement liée aux classes de couverture du sol avec, au niveau des sols nus, une perte en sol annuelle qui dépasse 10 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>; en *Inde* : selon Chandra Pal et al. (2019) l'application du modèle RUSLE révèle un taux d'érosion annuel variant de 0 à 10 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, la supervision de 29 points sur la carte obtenue montre une nette conformité avec la réalité; en *Tunisie* : Gaubi et al. (2017) ont estimé la perte moyenne annuelle à 24 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, ce résultat étant conforme aux mesures bathymétriques du barrage de Lebna; au *Maroc* : Chadli (2016) a décelé les zones hiérarchiques à risque d'érosion hydrique, les résultats montrent que 78,83% des terres montrent un faible risque d'érosion, 17,36% de risque moyen, 3,04% de risque élevé et 0,77% de risque très élevé; en *Algérie* : Djoukbal et al. (2019) ont comparé les trois approches USLE (Universal Soil Loss Equation), RUSLE et MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) sur l'ensemble du bassin versant de Ghazouana, qui donnent respectivement une érosion spécifique de 9,65; 9,90 et 11,33 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>.

Le transport solide dans les oueds est l'une des conséquences secondaires de l'érosion hydrique des sols. Le volume et les types de particules érodées et transportées par les oueds présentent une grande variabilité à l'échelle spatiale et temporelle (Achite et Ouillon, 2007). Les répercussions directes sont dévastatrices, tant en amont par des pertes de sols et des ravinements qu'à l'aval par des inondations et des dépôts sédimentaires (Touaïbia, 2010).

La mobilisation des ressources en eau, en Algérie, se fait pour une grande part, grâce au stockage des eaux superficielles au niveau des barrages (Kouri et Gomer, 2010). L'alluvionnement des réservoirs est dû principalement au débit solide des cours d'eau en amont, qui résulte lui-même de l'érosion hydrique des sols et de l'attaque des berges et du lit des cours d'eau. Ces nuisances suscitent un intérêt particulier chez les pouvoirs publics vu la gravité du phénomène tant sur le plan économique que social (Achite et al., 2014).

L'estimation et la prédiction du transport solide dans les cours d'eau revêt l'un des principaux objectifs des sédimentologues et hydrologues à travers le monde (Syvitski et al., 2000; Arthur, 2003; Zhang et al., 2012). La charge annuelle des sédiments dans un cours

d'eau est un facteur important pour la détermination du taux d'envasement d'un barrage (Khanchoul et al., 2009). Faute de données détaillées sur les concentrations de sédiments en suspension (Barnes et Frevert, 1954), plusieurs méthodes d'estimation fondées sur des techniques d'interpolation et d'extrapolation ont été proposées pour évaluer les charges sédimentaires d'un bassin versant (Walling et Webb, 1981; Ferguson, 1987). Le modèle Sediment Rating Curve (SRC) proposé par Miller (1951) permet l'estimation du transport solide en suspension à partir des débits liquides.

A cet effet plusieurs chercheurs ont travaillé dans le domaine du transport solide sur différentes zones à travers le monde notamment : en Chine (Di Cenzo et Luk (1997); Yang et al. (2007); Yang et al. (2009); Hu et al. (2011); Zhang et al. (2012)); aux Etats Unis (Crowder et al. (2007); Aytek et Kisi (2008); Gao et Josefson (2012)); en Allemagne (Asselman (2000)); en Ethiopie (Admasu (2005)); au Maroc (Gartet et al. (2005)); au Japon (Sadeghi et al. (2008)); en Espagne (Estrany et al. (2009)); en Irlande (Harrington et Harrington, (2013)); en Australie (Wilkinson et al. (2014)); en Hongrie (Tóth et Bódis (2015)); en Algérie (Meddi (1999); Benkhaled et Remini (2003); Megnounif et al. (2003); Achite et Meddi (2004); Achite et Meddi, (2005); Achite et Ouillon, (2007); Khanchoul et al. (2007); Ghenim et al. (2008); Khanchoul et al. (2009); Ghernaout et Remini (2014); Achite et Ouillon, (2016)).

En Algérie, lorsque le seuil de l'érosion tolérable est atteint, l'érosion devient un sérieux problème pour les sols (Toumi, 2013), au début des années quatre-vingt, environ 120 millions de tonnes de sédiments arrachés annuellement au niveau des bassins versant du nord algérien, mettant la pérennité des barrages en danger (Demmak, 1982). Selon le ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire (2000), le nord de l'Algérie est menacé par la dégradation des bassins versants, ce phénomène a atteint des stades inquiétants dans quelques zones, en particulier à l'ouest. Cette zone touche 47 % de l'ensemble des terres, considérée comme la région la plus érodée du pays; viennent ensuite les régions du centre (27%) et de l'Est (26%).

Le choix du bassin versant de l'oued Sahouat (2140 km<sup>2</sup>) dans cette étude repose sur différentes raisons:

- Son appartenance au plus grand bassin versant de l'ouest Algérien (la Macta);
- Il n'est pas influencé par un bassin versant à l'amont;

- L'accessibilité à un certain nombre de données, contrairement à d'autres bassins où l'accessibilité aux services de l'ANRH a été impossible;
- La diversité de mesures disponibles au niveau de cette zone (mesures climatiques, mesures hydrométriques juste à l'amont de l'exutoire, pour pouvoir enregistrer le transport solide du bassin versant);
- Les stations hydrométriques étudiées ne sont pas influencées par un barrage ou une retenue collinaire;
- Les moyens de lutte antiérosifs réalisés au centre du bassin permettent un pronostic sur l'historique et l'ampleur de l'érosion hydrique;
- Le barrage de Ouizert qui se trouve à l'exutoire de la zone d'étude pourra nous aider à discuter l'estimation de l'érosion hydrique ou du transport solide du bassin versant.

Partant de ce constat, notre étude a pour objectif principal l'évaluation des pertes en sols du bassin versant de l'oued Sahouat ainsi que le transport solide en suspension au niveau de deux stations hydrométriques contrôlant les eaux transitant au barrage de Ouizert. Ce travail s'articulera en cinq chapitres comme suit (Figure 1) :

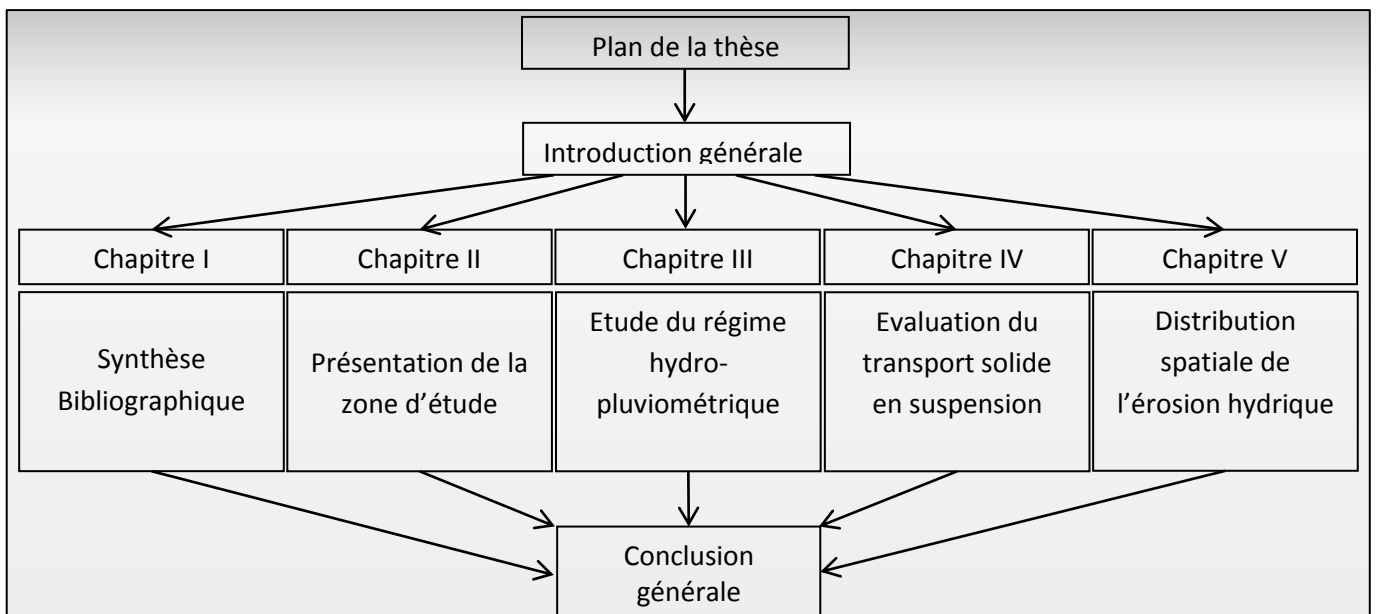
- Le premier chapitre propose une synthèse bibliographique sur l'érosion hydrique et le transport solide, avec une présentation du processus, des causes et conséquences, ainsi que les différents appareillages techniques et dispositifs de mesure des deux phénomènes. Dans une deuxième partie, nous abordons l'historique, les limites d'application et les travaux réalisés sur les deux modèles utilisés dans cette modeste étude, à savoir : Le modèle SRC et le modèle RUSLE.
- Le second chapitre concerne une présentation physique et hydroclimatologique du bassin versant ainsi que les caractéristiques hydrologiques, techniques et économiques du barrage de Ouizert.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude du régime hydro-pluviométrique. Vingt stations pluviométriques réparties sur le bassin versant dont la période d'observation s'étale entre 1970/71 à 2014/15 sont mises en étude ; en utilisant des tests statistiques recommandés par l'Organisation Météorologique Mondiale, nous allons tenter de détecter les années de ruptures sur une période de 45 ans. Dans un deuxième temps les débits liquides au niveau des deux stations



hydrométriques, à savoir la station de l’oued Taria et la station de Sidi Boubeker, seront également analysés.

- L’objectif principal du quatrième chapitre porte sur l’évaluation du transport solide en suspension. Pour ce faire, le développement d’un modèle régressif (rating curve ou courbes de transport sédimentaire) liant les apports solides aux apports liquides sera établi. Dans un deuxième temps nous étudierons la variabilité temporelle des apports liquides et solides aux stations de mesure aux échelles mensuelle, saisonnière et annuelle.
- Le dernier chapitre a pour objectif principal de mettre en évidence la quantification et la répartition spatiale du taux d’érosion hydrique du bassin versant de l’oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert avec le modèle RUSLE. A cet effet l’utilisation de la télédétection et d’un SIG revêt une importance capitale pour l’identification et l’analyse des zones à risque d’érosion hydrique. Dans un deuxième temps une validation et une supervision ponctuelle de la répartition spatiale du degré d’érosion hydrique sera effectuée avec Google Earth, et des niveaux de priorité d’intervention seront définis par sous-bassin. Une confrontation des résultats entre les modèle SRC et RUSLE sera établie.

Le manuscrit se termine par une synthèse générale portant sur l’essentiel des résultats obtenus et sur des perspectives concernant le bassin versant de l’oued Sahouat et le barrage de Ouizert, et leur gestion.



**Figure 1** : Organigramme du plan de la thèse.

***Chapitre I :***  
***Synthèse bibliographique***

# Chapitre I :

## Synthèse bibliographique



### I.1. Introduction

L'érosion, le transport et le dépôt sont les principales étapes de la dynamique de particules ou de sédiments, que l'on appelle transport solide (Julien, 2010; Ouillon, 2018). L'érosion est un processus naturel et dévastateur (Photos I.1) qui provoque la décomposition des agrégats du sol et accélère l'évacuation des matières organiques et minérales (Gilley, 2005). Dans ce chapitre nous aborderons les principales causes, le processus, les conséquences ainsi que les moyens de mesure des phénomènes de l'érosion hydrique et du transport solide. Dans un deuxième volet nous aborderons les deux approches utilisées dans cette modeste étude.

### I.2. Définition de l'érosion hydrique

L'érosion des sols est le volume brut de sédiments détachés par l'impact des gouttes de pluie et/ou arrachés par le ruissellement (Borges, 1993). C'est le mécanisme de détachement qui induit le transport de particules de sol de surface à partir de leur emplacement d'origine jusqu'à leur dépôt (Rupesh, 2018).

#### I.2.1. Processus de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique passe inévitablement par trois étapes, à savoir : le détachement, le transport et le dépôt (Figure I.1).

##### I.2.1.1. Détachement

Le détachement se produit lorsque les gouttes de pluie martèlent le sol nu sans aucune protection. L'énergie cinétique des gouttes de pluies brise les agrégats et disperse les particules du sol, ce qu'on appelle l'effet "Splash" (Figure I.2). La force érosive diffère selon le diamètre des gouttes de pluie; plus le diamètre est grand plus l'énergie est destructrice (Raissouni, 2012).

### I.2.1.2. Transport

Les particules de sol détachées sont vulnérables au transport, de ce fait, un très faible ruissellement peut emporter les particules de sol.

### I.2.1.3. Dépôt

Appelé aussi sédimentation, le dépôt se produit lorsque le courant n'a plus suffisamment d'énergie pour maintenir les particules en mouvement (Figure I.1).

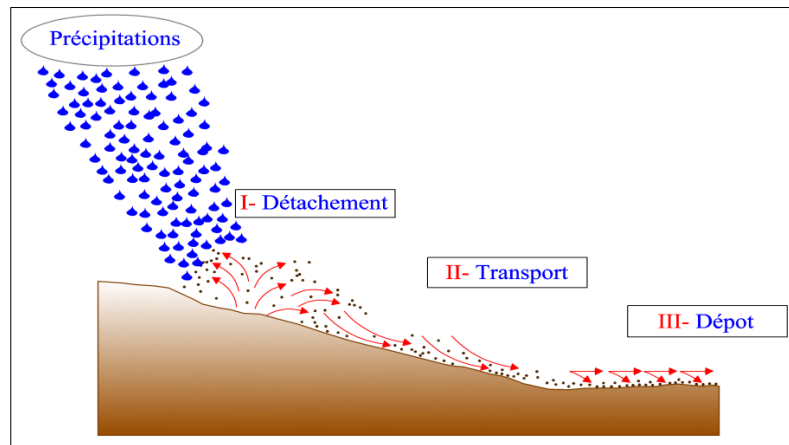


Figure I.1 : Processus de l'érosion hydrique

## I.2.2. Facteurs de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique des sols englobe une multitude de facteurs. Selon Morgan (1986), ces facteurs semblent être les mêmes partout dans le monde. Ces derniers sont d'origines naturelles et anthropiques.

### I.2.2.1. Facteurs naturels

Les facteurs naturels sont spécifiques au bassin versant à savoir :

- Intensité des précipitations (agressivité des pluies)
- Alternance de périodes de sécheresse et de périodes humides
- Couvert végétal
- Pente et longueur de pente
- Forme du Bassin versant (temps de résidence plus ou moins long)

### I.2.2.1. Facteurs anthropiques

Ces facteurs désignent l'intervention de l'homme au niveau du bassin versant favorisant l'accélération des pertes en sol à savoir :

- Incendies ou brûlis, défrichage des forêts,
- Pratiques culturales,
- Surpâturage,
- Labourage des sols,
- Mécanisation de l'agriculture et compactage des sols
- La gestion ou l'absence de gestion des aménagements, tels que les travaux de Défense et Restauration des Sols (DRS).

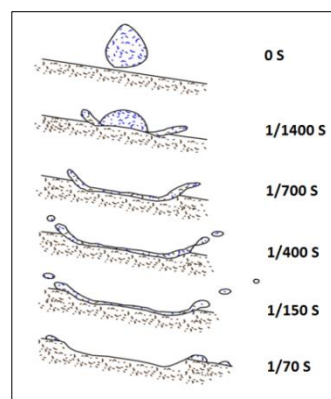
### I.2.3. Formes de manifestation de l'érosion hydrique

#### I.2.3.1. Impact Splash

Les gouttes de pluie impactant la surface du sol se dispersent et éclaboussent le sol, déplaçant les particules de leur position d'origine (Photo I.1). Le processus d'érosion par splash implique l'impact d'une goutte d'eau et la formation d'un cratère (Figure I.2) en emportant les particules de sol vers un autre point (Ghadiri, 2004).



**Photo I. 1 :** Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact Splash (Photo, Pierre-Olivier Cochard) (Leguedois, 2003).



**Figure I.2 :** Processus de l'impact Splash en temps réel (Leguedois, 2003).

#### I.2.3.2. Erosion en nappe

L'érosion en nappe consiste à l'élimination plus ou moins uniforme d'une mince couche superficielle du sol (Figure I.3 ; Photo I.2) par impact de gouttes de pluie suivi d'un écoulement de surface. Certaines particules sont emportées dans les eaux de ruissellement qui s'écoulent dans une lame d'eau très faible (Ellison, 1944; Blanco et Lal, 2010), c'est le

stade initial de la dégradation des sols par l'érosion hydrique, la perte moyenne annuelle varie de 15 à 30 t/ha soit une perte de hauteur de sol de 1 à 2 mm par an (Roose, 1994).

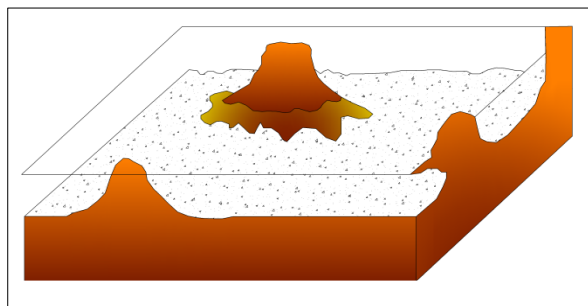


Figure I.3: Schéma explicatif de l'érosion en nappe



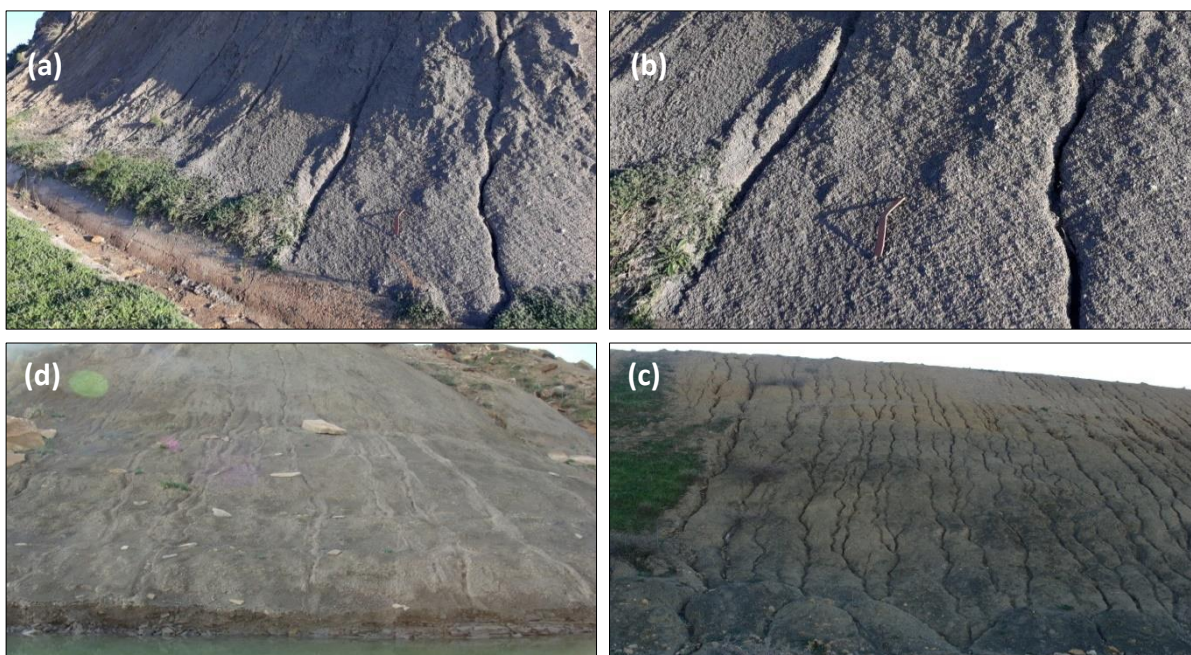
Photo I.2: Erosion en nappe, bassin versant de l'oued Mina. Photo, TOUBAL A. K. (02/02/2013)

### I.2.3.3. Erosion linéaire

L'érosion linéaire provoque un décapage total de l'horizon humifère et de l'ensemble des matériaux meubles sur la largeur concernée par les chemins de l'eau.

#### a/ Erosion en stries (griffes)

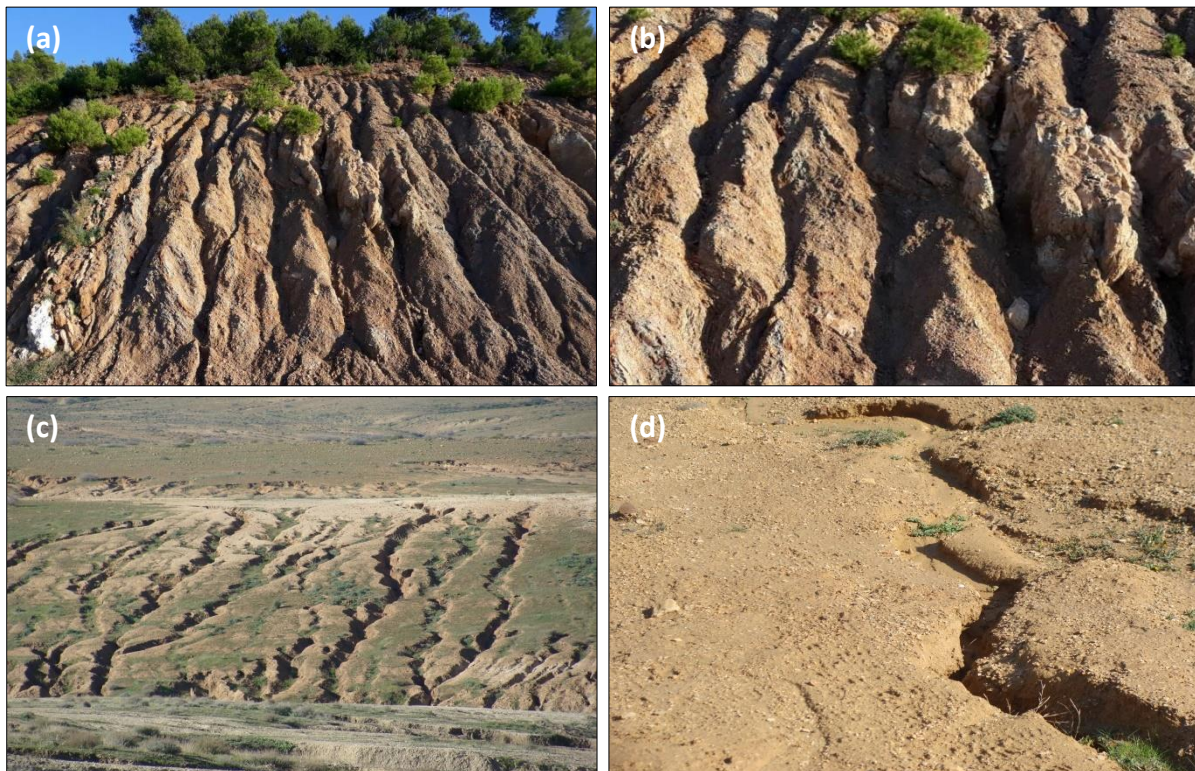
Lorsque l'agressivité des pluies augmente, l'érosion en nappe commence à se hiérarchiser et à se concentrer en formant des stries (Roose et al., 2010). On parle de griffes, lorsque les petits canaux atteignent quelques centimètres de profondeur (Roose, 1994), cette forme est considérée comme la première manifestation de l'érosion linéaire (Photos I.3 (a), (b), (c) et (d))



Photos I.3 : Erosion en griffes (a), (b) bassin versant du côtier Algérois, Photo, TOUBAL A. K. (21/12/2018). (c), bassin versant de l'oued Mina, Photo, TOUBAL A. K. (26/12/2018) (d) berges du barrage Sidi M'hamed Benaouda (SMBA), bassin versant de l'oued Mina, Photo, TOUBAL A. K. (27/12/2012).

### b/ Erosion en rigoles

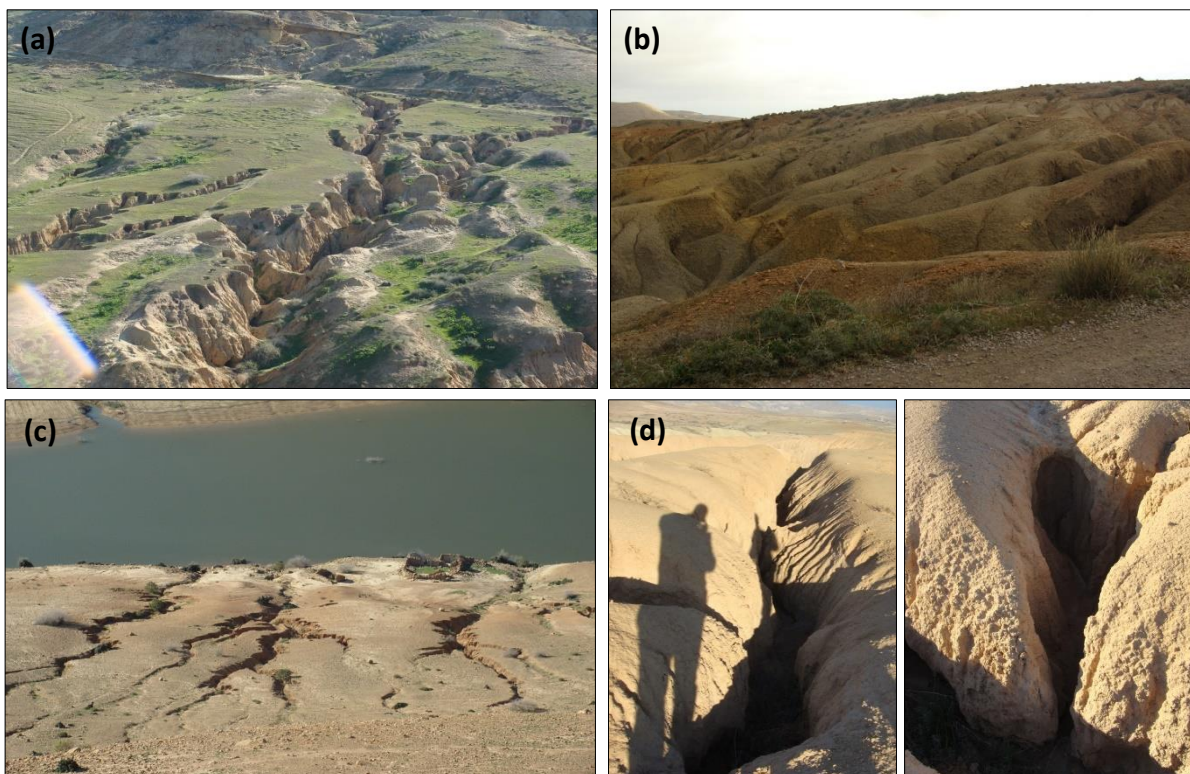
Il fait référence à l'érosion du sol qui se produit dans les petits canaux ou les rigoles (*rill erosion*). L'érosion en rigoles se produit en raison d'un écoulement concentré peu profond (Photos I.4 (a), (b), (c) et (d)). Elle est la deuxième voie la plus commune de l'érosion des sols. Cette étape peut causer une érosion importante du sol, en particulier dans des conditions extrêmes (Blanco et Lal, 2010). On parle de rigoles lorsque la profondeur des canaux est entre 10 cm et 50 cm (Roose, 1994).



Photos I.4 : Erosion en rigoles, (a), (b) bassin versant du côtier Algérois, Photo, TOUBAL A. K. (21/12/2018) (c), (d) bassin versant de l'oued Mina, Photo, TOUBAL A. K. (12/02/2013).

### c/ Ravine

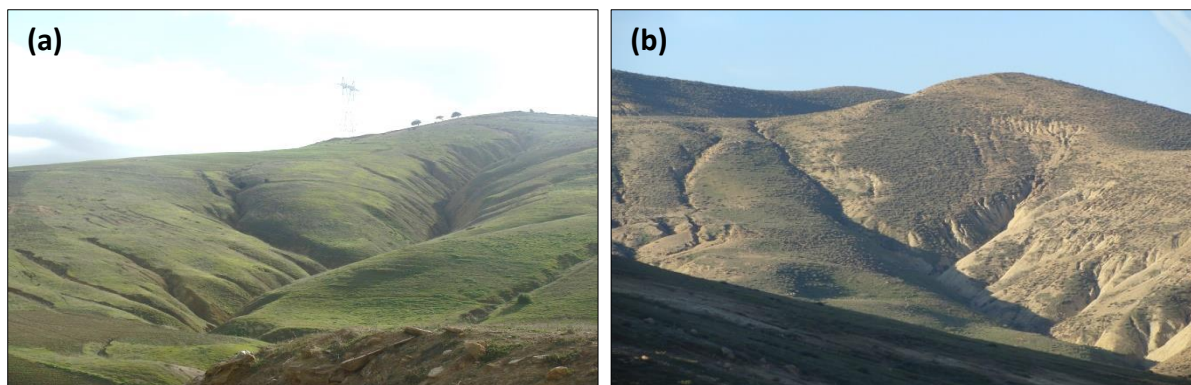
Contrairement à l'érosion en rigoles, l'érosion en ravines (*gully erosion*) atteint les horizons profonds de la couverture pédologique (Photos I.5 (a), (b), (c) et (d)). Contrairement aux rigoles qui peuvent se déplacer avec les forçages, les ravines ne se déplacent plus. Elles sont de largeur et de profondeur variables (Dautrebande et al., 2006), on parle néanmoins de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm) (Roose, 1994).



**Photos I.5 :** Erosion en ravine, bassin versant de l'oued Mina. **(a)** Photo, TOUBAL A. K. (02/02/2013) **(b)** Photo, TOUBAL A. K. (16/02/2013). **(c), (d)** Photos, TOUBAL A. K. (26/12/2018).

#### d/ Ravin

L'érosion régressive provoque la formation plus large des ravines du bas vers le haut (Ammari, 2012). Les ravines prennent de la profondeur jusqu'à des dizaines de mètres, a ce stade de développement le nom de ravin (*valley*) leur est attribué (Photos I.6 (a) et (b)).



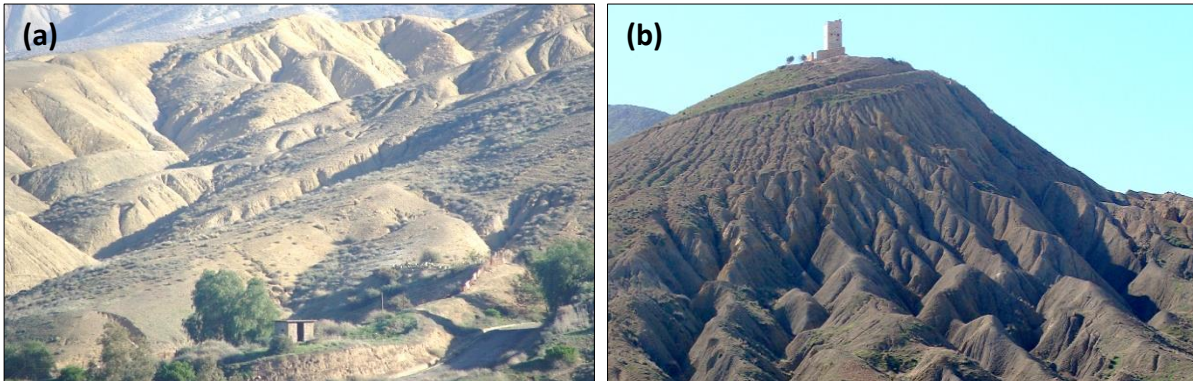
**Photos I.6 :** Formation de ravins, **(a), (b)** bassin versant de la Macta, Photos, TOUBAL A. K. (02/02/2015)

#### e/ Ravinement généralisé

La ramification et la multiplication des ravins entraînent le stade ultime de l'érosion linéaire, ce stade est considéré comme irréversible dans la plupart des cas du fait de la difficulté de traitement du ravin (Photos I.7 (a) et (b)). La couverture végétale y est rare, les



pententes sont caractérisées par un dense réseau de drainage en forme de V (Bryan et Yair, 1982).



**Photos 1.7 :** Ravinement généralisé, **(a)**, bassin versant de la Macta, *Photo, TOUBAL A. K. (22/12/2014)* **(b)** bassin versant de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (16/02/2013)*

#### **1.2.4. Conséquences de l'érosion hydrique**

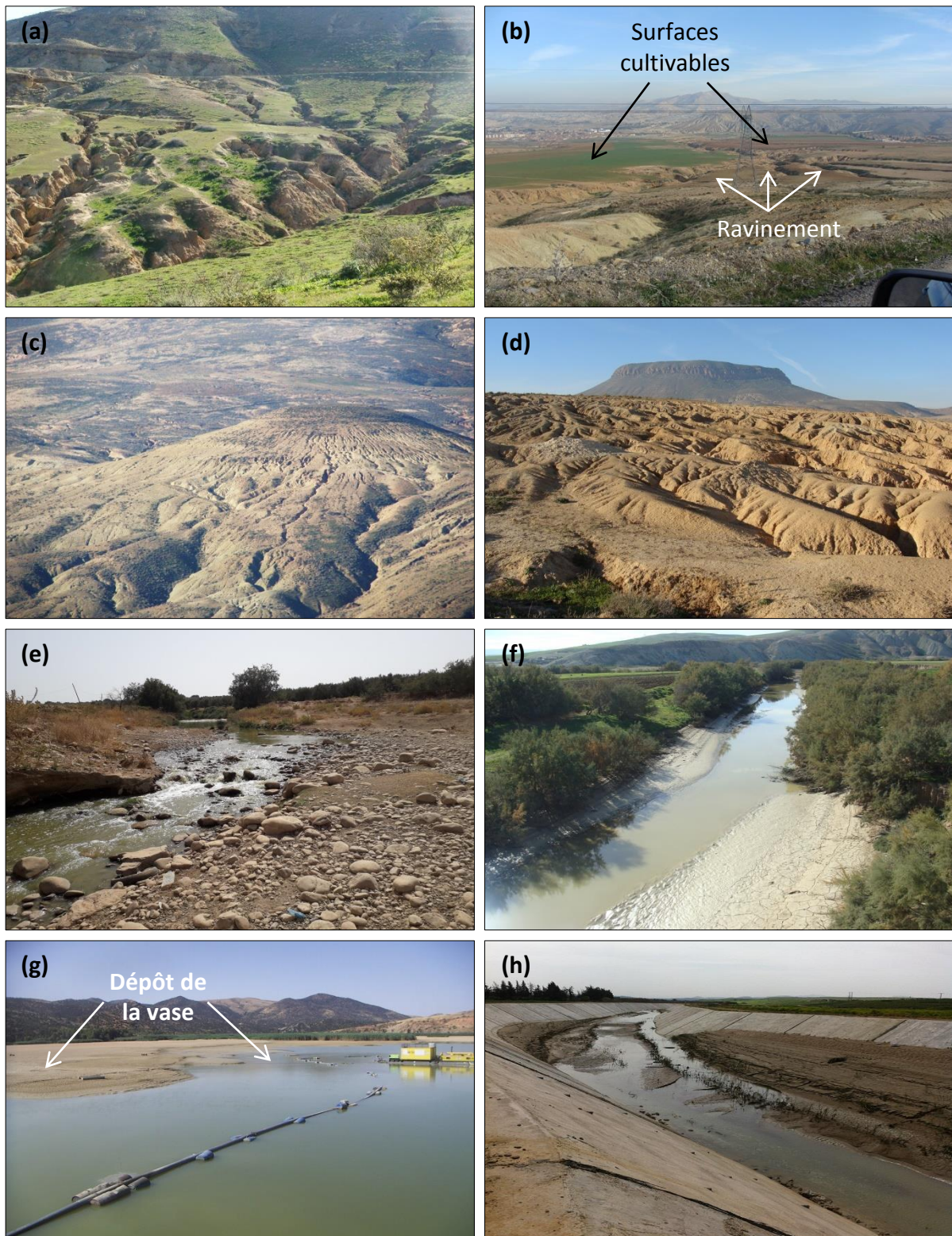
L'érosion hydrique entraîne des conséquences dévastatrices sur le site lui-même mais aussi à l'aval en laissant des sols dégradés à tous les niveaux à savoir :

##### **1.2.4.1. Conséquences directes**

- Pertes en sol (Photo 1.8 (a))
- Pénurie des surfaces cultivables (Photo 1.8 (b))
- Formation intensive du réseau d'écoulement (Photo 1.8 (c))
- Déformation du paysage (Photo 1.8 (d))
- Appauvrissement des sols en nutriments

##### **1.2.4.2. Conséquences indirectes**

- Transport solide dans les oueds (Photo 1.8 (e))
- Colmatage des sols (Photo 1.8 (f))
- Diminution des ressources en eau souterraine
- Envasement des barrages (Photo 1.8 (g))
- Dégradation de la qualité des eaux de barrages
- Sédimentation dans les ouvrages hydrauliques (Photo 1.8 (h))



**Photos I.8 :** Conséquences de l'érosion hydrique. **(a)** Pertes en sols énormes, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (16/02/2013)*. **(b)** Pénurie des surfaces cultivables, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (26/12/2018)*. **(c)** Formation de nouveaux oueds temporaires, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (26/12/2018)*. **(d)** Impact sur le paysage dû à l'érosion hydrique, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (26/12/2018)*. **(e)** Transport solide au niveau de l'oued Haddad, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (26/12/2018)*. **(f)** Stagnation des eaux due au colmatage du lit de l'oued El-Abd, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (26/12/2018)*. **(g)** Dragage du barrage de Fergoug, B.V. de la Macta, *Photo, Direction du barrage. (19/06/2007)*. **(h)** Sédimentation du canal de protection contre les inondations, Chef-lieu de la wilaya de Relizane *Photo, TOUBAL A. K. (22/03/2013)*.

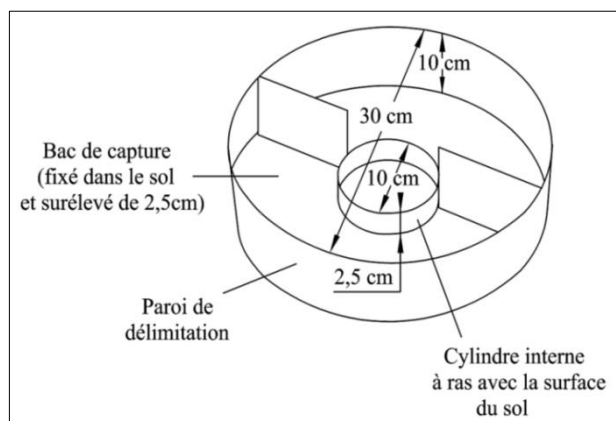
### I.2.5. Méthodes de mesure de l'érosion hydrique

L'érosion du sol est un phénomène très complexe et sa mesure doit comporter :

- La mesure du détachement d'éléments entraînés;
- La mesure directe, sur le terrain, de l'ablation subie par les sols.

#### I.2.5.1. Mesure de l'effet Splash

Une surface est délimitée sur le terrain. Le principe est d'essayer de recueillir les gouttes d'eau dont l'impact sur le sol rejaille dans un dispositif de capture d'un diamètre de 30 cm (Figure I.4 et Photo I.9). On essaye d'évaluer le poids des particules terreuses entraînées au cours du « SPLASH » et retombant sur la surface de l'entonnoir. Il est évidemment difficile d'obtenir des mesures d'une très grande rigueur de l'effet du « SPLASH », mais des ordres de grandeur du phénomène peuvent être ainsi obtenus. Cette mesure est rarement appliquée sur le terrain (Fournier, 1965).



**Figure I.4** : Dimensions de la coupe de Morgan pour la mesure de l'effet Splash.



**Photo I.9** : Dispositif de mesure de l'effet Splash (Stroosnijder, 2005).

#### I.2.5.2. Parcelles expérimentales

Le principe de cette méthode réside en la délimitation d'une superficie rectangulaire de quelques centaines de m<sup>2</sup> dont le fonctionnement simule un bassin versant hydrologique en raison des limites latérales, en amont et son exutoire (Figure I.5 et Photo I.10). La parcelle expérimentale contient à l'exutoire un système conçu pour recevoir l'eau terreuse provenant de chaque précipitation.

Les parties constitutives du système récepteur sont :

- Un canal d'adduction relié à l'exutoire transporte l'eau et la terre de la parcelle vers une première cuve réceptrice;

- Plusieurs cuves successives communiquant par des partiteurs;
- Le volume d'eau ruisselé après chaque pluie est facile à évaluer.

Quel que soit le système récepteur adopté, les parcelles expérimentales permettent, d'évaluer le ruissellement et l'érosion en champs après chaque pluie et, par addition pour des périodes plus longues : mois, année, etc.

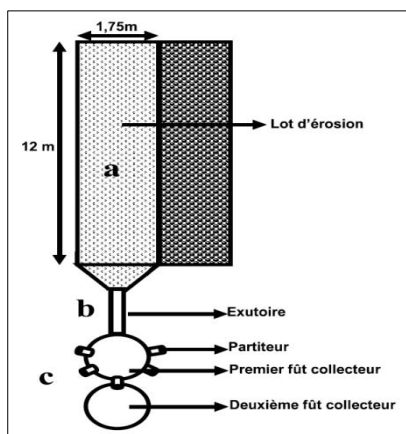


Figure I.5 : Schéma explicatif des parcelles expérimentales.



Photo I.10: Parcelles expérimentales à Madagascar (Razafindramanana et al., 2012).

### I.2.5.2. Méthode des repères (Tige topographique)

Ces repères consistent en un simple piquet, mince, bien stabilisé et répété tout le long d'un versant (Figure I.5 et Photo I.10). Le déchaussement ou le recouvrement des piquets servent à estimer l'ablation ou l'apport de terre. Mais étant donnée l'épaisseur que représente une ablation de terre annuelle, le microrelief du terrain et la présence de débris végétaux, la méthode des repères est très délicate à employer et comporte des possibilités d'erreurs graves.

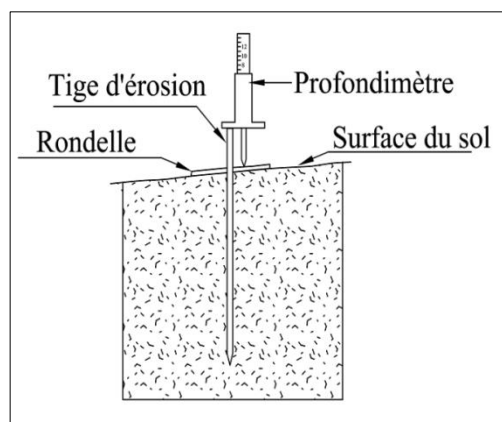


Figure I.6: Schéma explicatif de la tige topographique.



Photo I.11: Mesure du niveau de la surface du sol à l'aide de la Tige d'érosion.

### I.2.5.3. Mesure avec le radio-isotope Césium 137 (Cs-137)

Le principe de la méthode repose sur la comparaison de la teneur en Cs-137 d'un sol érodé à un site témoin, où ni érosion ni sédimentation n'a eu lieu; de préférence ces sites devraient ne pas être cultivés pendant plusieurs années, caractérisés par une faible pente et recouverts de végétation (Toumi, 2013). Les échantillons prélevés par carottage sont séchés au four à 105 °C pendant 48 heures. Les échantillons du sol sont pris à des intervalles de profondeur de 2cm afin d'établir un profil de profondeur de la répartition du Cs-137 dans le sol, qui est déterminée par spectroscopie gamma au laboratoire (Porto et al., 2013). Pour un sol où l'érosion s'est produite la teneur en Cs-137 est inférieure à celle du site de référence, lorsque le dépôt se produit, la teneur en Cs-137 est supérieure à celle du site témoin (Figure I.7) (Grzegorz, 2011).

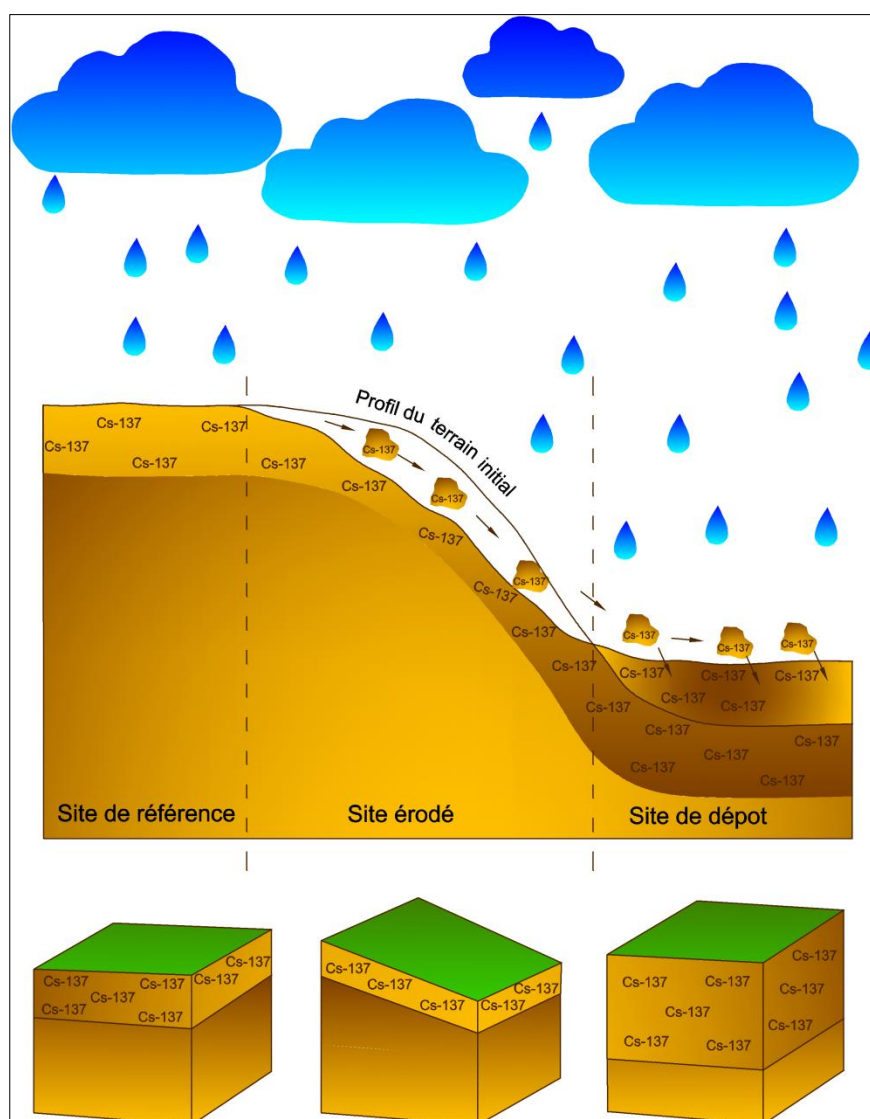
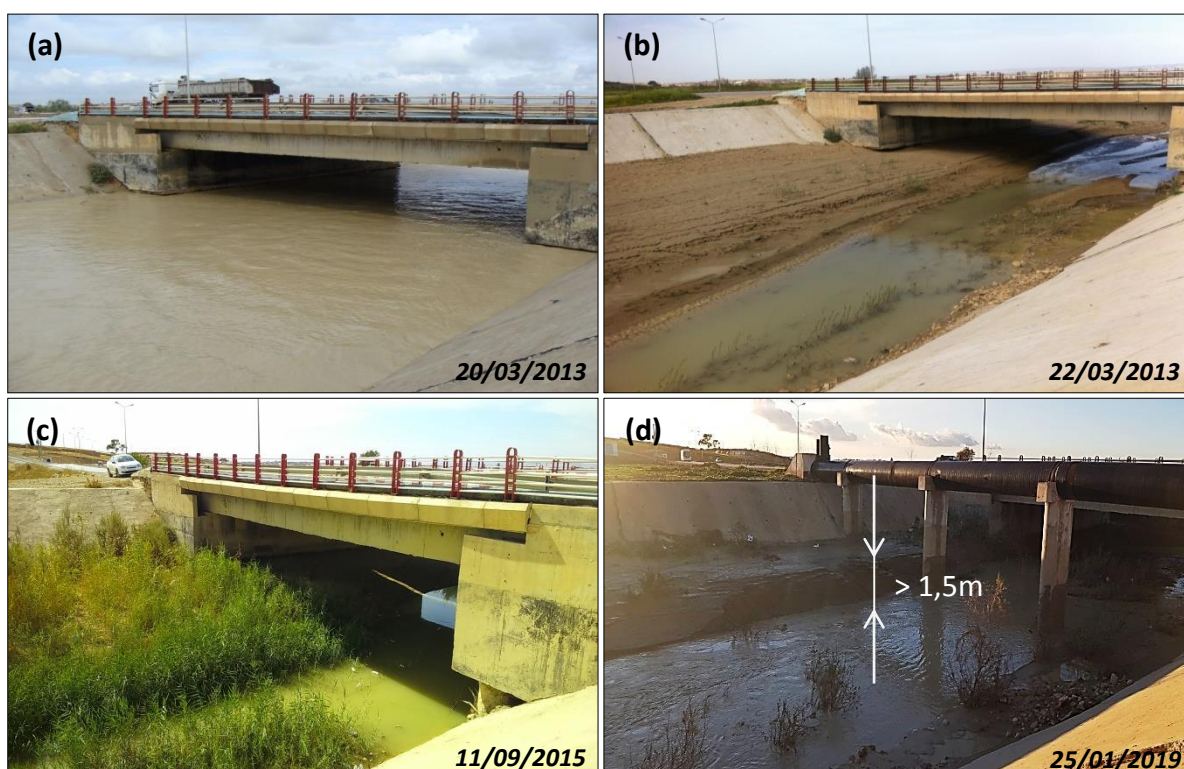


Figure I.7 : Teneur en Cs-137 au niveau de différents sites (référence, érosion et dépôt).

### I.3. Transport solide dans les cours d'eau

Le transport solide dans les oueds est l'une des conséquences secondaires de l'érosion hydrique. Dès que la particule de sol détachée et transportée vers le bas des versants atteint le réseau hydrographique, elle est acheminée et transportée dans le bassin versant vers son exutoire (Photos I.12 (a), (b), (c) et (d)), donc le transport solide est le phénomène qui permet le déplacement d'une masse solide composée d'éléments granulaires (vases, sables, graviers, galets...) (Oliveros, 1996).



**Photos I.12 :** Ensablement du canal de protection contre les inondations, Chef-lieu de la wilaya de Relizane. (a) Photo, TOUBAL A. K. (20/03/2013). (b) Photo, TOUBAL A. K. (22/03/2013). (c) Photo, TOUBAL A. K. (11/09/2015). (d) Photo, TOUBAL A. K. (25/01/2019).

#### I.3.1. Processus du transport solide

Selon l'énergie de l'écoulement et le débit véhiculé au niveau de l'oued, le mouvement des grains s'organise. Quand le débit augmente progressivement les particules commencent à bouger, puis à être transportées.

Avec l'augmentation du frottement de fond, l'épaisseur de couche de saltation augmente et débute le transport en suspension. Ces deux processus bien distincts coexistent : la suspension qui concerne toute la colonne d'eau et le charriage qui concerne les corps transportés sans quitter le fond du lit (Belleudy, 2007).

### I.3.2. Origine des matériaux transportés

Le transport solide dans les oueds provient de différentes sources. Le charriage s'alimente surtout par érosion du lit et des berges du cours d'eau (Photos I.13 (a)). Il contribue pour une large part à la formation et à l'équilibre du lit, modelant ainsi le profil en long du cours d'eau.

Le transport en suspension concerne principalement les matériaux produits par l'abrasion des sols (Photos I.13 (a) et (b)) (Granier, 1983). L'abrasion des sols a deux origines, à savoir :

- Erosion hydrique au niveau du versant (érosion en nappe, érosion linéaire, mouvements en masse, etc.)
- Erosion au niveau de l'oued : on distingue l'érosion du fond du lit, l'érosion des berges et le sapement des berges.



**Photos I.13:** Oued Khlog, B.V. de l'oued Mina. *Photos, TOUBAL A. K. (20/03/2013).* (a) Source de charriage provenant des berges (b) et (c) Erosion du fond du lit.

### I.3.3. Modes de transport

Ce phénomène s'effectue de deux manières, à savoir:

- La suspension : elle concerne les éléments fins tel que les argiles les limons, les sables fins, etc. Ils sont transportés à la même vitesse que l'écoulement (Yles, 2014).
- Le charriage : le transport par charriage est en relation étroite avec le lit d'oued, ce mode de transport englobe trois types :

- La saltation : elle consiste au déplacement par rebondissement des corps plus ou moins grossiers tels que les graviers... ce transport est moins rapide que la suspension.
- Le glissement et le roulement : il se présente comme le mode le moins rapide, car les matériaux déplacés restent toujours en contact avec le lit d'oued. Le glissement et le roulement s'effectuent lorsque les conditions d'écoulement le permettent (Figure I.8).

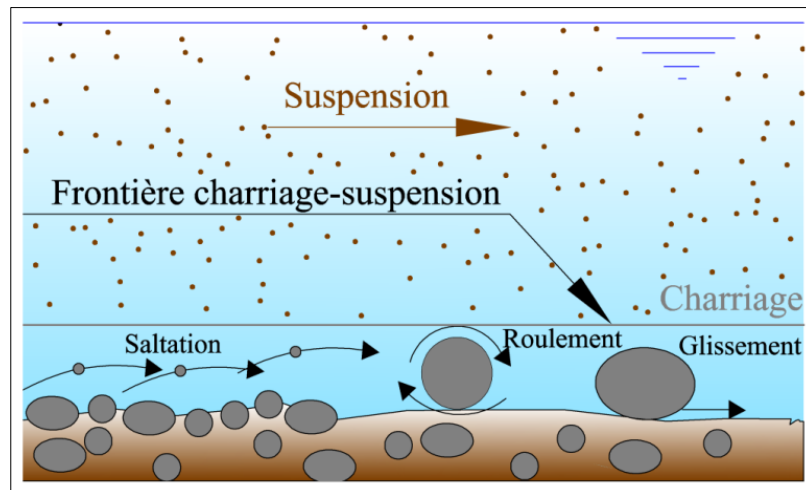


Figure I.8 : Modes de transport solide dans les oueds.

#### I.3.4. Conséquences du transport solide

Le transport solide engendre des nombreuses conséquences désastreuses parmi lesquelles :

- Exhaussement des lits d'oueds (Photo I.14 (a))
- Transport d'énormes quantités de blocs par charriage (Photo I.14 (b))
- Risques d'inondation des terres agricoles suite à l'exhaussement du lit d'oued (Photo I.14 (c))
- Diminution de la profondeur des ouvrages tels que les ponts (Photo I.14 (d))
- Sapement des berges (Photo I.14 (e))
- Impact sur le paysage et la qualité générale de la rivière (Photo I.14 (f))
- Erosion des berges (routes, etc.) (Photo I.14 (g))
- Envasement des barrages (Photo I.14 (h))





**Photos I.14 :** Conséquences du transport solide (a) Dépôts énormes de sédiments fins, *Photo, TOUBAL A. K. (03/03/2013)*. (b) Dépôts de galets et blocs sur le lit d'oued Haddad, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (16/02/2013)*. (c) Risque d'inondation de terres agricoles en période de crues, Oued El Abd, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (02/02/2013)*. (d) Diminution de la profondeur du pont de la commune d'oued El-Abtal, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (26/12/2018)*. (e) Sapement des berges de l'oued El-Abd, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (26/12/2018)*. (f) Déformation du paysage suite à l'érosion et au transport solide de l'oued Khलग, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (29/03/2013)*. (g) Recul des berges suite aux eaux chargées en sédiments, Oued Khलग, B.V. de l'oued Mina, *Photo, TOUBAL A. K. (30/03/2013)*. (h) Envasement total du barrage de Djidouia, *Photo, MADANI B. (2011)*.

### I.3.5. Mesure du transport solide dans les oueds

Le transport solide dans les oueds se mesure au niveau des stations hydrométriques, implantées dans un point stratégique du réseau d'écoulement. Une station est constituée de :

- Bloc en maçonnerie contenant tous les appareillages de mesure (Photo I.15 (a) et (c))
- Câble téléphérique pour l'échantillonnage au milieu de la section de l'oued (Photo I.15 (b))
- Le quai pour la mesure de la hauteur d'eau contenant l'échelle limnimétrique (Photo I.15 (d))



**Photos I.15** : Station hydrométrique d'oued El-Abtal, B.V. de l'oued Mina *Photos, TOUBAL A. K. (26/12/2018)*  
**(a)** Station contenant les appareillages de mesure **(b)** Câble téléphérique **(c)** Appareillages de mesure et moteur téléphérique **(d)** Echelle limnimétrique pour la mesure des hauteurs d'eau.

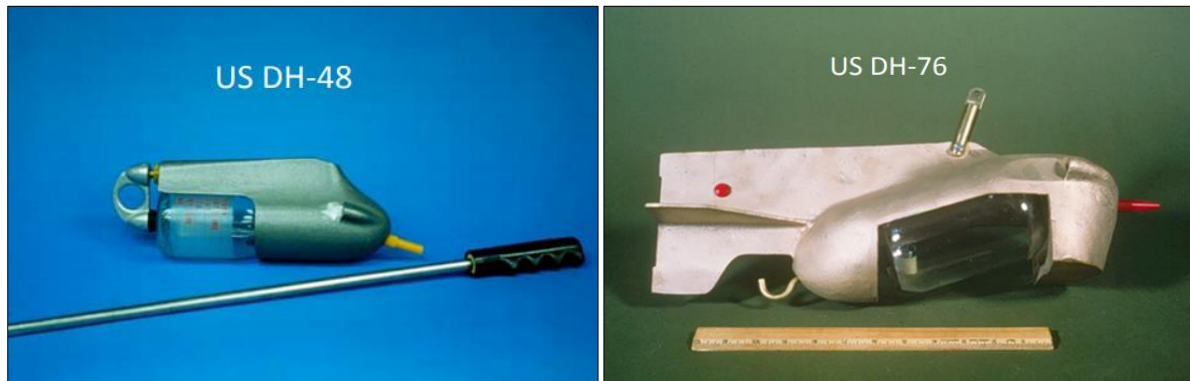
#### I.3.5.1. Mesure de la suspension

La mesure du taux de particules en suspension dans un cours d'eau lors de la crue est une étape indispensable pour l'estimation du débit solide, plusieurs appareillages et dispositifs ont vu le jour.

##### a/ Prélèvement à la bouteille

La concentration des matières en suspension varie selon une verticale, pour tenir compte de ces variations, le prélèvement s'effectue à différents points, de la surface libre jusqu'au fond. La moyenne des concentrations prélevées en chaque point représente la concentration

moyenne instantanée. Le dispositif se compose d'une bouteille couverte d'une armature en forme de poisson accrochée à une tige pour la mesure des petits cours d'eau ou accroché à un câble en acier pour les grands. Un premier orifice se charge de l'entrée de l'eau et un deuxième de chasser l'air (Photos I.16) (Fao, 1993).



Photos I.16 : Bouteille d'échantillonnage (Source : <https://www.usgs.gov/>)

#### b/ Saumon creux

C'est un corps lesté creux contenant une bouteille de prélèvement, deux orifices permettant l'un l'entrée de l'eau, l'autre l'évacuation de l'air. On peut commander à distance l'ouverture et la fermeture de la bouteille et faire des prélèvements ponctuels ou par intégration sur une verticale de mesure. L'échantillonneur reste à un point fixe dans le cours d'eau, les sédiments s'accumulent d'une façon continue dans l'appareil jusqu'à ce qu'elle se remplisse. L'appareil doit être muni d'une valve commandée électriquement ou par des câbles. En général ces appareils comportent un ajutage de 4 mm environ, un tube d'échappement d'air, une valve contrôlant la prise et l'échappement, une chambre égalisant la pression du réservoir et la pression externe à l'ajutage de prise à toutes les profondeurs (Photo I.17) (Hug, 1975; Fao, 1993).



Photo I.17 : Saumon creux (Source : <https://www.usgs.gov/>)

### c/ Utilisation des jauges nucléaires avec le Césium 137

L'utilisation des jauges nucléaires permet de réaliser en continu et à des profondeurs variables des mesures de concentration des matières en suspension. On utilise une jauge de turbidité à diffusion de photons appelée JTD3 (Figure I.9). La source de césium 137 émet son rayonnement dans tout l'espace. Les photons émis en direction du détecteur sont absorbés par un écran de tungstène si bien que seuls les photons diffusés par le milieu environnant peuvent atteindre le détecteur. La verticalité de la sonde pendant la mesure est l'un des critères essentiels.

Sur site, la mesure d'un profil vertical est faite en quelques minutes (15 profils par heure) (Remini, 2005).

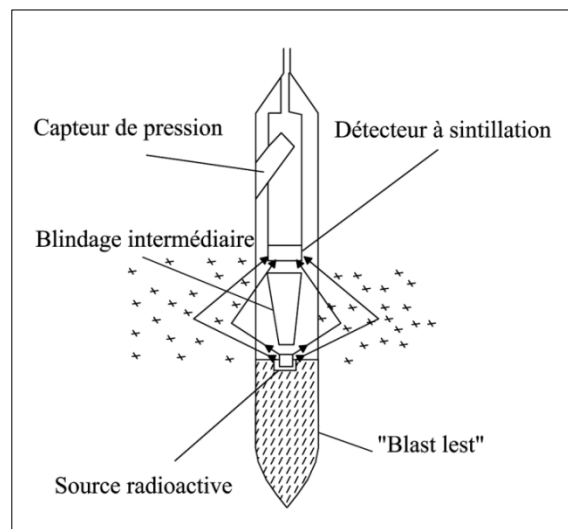


Figure I.9 : Jauge JTD3 (Remini, 2005).

### d/ Protocole expérimental de mesure du transport solide en suspension adopté par l'A.N.R.H

La mesure du transport solide en Algérie est réalisée par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H). L'estimation du transport solide consiste en la mesure des matières en suspension (MES) transitant dans un point précis de l'oued (station hydrométrique).

- Les débits sont calculés à l'aide de la courbe de tarage adéquate, à partir des hauteurs d'eau lues sur une échelle limnimétrique (Photos I.15 (d)), plus la crue est importante plus la fréquence de mesure est élevée.

- Pour la mesure de concentration des sédiments en suspension, à chaque mesure de débit, on prélève au moyen d'un flacon d'une contenance de 50 cl (Photos I.18 (a)) un échantillon d'eau turbide sur la rive à la surface de l'oued. Le charriage de fond n'est pas pris en considération dans la mesure du transport solide.

- La boue recueillie sur un papier filtre Laurent ( $\Phi$  : 32 cm) muni d'une filtration moyenne (Photos I.18 (b)) est pesée.

- Après séchage à l'étuve à 105 °C pendant 30 minutes, la concentration des sédiments exprimée en (g/L) est déterminée à partir de la charge déduite sur un litre d'eau (El Mahi & al., 2010) suivant la formule suivante :

$$\text{Concentration (g/l)} = 1000 (P2 - P1) / V$$

Où

**P1** : poids du papier-filtre sec et vide évalué en grammes avant la pesée de l'échantillon;

**P2** : poids du papier-filtre avec les sédiments en suspension évalué en grammes;

**V** : volume de l'échantillon.

- L'inconvénient dans les mesures réside dans la répartition non-uniforme des (MES) suivant une section verticale. En période d'étiage où le débit liquide est relativement constant, la mesure se fait automatiquement suivant des horaires bien précis de la journée.

- Les données observées sont reportées sur une fiche signalétique (Figure I.10) puis dans un fichier « Excel » (Figure I.11) contenant respectivement le code de la station de jaugeage, la date, l'heure, la hauteur d'eau en (cm), la concentration des sédiments (g/L), le débit liquide ( $m^3/s$ ) et le débit solide (kg/s) qui est le produit entre la concentration et le débit liquide (Achite et Meddi, 2005). Les données de base utilisées sont les concentrations instantanées et le débit liquide correspondant.



**Photos I.18** : Laboratoire de l'A.N.R.H de Tizi Ouzou. (a) Bouteille de prélèvement de l'échantillon du transport solide. (b) recueil des sédiments sur papier filtre, Photos, BALLAH A. (14/05/2013).

HYDRAULIQUE. A.N.R.H **ANALYSE DES EAUX** Code    Page   

Etiage = MG = ..... X c 25  
Crue = MG = ..... X c 25

OUED ..... STATION .....  
Analyses effectuées par: { partielles / Fondamentales } secteur de ..... laboratoire de .....

N°	Date	Heure	Hauteur à l'échelle (cm)	E ou C	Cond 25"	MG Sels dissous l'eau (g/l)	Composition des sels dissous (mg/l)						PH	Transport solide (g/l)	Analyse demandée	Observations (NO <sup>3</sup> )
							Na	Mg	Ca	K	Cl	SO <sup>4</sup>				

Figure I.10 : Fiche signalétique de l'analyse des eaux (Source : A.N.R.H de Tizi Ouzou, 2013).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	code_sta	Ladate	heure	hauteur cm	Concentration g/l	débit m3/s	nat_ecoul	debit sol kg/s	
1	111201	01-févr-87	00:00	54	8,33	6,82		56,811	
2	111201	01-févr-87	02:00	52	8,33	6,06		50,48	
3	111201	01-févr-87	04:00	48	8,33	4,78		39,817	
4	111201	01-févr-87	06:00	46	8,33	4,26		35,486	
5	111201	01-févr-87	08:00	44	7,6	3,74		28,424	
6	111201	01-févr-87	10:00	42	6,85	3,22		22,057	
7	111201	01-févr-87	12:00	40	6,1	2,7		16,47	
8	111201	01-févr-87	14:00	38	5,4	2,4		12,96	
9	111201	01-févr-87	16:00	35	4,8	1,95		9,36	
10	111201	01-févr-87							

Figure I.11 : Exemple du fichier Excel contenant les données instantanées du transport solide en suspension.

**I.3.5.2. Mesure du charriage**

**a/ Préleveur Ehrenberger**

Le préleveur Ehrenberger d'origine suisse, inventé en 1931, est, un échantillonneur que l'on place sur le lit de l'oued face au courant. Il se caractérise par une ouverture de 70 cm, sans divergent (Photo I.19). La taille des mailles est grossière et est destinée pour capturer les sédiments grossiers. Ce préleveur s'est avéré peu stable dans un écoulement très turbulent mais efficace en écoulement peu turbulent car il permet de capturer de gros échantillons (Camenen, 2011).



Photo I.19 : Préleveur Ehrenberger (Camenen, 2011)

**b/ Nasse BTMA**

Le BTMA (Bedload Transport Metre Arnhem) d'origine hollandaise fut conçu en 1934. Une nasse est posée au fond pour récolter les particules solides qui s'y déplacent dans une couche de 0.05 m au-dessus du fond. L'embouchure, d'une largeur d'environ 0.07 m, a la forme d'un tube rectangulaire qui est raccordé à une forme divergente métallique, elle-même connectée à une forme convergente constituée de mailles aux ouvertures de 0.250 mm (Photo I.20). La nasse est suspendue dans un cadre doté de deux supports à l'avant et d'un aileron à l'arrière. Le système de suspension est particulièrement efficace pour amener la nasse au fond sans choc, ce qui évite la prise intempestive.



Photo I.20: Nasse BTMA (Photo courtesy Roy Frings) (Van Rijn et Gaweesh, 1992).

**c/ Nasse Helley-Smith**

La nasse Helley-Smith a été inventée en (1971) par l'USGS (The United States Geological Survey). L'échantillonneur a été conçu pour être utilisé dans des écoulements avec une vitesse maximale de 3 m/s avec une taille de sédiment allant de 2 à 10 mm. L'échantillonneur a une buse d'entrée carrée de 7,62 cm et un sac d'échantillon de 46 cm de long constitué d'un maillage de 0,2 mm (Photo I.21) (Emmett, 1980).



Photo I.21: Nasse Helley-Smith (Photo Ph Belleudy) (Recking et al., 2008).

#### d/ Détecteur hydrophonique

Le principe de cet appareil sert à capter les ondes sonores diffusées par le charriage de fond. Pour cela, l'utilisation d'un hydrophone est requise. Lorsque les sédiments se déplacent au fond du lit, ils s'entrechoquent et génèrent du bruit dans des fréquences variant de quelques centaines de Hz à quelques centaines de kHz. Comme il a été démontré en laboratoire, les bruits captés par l'hydrophone sont similaires à celui produit par le transport solide (Figure I. 12 ; Photo I.22). A ce jour, le potentiel de la méthode ainsi que ses limites ne sont pas connues (Geay, 2017).

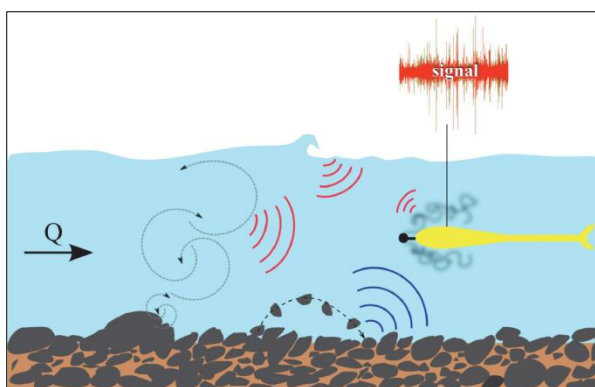


Figure I. 12 : Schéma de principe de la mesure par les ondes acoustiques (Geay, 2017).



Photo I.22 : Hydrophone monté sur un saumon hydraulique (Geay, 2017).

### I.4. Estimation de l'érosion hydrique dans la zone d'étude

#### I.4.1. Historique de la modélisation de l'érosion hydrique dans le monde

Dès que l'homme s'est attaché à cultiver la terre, il a défriché la couverture végétale, exposé le sol nu à l'agressivité des pluies et provoqué la dégradation de l'horizon humifère du sol ainsi que l'accélération de l'érosion et du ruissellement.

Les modèles développés visent à la fois à représenter et mieux comprendre les phénomènes naturels complexes. Les premières recherches sur les facteurs de l'érosion hydrique des sols sur des parcelles expérimentales ont vu le jour en Allemagne en 1890, aux USA en 1935 et en Afrique francophone en 1954.

#### I.4.1. Modèle Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

##### I.4.1.1. Historique des travaux qui ont abouti à l'USLE

Duley et Ackerman (1934) ont publié un article sur l'influence de la pente et la longueur sur l'érosion hydrique.



Zingg (1940) a comparé les données d'expériences menées sur le terrain entre les précipitations naturelles et la simulation des pluies.

Smith (1941) a ajouté à cette équation deux facteurs : les systèmes de cultures et les pratiques anti-érosives.

Browning et al. (1947) ont ajouté à l'équation de Smith le facteur érodibilité du sol, et ont préparé plusieurs tableaux de valeurs relatives de chaque facteur pour différents types de sols, de rotations de culture et de longueur de pentes.

Smith et Whitt (1947) ont fourni de nombreuses données sur les pertes en terre pour des sols argileux sur différentes pentes et pour une large gamme de systèmes de culture.

Musgrave (1947) a introduit le facteur "précipitations". La formule de Musgrave est :

$$E = I.R.(S/10)^{1.25} \cdot (L/72.6)^{0.25} \cdot (p/1.25)^{1.75}$$

E : perte en sol (tonne/ acre /an)

I : érodibilité des sols (tonne/acre/an)

R : couverture végétale

S : inclinaison de la pente

L : longueur de pente

P : hauteur de pluie en 30 minutes

Smith et Whitt (1948) ont proposé une équation d'estimation de l'érosion.

$$A = C.S.L.K.P$$

où C, le facteur principal, est le taux d'érosion des sols argileux sous certaines conditions. Les facteurs inclinaison de pente (S), longueur de pente (L), érodibilité (K) et les pratiques anti-érosives (P) sont sans dimension et sont utilisés pour affiner le résultat.

A partir de 1956 et la création du centre national du ruissellement et de calcul de perte de sol, Wischmeier et Smith grâce aux nombreuses données expérimentales accumulées ont affiné l'influence des différents facteurs et ont publié la première version de l'équation universelle de perte en terre (USLE) en 1965 puis une version définitive en 1978.

#### **I.4.2. Description du modèle RUSLE**

Le modèle d'estimation des pertes en sols appliqué dans cette étude est le modèle RUSLE, version révisée d'USLE développée par Renard et al. (1991). Il s'écrit sous la forme suivante :

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

avec:

$A$  : taux annuel de perte en sol ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ );

$R$  : facteur d'érosivité des pluies ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ an}^{-1}$ );

$K$  : facteur d'érodibilité des sols ( $t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ );

$LS$  : facteur topographique adimensionnel, obtenu en combinant la pente et sa longueur;

$C$  : facteur de couverture végétale sans dimension;

$P$  : facteur sans dimension, pour tenir compte des techniques culturales anti-érosives.

Ce modèle, au départ, a été développé pour des parcelles de terres agricoles. Selon De Roo (1996) et Chatterjee et al. (2014), l'utilisation combinée du modèle RUSLE avec les SIG présente plusieurs avantages, à savoir : (1) l'applicabilité de cette méthode sur de grands bassins versants ; (2) la possibilité d'afficher chaque paramètre dans une carte bien spécifique.

Le modèle RUSLE est un modèle empirique à présent appliqué à de plus en plus à grande échelle notamment à l'échelle continentale (Van der Knijff et al. (2000), Panagos et al. (2015a)), à l'échelle territoriale (Van der Knijff et al. (1999); Gay et al. (2002)) et à l'échelle du bassin versant (Prasannakumar et al. (2012); Toumi et al. (2013); Pan et Wen (2014); Balasubramani et al. (2015); Markose et Jayappa (2016)).

#### 1.4.2.1. Facteur d'érosivité R

Le facteur R est le principal facteur qui conditionne le taux de perte en sols. Alors que les autres facteurs conduisent à une bonne estimation de l'érosion hydrique (Naqvi et al., 2013), R représente le moteur essentiel du déclenchement de l'érosion en nappe et en rigoles par l'impact splash et le ruissellement (Chatterjee et al., 2014). Plus les précipitations sont intenses et longues, plus grands sont les risques d'érosion (Stone et Hilborn, 2000; Markose et Jayappa, 2016). L'équation proposée par Wischmeier et Smith (1978) représente le produit de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité maximum durant 30 minutes.

$$R = M E_c I_{30}$$

où  $M$  est un coefficient dépendant du système d'unités de mesure, et  $E_c$  est l'énergie cinétique de l'intensité moyenne sur 30 minutes ( $I_{30}$ ) des gouttes de pluie de chaque averse.

#### 1.4.2.2. Facteur d'érodabilité (*K*)

Il s'agit d'un facteur du sol qui se définit comme la susceptibilité du sol à l'érosion. La texture, la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité sont des facteurs qui conditionnent l'érodabilité des sols (Roose, 1994; Toumi et al., 2013; Balasubramani et al., 2015) et qui expliquent l'influence de la propriété des sols sur les pertes en sols pendant les événements pluvieux (Renard et al., 1997). La formule proposée par Wischmeier et Smith, (1978) est donnée comme suit :

$$100.K = 2,1M^{1,14} \cdot 10^{-4} (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5 (c - 3)$$

Où :

*M* = (% sable fin + limon) (100 - % argile)

*a*: pourcentage de matière organique;

*b*: Code de la perméabilité et *c* : code de la structure.

#### 1.4.2.3. Facteur de pente et de longueur de pente (*LS*)

Ce facteur représente l'influence de la topographie sur l'érosion des sols. C'est le produit de l'inclinaison du terrain (*S*) par sa longueur (*L*). Les pertes en sol augmentent avec l'augmentation de la pente (Yildirim, 2011), et plus la pente est longue plus le risque d'érosion est élevé (Stone et Hilborn, 2012).

La formule du facteur *LS* établie par Wischmeier et Smith (1978) est la suivante :

$$LS = \left(\frac{l}{22,13}\right)^m (0,065 + 0,045 S + 0,065 S^2)$$

Où :

*L* : Longueur de pente (m);

*S* : angle d'inclinaison de la pente (%);

*m* : paramètre dépendant de la pente;

*m* = 0,5 si *S* >5%, *m* = 0,4 si 3,5 < *S* < 4,5 %, *m* = 0,3 si 1 < *S* < 3 %, *m* = 0,2 si *S* < 1%.

#### 1.4.2.4. Facteur de couverture végétale *C*

Le facteur de couvert végétal est défini comme le rapport entre l'érosion mesurée sur une parcelle de référence (jachère nue) et une parcelle test sous une culture bien précisée (Raissouni, 2012). Ce facteur est un paramètre crucial qui conditionne l'érosion hydrique. Un

couvert végétal plus important a tendance à réduire l'érosion (Renard et al., 2011). Il correspond au facteur de végétation, compare les pertes de terre provenant de sols cultivés bénéficiant d'une gestion spécifique et les pertes correspondantes dans un champ travaillé constamment et laissé en jachère (Stone et Hilborn, 2000). La valeur du facteur C varie de 0 à 1 (Tableau I.1)

**Tableau I.1 :** Valeurs du facteur C en fonction de l'occupation des sols.

Occupation du sol	Valeur du facteur C
Eau libre	0
Forêt dense	0,004
Forêt dégradée	0,008
Zone urbanisée	0,002
Zone agricole	0,28
Sol nu	1

Source : (United States Department of Agriculture, USDA, 1972)

#### **1.4.2.5. Pratiques agricoles et conservation du sol (P)**

Ce facteur correspond aux pratiques de conservation des eaux et des sols qui minimisent considérablement l'effet de l'érosion hydrique (Ferreira et al., 2015). Les pratiques antiérosives sur des surfaces de sols cultivés sont les cultures en courbes de niveau, en bandes alternées ou en terrasses, les reboisements en banquettes, le buttage et le billonnage en courbes de niveau. Ce sont les pratiques les plus efficaces de conservation des sols (Sadiki, 2004).

Morgan (2005) a proposé des valeurs du facteur P en fonction de la pente du terrain (Tableau I.2) là où un contrôle de l'érosion est pratiqué.

**Tableau I.2 :** Valeurs du facteur P en fonction de la pente du terrain (Panagos et al., 2015b)

Pente (%)	Valeur du facteur P
9 - 12	0.6
13 - 16	0.7
17 - 20	0.8
21 - 25	0.9
>25	0.95

#### **1.4.3. Limites d'application du modèle USLE**

Les limites d'application du modèle USLE sont résumées comme suit :

- Il est applicable pour l'estimation de l'érosion en nappe parce que la source de l'énergie est la pluie. Il n'est pas applicable pour l'estimation de l'érosion linéaire ni les mouvements en masse, tel que les glissements de terrain.

- La topographie : ce modèle a été testé et vérifié sur des pentes allant de 1 à 20 % à l'exclusion des montagnes jeunes, en particulier des pentes supérieures à 40 % où le ruissellement est une source d'énergie plus grande que les pluies et où les mouvements de masse sont importants.
- Les types de pluies : les relations entre l'énergie cinétique et l'intensité des pluies utilisées généralement dans ce modèle ont été établies dans la plaine américaine. Elles ne sont pas valables en montagne mais on peut développer des sous-modèles différents pour l'indice d'érosivité des pluies R.
- Ce modèle ne s'applique qu'à des données moyennes sur 20 ans. Elles ne sont donc pas valables à l'échelle de l'averse. Un modèle MUSLE a été mis au point pour estimer les transports solides de chaque averse, qui ne tient plus compte de l'érosivité de la pluie mais du volume ruisselé.
- Enfin une limite importante de ce modèle, c'est qu'il néglige certaines interactions entre les facteurs. Par exemple, il n'est pas tenu compte de l'effet de la pente combiné au couvert végétal sur l'érosion, ni de l'effet du type de sol sur l'effet de la pente (F.A.O, 1990).

## I.5. Travaux réalisés avec le modèle RUSLE

### I.5.1. Dans le monde

Parmi les très nombreuses études basées sur le modèle RUSLE, citons quelques applications récentes et illustratives des potentialités du modèle :

- Bayramin et al. (2008) ont étudié l'impact des changements d'utilisation des terres sur la dégradation des terres liées à l'érodibilité du sol en utilisant le modèle RUSLE au niveau des montagnes d'Indagi de Cankiri (Turquie). L'analyse de la variance a montré que les propriétés statistiques du sol ont changé avec l'utilisation des terres, car les terres cultivées sont plus sensibles à l'érosion hydrique que les forêts. Ceci est principalement dû à l'importante diminution de la matière organique du sol.
- Prasannakumar et al. (2012) ont utilisé les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et la télédétection pour appliquer le modèle RUSLE afin de quantifier les pertes en sol du sous-bassin versant de l'oued Pamba en Inde (16783 km<sup>2</sup>). La distribution spatiale du taux annuel d'érosion des sols a été obtenue en intégrant les variables du

modèle dans un outil SIG en format Raster, le résultat a montré que l'érosion maximale est de  $17 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ .

- Naqvi et al. (2013) ont intégré les SIG et la télédétection pour la détermination du taux moyen annuel de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE au niveau du bassin versant de Nun Nadi (Inde) (8697,33 ha). Le résultat obtenu montre qu'environ 80% des zones représentent la partie la moins exposée à l'érosion hydrique, par contre 7 % des zones sont exposés à un risque élevé ou très élevé à l'érosion hydrique.
- Kumar et al. (2014) ont utilisé les SIG et la télédétection conjointement pour l'application du modèle RUSLE afin d'estimer les pertes en sols en Inde à l'ouest de l'Himalaya sur un bassin d'une superficie de  $5739 \text{ km}^2$ . L'étude a révélé que le couvert forestier, les terres cultivées et les broussailles constituent 87,4% de la zone exposée au risque d'érosion du sol ( $25,63 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ), dans les sols nus il atteint  $60,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , la partie la moins exposée à l'érosion est celle des cultures de thé ( $16,09 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ).
- Jiang et al. (2015) ont estimé les pertes en sols du sous-bassin versant de l'oued Jinsha (Chine) ( $87000 \text{ km}^2$ ). La mise en œuvre des jeux de données au moyen de Systèmes d'Information Géographique montre que l'application du modèle RUSLE conduit à l'estimation d'une perte moyenne annuelle de  $52,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . La plus forte érosion est localisée au niveau du cours d'eau principal, dans la tranche d'altitudes entre 1675 et 2153 m et au niveau des pentes allant de  $15^\circ$  à  $35^\circ$ .
- Panagos et al. (2015) ont travaillé avec le modèle RUSLE au niveau du territoire de l'union européenne. Le taux moyen de perte en sol annuel est estimé à  $2,46 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  entraînant une perte totale de sol de 970 Mt par an. Une attention particulière est accordée aux 4 millions d'ha de terres cultivées sur lesquelles on estime actuellement des taux de perte de sol non durables de plus de  $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , pour lesquels des mesures politiques et de stratégies antiérosives devraient être ciblées.
- Chadli (2016) a appliqué le modèle RUSLE sur le bassin versant de Sebou au Maroc ( $40000 \text{ km}^2$ ). La multiplication des cinq facteurs du modèle montre que 78,83% de la superficie présente un faible risque d'érosion, 17,36% de risque moyen, 3,04% de risque élevé et 0,77% de risque très élevé.

- Gaubi et al. (2017) ont appliqué le modèle RUSLE en utilisant les techniques de SIG et de télédétection qui a permis d'évaluer l'estimation du risque d'érosion des sols au niveau du bassin versant de Lebna (Tunisie). En effet le taux moyen annuel des pertes en sol est estimé à  $24 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Les résultats trouvés sont en conformité avec les mesures bathymétriques du barrage de Lebna situé à l'exutoire de la zone d'étude.

### I.5.2. En Algérie

- Toumi et al. (2013) ont étudié les pertes en sol du bassin versant de l'oued Mina située au nord-ouest algérien ( $4900 \text{ km}^2$ ) en appliquant le modèle USLE. Les SIG et la télédétection ont fait l'objet des outils principaux de cette étude. Le potentiel érosif varie de 0 à  $1500 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . la distribution spatiale de l'érosion hydrique montre que les zones à haut risque d'érosion hydrique sont situées en amont du barrage SMBA. Selon les résultats de calcul des changements entre l'année 1987 et l'année 2009, environ  $1038 \text{ km}^2$  des terrains couverts par la végétation sont devenus des terrains nus.
- Benkadja et al. (2015) ont comparé trois modèles à savoir : RUSLE, Graviovic et ICONA pour l'évaluation des pertes en sol et l'identification des zones dégradées du bassin versant de l'oued K'sob ( $1482 \text{ km}^2$ ). Les résultats montrent que 90 % de la surface du bassin est soumise à un risque d'érosion faible à modéré et seulement 10 % est vulnérable à l'érosion avec une perte de sédiments estimée à  $4,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Les modèles RUSLE, Graviovic et ICONA fournissent des outils utiles pour caractériser l'érosion du sol et peuvent être utilisés pour la hiérarchisation des zones vulnérables sur les bassins versants semi-arides.
- Benchettouh et al. (2017) ont testé le modèle RUSLE au niveau du bassin versant de l'oued Mina. Le croisement des couches Raster représentant chacune d'entre elles les facteurs du modèle montre une perte moyenne annuelle de la zone de  $11,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Les taux du potentiel érosif varient de 0 à plus de  $100 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Environ 50% du bassin présente une classe très faible à faible. Le risque d'érosion est modéré sur 13,9% du bassin versant. Le risque d'érosion est élevé à dangereux sur 36,1% du bassin versant.

- Benselama et al. (2018) ont étudié le taux de pertes en sol du bassin versant de l'oued El Maleh (932,56 km<sup>2</sup>). Le modèle RUSLE révèle que le taux moyen annuel de l'érosion en nappe est de 9 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Le transport solide mesuré au niveau de la station hydrométrique montre une érosion spécifique de 2,94 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. La différence entre les deux valeurs est due aux dépôts des sédiments érodés qui n'ont pas atteint le réseau hydrographique.
- Djoukbala et al. (2018) ont comparé l'érosion spécifique obtenue avec le modèle RUSLE et le taux des sédiments mesurés au niveau de la station hydrométrique située à l'exutoire du bassin versant de l'oued El Ham (26000 km<sup>2</sup>). Le modèle RUSLE a donné une valeur de l'érosion spécifique en nappe évaluée à 5,7 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. La différence entre ces deux méthodes est de 7,5%.

### **I.6. Apport des nouvelles technologies de télédétection et des SIG à l'étude de l'érosion**

L'introduction et l'application des SIG et de la télédétection ont permis une spatialisation précise des phénomènes naturels. Dès qu'il s'agit de conserver les notions d'espace et de topologie, les SIG deviennent des outils indispensables. Les premiers modèles des années 60 contenaient d'ailleurs déjà les concepts propres au SIG (Brilly *et al.*, 1993).

L'utilisation de la télédétection dans le domaine de la recherche sur l'érosion hydrique a débuté par l'interprétation des photos aériennes. À partir de 1972, l'imagerie satellitaire est devenue de plus en plus à la disposition des chercheurs scientifiques. Ces trois dernières décennies de nombreux travaux ont été publiés en utilisant principalement l'imagerie satellitaire à des fins scientifiques et économiques. Les SIG et la télédétection sont à présent considérés comme les principaux outils pour la détermination des différents facteurs de l'érosion hydrique (Vrieling, 2006). Les exemples d'application dans la littérature sont très nombreux.

La cartographie de l'érosion hydrique repose actuellement sur l'utilisation des SIG et la télédétection, à cet effet plusieurs chercheurs ont travaillé sur cet axe, à savoir : Graciela et al. (1996); Van Der Knijff et al. (2000); Fernandez et al. (2003); Diodato, (2005); Koirala et al. (2007); Bayramin et al. (2008); Terranova et al. (2009); Fagnano et al. (2012); Toumi et al. (2013); Pan et Wen (2014); Lamba et al. (2015); (2015); Panagos et al. (2015a); Chadli (2016); Benchettouh et al. (2017); Benselama et al. (2018); Djoukbala et al. (2018).



Dans le présent cas d'étude, l'apport des SIG et de la télédétection permet l'évaluation des différents paramètres du modèle RUSLE tels que le facteur topographique (LS) et le facteur des pratiques de conservation des sols (P) à l'aide du Modèle Numérique de Terrain (MNT), téléchargé du site internet : <https://www.usgs.gov/>. L'exploitation des images satellitaires a permis l'évaluation du facteur de couverture végétale (C). Toutes ces opérations sont regroupées dans un SIG (Arcgis 10.2.2) qui permet au final de cartographier la distribution spatiale des pertes en sol de la zone étudiée.

### I.7. Courbe de transport sédimentaire, modèle Sediment Rating Curve (SRC)

A cause de leurs rôles propagateur dans la pollution diffuse, les solides en suspension font généralement partie des substances pour lesquelles un suivi est assuré quotidiennement. Les observations effectuées à l'exutoire des bassins versants agricoles offrent la possibilité d'utiliser les données sur le transport des solides en suspension pour évaluer indirectement l'importance de l'érosion hydrique sur un bassin versant (Fournier, 1960; Diaconu, 1974; Walling, 1994). Faute de données détaillées sur les concentrations de sédiments en suspension (Brown et al., 1970; Barnes et Frevert, 1954), plusieurs méthodes d'estimation fondées sur des techniques d'interpolation et d'extrapolation ont été proposées pour évaluer les charges sédimentaires d'un bassin versant (Walling et Webb, 1981; Ferguson, 1987). Les modèles les plus simples font intervenir un nombre limité de mesures de concentrations de sédiments en suspension et de débits pendant une certaine période de temps (Campbell et Bauder, 1940; Glymph, 1954). Une relation de régression est établie entre le logarithme des débits et des concentrations afin d'obtenir une courbe d'apport sédimentaire (Sediment Rating Curve). De nombreux chercheurs ont recours à la courbe de transport sédimentaire (Sediment Rating Curve, SRC) pour suivre l'évolution du débit solide en fonction du débit liquide (Demirci et Baltaci, 2013). Ce modèle, très important dans le domaine de l'hydrologie (Rajae et al., 2010), estime les concentrations ( $C$ ) et les flux des matières en suspension, à partir des seuls débits liquides mesurés ( $Q$ ) (El Mahi et al., 2010). La loi la plus adaptée aux séries de mesures ( $C, Q$ ) est généralement une loi en puissance de type  $C = a Q^b$  (Walling, 1977a), les deux coefficients ( $a$ ) et ( $b$ ) étant déterminés à partir de la régression linéaire des deux paramètres sus cités (Mc Bean et Al-Nassri, 1988; Demirci et Baltaci, 2013). Le paramètre «  $a$  » est un coefficient dimensionnel et «  $b$  » est un exposant adimensionnel (Gao et Josefson, 2012). Selon Peters-Kaummerly (1973), Morgan (1995)

et Achite et Ouillon (2016), le coefficient «  $a$  » est très corrélé au débit solide spécifique du bassin au droit de la station. L'exposant «  $b$  » est fonction des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques du bassin versant (Vivian, 1980; Probst et Bazerbachi, 1986), des conditions hydrauliques de l'écoulement dans le cours d'eau (Kattan et Probst, 1987) ou du régime hydrologique de ce cours d'eau (Achite et Ouillon, 2016). Le modèle est donné par la formule I suivante :

$$C_{sj} = a Q_{ij}^b$$

$C_{sj}$ : Concentration moyenne journalière des solides en suspension (g/l) ;

$Q_{ij}$ : Débit moyen journalier ( $m^3/s$ ) ;

$a, b$ : Coefficients de régression.

### 1.7.1. Limites d'application du modèle SRC

Les limites d'application du modèle SRC sont résumées comme suit :

- La plus grande attention doit être accordée à la fiabilité et à la précision des valeurs résultantes lors de l'échantillonnage et les mesures au laboratoire (Walling, 1977b),
- Le modèle SRC est dégradé par les phénomènes d'hystérésis, qui se traduisent par des pics de concentration et de débit liquide décalés, ce qui est fréquemment le cas dans les milieux semi-arides,
- Le modèle SRC ne peut être appliqué sur un site que sur une période pour laquelle on a vérifié qu'il est effectivement représentatif, ce qui exclut les changements de régime hydrologique très marqués.
- La loi établie sur une période ne peut pas être appliquée pour une autre plus longue sans précaution, car le modèle peut varier d'une manière significative d'une période à une autre (Achite et Ouillon, 2016).

## I.8. Utilisation du modèle SRC

### I.8.1. Dans le monde

Les utilisations de ce modèle dans le monde sont extrêmement nombreuses. Nous n'en citerons que deux à titre d'illustration :

- Yang et al. (2007) ont examiné les paramètres du modèle SRC  $C = a Q^b$  à savoir : «  $a$  et  $b$  » à diverses stations de jaugeage dans le bassin du Yangtze en Chine. Les résultats indiquent que les paramètres sont associés à la morphologie du chenal fluvial des tronçons sélectionnés. L'analyse des données sur la charge sédimentaire révèle également une forte corrélation entre les modifications des paramètres du modèle et la réduction de la valeur annuelle ( $4,70 \times 10^8$  t/an à  $3,50 \times 10^8$  t / an, des années 1950 aux années 1990), principalement en raison de l'implantation du barrage des Trois Gorges. Les valeurs de «  $b$  » extrêmement basses et les valeurs log ( $a$ ) élevées indiquent des années d'inondation majeures, alors que l'inverse indique les années de sécheresse.
- Estrany et al. (2008) ont surveillé le transport solide en suspension pendant une période de deux ans dans le Na Borges, un bassin versant agricole de basse altitude ( $319 \text{ km}^2$ ) situé sur l'île de Majorque (îles Baléares, Espagne). Les valeurs trouvées sont la conséquence de la minorité de sédiments dû aux pratiques de conservation des eaux et des sols, aux faibles coefficients de ruissellement de surface et aux caractéristiques géomorphologiques des rivières dominées par les eaux souterraines, telles que la faible densité de drainage.

## I.9. Synthèse récapitulative des travaux réalisés en Algérie

Au nord de l'Algérie, et plus particulièrement l'ouest, plusieurs travaux ont été réalisés pour l'estimation de la dégradation spécifique des zones susceptibles à l'érosion hydrique (Tableau I.3).

**Tableau I.3** : Quelques chiffres de dégradation spécifique en Algérie du nord.

Bassin versant/Sous-bassin	Superficie (km <sup>2</sup> )	Période d'étude	Nbre d'années	Ds (t/km <sup>2</sup> /an)	Auteur
Oued Abd	4126	(1973/74 – 1994/95)	22	65	Achite et Meddi (2005)
				117	
Oued Taht	680			191	
Oued Haddad	470			212	
				287	Achite et Meddi (2004)
Oued Sebdou	256	(1985/86 – 1997/98)	13	1330	Ghenim et al. (2007a)
		(1988/89 – 1992/93)	5	1120	Megnounif et al. (2003)
Oued Saida	543	(1980/81 - 2009/10)	30	55	Yles et Bouanani (2012)
Oued EL Hammam	8348	(1993/94 – 2004/05)	12	256	El mahi et al. (2012)
Oued Mouilah	2650	(1977/78 – 1992/93)	16	126	Terfous et al. (2001)
		(1977/78 – 1994/95)	18	165	Ghenim et al. (2008)
Oued Mellah	550	(1975/76 – 1996/97)	22	375	Khanchoul et al. (2007)
Oued Mekerra	1890	(1988/89 – 2000/01)	13	111	Cherif et al. (2009)
Oued Boumessaoud	118	(1988/89 – 2003/04)	16	518	Bouguerra et al. (2016)

### I.10. Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous pouvons conclure que les conséquences de l'érosion hydrique et le transport solide sont dévastatrices, qu'il faudrait surveiller de près, malgré la complexité de la situation.

Le modèle RUSLE combiné au SIG devrait nous aider à estimer le taux d'érosion hydrique dans un bassin versant et à prendre les décisions appropriées pour l'aménagement de la zone touchée par la plus grande proportion de pertes en sols.

Le modèle SRC permet l'évaluation du transport solide en suspension seulement à partir du débit liquide, le suivi de l'échantillonnage instantané durant une crue donne l'avantage d'avoir un bon enregistrement de l'historique du transport solide en suspension au niveau de la station hydrométrique.

Le développement des outils informatiques et des SIG ont permis de faciliter la distribution spatiale de l'érosion hydrique de plus en plus à grande échelle.

***Chapitre II :***  
***Présentation de la zone***  
***d'étude***



## Chapitre II :

### Présentation de la zone d'étude

#### II.1. Introduction

Les phénomènes hydrologiques sont contraints par le climat et fortement dépendant du milieu physique, parfois impactés par les activités socio-économiques.

Dans ce chapitre nous présentons les limites géographiques de la zone d'étude, la litho-stratigraphie, la topographie, l'occupation des sols, ainsi que le réseau hydrométrique qui contrôle les eaux de surfaces qui transitent par les stations hydrométriques et s'accumulent dans le barrage de Ouizert. Les différentes caractéristiques climatiques de la zone d'étude ainsi qu'une présentation du barrage de Ouizert seront détaillées.

#### II.2. Bassin versant de l'oued Sahouat

##### II.2.1. Caractéristiques géographiques

Le bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert est situé au Sud-Est du grand bassin versant de la Macta, dans l'Ouest algérien (Figure II.1). D'un périmètre de 231,4 km, il couvre une superficie de 2140 km<sup>2</sup>. Il est situé entre -0° 07' de longitude Ouest et 0° 56' de longitude Est et entre 34° 67' et 35° 20' de latitude Nord. Il est limité :

- au Nord par les monts de Bani Chougrane;
- au Sud par le Chott Chergui;
- à l'Est par les monts de Saida;
- à l'Ouest par les monts de Daia (Figure II.2).

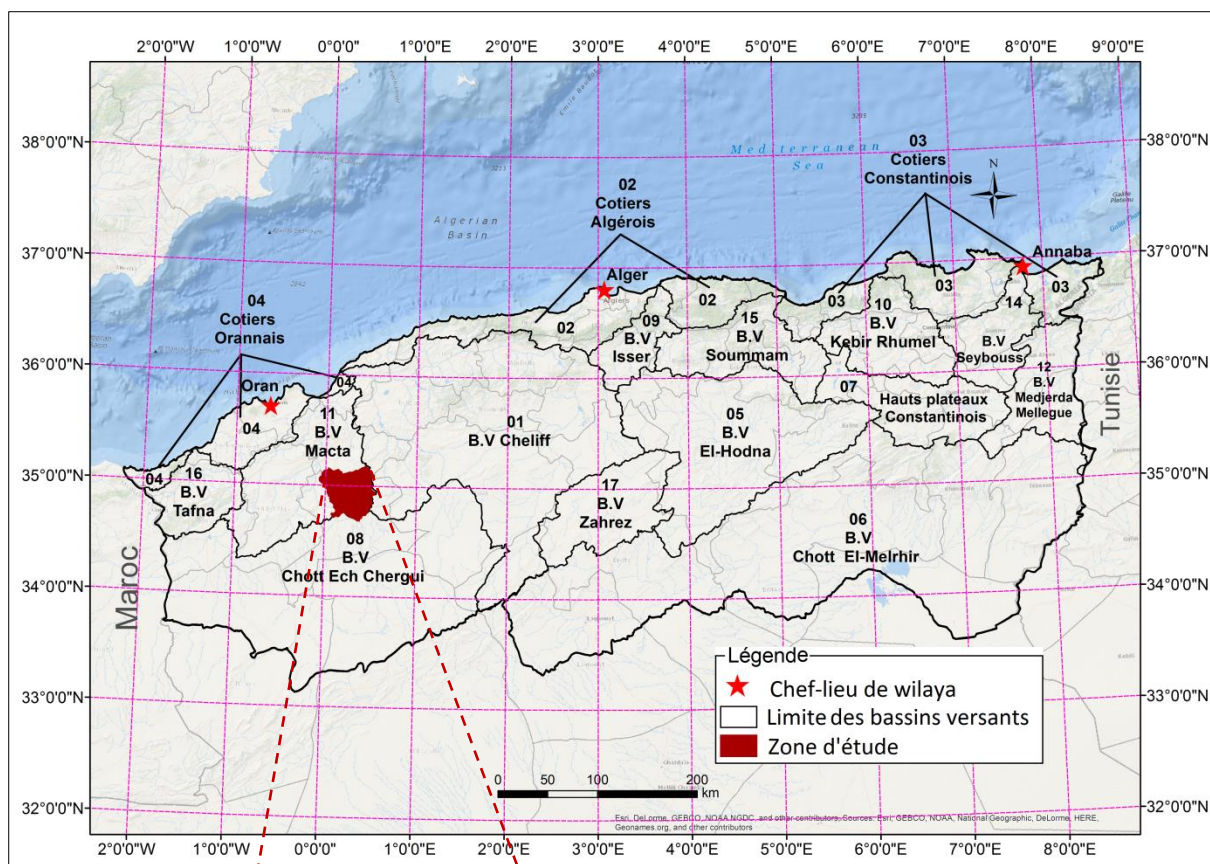


Figure II.1 : Carte de situation du bassin versant de l'oued Sahouat.

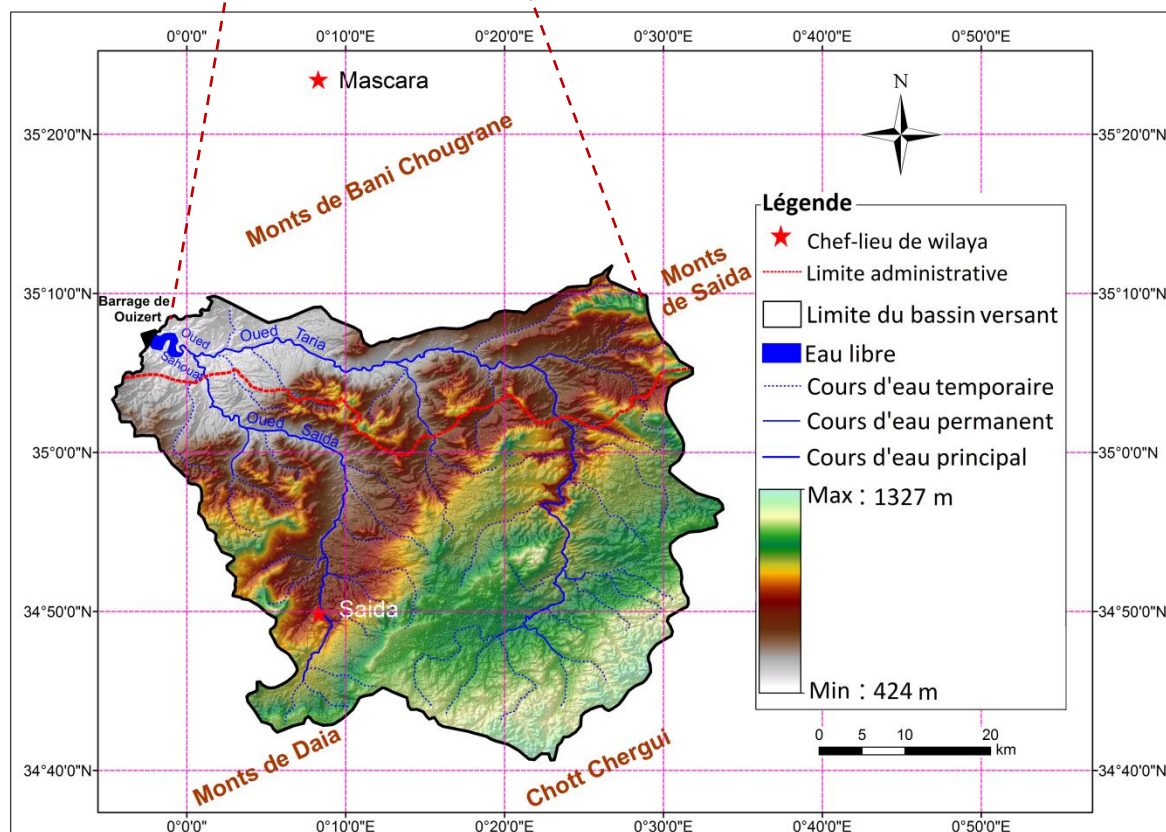


Figure II.2 : Modèle numérique de terrain et limites administratives.

## II.2.2. Caractéristiques sociodémographiques

La zone d'étude recouvre deux wilayas : Mascara et Saida. Le bassin versant englobe 14 communes importantes de plus de 100 habitants (Tableau II.1), ainsi que 8 communes de moins de 100 habitants chacune (Tecsult International Limitée, 2004).

**Tableau II.1** : Superficie totale dans le bassin versant des communes visées  
(Tecsult International Limitée, 2004).

Wilaya	Communes principales	A (Km <sup>2</sup> )
Mascara	Gharrous, Benian, Aouf, Oued Taria	467,9
Saida	Tircine, Ouled Brahim, Doui Thabet, Ain Soltane, Sidi Amar, El Hassasna, Ain El Hadjar, Sidi Boubeker, Ouled Khaled, Saida.	1672,1
<b>Total</b>	14 communes	<b>2140,0</b>

A : Superficie de la zone considérée.

## II.2.3. Caractéristiques physiques

### II.2.3.1. Lithostratigraphie

Le bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert est occupé par une série géologique allant du Primaire au Quaternaire (Figure II.3, Tableau II.2) à savoir : les terrains quaternaires occupent les dépressions et les creux des vallées avec 9,33% de la superficie totale ; les terrains du Pliocène affleurent en grande quantité au nord et à l'ouest du bassin versant avec 7,33% de la superficie; les formations du Jurassique (marnes gris-vert) dominant presque toute la surface de la zone étudiée (63%) ; les formations géologiques de l'âge primaire, dans la région du Sud-Est, constituées essentiellement de schistes et de quartzites avec la présence d'intrusion granitique et de coulées de laves basaltiques (Pitaud, 1973).



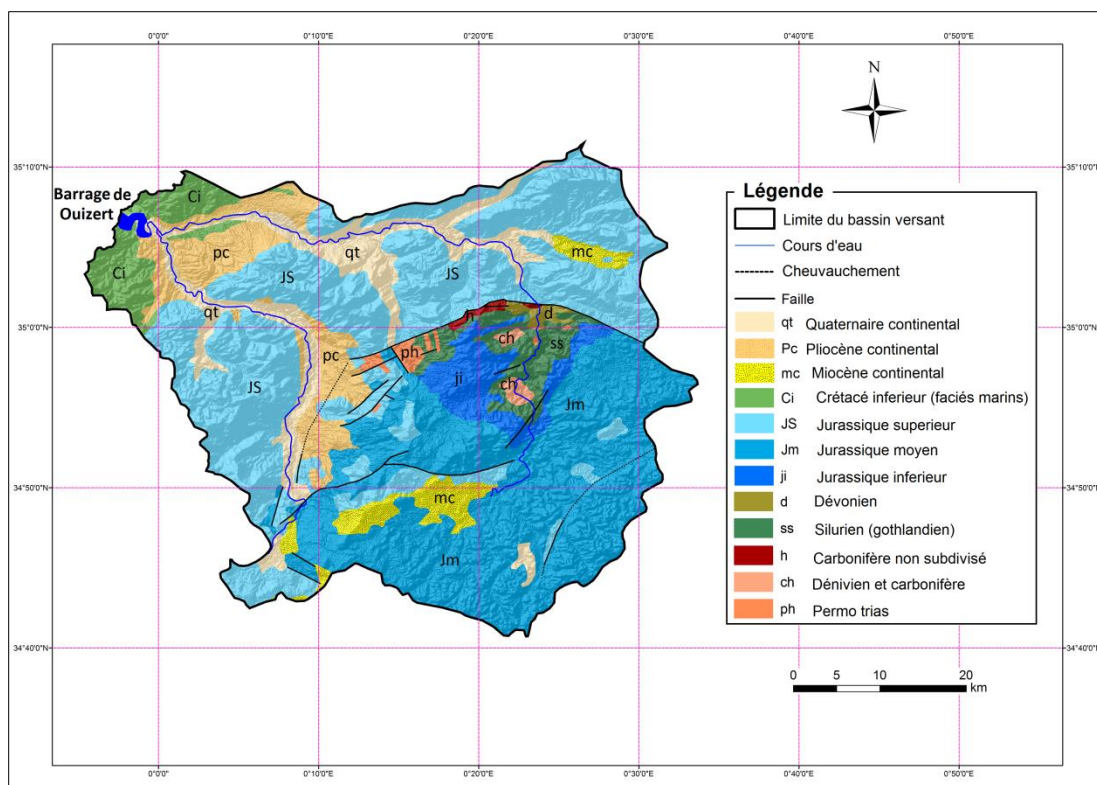


Figure II.3 : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sahouat.

Tableau II.2 : Superficie des classes lithologiques du bassin versant de l'oued Sahouat.

Ere	Système	Abréviation	Epoque	A (km <sup>2</sup> )	A (%)
Quaternaire	Holocène	qt	Alluvions actuels	199,67	9,33
Tertiaire	Pliocène	Pc	Pliocène continental	157,86	7,38
	Miocène	mc	Miocène continental	68,94	3,22
	Crétacé	ci	Crétacé inférieur (faciès marins)	94,58	4,42
	Jurassique	JS	Jurassique supérieur	700,00	32,71
		Jm	Jurassique moyen	720,69	33,68
		Ji	Jurassique inférieur	85,82	4,01
Permien	ph	Permo trias	14,30	0,67	
Primaire	Carbonifère	h	Carbonifère non subdivisé	6,00	0,28
	Dévonien	Ch	Dévonien et carbonifère	9,89	0,46
		d	Dévonien	9,88	0,46
	Silurien	ss	Silurien	72,36	3,38
<b>Total</b>				<b>2140,00</b>	<b>100,00</b>

### II.2.3.2. Occupation du sol

Deux méthodes sont employées pour réaliser une carte d'occupation des sols : une classification supervisée ou une classification non supervisée. Le mode supervisé est beaucoup plus exigeant que le mode non-supervisé (Toumi, 2013), car la connaissance préalable de l'occupation du sol doit être inspectée par un GPS (Global Positioning System). Compte-tenu de la grande superficie du bassin versant qui s'élève à 2140 km<sup>2</sup>, et à défaut de

GPS, la présente méthode ne peut être actuellement engagée sur ce bassin. En revanche, le mode non supervisé est adapté à notre situation. La classification peut être validée en utilisant une mosaïque d'images satellites de Très Haute Résolution Spatiale (THRS) disponible sur Google Earth.

La carte d'occupation des sols a ainsi été établie en « **mode non supervisé** » par télédétection à l'aide du logiciel « **Arcgis 10.2.2** », en appliquant les étapes successives suivantes :

- Acquisition d'une image satellite LANDSAT (ETM+, Enhanced Thematic Mapper Plus) de résolution 30 m sur toute la zone d'étude, prise en octobre 2015;
- Réalisation d'une classification non supervisée;
- Assignment des classes à différentes occupations des sols.

Les résultats obtenus nous ont permis de délimiter 5 zones (Figure II.4; Tableau II.3) de caractéristiques différentes, à savoir : végétation dense (forêts, arboriculture...); végétation claire (agriculture, ...); sols labourés; sol nu ; eau libre (barrage de Ouizert).

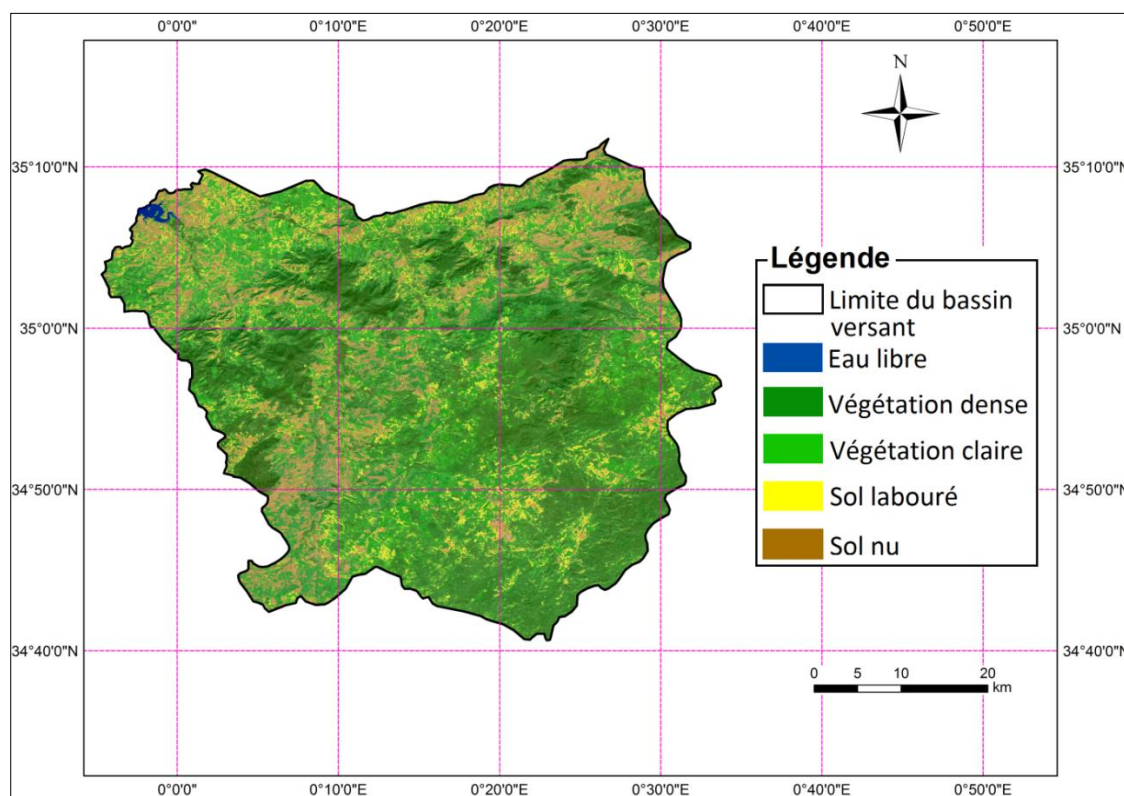


Tableau II.3 : Superficie et pourcentage des classes d'occupation du sol.

N° de classe	Occupation du sol	Degré de protection à l'érosion	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pourcentage (%)
1	Végétation dense	Fortement protecteur	948.02	44.30
2	Végétation claire	Moyennement protecteur	711.65	33.25
3	Sol labouré	Moyennement protecteur	316.05	14.77
4	Sol nu	Non protecteur	157.01	7.34
5	Eau libre	/	7.25	0.34
<b>Total</b>			<b>2140.00</b>	<b>100.00</b>

Le couvert végétal joue un rôle de contrôle des phénomènes érosifs (Ouechtati & Baldassarre, 2011). D'après la carte d'occupation des sols établie en mode non supervisé, la couverture végétale permanente (végétation dense) dans la zone d'étude s'élève à 44,30 % de la superficie totale du bassin, alors que le couvert végétal temporaire (végétation claire) n'en représente que 33,25 %. Les sols labourés, qui constituent une protection très moyenne des sols, surtout lorsque le labourage a lieu suivant les lignes de plus grande pente, recouvrent 14,77 % du bassin. Les sols nus (7,34 %) représentent l'occupation la plus vulnérable à l'érosion hydrique car, le ruissellement est toujours le plus dévastateur sur un sol non travaillé, et par conséquent le phénomène est encore plus accentué (Roose, 1994).

### II.2.3.3. Relief

#### a/ Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain est une surface continue qui, en plus des valeurs des hauteurs (connu sous le nom Modèle Numérique de Terrain, MNT), comporte aussi d'autres éléments qui décrivent une surface topographique (Podobnikar, 2016).

#### b/ Altitudes

La carte des altitudes dérive directement du modèle numérique de terrain. Elle présente la répartition des classes d'altitudes en fonction des superficies élémentaires. L'étude hypsométrique du bassin montre que les zones d'altitude comprise entre 1000 et 1200m dominant avec 35,22% de la superficie totale, et que la classe la plus haute (1200 à 1327m) est minoritaire (Figure II.5, Tableau II.4). Le point culminant est observé dans la partie sud du bassin, et l'altitude moyenne est évaluée à 902,25m.

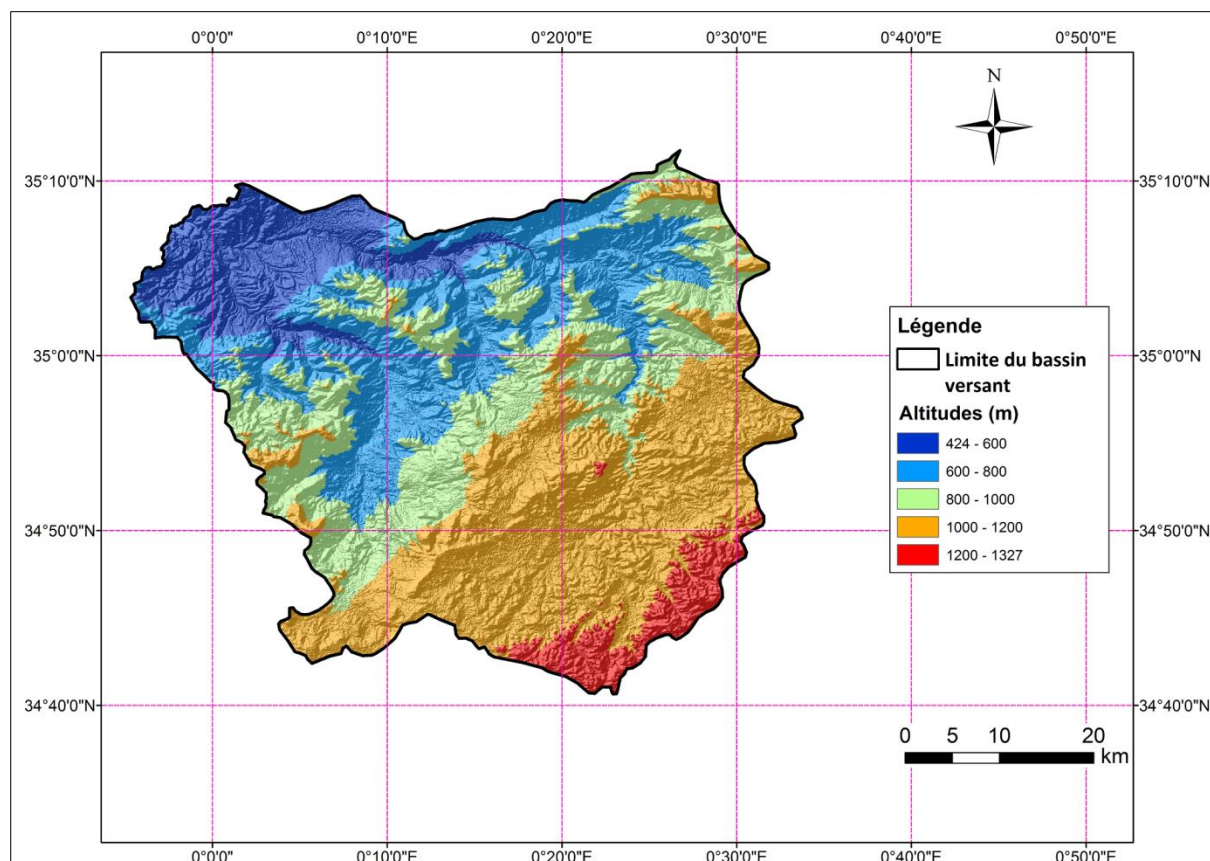


Figure II.5 : Carte des altitudes du bassin versant de l'oued Sahouat.

Tableau II.4 : Classes des altitudes du bassin versant de l'oued Sahouat.

Classes d'altitudes (m)	A (Km <sup>2</sup> )	A (%)
424 – 600	257.75	12.04
600 – 800	507.35	23.71
800 – 1000	513.24	23.98
1000 – 1200	754.08	35.24
1200 – 1327	107.57	5.03
<b>Total</b>	<b>2140.00</b>	<b>100.00</b>

### c/ Classes des pentes

La carte des pentes (Figure II.6), exprimées en pourcentage, dérive directement du Modèle Numérique de Terrain. Elle révèle la domination des pentes très faibles (0 - 3%) qui concernent 43,46% de la superficie totale. Les terrains à pentes modérées (3 - 12,5%) recouvrent 42,65% du bassin. Les fortes pentes comprises entre 12,5 et 25% se situent d'Est en Ouest dans la partie centrale ; elles occupent 13,04% du bassin et présentent un risque d'érosion très élevé. Les terrains à pentes supérieures à 25% couvrent 0,85% de l'aire totale et se situent principalement dans le centre et le nord-Est.

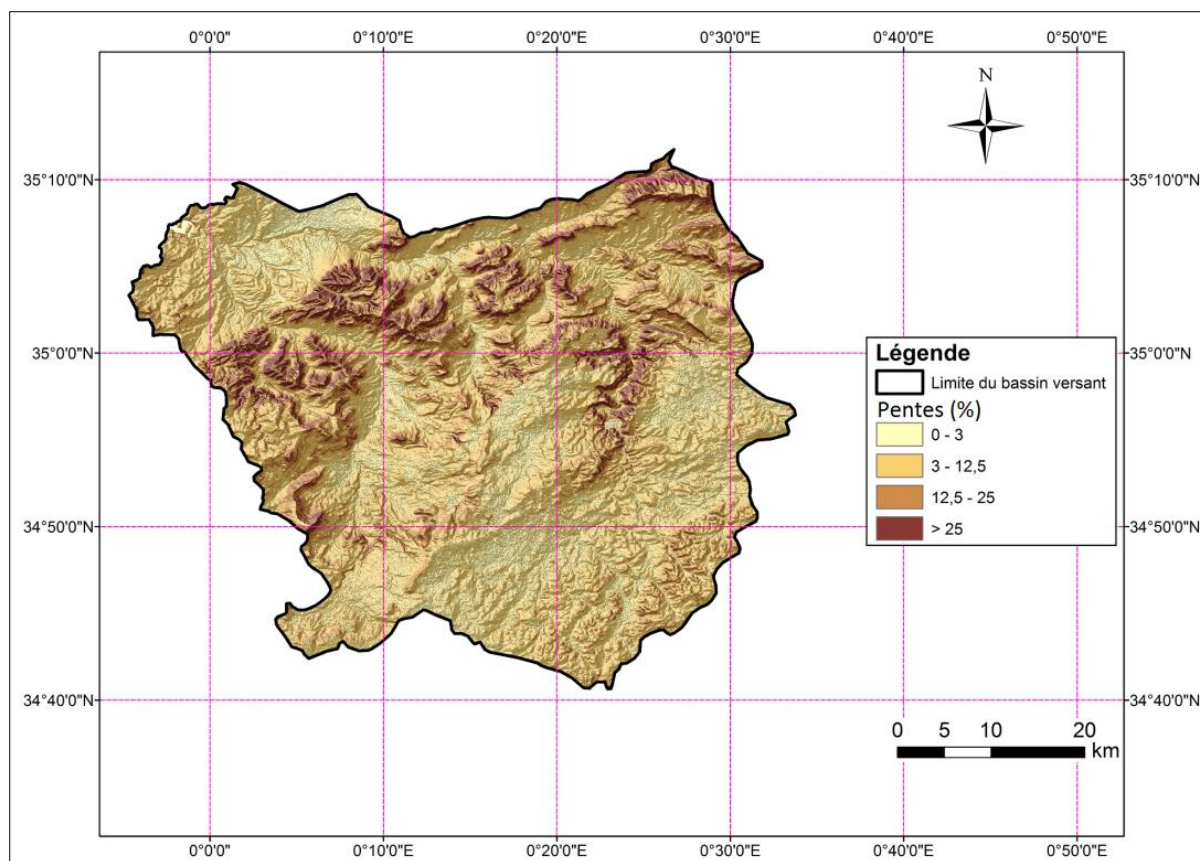


Figure II.6 : Carte des pentes du bassin versant de l'oued Sahouat.

Tableau II.5 : Classes des pentes dans le bassin versant de l'oued Sahouat.

Classes (%)	A (Km <sup>2</sup> )	A (%)
0 - 3	930,00	43,46
3 - 12,5	912,80	42,65
12,5 - 25	279,00	13,04
> 25	18,20	0,85
<b>Total</b>	<b>2140,00</b>	<b>100,00</b>

#### II.2.4 Réseau hydrométrique

Les mesures hydrométriques proviennent de 5 stations de jaugeage (Figure II.7) :

- La station de l'oued Taria (H1, Photos II.1) implantée sur l'oued Taria, ainsi que la station H3 implantée au niveau d'un de ses affluents.
- Trois stations hydrométriques implantées en série sur l'oued Saida respectivement selon le sens de l'écoulement à savoir (H5), (H4) et sidi Boubeker (H2) (Photos II.2).
- La confluence entre l'oued Taria qui s'étend sur une longueur curviligne de 82 km et l'oued Saida d'une longueur de 52 km donne naissance au cours d'eau principal

appelé l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert d'une longueur de 3 km (Photo II.3).

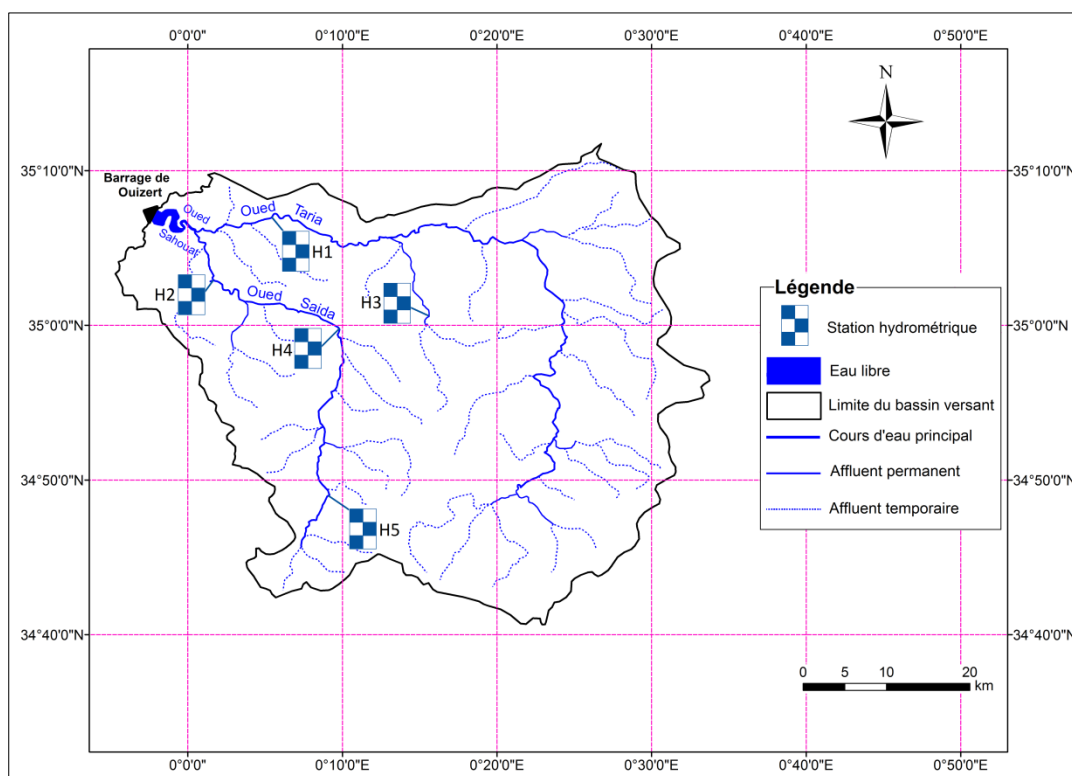


Figure II.7 : Carte du réseau hydrométrique du bassin versant de l'oued Sahouat.

Tableau II.6 : Stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Sahouat.

N°	Nom de la station	Code de la station	Oued	Wilaya	Coordonnées	
					Long. (°) (') (")	Lat. (°) (') (")
H1	Oued Taria	11 12 01	Taria	Mascara	0°4'51,847"E	35°6'44,434"N
H2	Sidi Boubekeur	11 11 29	Saïda	Saïda	0°1'33,136"E	35°2'51,977"N
H3	Khrous	11 12 20	Taria	Mascara	0°15'18,69"E	35°0'26,211"N
H4	Sidi Amar	11 11 06	Saïda	Saïda	0°9'41,446"E	34°59'41,83"N
H5	Saïda	11 11 01	Saïda	Saïda	0°9'0,6560"E	34°49'4,980"N

avec :

Long. (°) (') (") : longitude en degrés-minutes-secondes;

Long. (°) (') (") : latitude en degrés-minutes-secondes.



Photos II.1 : Station hydrométrique de l'oued Taria.

Photos, TOUBAL A. K. (25/07/2018)



Photos II.2 : Station hydrométrique de Sidi Boubeker

Photos, TOUBAL A. K. (25/07/2018)

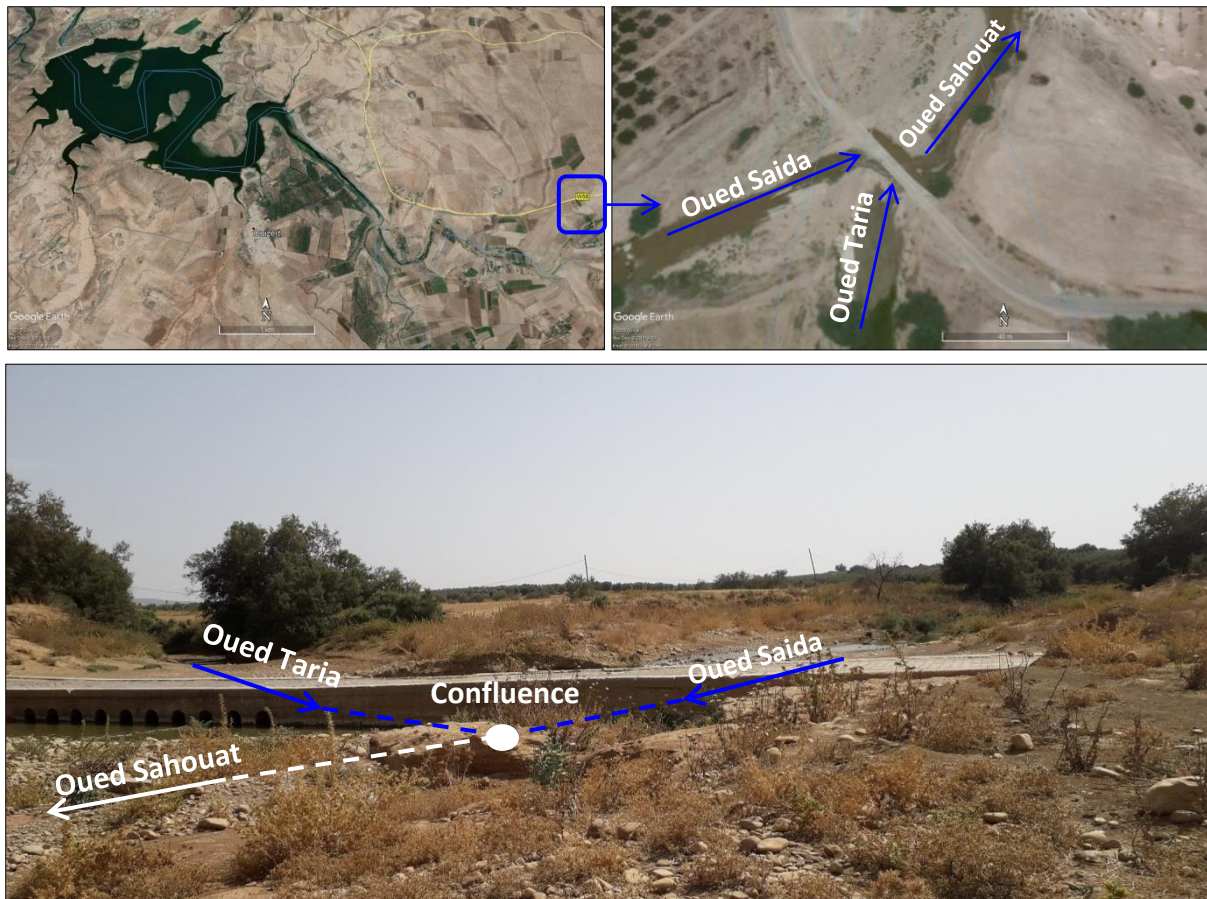


Photo II.3 : Confluence entre l'oued Taria et l'oued Saïda.

Photo, TOUBAL A. K. (25/07/2018)

## II.2.5. Etude des paramètres du relief

### II.2.5.1. Indice de compacité $K_c$

La forme d'un bassin versant joue un rôle très important dans la nature de l'écoulement, car un bassin versant ramassé ne réagit pas de la même manière qu'un bassin versant allongé (Roche, 1963). L'indice de compacité de Gravelius, introduit par Gravelius en 1914, est un indicateur de forme très utilisé en hydrologie. Il est exprimé par la formule (II.1) : c'est le rapport entre le rapport entre le périmètre du bassin  $P$  et la circonférence  $P'$  du cercle de rayon  $R'$  ayant la même superficie  $A$ .

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{II.1})$$

avec :

$K_c$ : Coefficient de Gravelius;

$A$  : Superficie du bassin versant ( $\text{Km}^2$ );

$P$  : Périmètre du bassin versant (Km).



Selon la valeur de  $K_c$ , on peut caractériser la forme du bassin versant comme suit :

- $K_c < 1 \Rightarrow$  bassin de forme ramassée;
- $K_c = 1 \Rightarrow$  bassin de forme circulaire;
- $K_c > 1 \Rightarrow$  bassin versant de forme allongée.

Le bassin de l'oued Sahouat avec une valeur de  $K_c = 1,40$  présente donc une forme allongée.

### II.2.5.2. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent s'identifie par une simple transformation géométrique du contour du bassin en un rectangle de même surface  $A$ , de périmètre  $P$ , de longueur  $L$ , de largeur  $l$ , d'indice de compacité  $K_c$ , et avec la même courbe hypsométrique que le bassin versant étudié, les courbes de niveaux devenant des droites parallèles aux petites côtes et les exutoires du bassin versant étant assimilées à l'un de ces petits côtés du rectangle (Formules (II.2) et (II.3)).

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,128} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (\text{II.2})$$

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,128} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad (\text{II.3})$$

avec :

$L$  : Longueur du rectangle équivalent (Km);

$l$  : Largeur du rectangle équivalent (Km);

$K_c$  : Indice de compacité de Gravelius;

$A$  : Superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

Après application numérique, les valeurs du rectangle équivalent sont les suivantes :

$L = 92,59 \text{ Km}$  et  $l = 23,11 \text{ Km}$ .

### II.2.5.3. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique est une caractéristique importante de la topographie d'un bassin versant. En abscisse, elle présente les superficies cumulées et en ordonnées, les altitudes correspondant en pourcentage (Tableau II.7; Figure II.8).

Tableau II.7 : Répartition des superficies cumulées en fonction des classes d'altitudes.

Classe	Superficie partielle		Superficie cumulée		Altitude moyenne (m)
	A (km <sup>2</sup> )	A (%)	A (km <sup>2</sup> )	A (%)	
1327-1200	107,57	5,03	107,57	5,03	1263,5
1200-1000	754,08	35,24	861,65	40,27	1100
1000-800	513,24	23,98	1374,89	64,25	900
800-600	507,35	23,71	1882,24	87,96	700
600-424	257,75	12,04	2140	100	512
<b>Total</b>	<b>2140,00</b>	<b>100,00</b>			

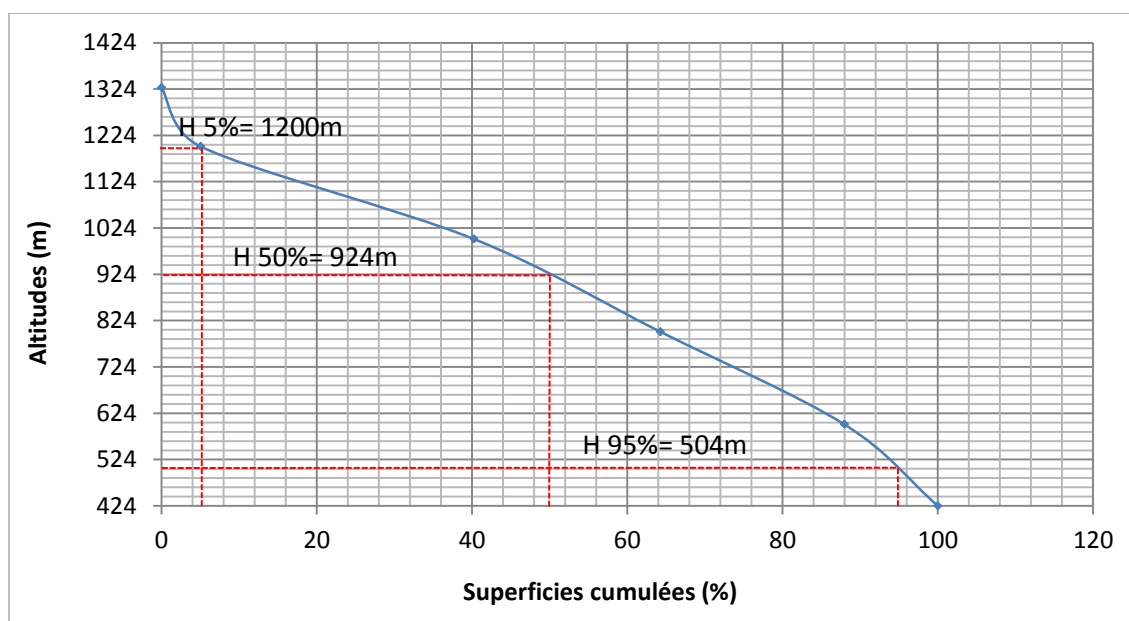


Figure II.8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Sahouat.

- **Altitude médiane** : Elle correspond à l'altitude liée au point d'abscisse 50 % de la superficie totale du bassin. Sur la courbe hypsométrique,  $H_{50\%} = 924$  m;
- **Altitude à 5% de la superficie**  $H_{5\%} = 1200$  m;
- **Altitude à 95% de la superficie**  $H_{95\%} = 504$  m;
- **Altitude maximale** :  $H_{(max)} = 1327$  m;
- **Altitude minimale** :  $H_{(min)} = 424$  m;
- **Altitude moyenne** :

L'altitude moyenne d'un bassin versant exprime le rapport entre les superficies élémentaires et leurs altitudes moyennes comprises entre deux courbes de niveaux à la superficie totale du même bassin versant (Formule II.4), suivant :

$$H_{moy} = \frac{\sum Ai.Di}{A} \quad (II.4)$$

avec :

$H_{moy}$  : Altitude moyenne du bassin versant (m);

$A$  : Superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>);

$Ai$  : Aire comprise entre deux courbes de niveau (Km<sup>2</sup>);

$Di$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m).

En appliquant la formule (II.4) on obtient une altitude moyenne  $H_{moy} = 894.6 \text{ m}$ .

#### II.2.5.4. Indice de pente globale $I_g$

L'indice de pente global  $I_g$  est exprimé par le rapport entre la dénivelée utile et la longueur du rectangle équivalent (Formule II.5), suivant :

$$I_g = \frac{(H_{5\%} - H_{95\%})}{L} \quad (II.5)$$

avec :

$I_g$  : Indice de pente globale;

$L$  : Longueur du rectangle équivalent (Km);

$H_{5\%}$  : Altitude correspondant à 5 % de la surface totale du bassin étudié sur la courbe hypsométrique (m);

$H_{95\%}$  : Altitude correspondant au point d'abscisse 95 % de la surface totale du bassin étudié sur la courbe hypsométrique (m).

En appliquant la formule (II.5) on obtient une dénivelée spécifique  $I_g = 7,51 \text{ m/km}$ .

#### II.2.5.5. Dénivelée spécifique $D_s$

La dénivelée spécifique caractérise le type de relief d'un bassin versant selon des classes bien déterminées. Le tableau (II.8) présente la classification de l'O.R.S.T.O.M (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) (Laborde, 2000) du relief en fonction de la dénivelée spécifique calculée par la formule II.6 suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{A} \quad (II.6)$$

avec :

$D_s$  : Dénivelée spécifique (m);

$I_g$  : Indice de pente globale (%);

$A$  : Superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>).

Tableau II.8 : Classification du relief (Laborde, 2000).

R1	Relief très faible	$D_s < 10 \text{ m}$
R2	Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$
R3	Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$
R4	Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$
R5	Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$
R6	Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$
R7	Relief très fort	$500 \text{ m} < D_s$

Sur le bassin de l'oued Sahouat, on obtient une dénivelée spécifique  $D_s = 347,41 \text{ m}$  (relief fort).

#### II.2.5.6. Pente moyenne $I_m$

La pente moyenne du bassin est donnée par la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires pour lesquelles on peut considérer que la ligne de plus grande pente est constante (Roche, 1963). Elle est donnée par la formule (II.7) :

$$I_m = \frac{D.L}{A} \quad (\text{II.7})$$

avec :

$I_m$ : Pente moyenne du bassin considéré (m/Km ou ‰);

$D$ : Equidistance entre deux courbes de niveau (m);

$L$ : Longueur du rectangle équivalent (Km);

$A$ : Surface du bassin versant ( $\text{Km}^2$ ).

En appliquant la formule (II.7) on obtient une pente moyenne  $I_m = 3,9\%$ .

#### II.2.5.7. Densité de drainage $D_d$

La densité de drainage exprime le rapport entre la longueur totale de tous les cours d'eaux et la superficie du bassin versant en question (formule II.8).

$$D_d = \frac{(\sum_1^n L_i)}{A} \quad (\text{II.8})$$

avec :

$D_d$ : Densité de drainage ( $\text{Km}/\text{Km}^2$ );

$L_i$  : Longueur des cours d'eau (Km);

$A$  : Superficie du bassin versant ( $\text{Km}^2$ ).

En appliquant la formule (II.8) on obtient une densité de drainage  $D_d = 1,32 \text{ km}/\text{km}^2$ .

### II.2.5.8. Temps de concentration $T_c$

Le temps de concentration est défini comme le temps nécessaire à une particule d'eau pour parcourir le plus long chemin hydraulique depuis la limite du bassin jusqu'à l'exutoire (Hydratec, 2007).

Dans le contexte algérien et pour les grands bassins versants, il peut être notamment calculé par l'ancienne formule de Giandotti (1937) (formule II.9) (Touaibia, 2004).

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + (1,5L_{cp})}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (II.9)$$

avec :

$T_c$ : Temps de concentration du bassin versant (heures);

$A$  : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>);

$L_{cp}$ : Longueur du cours d'eau principal (Km);

$H_{moy}$  : Altitude moyenne du bassin versant (m);

$H_{min}$  : Altitude minimale du bassin versant (m).

En appliquant la formule (II.9) on obtient un temps de concentration  $T_c = 18,48$  heures.

### II.2.6. Synthèse récapitulative du bassin versant de l'oued Sahouat

Le tableau (II.9) synthétise les différentes caractéristiques morphométriques, topographiques et hydrologiques du bassin versant de l'oued Sahouat.

Tableau II.9 : Synthèse des caractéristiques générales du bassin versant de l'oued Sahouat.

Type	Type de paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Caractéristiques Morphométriques	Superficie	<b>A</b>	Km <sup>2</sup>	2140,00
	Périmètre	<b>P</b>	Km	231,40
	Indice de compacité de Gravelius	<b>K<sub>c</sub></b>	/	1,40
	Longueur du rectangle équivalent	<b>L</b>	Km	92,59
	Largeur du rectangle équivalent	<b>I</b>	Km	23,11
Caractéristiques Topographiques	Altitude maximale	<b>H<sub>max</sub></b>	m	1327,00
	Altitude Minimale	<b>H<sub>min</sub></b>	m	424,00
	Altitude moyenne	<b>H<sub>moy</sub></b>	m	894,6
	Altitude Médiane	<b>H<sub>50%</sub></b>	m	924,00
	Altitude à 5 % de la surface	<b>H<sub>5%</sub></b>	m	1200,00
	Altitude à 95 % de la surface	<b>H<sub>95%</sub></b>	m	504,00
	Indice de pente globale	<b>I<sub>g</sub></b>	m/km	7,51
	Dénivelée spécifique	<b>D<sub>s</sub></b>	m	347,41
Pente moyenne	<b>I<sub>m</sub></b>	%	3,90	
Caractéristiques hydrologiques	Densité de drainage	<b>D<sub>d</sub></b>	Km/Km <sup>2</sup>	1,32
	Longueur du cours d'eau principal	<b>L<sub>cp</sub></b>	Km	98,00
	Temps de concentration	<b>T<sub>c</sub></b>	heures	18,48

### II.2.7. Hydroclimatologie

Cette partie a pour objet de présenter le bilan hydrique élaboré à partir des mesures de température et de précipitation réalisées sur site par l'O.N.M (Office National de la Météorologie), à l'aide de formules empiriques couramment employées en hydrologie.

#### II.2.7.1. Choix de la station

Le choix de la station repose sur les conditions suivantes :

- Les paramètres climatiques doivent être mesurés en un même point (station climatologique);
- Ces mesures doivent être disponibles et accessibles au niveau de l'Office National de la Météorologie (O.N.M, Alger);
- La période d'étude dépend des données que l'office national de la météorologie accepte de transmettre.

En fonction de ces critères, nous avons opté pour la station de Saida située au chef-lieu de la wilaya de Saida (Figure II.2, Tableau II.10), sur la période allant de 1977 à 2010.

**Tableau II.10 :** Caractéristiques de la station mise en étude (1977 / 2010).

Station	Wilaya	Coordonnées			Période d'étude
		Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	
Saïda	Saïda	34°52'N	00°09'E	750	1977 - 2010

Source : (O.N.M Alger, 2015)

#### II.2.7.2. Température

Le tableau (II.11) illustre les températures minimales, moyennes et maximales mensuelles enregistrées à la station de Saida sur une période de 34 ans (1977-2010).

**Tableau I.11:** Températures mensuelles minimales, moyennes et maximales enregistrées à la station de Saida en (°C) (1977 / 2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
<b>T min</b>	<b>3,1</b>	3,7	5,1	6,5	10,0	14,5	18,1	18,4	15,0	11,4	7,0	4,1	<b>9,7</b>
<b>T moy</b>	8,4	9,6	11,6	13,6	17,7	23,1	27,1	27,0	22,7	17,9	12,5	9,3	<b>16,7</b>
<b>T max</b>	13,7	15,4	18,2	20,7	25,4	31,6	<b>36,1</b>	35,6	30,3	24,4	18,1	14,5	<b>23,7</b>

Source : (O.N.M Alger, 2015)

$T_{\min}$  : Température minimale mensuelle (°C);

$T_{\text{moy}}$  : Température moyenne mensuelle (°C);

$T_{\max}$  : Température maximale mensuelle (°C).

L'analyse des températures mensuelles sur une période de 34 ans (1977/2010) montre que le mois de janvier enregistre des températures basses pouvant atteindre 3,1°C, tandis

que les maxima sont atteints aux mois de juillet et août, à 27°C. La température moyenne interannuelle est de 16,7°C (Figure II.9).

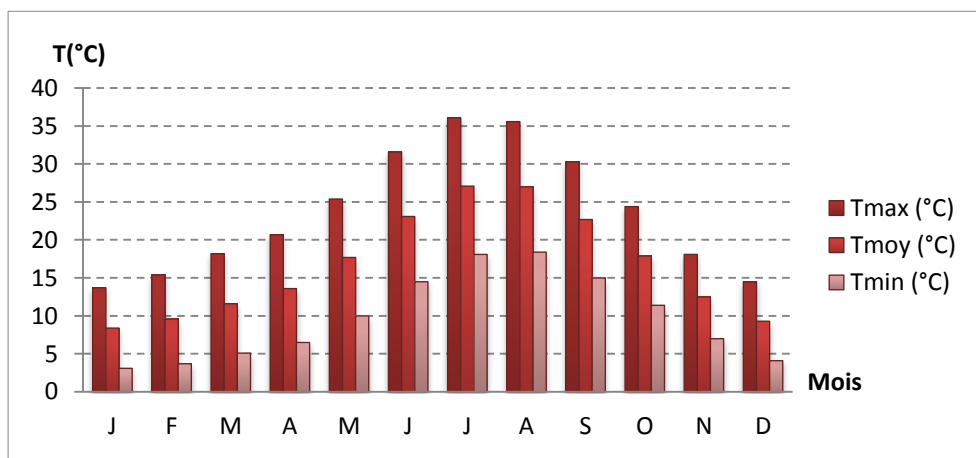


Figure II.9 : Températures mensuelles moyennes, minimales et maximales à la station de Saïda (1977-2010).

### II.2.7.3. Humidité relative

L'humidité relative désigne le rapport entre la teneur en vapeur d'eau de l'air ambiant et la teneur maximale en vapeur d'eau possible à la même température. Une valeur de 100% correspond à une teneur en vapeur d'eau maximale, l'air est dit saturé. L'humidité est mesurée par un hygromètre.

Le tableau (II.12) résume les valeurs moyennes de l'humidité relative mensuelles maximales, moyennes et minimales.

Tableau II.12 : Humidités relatives mensuelles minimales, moyennes et maximales (%) (1977 / 2010).

Humidité	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
HR <sub>min</sub>	46	43	38	35	31	23	17	18	27	35	42	48	33
HR <sub>moy</sub>	70	68	65	62	58	47	39	41	53	61	67	71	58
HR <sub>max</sub>	88	90	89	88	86	75	64	66	78	84	87	89	82

Source : (O.N.M Alger, 2015)

HR<sub>min</sub> : Humidités relatives mensuelles minimale (%);

HR<sub>max</sub> : Humidités relatives mensuelles maximale (%);

HR<sub>moy</sub> : Humidités relatives mensuelles moyenne (%).

L'humidité relative moyenne annuelle est de 58% (Figure II.10). Ses variations mensuelles montrent des valeurs évoluant entre un minimum en juillet (39% en moyenne, jusqu'à 17% en moyenne mensuelle pour une année donnée), et un maximum entre décembre et février (68 à 71% en moyenne, jusqu'à 90% en moyenne mensuelle pour une année spécifique).

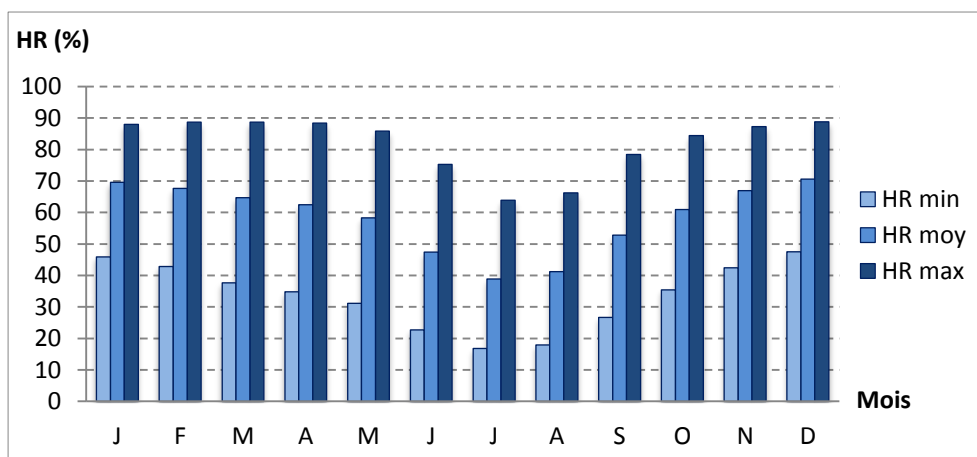


Figure II.10 : Humidités relatives mensuelles de la station de Saïda (1977-2010).

#### II.2.7.4. Vitesse du vent

Le vent est le déplacement d'air résultant des différences de pression atmosphérique. C'est un paramètre essentiel associé au mouvement des masses d'air et aux précipitations. Il est mesuré par un anémomètre.

Les vitesses moyennes du vent moyen enregistrées à la station de Saïda durant la période (1977-2010) sont reportées dans le tableau II.13.

Tableau II.13 : Moyennes mensuelles de la vitesse du vent à la station de Saïda (m/s) (1977 / 2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
V (m/s)	2,9	2,7	2,9	3,0	2,9	2,8	2,7	2,7	2,4	2,4	2,6	2,8

Source : (O.N.M Alger, 2015)

V : Vitesse moyenne du vent moyen (m/s).

Les vitesses du vent moyen mensuel fluctuent principalement entre 2,4 m/s pour les mois de septembre et octobre et 3 m/s pour le mois d'avril (Figure II.11).

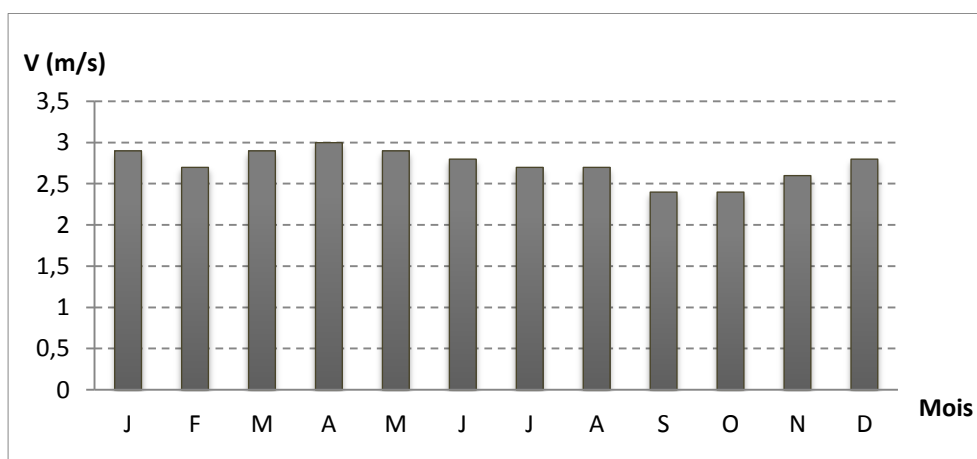


Figure II.11 : Moyennes mensuelles des vitesses du vent moyen à la station de Saïda (1977 / 2010).



### II.2.7.5. Insolation

L'insolation, appelée aussi ensoleillement, est définie comme étant la durée pendant laquelle le rayonnement solaire atteint une surface donnée; ce paramètre est mesuré à l'aide d'un instrument météorologique appelé l'héliographe Campbell.

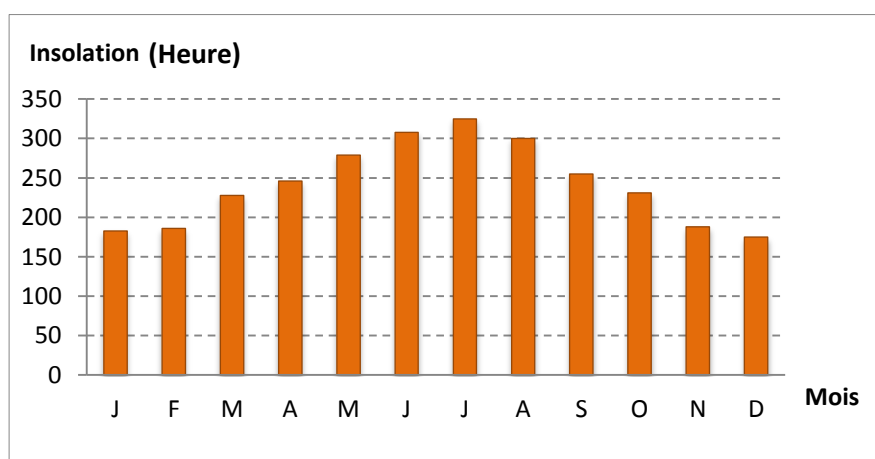
Les valeurs de la durée mensuelle de l'insolation enregistrées à la station de Saïda sont reportées dans le tableau II.14 et la Figure II.12.

**Tableau II.14** : Durée mensuelle de l'insolation totale à la station de Saïda (heures) (1977 / 2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Insolation (heures)</b>	183	186	228	246	279	308	<b>325</b>	300	255	231	188	<b>175</b>

Source : (O.N.M Alger, 2015)

L'analyse de l'insolation au niveau de la station de Saïda révèle un maximum observé au mois de juillet avec une durée moyenne de 325 heures et un minimum au mois de janvier, pour 183 heures.



**Figure II.12** : Durée mensuelle d'insolation totale en (heures) à la station de Saïda (1977 / 2010).

### II.2.7.6. Précipitations

Les précipitations se présentent sous plusieurs formes : pluie, neige fondante, neige ou grêle. Elles concernent le flux d'eau de l'atmosphère vers le continent. Ce paramètre est le facteur principal utilisé pour caractériser le type de climat ; il est mesuré à l'aide d'un pluviomètre.

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles sont présentées dans le tableau II.15.

Tableau II.15 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Saida (mm) (1977 / 2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
P (mm)	40,1	37,4	38,6	33,9	29,3	10,4	5,4	8,7	22,5	42,5	39,6	36,9	345,3

Source : (O.N.M Alger, 2015)

P : Précipitations moyennes mensuelles (mm).

Les précipitations moyennes mensuelles varient entre 5,4 mm et 42,5 mm. La précipitation moyenne annuelle enregistrée sur toute la période d'étude est de 345,3 mm (Figure II.13).

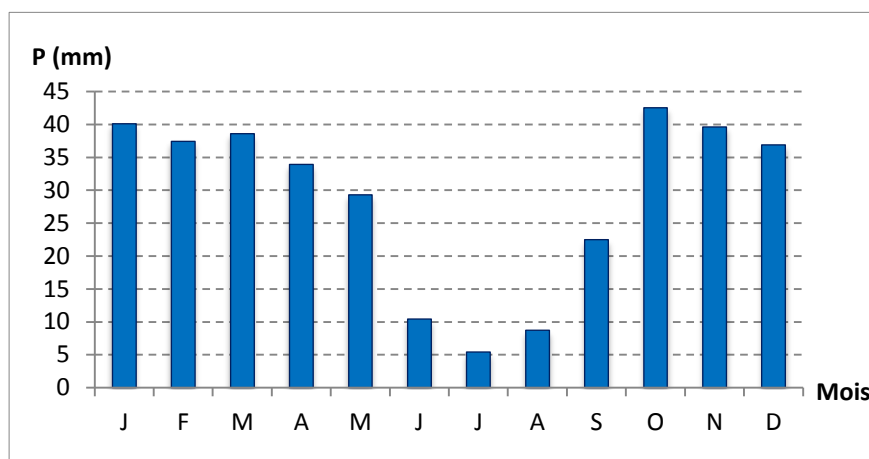


Figure II.13 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Saida sur 1977-2010.

## II.2.8. Indices climatiques

Le régime climatique de la région a été caractérisé par l'indice de De Martonne.

### II.2.8.1. Indice d'aridité annuelle de De Martonne $I$

Les indices d'aridité sont des indicateurs quantitatifs du degré du manque d'eau à un endroit donné. La plupart sont de simples rapports hydro-thermiques fondés sur les valeurs moyennes de précipitation et de température (Mokhtari et al., 2013). Parmi les plus utilisés, celui de De Martonne (1926) est donnée par la formule II.10 :

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (II.10)$$

$I$  : Indice de De Martonne;

$P$  : Précipitations moyennes annuelles (mm);

$T$  : Température moyennes annuelles (°C).

De Martonne a ainsi associé différents types de climat en fonction de la valeur de cet indice, suivant :  $I < 5$  : Climat hyperaride;  $5 < I < 7,5$  : Climat désertique;  $7,5 < I < 10$  : Climat steppique;  $10 < I < 20$  : Climat semi-aride;  $20 < I < 30$  : Climat tempéré.

L'indice d'aridité, qui est de l'ordre de 12,94 à la station de Matemore, reflète un climat semi-aride (figure II.14).

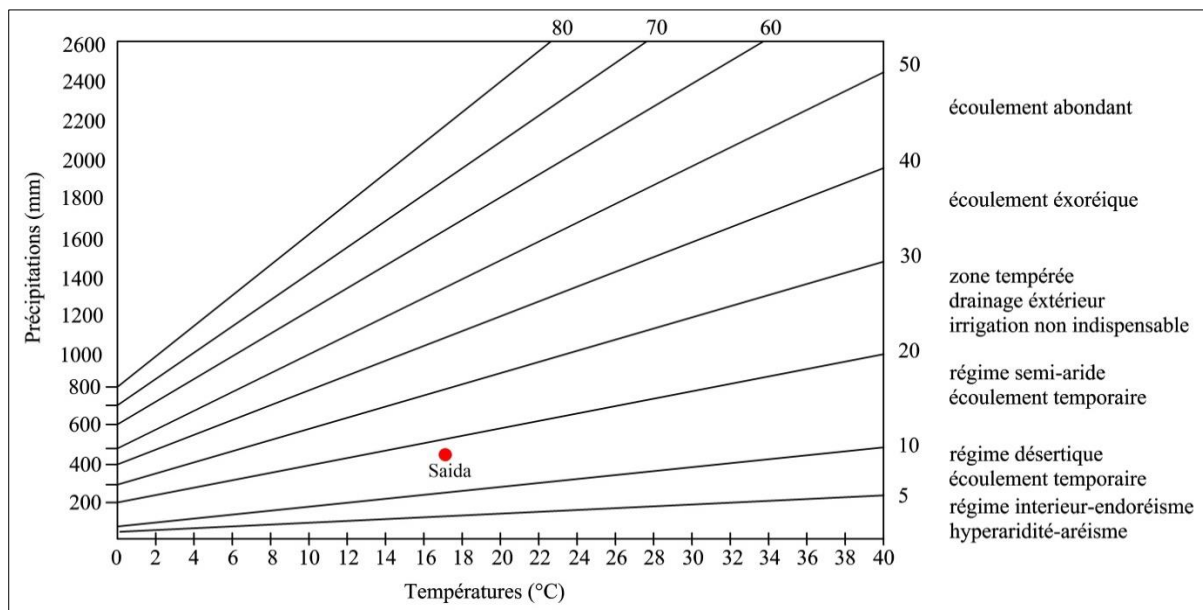


Figure II.14: Indice d'aridité à la station de Saida.

Le calcul de l'indice de De Martone indique que le bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert est situé dans l'étage bioclimatique semi-aride.

### II.2.8.2. Diagramme ombrothermique

Développé par Gaussen et Bagnouls, le diagramme ombrothermique est une méthode purement géométrique qui définit les périodes sèches et humide durant l'année hydrologique. Il porte en abscisses les mois de l'année, en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T) sur une échelle telle que  $P=2T$ . La figure II.15 présente le diagramme ombrothermique à la station de Saida.

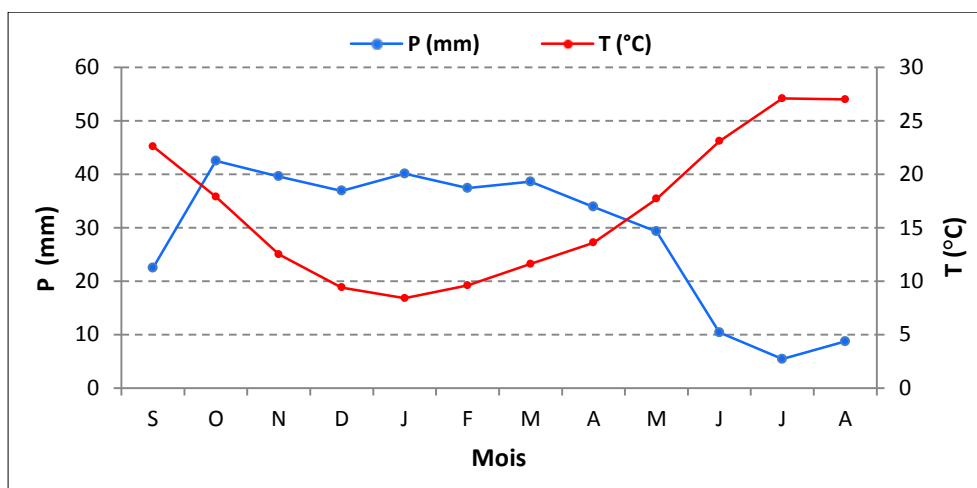


Figure II.15 : Diagramme ombrothermique à la station de Saida.

Ce diagramme ombrothermique nous a permis de distinguer deux périodes à la station de Saïda :

- Une période humide entre octobre et avril, avec des précipitations supérieures à 30 mm/mois.
- Une période déficitaire qui s'étale de mai jusqu'au mois de septembre, caractérisée par des températures élevées et des précipitations minimales.

### II.2.9 Bilan hydrologique

Afin de déterminer le bilan hydrologique, notre choix se porte sur la méthode de Thornthwaite, en fonction des données disponibles (températures et précipitations). Les principaux paramètres pris en considération dans le calcul sont l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent (EXC).

#### II.2.9.1. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est le paramètre le plus important du bilan hydrologique ; elle constitue le transfert de l'eau de la terre vers l'atmosphère par évaporation des eaux de surface et du sol et par la transpiration des végétaux. Elle comprend deux composantes : l'évaporation directe qui s'effectue à partir des sols humides et des différents plans d'eau, et la transpiration des végétaux. Son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant.

#### II.2.9.2. Evapotranspiration potentielle ETP

A défaut de mesures directes de l'ETP sur le terrain, l'évapotranspiration potentielle est estimée à l'aide de la formule empirique de Thornthwaite, qui est largement utilisée pour les climats semi-arides (Gerard, 1999). Son estimation repose sur les données de température moyenne sur la période considérée.

##### a/ Formule de Thornthwaite

La formule II.11 de Thornthwaite est basée essentiellement sur les températures de l'air. Les formules II.12, II.13 et II.14 présentent le détail de calcul de chaque paramètre impliqué dans la formule de Thornthwaite.

$$ETP = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^a \quad (II.11)$$

où :

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (\text{II.12})$$

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514} \quad (\text{II.13})$$

$$a = 0,492 + 1,79 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 \quad (\text{II.14})$$

avec :

**ETP** : Évapotranspiration potentielle (mm);

**T** : Température moyenne mensuelle du mois considéré (°C);

**I** : Indice thermique annuel;

**i** : Indice thermique mensuel;

**k** : Facteur de correction intégrant la durée d'insolation et le nombre de jours du mois dépendant de la latitude ou de la longitude (voir Annexe 1). La formule II.15 donne le calcul de l'évapotranspiration potentielle corrigée de la zone d'étude.

$$ETP_c = ETP \cdot k \quad (\text{II.15})$$

Pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle dans le bassin versant, nous avons pris comme référence les températures enregistrées au niveau de la station de Saïda.

Les résultats obtenus par l'application de cette formule relatifs à la période 1977/2010 sont résumés dans le tableau II.16.

**Tableau II.16** : ETP mensuelle selon Thornthwaite à la station de Saïda (1977 / 2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>P (mm)</b>	40,10	37,40	38,60	33,90	29,30	10,40	5,40	8,70	22,50	42,50	39,60	36,90
<b>T moy (°C)</b>	8,40	9,60	11,60	13,60	17,70	23,10	27,10	27,00	22,60	17,90	12,50	9,30
<b>i</b>	2,19	2,68	3,58	4,55	6,78	10,15	12,92	12,85	9,81	6,90	4,00	2,60
<b>I</b>	79,01											
<b>a</b>	1,76											
<b>ETP (mm)</b>	17,80	22,50	31,40	41,60	66,10	105,50	139,70	138,80	101,50	67,40	35,80	21,70
<b>k</b>	0,88	0,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	1,03	0,97	0,87	0,86
<b>ETP<sub>c</sub> (mm)</b>	15,68	19,15	32,37	45,31	79,26	126,58	170,40	160,97	104,55	65,35	31,18	18,67

L'évapotranspiration potentielle corrigée révèle une variation des valeurs mensuelles entre 170,4 mm et 15,7 mm. Les fortes valeurs l'été s'expliquent par de fortes températures, la température moyenne maximale qui pouvant atteindre 36,1 °C.

### b/ Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et du bilan hydrologique

La comparaison des valeurs de l'évapotranspiration potentielle mensuelle ( $ETP_c$ ) et des hauteurs des précipitations mensuelles ( $P$ ) permet de calculer l'évapotranspiration réelle mensuelle ( $ETR$ ).

Plusieurs cas peuvent se présenter :

$$\text{Si } P > ETP \rightarrow ETR = ETP$$

La quantité d'eau correspondant à  $P - ETP$  est *emmagasinée*<sup>(1)</sup> dans le sol jusqu'à saturation de celui-ci, la partie de l'*excédent* dépassant éventuellement la réserve cumulée maximale en eau du sol, constitue le surplus disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

(1) Thornthwaite a été conduit à adopter pour ce seuil de saturation du sol une valeur de 100 mm, cet ordre de grandeur étant confirmé par les travaux de divers agronomes dans le monde.

$$\text{Si } P = ETP \rightarrow ETR = ETP = P$$

Les réserves en eau de sol restent les mêmes que celles du mois précédent.

$\text{Si } P < ETP \rightarrow ETR = P$  + Tout ou partie de la réserve en eau du sol s'évapore jusqu'à épuisement de celle-ci.

Lorsque les réserves en eau du sol sont épuisées et que :  $ETP > ETR \rightarrow ETP - ETR =$  *Déficit d'eau*

Le tableau (II.17) illustre le calcul du bilan hydrologique calculé à la station de Matemore.

**Tableau II.17 :** Bilan hydrique à la station de Saïda selon la méthode de Thornthwaite (1977 / 2010).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
ETP <sub>c</sub> (mm)	15,68	19,15	32,37	45,31	79,26	126,58	170,4	160,97	104,55	65,35	31,18	18,67
P(mm)	40,10	37,40	38,60	33,90	29,30	10,40	5,40	8,70	22,50	42,50	39,60	36,90
ETR(mm)	15,68	19,15	32,37	45,31	79,26	49,00	5,40	8,70	22,50	42,5	31,18	18,67
RFU (mm)	100	100	100	88,59	38,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,42	26,65
Déficit = ETP-ETR (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77,60	165,00	152,30	82,10	22,90	0,00	0,00
EXC = P-ETP (mm)	24,42	18,25	6,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Le calcul du bilan hydrologique à la station de Saïda révèle 3 stades de la RFU :

#### ➤ Saturation

L'évolution de la RFU atteint l'état de saturation (100 %) pendant 3 mois de l'année (janvier, février et mars) à fortes précipitations. Cette période est caractérisée par un

écoulement superficiel qui atteint 24,4 mm au mois de janvier et une absence totale de déficit hydrique. Cette spécificité s'explique par des précipitations nettement supérieures à l'évapotranspiration potentielle.

#### ➤ **Epuisement**

La RFU commence à diminuer à partir du mois d'avril (88,59 mm) jusqu'à juin où elle s'épuise totalement; la demande d'eau a alors dépassé la réserve.

Le déficit hydrique n'apparaît que pendant la saison sèche, de juin à octobre avec des valeurs respectivement estimées à 77,6 mm (juin), 165,0 mm (juillet), 152,3 mm (août), 81,1 mm (septembre) et 22,9 mm (octobre).

#### ➤ **Régénération**

A partir du mois de novembre, on assiste à une reconstitution du stock avec une augmentation de la RFU qui conduit, en moyenne, aux valeurs mensuelles suivantes : 8,4 mm en novembre et 26,6 mm en décembre.

### **II.3. Présentation du barrage étudié**

Cette partie consiste en une présentation générale du barrage de Ouizert à savoir: la situation et la destination ainsi que les éléments constitutifs du barrage. Considéré comme l'exutoire du bassin versant, ce dernier intercepte toutes les eaux superficielles, soit une superficie de drainage de 2140 km<sup>2</sup>.

#### **II.3.1. Barrage de Ouizert**

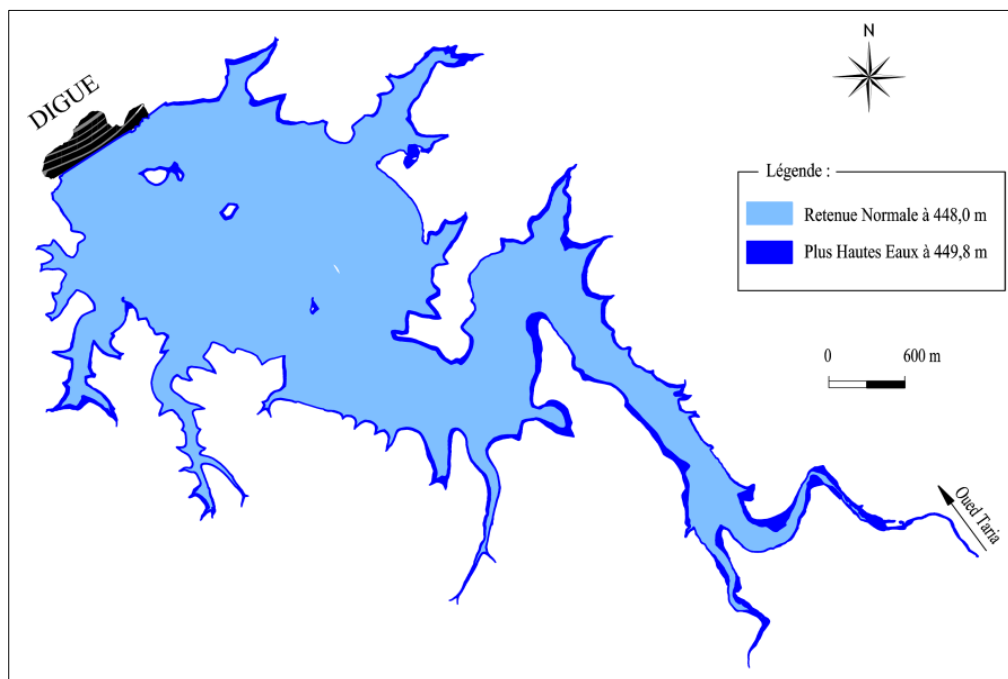
##### **II.3.1.1. Situation et rôle**

Le barrage de Ouizert ou El-fakia est situé à 17 km au sud de la ville d'Ain Fekan. Il fait partie du triplex formé par les barrages de Ouizert, Bouhanifia et Fergoug dans la wilaya de Mascara. Il a été construit en 1986 afin de régulariser les apports de l'oued Sahouat formé par la confluence des oueds Taria et Saïda (Figure II.7) et de compléter la régularisation des apports de l'oued El Hammam, déjà partiellement réalisée par le barrage de Bouhanifia.

Le barrage de Ouizert est alimenté par un bassin versant d'une superficie de 2140 km<sup>2</sup>. Sa capacité initiale était de 100 hm<sup>3</sup> et sa capacité actuelle estimée à 93,91 hm<sup>3</sup>, avec un volume régularisé de 40 hm<sup>3</sup> et un apport annuel moyen de 84 hm<sup>3</sup> (A.N.B.T, 2014).

### II.3.1.2. Retenue du barrage

La retenue du barrage couvre une superficie de 663,14 ha et une capacité de 93,91 hm<sup>3</sup> à la cote de la retenue normale fixée à 448,00 m (Nivellement Général Algérien, N.G.A), mais celle de la retenue maximale a été fixée à 449,80 m (Niveau des Plus Hautes Eaux, NPHE) avec une capacité de 106,43 hm<sup>3</sup> et une superficie de 728,33 ha (Figure II.16) (Geoid et L.E.M, 2004).



### II.3.1.3. Eléments constitutifs du barrage

#### a/ Digue

C'est un ouvrage en terre hétérogène et composé d'un noyau étanche incliné vers l'amont. Ce noyau est posé sur une dalle en béton de 1 m d'épaisseur et un tapis drainant s'étendant sous toute la surface de la recharge aval. La hauteur de la digue est de 60 m avec une largeur en crête de 10 m et une longueur totale en crête atteignant 950 m (Photo II.4 (a)) (Energoprojekt, 1973).

#### b/ Ouvrages de prise

La tour de prise d'eau est indépendante de la structure de la digue, permettant de capter l'eau à 3 niveaux différents en fonction de la cote de la retenue (Photo II.4 (b)). (Energoprojekt, 1973).



### c/ Evacuateur de crues

Un évacuateur de crues principal est situé en rive droite de l'ouvrage (Photo II.4 (d)) et un évacuateur de crues secondaire à digues fusibles (Photo II.4 (c)) en rive gauche. Ce dernier est conçu pour passer la crue déca millénaire estimée à 3400 m<sup>3</sup>/s (Energoprojekt, 1973).

L'évacuateur de crues principal se compose :

- d'un déversoir (4 passes de 10,5 m de large et 600 m<sup>3</sup>/s dont le seuil est calé à la côte 437,50 m). Chaque passe est équipée d'une vanne segment de 10,5 m x 10,5 m à commande automatique et manuelle (Photo II.4 (f));
- d'un canal de fuite entièrement bétonné à 7,25 % d'une longueur de 390 m et de largeur variable. Le radier est constitué par des dalles en béton de 80 cm d'épaisseur (10 m x 10 m). L'ensemble est drainé (Photo II.4 (e));

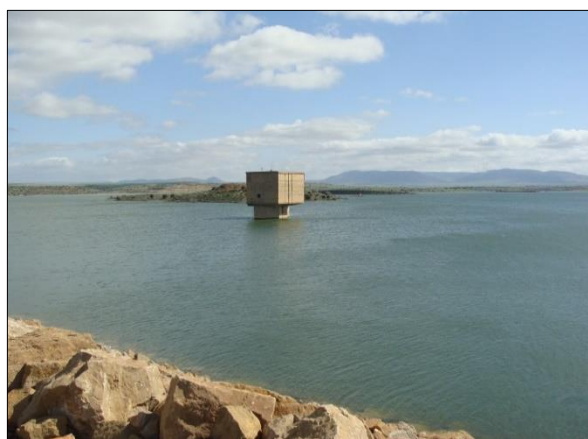
L'évacuateur de crues auxiliaire est constitué de trois digues fusibles. Ce sont des ouvrages de type homogène constitués de sable fin silteux compacté et comportant un drain cheminé, les trois pertuis divisés par des murs longitudinaux de 2,5 m d'épaisseur et fermés par des remblais de construction appropriés. Ces remblais sont fondés sur une dalle en béton à la côte 445 m et réalisée jusqu'aux côtes 449 ; 449,40 et 440,80 m. La portée de chaque pertuis est de 22 m (photo II.4 (c)) (Energoprojekt, 1973).

### d/ Vidange de fond

La vidange de fond a été construite à la côte 397,5 m et dimensionnée pour un débit de 100 m<sup>3</sup>/s lors du niveau maximum de la retenue à la côte 448 m, avec 3 vannes de 2,68 x 1,60 m (Photo II.4 (g)) (Energoprojekt, 1973).



a) Digue.



b) Tour de prise d'eau.



c) Digue fusible.



d) Evacuateur de crues à seuil vanné



e) Ouvrage de rejet.



f) Vanne de l'évacuateur de crues.



g) Vidange de fond.

*Photos, TOUBAL A. K. (23/02/2015)*

**Photos II.4 :** Eléments constitutifs du barrage de Ouizert.

### II.3.2. Synthèse récapitulative du barrage de Ouizert

Afin de bien connaître l'implantation de chaque constituant par rapport à la digue du barrage, une prise de vue en plan sur Google Earth à la date du 20/06/2017 est illustrée en figure II.17. Le regroupement des caractéristiques générales du barrage de Ouizert sont regroupées dans le tableau II.18.



Figure II.17 : Image satellite du barrage de Ouizert (*Google Earth le 20/06/2017*)

Tableau II.18 : Caractéristiques générales du barrage de Ouizert.

Caractéristiques hydrologiques		
Bassin versant	Oued	Sahouat
	Surface du bassin versant	2140 km <sup>2</sup>
	Affluents	Oued Taria et Oued Saida
	Précipitation moyenne annuelle	313 mm
	Apport moyen annuel	84 hm <sup>3</sup> /an
Retenue du barrage	Capacité initiale	100 hm <sup>3</sup>
	Superficie inondable à la mise en eau	663,14 ha
	Volume régularisable	40 hm <sup>3</sup>
	Crue de projet	3400 m <sup>3</sup> /s
	Levé bathymétrique (2003)	volume de vase : 6,09 hm <sup>3</sup> reste 93,91 hm <sup>3</sup>
	Envasement annuel	0,30 hm <sup>3</sup> /an
caractéristiques techniques		
Digue du barrage	Type	Terre
	Volume de Terrassement	1 608 000 m <sup>3</sup>
	Longueur de la digue	950 m
	Hauteur de la digue	60 m
	Largeur de la digue a la base	200 m
	Largeur de la digue en crête	10 m
	Côte retenue normale (R.N)	448,00 m
	Côte plus hautes eaux (P.H.E)	449,80 m
	Côte en crête	450 m
	Côte vidange de fond	397,50 m
Organes d'exploitation	Evacuateur de crues en rive droite à seuil vanné	4x600 m <sup>3</sup> /s
	Evacuateur de crues secondaire à digues fusibles situé en rive gauche	1600 m <sup>3</sup> /s
	Vidange de fond	100 m <sup>3</sup> /s
	Conduite pour l'irrigation	Ø 1250mm
	Dévasement	Chasse d'eau par vidange de fond
	Volume de béton	120 000 m <sup>3</sup>
	Injection	50 000 ml
Caractéristiques économiques		
Destination	Alimentation en eau potable	Oran, Arzew et Mohammadia
	Irrigation	Périmètre Hacine et Habra
Construction	Début des travaux / mise en eau	1974 / 1986
	Bureau d'études	S.G.I
	Entreprise de Réalisation	GARO (Groupement Algéro-Roumain de Ouizert)

**II.4. Conclusion**

Le bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert ( $A=2140 \text{ km}^2$  et  $P= 231,40 \text{ km}$ ) présente une forme allongée avec un coefficient de Gravelius  $K= 1,4$  et un temps de concentration des eaux à l'exutoire relativement long (18,48 heures).

La zone d'étude est située dans une tranche d'altitudes allant de 424 à 1327 m. Selon la classification de l'O.R.S.T.O.M. (devenu IRD, Institut de Recherche pour le Développement), le bassin versant est classé comme relief fort avec une dénivelée spécifique de 347,41 m.

L'analyse des températures annuelles au niveau de la station climatique de Saïda durant une période de 34 ans (1977/2010) donne une température moyenne interannuelle de 16,7 °C. La région d'étude est située dans une zone à climat semi-aride caractérisé par un hiver humide et froid et un été sec et chaud. La pluviométrie moyenne interannuelle (1977-2010) s'élève à 345,3 mm.

Le barrage de Ouizert a été réalisé entre 1974 et 1986 par le Groupement Algéro-Roumain de Ouizert (G.A.R.O) pour l'alimentation en eau potable des villes d'Oran, Arzew et Mohammadia ainsi que pour l'irrigation du périmètre de Hacine et Habra. La capacité du barrage s'élève à  $100 \text{ hm}^3$  à la mise en eau. Au dernier levé bathymétrique de 2003, ce volume s'est vu réduit à  $93,91 \text{ hm}^3$  du fait de l'envasement progressif de la retenue depuis 1986.

***Chapitre III :***  
***Etude du régime***  
***hydro-pluviométrique***



## Chapitre III :

# Etude du régime hydro-pluviométrique

### III.1. Introduction

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est tributaire des conditions climatiques et géomorphologiques, les précipitations représentent le principal facteur de toute réponse dans le bassin versant. Ce chapitre présente une étude hydro-pluviométrique détaillée sur le bassin de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert.

### III.2. Collecte et mise en forme des données

Dans un premier temps nous avons collecté le maximum d'informations au niveau de la Direction Régionale de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H, Oran). L'A.N.R.H locale de Mascara présente des déficiences au niveau du système de bases de données rendant l'information inaccessible. Pour de plus amples informations nous nous sommes rendus à la Direction Générale de l'A.N.R.H (Alger). Les données collectées comportent des inconvénients pour notre étude, à l'exception de quelques stations. Parmi les insuffisances constatées sur quelques stations, citons :

- d'énormes lacunes mensuelles au fil des années;
- des stations en arrêt;
- des valeurs douteuses (non fiables, très différentes des valeurs usuelles...).

#### III.2.1. Choix des stations

Le bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert comporte 30 postes pluviométriques. Vingt stations ont été retenues pour notre étude pour les raisons suivantes :

- un accès aisé aux données, nécessaire au niveau des services de l'A.N.R.H;
- un nombre de lacunes pas excessifs, autorisant l'analyse des variations temporelles des paramètres mesurés;

➤ la station devait également être jugée fiable par les services de l’A.N.R.H.

Le tableau (III.1) présente les coordonnées des 20 postes pluviométriques retenus. Leur répartition spatiale dans le bassin est illustré en figure III.1.

Tableau III.1 : Stations pluviométriques retenues de la zone d’étude.

N°	Nom	Sous-bassin	Wilaya	X (km)	Y (km)	Z (m)
S1	Meftah sidi boubekeur	Oued Saida	Saida	259,5	195,8	525
S2	Ain el hadjar	Oued Saida	Saida	266,5	165,2	1034
S3	Kilometre 50	Oued Saida	Saida	268,5	192,0	607
S4	Hammam rabi	Oued Saida	Saida	270,4	184,5	737
S5	Djebel karous	Oued Saida	Saida	264,7	181,2	742
S6	Rebahia ferme 917	Oued Saida	Saida	272,6	180,5	921
S7	Sidi amar shgeo	Oued Saida	Saida	264,0	195,0	578
S8	Ferme du syndicat	Oued Saida	Saida	263,7	165,5	1009
S9	Ain zerga ferme	Oued Saida	Saida	273,9	176,4	987
S10	Oued taria	Oued taria	Mascara	262,4	204,9	498
S11	Oum el djirane	Oued taria	Saida	296,9	190,6	1015
S12	Ain tifrît	Oued taria	Saida	290,1	182,5	1116
S13	Ain soltane	Oued taria	Saida	281,4	188,4	985
S14	Sidi mimoun	Oued taria	Saida	289,1	196,1	728
S15	Bled el beida	Oued taria	Saida	283,3	183,1	1031
S16	Tamesna	Oued taria	Saida	295,6	174,5	974
S17	Domaine bencherit	Oued Saida	Saida	275,0	173,0	1130
S18	Beniane	Oued taria	Mascara	275,0	203,2	560
S19	Hasna domaine bouchikhi	Oued taria	Mascara	277,4	194,6	666
S20	Barrage de Ouizert	Oued Sahouat	Mascara	277,4	194,1	424

X(Km) : Longitude; Y(Km) : Latitude; Z(m) : Altitude.

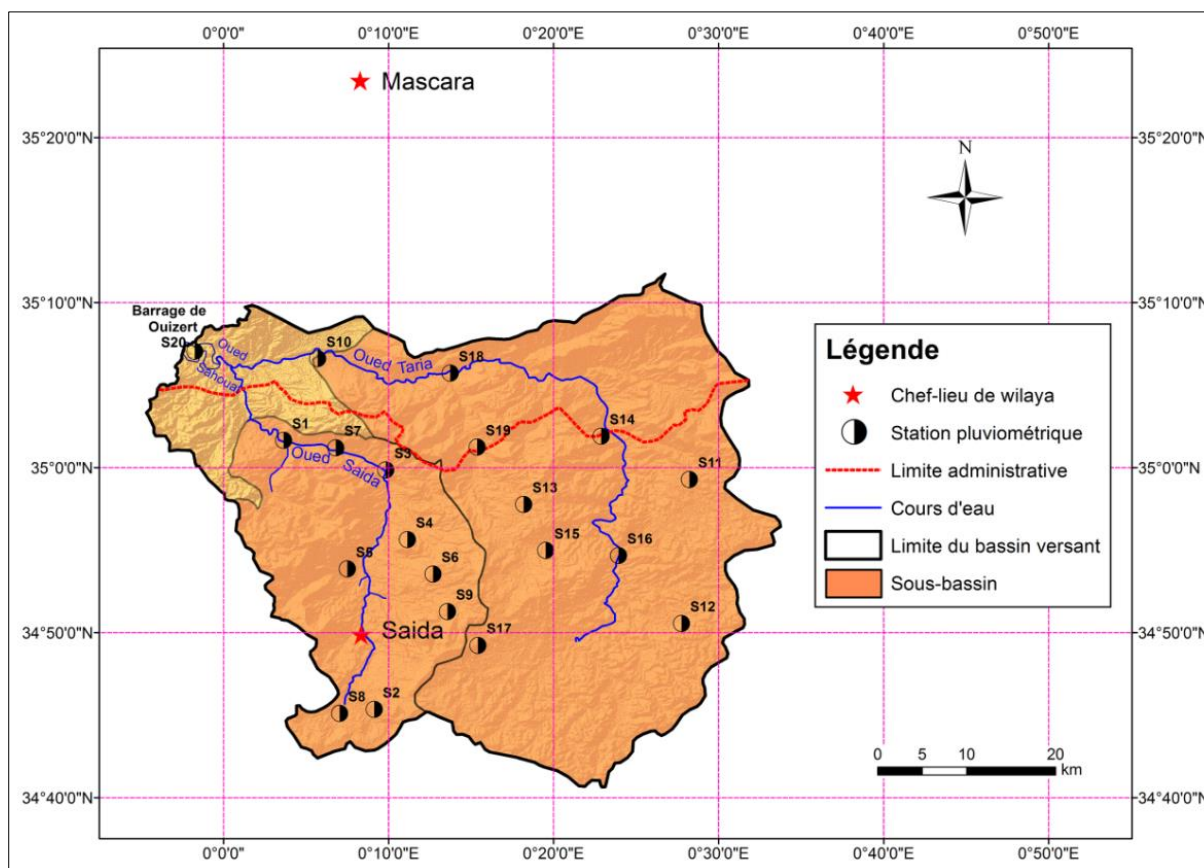


Figure III.1 : Plan de situation des stations pluviométriques étudiées.

### III.2.2. Période d'étude

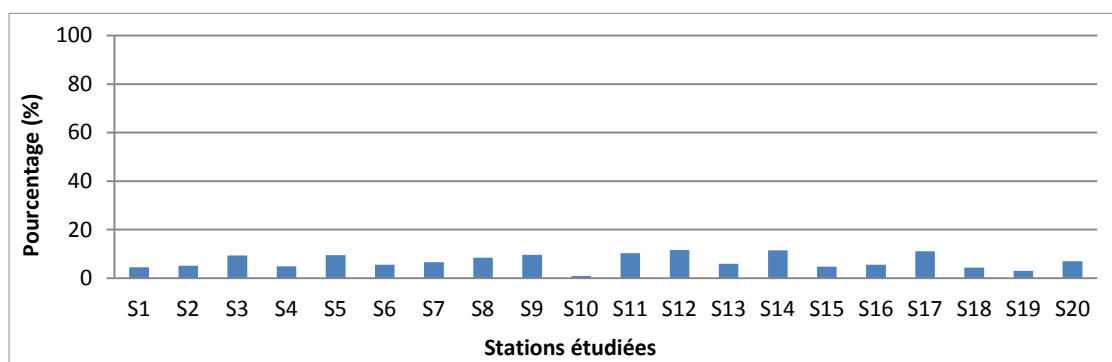
La collecte des données des séries pluviométriques des stations choisies nous a mené à déterminer une période d'étude commune pour les comparer entre elles, à partir de suffisamment d'informations. Cette analyse a ainsi été réalisée de l'année hydrologique 1970/71 à l'année 2014/15, date limite autorisée par l'A.N.R.H., correspondant également à la première inscription en doctorat.

### III.2.3. Inventaire mensuel des stations retenues

Le pourcentage de lacunes à l'échelle mensuelle des stations retenues, est reporté dans le tableau III.2 et la figure III.2. Durant la période étudiée, l'inventaire des stations varie de 0,9 à 11,7 % respectivement au niveau de la station S10 (Oued Taria) et la station S12 (Sidi Mimoun). L'inventaire des stations à l'échelle journalière est très laborieux à établir.

**Tableau III.2 :** Pourcentage des lacunes des stations pluviométriques étudiées.

N°	Nom	Nombre de mois manquants	Pourcentage de mois manquants (%)
S1	Meftah sidi boubekeur	24	4,4
S2	Ain el hadjar	28	5,2
S3	Kilometre 50	50	9,3
S4	Hammam rabi	26	4,8
S5	Djebel karous	51	9,4
S6	Rebahia ferme 917	30	5,6
S7	Sidi amar shgeo	35	6,5
S8	Ferme du syndicat	45	8,3
S9	Ain zerga ferme	52	9,6
S10	Oued taria	5	0,9
S11	Oum el djirane	56	10,4
S12	Ain tifrit	62	11,5
S13	Ain soltane	32	5,9
S14	Sidi mimoun	63	11,7
S15	Bled el beida	26	4,8
S16	Tamesna	30	5,6
S17	Domaine bencherit	60	11,1
S18	Beniane	23	4,3
S19	Hasna domaine bouchikhi	16	3,0
S20	Barrage de Ouizert	38	7,0



**Figure III.2 :** Pourcentage de lacunes au niveau des stations choisies.



#### III.2.4. Comblement des lacunes

Les lacunes dans une série pluviométrique peuvent provenir d'une panne de l'appareil, ou à l'absence de l'observateur ou à l'arrêt de la station...

Le comblement d'une lacune de pluie journalière peut se faire par :

- Le remplacement de la pluie manquante par celle observée à la station la plus proche, en respectant l'altitude de chaque station (Kabouya, 1990)
- Calcul de la moyenne des précipitations des stations voisines. La fiabilité de cette méthode repose sur les précipitations qui ne sont pas très irrégulières.
- Etablissement de la régression linéaire entre deux stations voisines (Kabouya, 1990)

Dans le cas présent, nous optons pour le comblement des lacunes à l'échelle journalière par le remplacement de la pluie manquante de la station voisine.

#### III.2.5. Erreurs commises dans les séries de données

Les données fournies au niveau des organismes concernés ne sont pas utilisés directement (Mestre, 2000), elles peuvent être entachées d'erreurs qui peuvent être accidentelles ou systématiques.

Les erreurs *accidentelles* sont surtout des erreurs d'exploitation et du personnel exploitant qui sont dues aux :

- Erreurs d'observation et de dépuillement;
- Copie de données sur le fichier Excel;
- Erreurs d'imprécision relative à la conception de l'appareil de mesure;
- Les conditions d'installation de l'appareil de mesure;

Les erreurs *systématiques* peuvent survenir à l'occasion :

- Du changement d'observateur;
- Défectuosités progressives de l'appareil de mesure;
- Changement de la méthode de mesure (protocole de mesure).

Ces facteurs ne sont pas exhaustifs mais résument cependant principalement ceux qui affectent l'homogénéité des séries climatologiques.

Heino (1996), explique l'influence que peuvent avoir divers changements sur les séries de mesures de différents paramètres (Tableau III.3)

**Tableau III.3** : Estimation de l'influence des principaux changements sur l'homogénéité des mesures de divers paramètres météorologiques (Heino, 1996).

Changements	TM	TN, TX	Précipitations	PP	HU	dd	ff	ww
Instrumentation	-	+	+	-	++	-	++	-
Hauteur instrument	+	+	+	+++	+	+	++	-
Exposition	+	++	+++	-	+	++	++	-
Heurs observations	+	+	-	-	+	-	+	+
Méthode de calcul	++	-	-	-	+	-	+	-
Emplacements	++	+++	+++	-	+	++	+++	+
Environnement	+	+	+	-	+	+	++	+
Observateurs	-	-	-	-	+	-	+	+++

**TM** : Température moyenne; **TN, TX** : Température minimale;

**PP** : Pression; **HU** : Humidité; **ww** : Temps sensible;

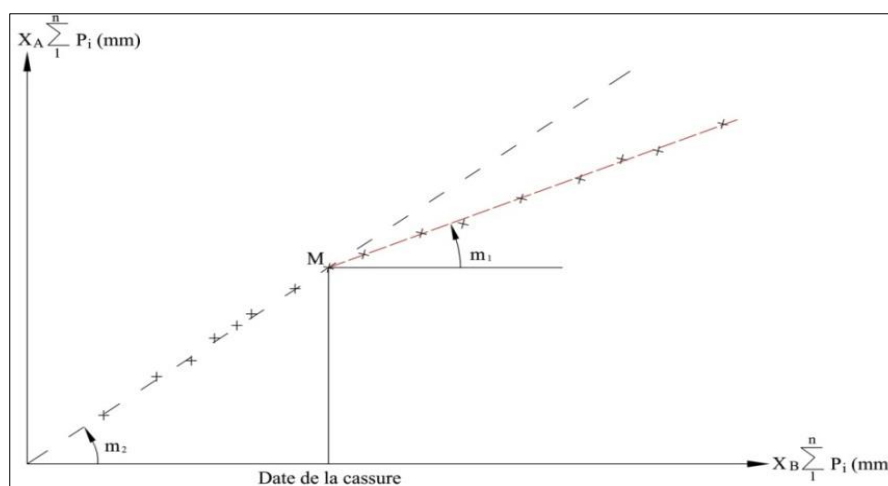
**dd et ff**: Direction et force du vent.

Les annotations sont les suivantes: **(-)** « pas de problèmes majeurs », **(+)** « quelques inhomogénéités », **(++)** « ruptures importantes » et **(+++)** « ruptures très importantes »

### III.3. Détection des erreurs systématiques et correction des données

#### III.3.1. Méthode des doubles masses

Cette méthode permet de détecter graphiquement l'hétérogénéité de la série à étudier, en comparant les précipitations cumulées de deux stations rapprochées du bassin. Le principe de la méthode est illustré en figure III.3. Un changement de pente durant la période d'étude nous met en garde sur la validité d'une des séries de mesure, à confronter à d'autres stations et, le cas échéant, à écarter de l'analyse.



**Figure III.3** : Méthode des doubles masses (Touaibia, 2004).

On corrige les données observées en multipliant le rapport de pente ( $\frac{m_1}{m_2}$ ) par la valeur erronée respectivement selon que l'on soit, après la cassure ou avant la cassure.

Les graphiques de la méthode des doubles masses des séries sont présentés en figure III.4

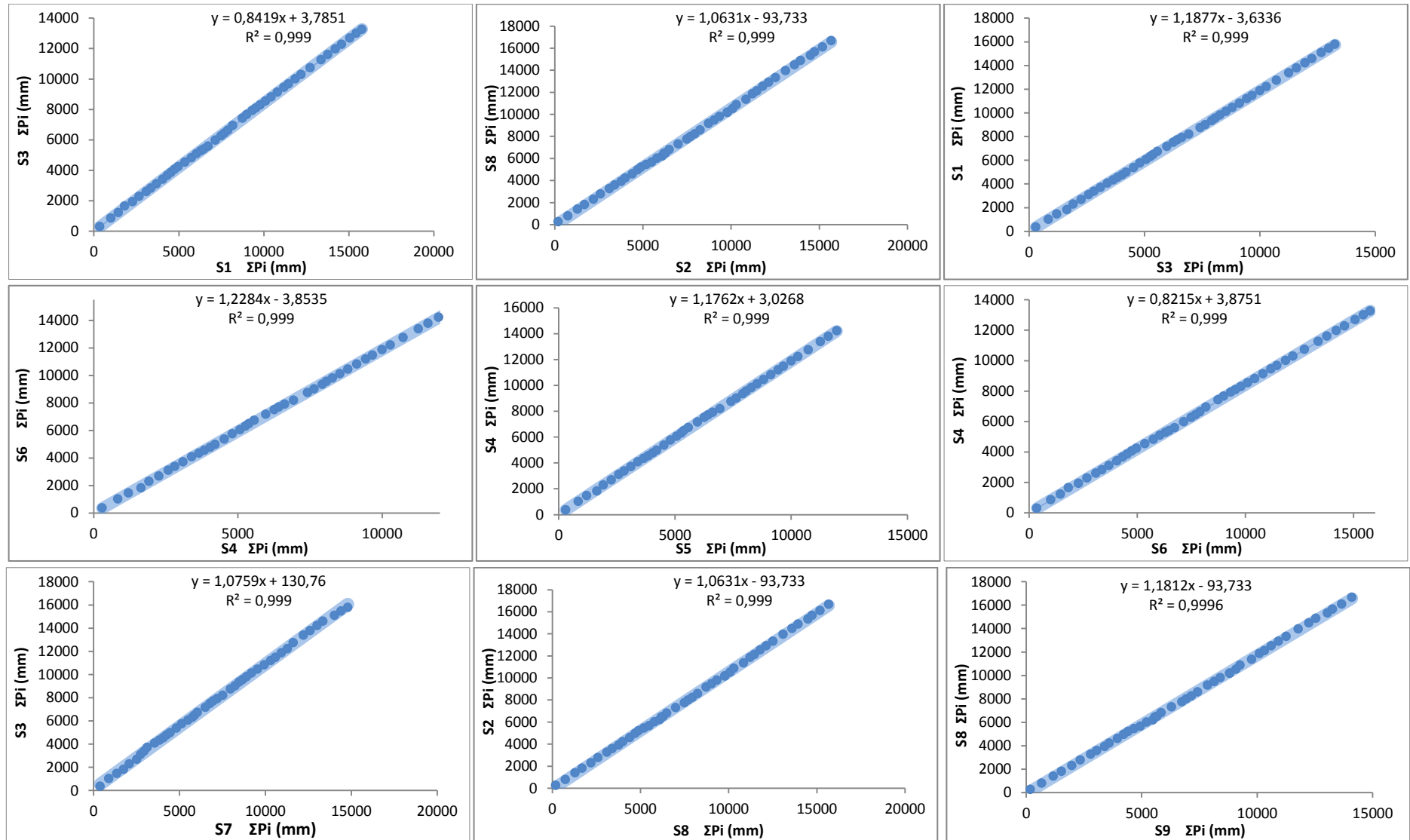


Figure III.4 : Double masses des séries pluviométriques étudiées (1970/71 - 2014/15).

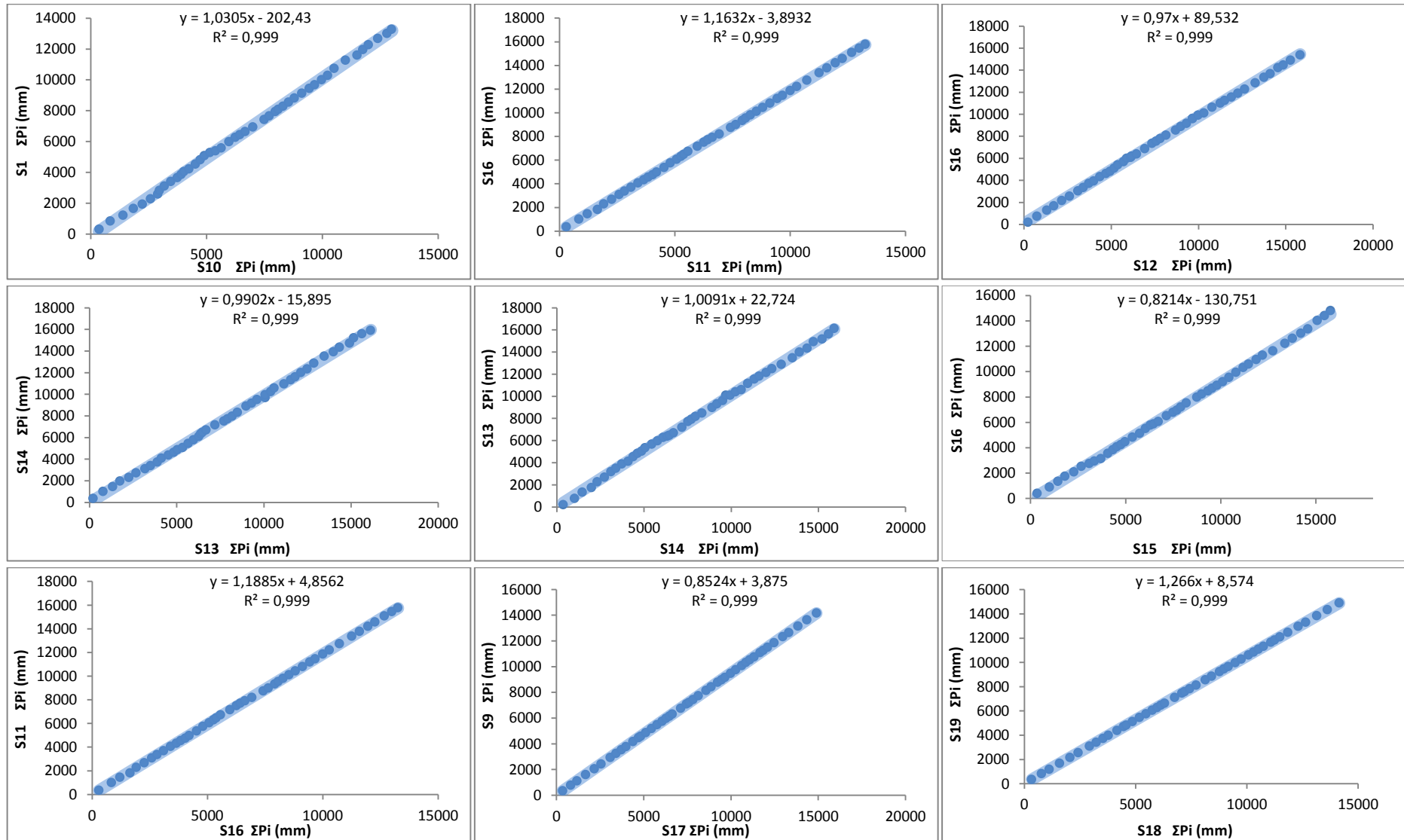


Figure III.4 : Double masses des séries pluviométriques étudiées (1970/71 - 2014/15) (Suite).

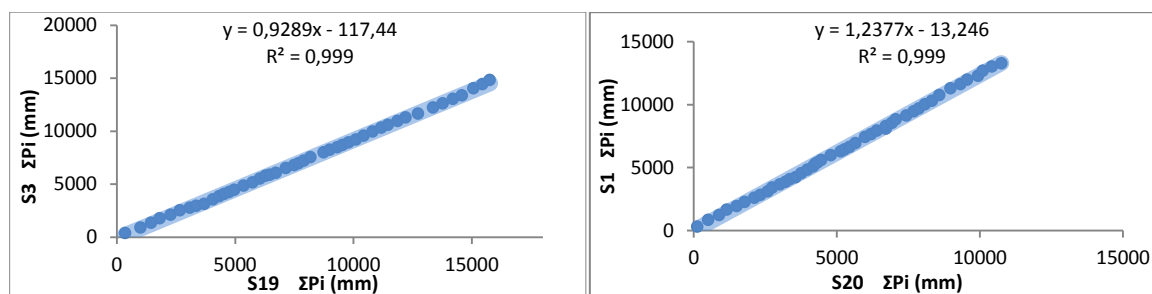


Figure III.4 : Double masses des séries pluviométriques étudiées (1970/71 - 2014/15) (Suite et fin).

A partir des résultats obtenus nous remarquons que la majorité des stations enregistrent un coefficient de détermination  $R^2 \approx 1$ , partant de ce constat nous pouvons dire que les stations étudiées sont homogènes.

### III.4. Etude du régime pluviométrique

#### III.4.1. Distribution mensuelle des précipitations

L'analyse des précipitations mensuelles révèle que le mois de Janvier est le plus pluvieux avec un maximum de 51,1 mm au niveau de la station S19, et que le minimum de 1,4mm est atteint au mois de Juillet au niveau de la station S7 (Tableau III.4).

Tableau III.4 : Précipitations moyennes mensuelles des stations choisies (1970/71 - 2014/15).

N°	Code	Nom	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Août
S1	111102	Meftah sidi boubekeur	13,7	32,0	40,9	32,5	36,3	33,1	33,2	32,5	25,7	7,9	3,2	3,6
S2	111103	Ain el hadjar	22,1	33,9	39,2	38,0	46,9	40,1	41,1	36,0	28,8	9,9	4,1	8,6
S3	111106	Kilometre 50	16,4	36,7	48,1	37,9	43,6	37,5	43,6	38,0	31,3	8,6	4,0	4,7
S4	111112	Hammam rabi	16,6	31,9	37,0	28,7	31,6	31,8	30,7	28,7	23,6	7,5	3,0	4,1
S5	111113	Djebel karous	13,3	31,2	37,4	29,7	36,7	38,3	39,2	33,9	27,8	8,5	2,0	6,3
S6	111114	Rebahia ferme 917	16,2	30,3	36,1	28,3	29,9	33,5	30,4	31,2	24,0	8,2	2,1	5,3
S7	111116	Sidi amar shgeo	15,7	32,8	45,4	36,4	41,3	37,9	42,2	34,3	28,7	7,2	1,4	5,7
S8	111120	Ferme du syndicat	24,0	35,3	40,1	36,9	47,6	42,4	43,3	41,6	31,4	12,2	5,8	11,4
S9	111128	Ain zerga ferme	16,8	39,8	42,0	33,8	37,0	38,6	37,5	33,7	31,8	8,8	4,2	7,9
S10	111201	Oued taria	16,6	26,8	37,6	31,8	33,3	33,0	35,3	30,1	23,8	9,2	2,7	4,9
S11	111203	Oum el djirane	15,3	23,4	38,6	31,3	42,2	38,1	32,4	34,2	32,4	9,3	3,1	5,9
S12	111204	Ain tifrit	22,0	33,4	45,6	36,5	45,4	46,9	41,3	43,9	33,8	10,4	2,7	7,6
S13	111205	Ain soltane	15,5	35,3	49,6	39,5	49,9	43,9	37,0	44,1	31,5	10,1	2,9	6,2
S14	111208	Sidi mimoun	18,9	35,0	42,4	40,6	43,7	50,0	43,6	37,5	30,2	8,6	3,3	7,8
S15	111209	Bled el beida	18,4	32,2	35,0	38,2	42,1	41,9	41,9	41,4	33,7	7,8	2,8	6,2
S16	111210	Tamesna	17,9	29,0	40,4	34,2	43,9	48,5	40,6	37,0	29,1	9,9	4,2	10,0
S17	111215	Domaine bencherit	16,9	36,8	44,4	32,1	35,9	39,7	39,0	36,0	31,8	8,8	3,5	7,0
S18	111217	Beniane	16,2	30,7	39,7	41,8	45,3	43,4	36,3	32,9	24,1	7,4	3,2	4,6
S19	111219	Hasna domaine bouchikhi	17,5	36,5	49,8	42,4	51,1	49,2	47,6	36,1	32,0	6,8	3,4	6,2
S20	111303	Barrage de Ouizert	14,7	27,6	34,7	28,1	30,5	29,3	32,4	28,5	20,5	7,1	2,3	4,0

La figure (III.5) montre deux périodes bien distinctes durant l'année :

- La saison humide, qui se prolonge du mois de Septembre jusqu'en Mai;
- La saison sèche qui correspond à la période estivale et qui est caractérisée par une pluviométrie inférieure à 12,2 mm.

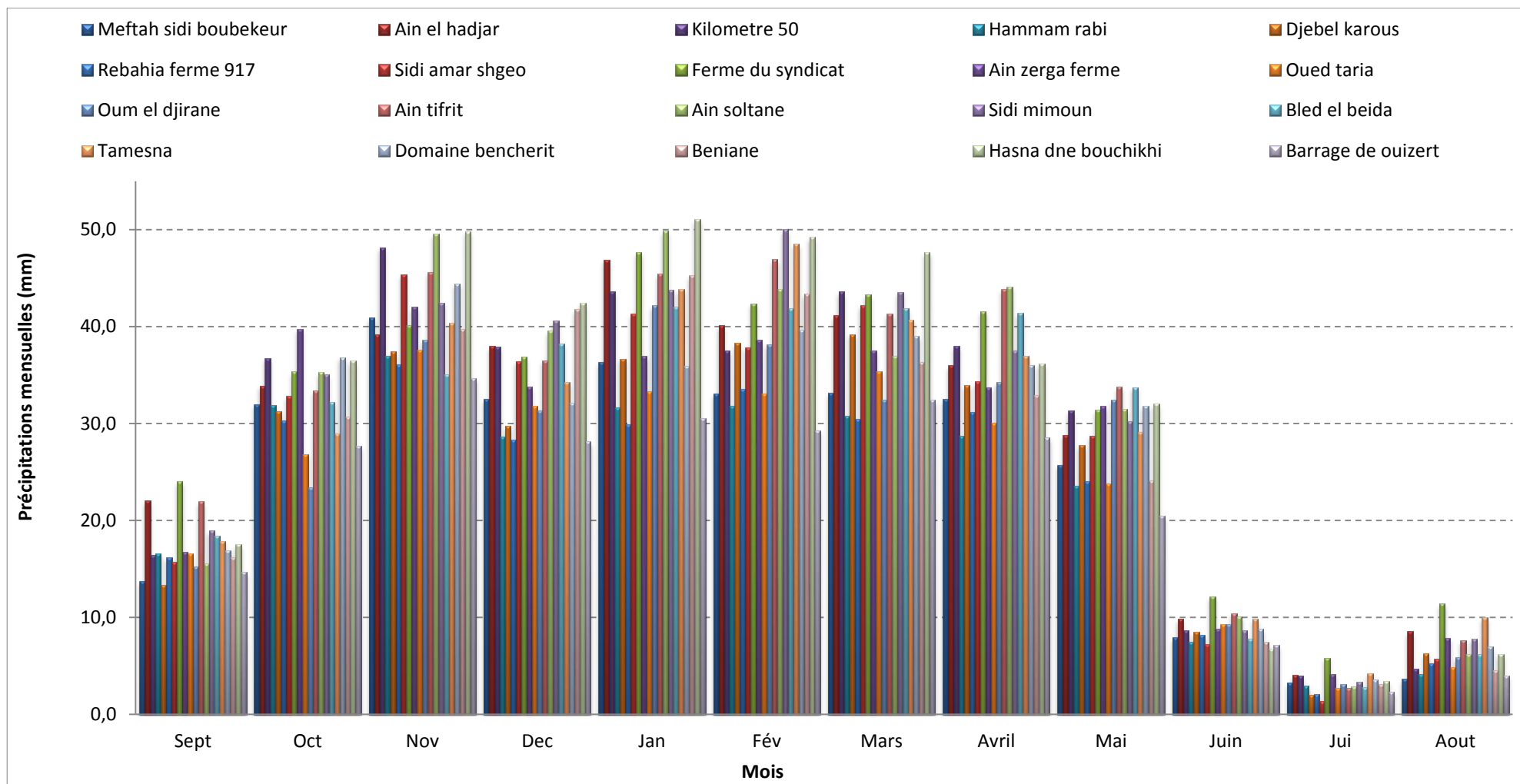


Figure III.5 : Précipitations moyennes mensuelles des stations étudiées, bassin versant de l’oued Sahouat (1970/71 - 2014/15).

**III.4.1.1. Répartition spatiale des précipitations moyennes mensuelles (1970/71 - 2014/15)**

Pour visualiser les précipitations sur le bassin versant, une interpolation linéaire a été établie avec le logiciel Arcgis 10.2.2 en utilisant la méthode d'interpolation Inverse Distance Weighted (I.D.W).

La spatialisation de la pluviométrie moyenne mensuelle qui en résulte sur la période de 45 ans révèle une nette variation d'un mois à l'autre (Figure III.6), sur laquelle les couleurs les plus foncées indiquent une forte précipitation tandis que les couleurs claires indiquent une faible précipitation. Ces variations illustrent le cycle bien spécifique des hauteurs des pluies au fil des mois.

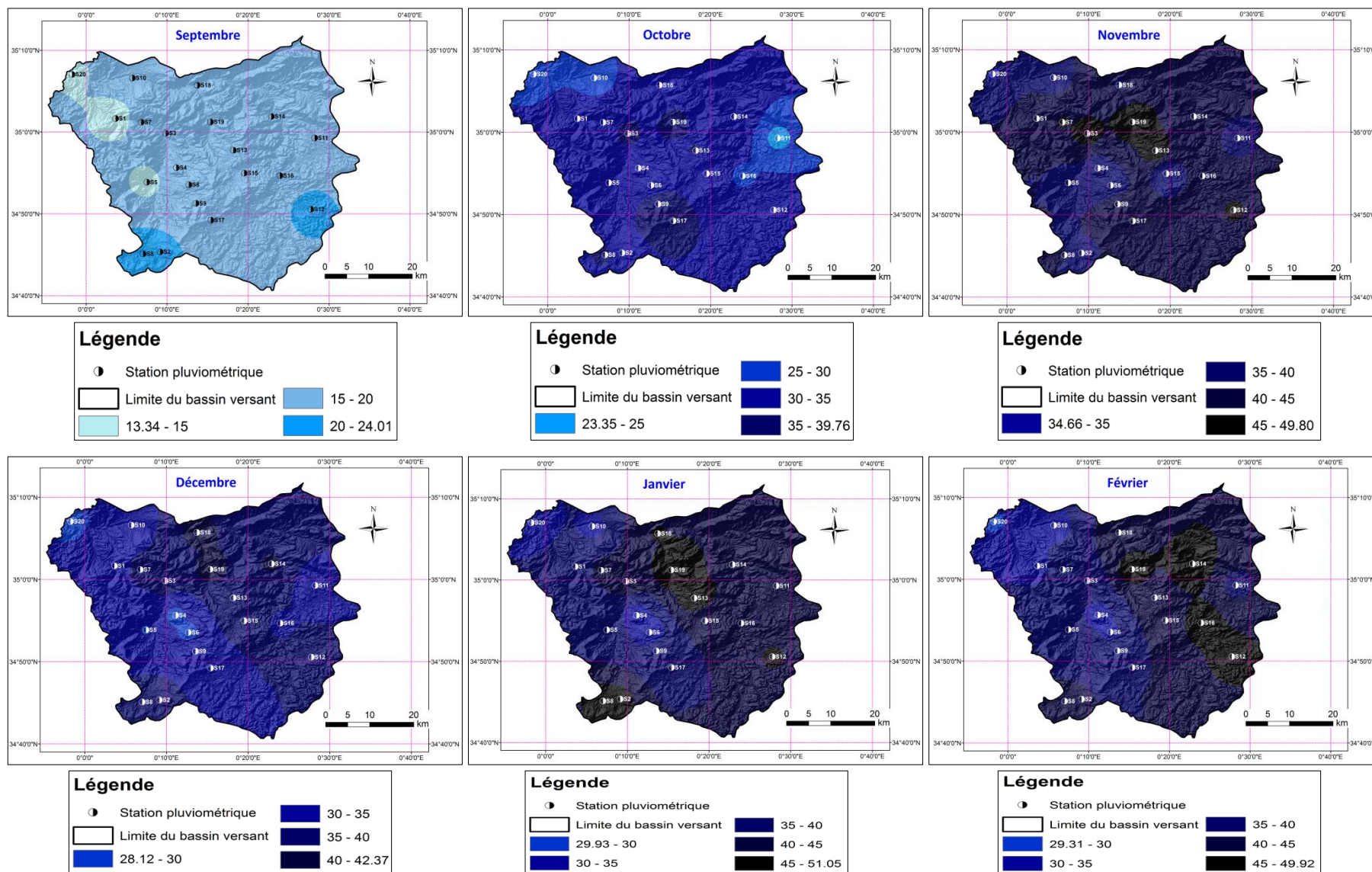


Figure III.6 : Cartes de distribution de la pluviométrie moyenne mensuelles (1970/71 - 2014/15)



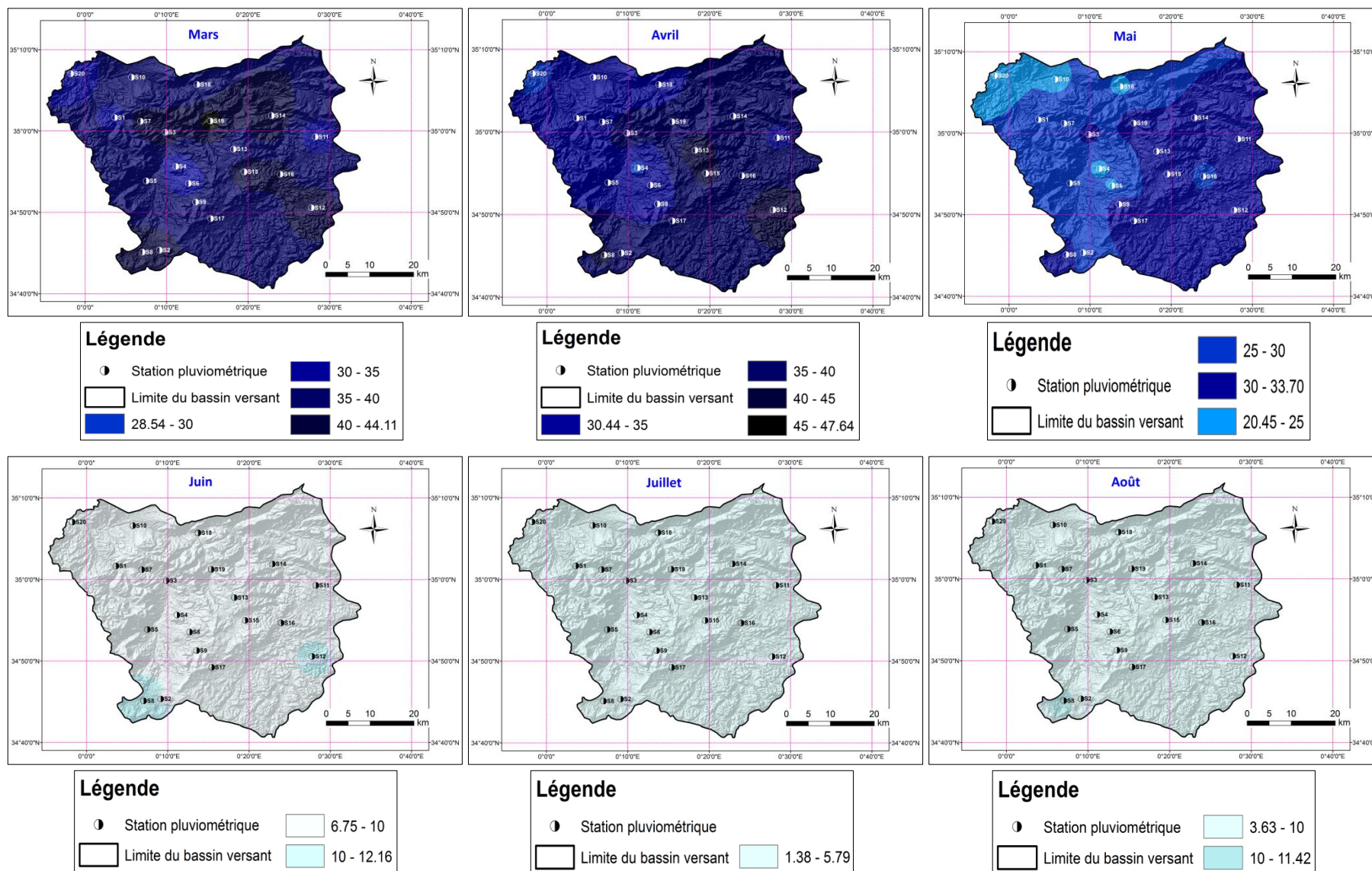


Figure III. 6: Cartes de distribution de la pluviométrie moyenne mensuelles (1970/71 - 2014/15) (suite et fin).

### III.4.1.2. Paramètres statistiques des stations retenues

#### a/ Moyenne

La moyenne arithmétique ( $\bar{x}$ ) est égale à la somme des valeurs prises par la série divisée par le nombre de valeurs observées (formule III.1).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad (\text{III.1})$$

avec :

$x_i$ : Précipitation observée;

$N$  : Taille de la série (nombre d'années observées).

#### b/ Ecart-type

L'écart type ( $\sigma$ ) est un paramètre statistique souvent utilisé, qui précise la dispersion de la série de valeurs autour de la moyenne et traduit les fluctuations de la série (formule III.2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (\text{III.2})$$

#### c/ Coefficient de variation

Le phénomène de variabilité interannuelle des modules pluviométriques bien exprimé par le coefficient de variation ( $C_v$ ) traduit la dispersion relative des pluies (formule III.3).

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (\text{III.3})$$

Les valeurs extrêmes influencent l'écart-type et le coefficient de variation qui augmente dans le sens inverse de la moyenne. Les grandes valeurs du coefficient de variation sont observées en saison estivale dans la quasi-totalité des stations avec une valeur extrême de 319,1 % à la station S18 au mois de juillet. Cette forte variabilité pendant les mois secs peut s'expliquer par la rareté des précipitations estivales et leurs caractères orageux. Les minimas du coefficient de variation sont enregistrés pendant les mois pluvieux avec une valeur minimale de 59,1 % au niveau de la station S8 au mois de décembre (Tableau III.5).



III.4.2. Distribution saisonnière des précipitations

L'étude du régime saisonnier est indispensable pour détecter les baisses et les hausses de régime pluviométrique. Les précipitations moyennes saisonnières des stations étudiées sont reportées dans le tableau III.6 et en figure III.7. Le déficit d'eau en été y apparaît très clairement. Les écarts de précipitations entre automne, hiver et printemps sont relativement réduits.

Tableau III.6 : Précipitations moyennes saisonnières des stations étudiées (1970/71 - 2014/15).

N°	Code	Nom	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Régime dominant
S1	111102	Meftah sidi boubekeur	86,6	101,9	91,4	14,8	HAPE
S2	111103	Ain el hadjar	95,1	125,0	105,9	22,5	HAPE
S3	111106	Kilometre 50	101,3	119,0	112,9	17,3	HPAE
S4	111112	Hammam rabi	85,4	92,1	83,0	14,6	HPAE
S5	111113	Djebel karous	82,0	104,7	100,8	16,8	HPAE
S6	111114	Rebahia ferme 917	82,5	91,7	85,7	15,5	HPAE
S7	111116	Sidi amar shgeo	93,9	115,6	105,3	14,3	HPAE
S8	111120	Ferme du syndicat	99,4	126,9	116,2	29,4	HPAE
S9	111128	Ain zerga ferme	98,5	109,3	103,0	20,8	AHPE
S10	111201	Oued taria	80,9	98,1	89,2	16,8	HPAE
S11	111203	Oum el djirane	77,2	111,6	99,1	18,3	HPAE
S12	111204	Ain tifrit	101,0	128,9	119,0	20,8	HPAE
S13	111205	Ain soltane	100,4	133,3	112,6	19,2	HAPE
S14	111208	Sidi mimoun	96,4	134,3	111,3	19,8	HPAE
S15	111209	Bled el beida	85,6	122,2	117,0	16,7	HPAE
S16	111210	Tamesna	87,2	126,6	106,7	24,1	HPAE
S17	111215	Domaine bencherit	98,2	107,7	106,8	19,3	APHE
S18	111217	Beniane	86,6	130,4	93,4	15,1	HPAE
S19	111219	Hasna domaine bouchikhi	103,8	142,7	115,8	16,3	HPAE
S20	111303	Barrage de ouizert	77,0	87,9	81,4	13,5	HPAE

H : Hiver; P : Printemps; A : Automne; E : Eté.

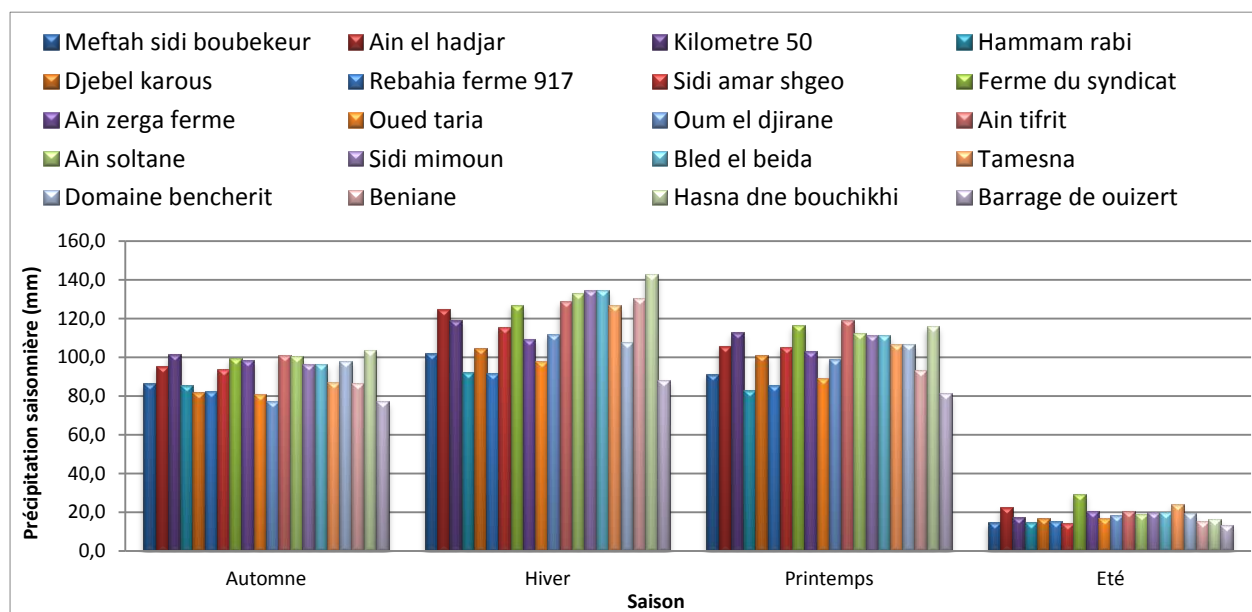


Figure III.7 : Précipitations moyennes saisonnières des stations étudiées bassin versant de l'oued Sahouat (1970/71 - 2014/15).

### III.4.2.1. Répartition spatiale des précipitations moyennes saisonnières (1970/71 - 2014/15)

La cartographie des précipitations à l'échelle saisonnière démontre une nette dominance des précipitations durant l'hiver, suivis par le printemps, l'automne et l'été en dernier, ceci en conformité avec les résultats trouvés en tableau (III.6). Les précipitations (Figure III.8) apparaissent légèrement plus fortes à l'est du bassin qu'à l'ouest au printemps, et légèrement supérieures au sud et sud-est du bassin qu'ailleurs en été.

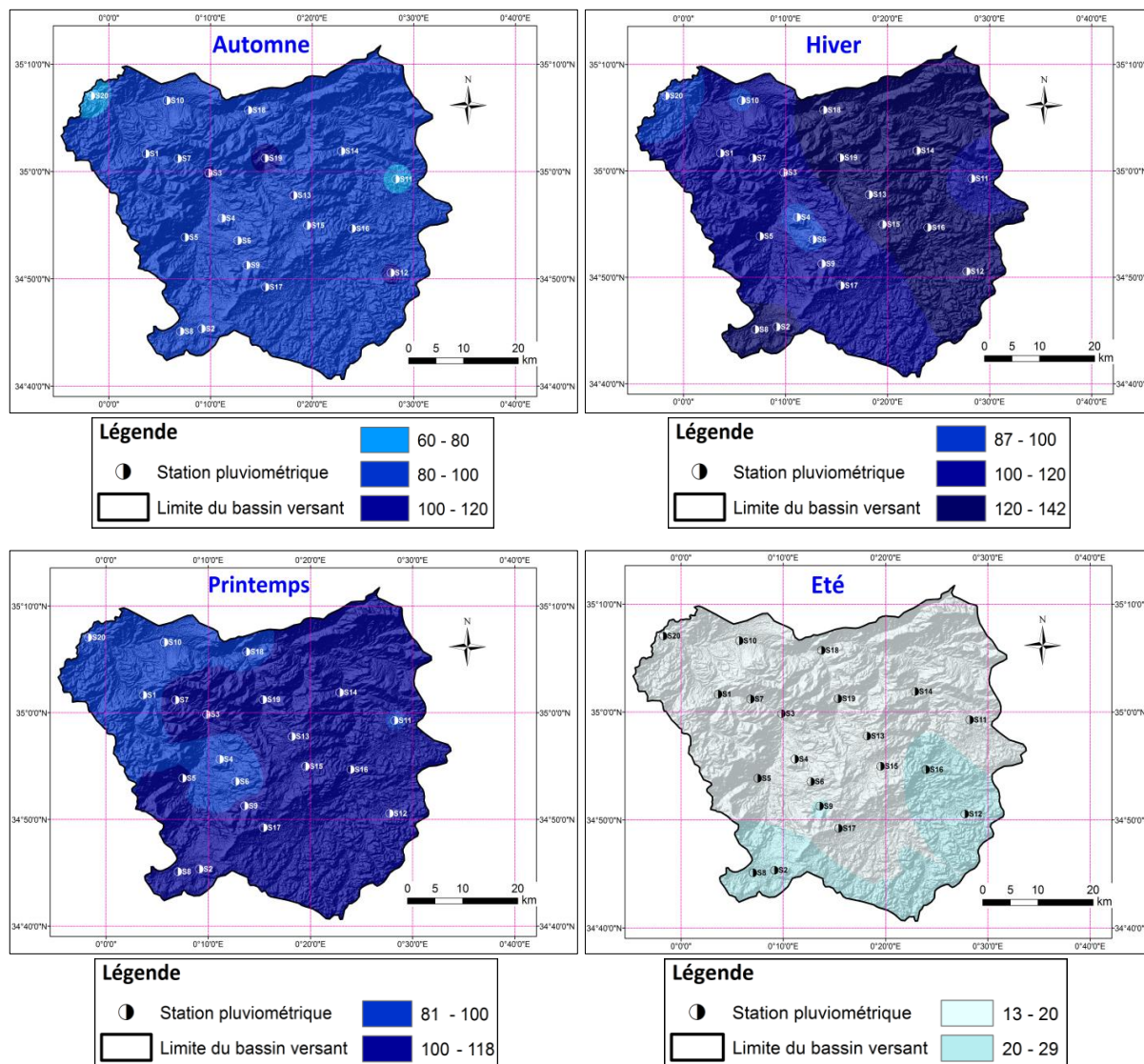


Figure III.8 : Cartes de distribution de la pluviométrie moyenne saisonnière (1970/71 - 2014/15).

### III.4.2.2. Régime pluviométrique saisonnier dominant

Pour la détermination du régime saisonnier dominant dans la région d'étude, on calcule le cumul des précipitations mensuelles de chaque saison (tableau III.7 et figure III.5), ensuite on procède à un classement de ces quatre saisons par ordre décroissant de la pluviométrie. Les

quatre initiales des saisons ainsi classées forment ce qu'on appelle "Indicatif saisonnier" (tableau III.7) et le régime qui présente le pourcentage le plus élevé est considéré comme dominant de la région.

**Tableau III.7 : Pourcentage des régimes saisonniers des stations retenues (1970/71 - 2014/15).**

S1	HAPE	HPAE	AHPE	PHAE	PAHE	APHE	PHEA	AHPE	HAEP	PHAE	AEHP	HPEA	
	20,0	15,6	15,6	15,6	11,1	4,4	4,4	4,4	2,2	2,2	2,2	2,2	
S2	HAPE	PAHE	HPAE	PHAE	AHPE	APHE	PEHA	AHEP	PHEA	HPEA			
	35,6	13,3	13,3	13,3	11,1	4,4	2,2	2,2	2,2	2,2			
S3	HPAE	PAHE	HAPE	AHPE	APHE	PAHE	PHAE	HPEA	PHEA	EAHP	PHAE		
	22,2	15,6	13,3	11,1	11,1	8,9	6,7	4,4	4,4	2,2	2,2		
S4	HPAE	PHAE	AHPE	HAPE	APHE	PHEA	PAHE	AEHP					
	22,2	20,0	17,8	15,6	13,3	6,7	2,2	2,2					
S5	HPAE	HAPE	PHAE	AHPE	PAHE	APHE	PHEA	HPEA	AHEP	HAEP	APHE	PAEH	PAEH
	17,8	17,8	15,6	11,1	8,9	6,7	6,7	4,4	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
S6	HPAE	HAPE	AHPE	APHE	PAHE	PHEA	APHE	PHAE	PAEH	PHEA	EPHA		
	24,4	15,6	13,3	13,3	6,7	6,7	6,7	4,4	4,4	2,2	2,2		
S7	HPAE	PHAE	AHPE	APHE	HAPE	PAHE	HPEA	HAPE	AEHP				
	28,9	17,8	13,3	13,3	8,9	8,9	4,4	2,2	2,2				
S8	HPAE	PHAE	HAPE	PAHE	AHPE	HPEA	APHE	PHEA	AHPE	APEH	AHPE	HEAP	EAHP
	22,2	15,6	13,3	13,3	8,9	6,7	4,4	4,4	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
S9	AHPE	HPAE	APHE	PHAE	PAHE	HAPE	HPEA	AHPE	EAHP	PHEA			
	20,0	20,0	13,3	11,1	11,1	11,1	4,4	4,4	2,2	2,2			
S10	HPAE	AHPE	PHAE	APHE	PAHE	PHEA	PAHE	HAPE	APEH	APHE			
	26,7	22,2	13,3	11,1	8,9	4,4	4,4	4,4	2,2	2,2			
S11	HPAE	PHAE	HAPE	PAHE	PHEA	APHE	HPEA	AHPE	APHE	APEH	HEAP	PAHE	
	22,2	20,0	17,8	11,1	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	2,2	2,2	2,2	
S12	HPAE	HAPE	APHE	PHAE	PAHE	AHPE	HAPE	HPEA	PEHA	EPHA			
	22,2	17,8	17,8	15,6	8,9	6,7	4,4	2,2	2,2	2,2			
S13	HAPE	HPAE	PHAE	AHPE	APHE	PAHE	PEHA	PHEA	PAEH	APEH			
	26,7	20,0	13,3	11,1	8,9	8,9	4,4	2,2	2,2	2,2			
S14	HPAE	HAPE	PHAE	PAHE	APHE	AHPE	PHEA	PAHE	EAHP	HAEP			
	26,7	22,2	13,3	8,9	8,9	6,7	4,4	4,4	2,2	2,2			
S15	HPAE	PHAE	HAPE	AHPE	PAHE	PHAE	PHEA	HPEA	APHE	PAEH	APHE		
	20,0	17,8	15,6	11,1	8,9	8,9	4,4	4,4	4,4	2,2	2,2		
S16	HPAE	PAHE	HAPE	APHE	PHEA	AHPE	PHAE	HPEA	EHAP	PAEH			
	35,6	17,8	15,6	6,7	6,7	4,4	4,4	4,4	2,2	2,2			
S17	APHE	AHPE	HAPE	PHAE	HPAE	PHEA	HPEA	PAHE	EAPH	PAEH			
	17,8	15,6	15,6	13,3	13,3	11,1	4,4	4,4	2,2	2,2			
S18	HPAE	AHPE	PAHE	PHAE	APHE	HAPE	PHEA	HPEA					
	42,2	17,8	11,1	11,1	6,7	6,7	2,2	2,2					
S19	HPAE	HAPE	AHPE	PAHE	PHAE	APHE	EHAP	AHEP	HAEP				
	33,3	17,8	11,1	11,1	11,1	8,9	2,2	2,2	2,2				
S20	HPAE	APHE	PHAE	HAPE	AHPE	PAHE	APHE	PHEA	HPEA	PAEH			
	20,0	17,8	13,3	13,3	11,1	6,7	6,7	4,4	4,4	2,2			

H : Hiver; P : Printemps; A : Automne; E : Eté.

D'après les résultats obtenus nous pouvons dire que le régime le plus dominant dans la zone d'étude est de type HPAE.

### III.4.2.3. Paramètres statistiques des séries pluviométriques saisonnières

En analysant le tableau des coefficients de variation pour chaque saison des 20 stations (Tableau III.8) étudiées on remarque que :

- Toutes les stations présentent de fortes variations avec une valeur maximale de 144,1% au niveau de la station S18, en Eté. Ces résultats sont en conformité avec les conclusions faites auparavant à l'échelle mensuelle.

- La valeur minimale est observée au printemps avec 43,4 % au niveau de la station S3.

Tableau III.8 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques saisonnières (1970/71 – 2014/15).

Station	Paramètre	Automne	Hiver	Printemps	Été	Station	Paramètre	Automne	Hiver	Printemps	Été
S1	Min.	2,2	20,2	0,0	0,0	S11	Min	3,8	2,3	1,0	0,0
	Max.	271,0	214,4	211,4	103,1		Max	238,4	498,8	243,8	70,1
	Moy.	86,6	101,9	91,4	14,8		Moy	77,2	111,6	99,1	18,3
	Ecart-type	55,4	44,5	52,8	19,5		Ecart-type	53,5	80,2	62,1	18,0
	Cv(%)	64,0	43,7	57,8	132,4		Cv(%)	69,3	71,9	62,6	98,6
S2	Min	0,7	24,4	12,3	0,0	S12	Min	1,0	2,9	13,9	0,0
	Max	251,1	253,7	281,1	101,0		Max	298,0	277,5	304,7	112,8
	Moy	95,1	125,0	105,9	22,5		Moy	101,0	128,9	119,0	20,8
	Ecart-type	55,9	57,5	65,3	23,6		Ecart-type	65,7	66,4	65,8	23,5
	Cv(%)	58,8	46,0	61,6	105,2		Cv(%)	65,0	51,6	55,3	113,0
S3	Min	2,5	38,0	0,0	0,0	S13	Min	1,0	1,1	0,0	0,0
	Max	325,2	257,2	306,8	111,2		Max	268,2	473,3	243,9	102,5
	Moy	101,3	119,0	112,9	17,3		Moy	100,4	133,3	112,6	19,2
	Ecart-type	68,5	51,7	65,1	21,8		Ecart-type	61,8	83,1	62,1	21,9
	Cv(%)	67,6	<b>43,4</b>	57,6	126,1		Cv(%)	61,6	62,4	55,1	114,0
S4	Min	0,0	12,0	0,0	0,0	S14	Min	8,5	26,1	0,0	0,0
	Max	279,7	219,0	213,5	65,2		Max	232,8	281,3	281,5	70,6
	Moy	85,4	92,1	83,0	14,6		Moy	96,4	134,3	111,3	19,8
	Ecart-type	55,2	50,2	50,4	15,8		Ecart-type	53,9	65,2	60,7	18,8
	Cv(%)	64,6	54,5	60,7	108,0		Cv(%)	55,9	48,6	54,5	95,2
S5	Min	0,0	24,9	0,0	0,0	S15	Min	0,0	20,3	15,0	0,0
	Max	298,0	267,0	239,0	101,4		Max	211,6	255,7	294,9	64,2
	Moy	82,0	104,7	100,8	16,8		Moy	85,6	122,2	117,0	16,7
	Ecart-type	58,7	56,8	62,0	19,2		Ecart-type	52,1	60,9	65,4	17,9
	Cv(%)	71,6	54,3	61,5	114,7		Cv(%)	60,8	49,9	55,9	107,1
S6	Min	0,9	2,6	10,5	0,0	S16	Min	2,3	34,5	14,6	0,0
	Max	283,8	254,3	227,6	96,6		Max	312,9	498,8	321,0	86,3
	Moy	82,5	91,7	85,7	15,5		Moy	87,2	126,6	106,7	24,1
	Ecart-type	68,0	59,0	57,2	21,2		Ecart-type	63,7	83,7	62,7	21,8
	Cv(%)	82,4	64,3	66,8	136,4		Cv(%)	73,1	66,1	58,8	90,2
S7	Min	4,8	21,2	0,0	0,0	S17	Min	0,0	28,2	32,6	0,0
	Max	277,3	224,4	228,9	98,5		Max	288,6	296,5	281,7	62,5
	Moy	93,9	115,6	105,3	14,3		Moy	98,2	107,7	106,8	19,3
	Ecart-type	60,9	54,3	59,0	20,4		Ecart-type	64,8	55,2	61,2	18,3
	Cv(%)	64,9	47,0	56,0	142,9		Cv(%)	66,0	51,2	57,3	94,5
S8	Min	5,0	25,1	0,0	0,0	S18	Min	0,0	17,6	6,4	0,0
	Max	273,9	241,0	267,3	125,4		Max	215,9	413,3	211,6	107,0
	Moy	99,4	126,9	116,2	29,4		Moy	86,6	130,4	93,4	15,1
	Ecart-type	56,9	56,4	64,4	27,3		Ecart-type	59,0	83,0	52,3	21,8
	Cv(%)	57,2	44,5	55,4	92,7		Cv(%)	68,1	63,7	56,0	<b>144,1</b>
S9	Min	7,1	26,8	0,0	0,0	S19	Min	5,3	25,9	0,0	0,0
	Max	274,8	282,3	290,0	92,7		Max	235,6	287,4	269,4	87,5
	Moy	98,5	109,3	103,0	20,8		Moy	103,8	142,7	115,8	16,3
	Ecart-type	54,7	53,5	60,3	18,7		Ecart-type	58,9	73,0	69,8	18,9
	Cv(%)	55,5	48,9	58,5	89,7		Cv(%)	56,7	51,2	60,3	116,1
S10	Min	0,7	12,0	1,1	0,0	S20	Min	4,2	18,5	10,5	0,0
	Max	204,7	228,3	251,7	96,5		Max	164,8	205,5	226,5	53,6
	Moy	80,9	98,1	89,2	16,8		Moy	77,0	87,9	81,4	13,5
	Ecart-type	48,4	49,8	52,8	21,6		Ecart-type	47,8	44,9	47,2	14,7
	Cv(%)	59,9	50,8	59,2	128,5		Cv(%)	62,0	51,1	58,0	109,1

### III.4.3. Distribution annuelle des précipitations

La cartographie des précipitations moyennes annuelles du bassin versant entre 1970/71 et 2014/15 révèle une valeur moyenne de 329 mm (Figure III.9)

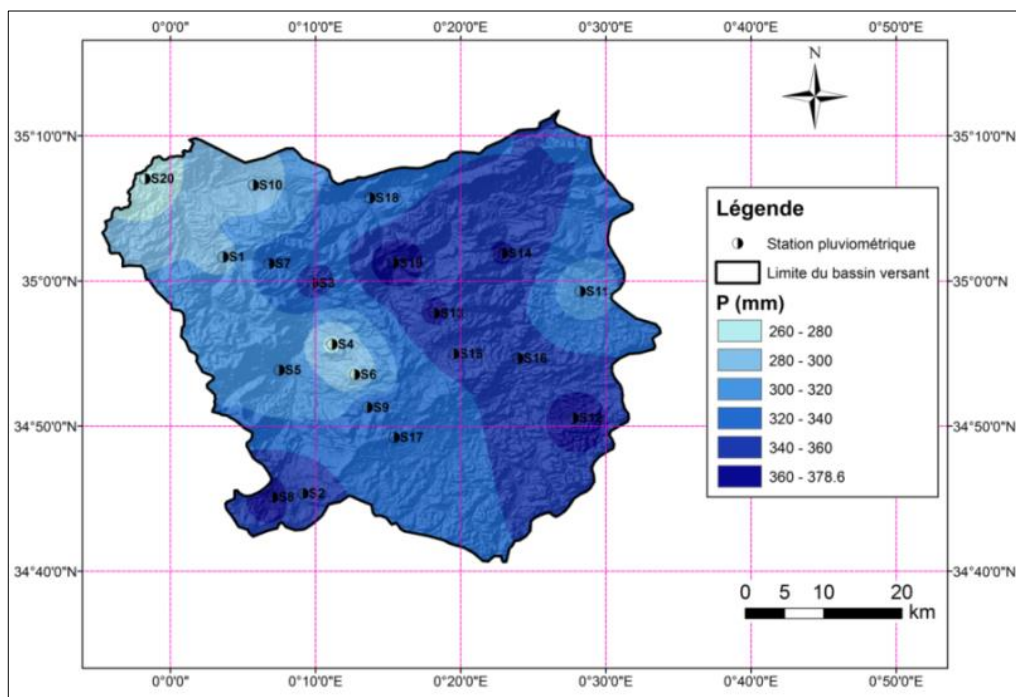


Figure III.9 : Carte de distribution de la pluviométrie moyenne annuelle (1970/71 – 2014/15).

L'analyse des variations interannuelles des précipitations révèle un coefficient de variation qui oscille entre 30 % au niveau de la station S9 et 53,2 % au niveau de la station S6 (le CV moyen est de 37,8%). Cette étude statistique montre que le coefficient de variation est inversement proportionnel à l'échelle étudiée car la variation des précipitations annuelles est inférieure à celle des variations mensuelles (Tableau III.9).

Tableau III.9 : Paramètres statistiques des séries pluviométriques annuelles (1970/71 – 2014/15).

Station	Min	Max	Moy	Ecart-type	Cv(%)
S1	111,6	542,9	294,7	95,5	32,4
S2	74,7	646,2	348,4	139,8	40,1
S3	170,7	651,5	350,5	110,6	31,6
S4	33,3	545,1	273,0	109,9	40,3
S5	117,9	627,3	304,3	121,9	40,1
S6	46,1	708,0	275,4	146,6	<b>53,2</b>
S7	107,1	679,4	328,8	115,0	35,0
S8	129,6	650,1	371,9	120,5	32,4
S9	163,0	572,1	331,8	99,6	<b>30,0</b>
S10	73,9	549,6	284,4	96,6	34,0
S11	63,3	884,7	304,8	144,7	47,5
S12	53,5	690,9	369,6	131,0	35,4
S13	113,2	821,3	365,4	141,0	38,6
S14	153,1	691,8	361,9	114,8	31,7
S15	141,2	643,3	341,5	127,3	37,3
S16	127,7	934,0	344,6	159,3	46,2
S17	118,4	554,0	331,2	113,1	34,2
S18	66,3	760,9	325,5	152,2	46,8
S19	119,0	661,8	378,5	130,7	34,5
S20	73,0	494,6	259,9	91,1	35,0



### **III.5.3.1. Variation de la pluviométrie interannuelle**

Afin d'évaluer la variabilité interannuelle des stations choisies, on procède à l'analyse des courbes de tendances (figure III.10). Les graphes montrent une variation interannuelle très élevée avec une tendance à la hausse illustrée par les pentes positives des courbes de tendance sur 16 des 20 stations (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S11, S12, S13, S14, S15, S16, S18 et S20) et des tendances à la baisse illustrée par des pentes négatives pour les 4 autres stations (S9, S10, S17 et S19). Les tendances baissières ont été obtenues sur des stations sur lesquelles la baisse de précipitations semble avoir été plus forte que sur les autres pendant une période assez longue de la fin des années 1970 au milieu des années 2000 (environ de 1976 à 2006) par rapport au début de période (1970-71 à 1975-76). Ce constat visuel sur les courbes demande à être prolongé, vérifié et précisé : cette étude est réalisée dans le paragraphe suivant.

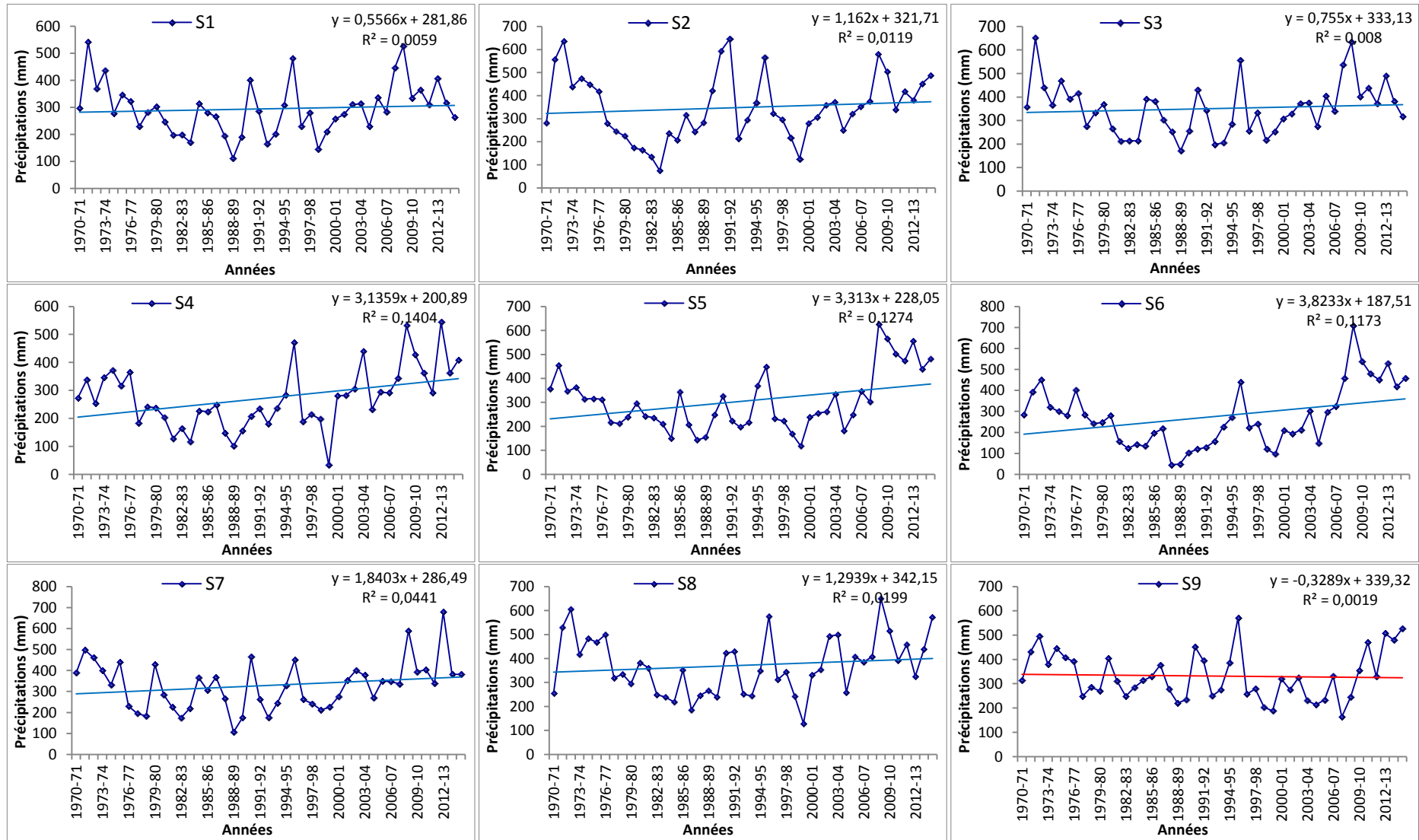


Figure III.10 : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance des stations étudiées dans le bassin versant de l'oued Sahouat (1970/71 – 2014/15).

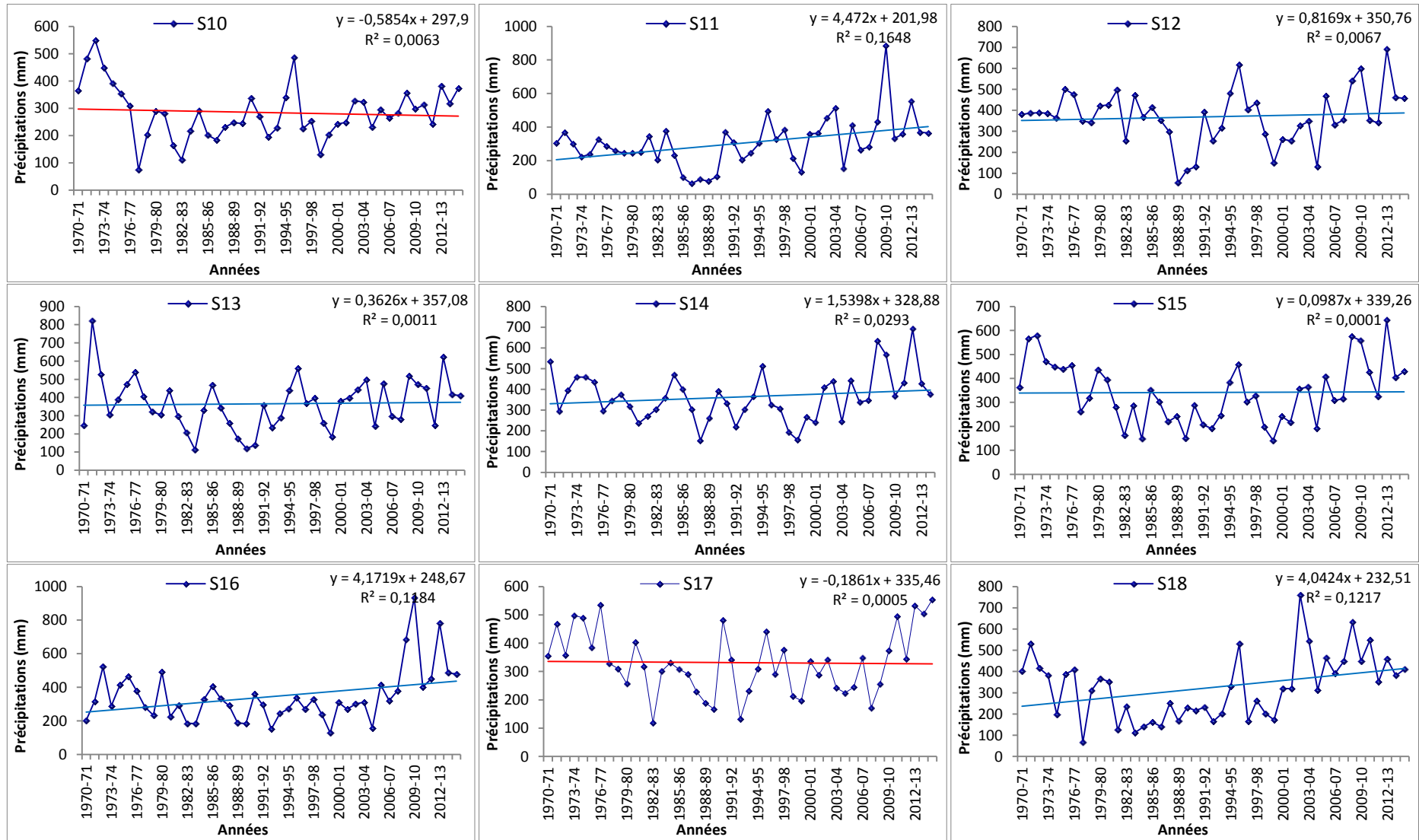


Figure III.10 : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance des stations étudiées dans le bassin versant de l'oued Sahouat (1970/71 – 2014/15) (suite).

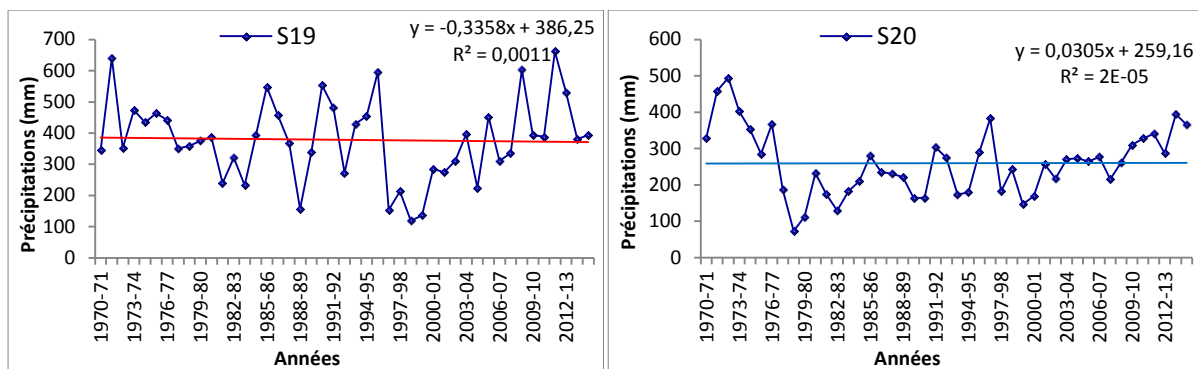


Figure III.10 : Variabilité des précipitations annuelles et droites linéaires de tendance des stations étudiées dans le bassin versant de l'oued Sahouat (1970/71 – 2014/15) (suite et fin).

### III.5. Tests statistiques de détection des ruptures dans les séries pluviométriques

#### III.5.1. Définition d'une rupture

D'un point de vue statistique, une rupture peut être définie par un changement dans la loi des probabilités de la série chronologique à un instant donné, le plus souvent inconnu. Nous avons donc appliqué plusieurs tests statistiques de détection des ruptures sur les séries annuelles de précipitations.

#### III.5.2. Test de Pettitt (1979)

Ce test non-paramétrique est réputé pour sa robustesse, il dérive du test de Mann-Whitney. L'absence d'une rupture dans la série chronologique  $X$  constitue l'hypothèse nulle  $H_0$ . La statistique du test est donnée par les équations III.4 et III.5 :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (\text{III.4})$$

avec:

$$i = 1, N \text{ et } j = t + 1, N, N = ???$$

$$D_{ij} = \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (\text{III.5})$$

Où :

$$\text{sgn}(Z) = 1 \text{ si } Z > 0;$$

$$\text{sgn}(Z) = 0 \text{ si } Z = 0;$$

$$\text{sgn}(Z) = -1 \text{ si } Z < 0.$$

Pettitt propose de tester l'hypothèse nulle en utilisant la statistique  $K_N$ , définie par le maximum en valeur absolue de  $U_{t,N}$  pour  $t$  variant de 1 à  $N-1$ . A partir de la théorie des rangs,

Pettitt montre que si  $k$  désigne la valeur de  $K_N$  prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur  $k$  est donnée approximativement par la relation III.6 :

$$\text{Prob}(K_N > K) \approx 2\exp\left(-\frac{6K^2}{N^3+N^2}\right) \quad (\text{III.6})$$

Pour un risque  $\alpha$  de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à  $\alpha$ , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment où est observé  $\max |U_{t,N}|_{t=1, N-1}$  (Lespinas, 2008).

### III.5.3. Statistique de Buishand (1982, 1984)

Ce test est basé sur les hypothèses de normalité et de constance de la variance de la série. En supposant une distribution a priori uniforme pour la position du point de rupture, la statistique du test est donnée par les formules III.7 et III.8 :

$$U = (N(N+1))^{-1} \sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{S_k}{D_x}\right)^2 \quad (\text{III.7})$$

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad (\text{III.8})$$

où  $K=1,2,3\dots N$  et  $D_x$  est l'écart-type de la série.

L'hypothèse nulle est l'absence de rupture dans la série. Si l'hypothèse nulle est rejetée, le test ne propose pas une estimation de la date de rupture. Des valeurs critiques de la statistique  $U$  sont données par Buishand (1982, 1984) à partir d'une méthode de Monte-Carlo. Cette méthode donne moins de poids aux premières et aux dernières valeurs de la série et s'avère donc plus performante pour tout changement de moyenne intervenant au cours de la série. La statistique  $U$  est une statistique robuste qui reste valide même pour des distributions de la variable étudiée qui s'écartent de la normalité.

### III.5.4. Procédure bayésienne de Lee et Heghinian (1977)

Cette procédure repose sur le modèle suivant :

$$x_i \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & \text{avec } i = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Les  $\varepsilon_i$  sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ . Les variables  $\tau$ ,  $\mu$ ,  $\delta$  et  $\sigma$  sont des paramètres inconnus.  $\tau$  et  $\delta$  représentent respectivement la position de la rupture et l'amplitude d'un changement éventuel de la moyenne. Le

changement éventuel, position et amplitude, correspond au mode des distributions a posteriori de  $\tau$  et  $\delta$ . Cette procédure fournit donc la probabilité que le changement se produise au moment  $\tau$  dans une série où on suppose a priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé. De même, elle donne une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement ait la valeur  $\delta$ . L'estimation est d'autant plus précise que la dispersion est faible (Lespinas, 2008).

### III.5.5. Procédure de segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989)

Cette méthode consiste à découper la série en  $m$  segments ( $m > 1$ ) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. La segmentation est définie de la manière suivante :

Toute série  $x_i$ , où  $i = i_1, i_2$  avec  $1 \leq i_1 < i_2 \leq N$ , constitue un segment de la série initiale des  $(x_i)$  avec  $i = 1, 2, \dots, N$ . Toute partition de la série étudiée initiale en  $m$  segments constitue une segmentation de rang  $m$  définie par :

- $i_k$ ,  $k=1, 2, \dots, m$  le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du  $k^{\text{ème}}$  segment;
- $n_k = i_k - i_{k-1}$  la longueur du  $k^{\text{ème}}$  segment;
- $\bar{x} = \frac{\sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} x_i}{n_k}$  la moyenne du  $k^{\text{ème}}$ .

La quantité  $D_m = \sum_{k=1}^m D_k = \sum_{k=1}^m \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i=i_k} (x_i - \bar{x})^2$  est l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée.

La segmentation retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure est celle qui minimise  $D_m$ . Cette condition est nécessaire mais insuffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre la contrainte suivante, selon laquelle les moyennes de 2 segments contigus doivent être significativement différentes. La pertinence de chaque nouvelle rupture est testée à l'aide du test de Scheffé (1959).

### III.5.6. Programme « Khronostat »

Le logiciel **Khronostat** (Boyer, 2002) développé par l'équipe IRD d'HSM à Montpellier a été particulièrement utile dans la mise en œuvre des procédures statistiques mentionnées ci-dessus. Il permet notamment de visualiser et de stocker les résultats sous format numérique mais aussi graphique. En particulier, la visualisation des ellipses de contrôle

associées au test de Buishand s'est avérée indispensable au repérage des dates de rupture. Le tableau (III.10) résume le calcul des tests de ruptures pour les 20 stations pluviométriques durant la période (1970/71 - 2014/15).

**Tableau III.10** : Résultats des tests statistiques (dont les années de ruptures) dans les séries pluviométriques étudiées.

St.	Test de Buishand	Test de Pettitt	Moyenne avant la rupture	Moyenne après la rupture	Rapport entre les deux Moy. (%)	Test de Lee et Heghinian	Moyenne avant la rupture	Moyenne après la rupture	Rapport entre les deux moy. (%)	Test de Hubert	Moyenne avant la rupture	Moyenne après la rupture	Rapport entre les deux moy. (%)
S1	Non	Non	/	/	/	1973	411,6	283,2	-45,3	1973	411,6	261,8	-57,2
										2006	261,8	371,5	29,5
S2	Non	Non	/	/	/	1976	465,2	326,9	-42,3	Non	/	/	/
S3	Non	Non	/	/	/	2006	329,9	434	24,0	1976	441,5	298,9	-47,7
										2004	298,9	430,9	30,6
S4	Non	1999	236,3	345,6	31,6	2006	246,2	396,0	37,8	1976	323,3	211,3	-53,0
										2001	211,3	372,0	43,2
S5	Non	2005	261,5	453,8	42,4	2007	264,4	520,4	49,2	1976	351,7	244,6	-43,8
										2001	244,6	520,3	53,0
S6	Non	2004	221,1	465,5	-45,3	2005	223,2	484,3	-45,3	1980	316,6	131,0	-141,7
										1992	131,0	250,6	47,7
										2007	250,6	511,3	51,0
S7	Non	2000	296,6	401,0	26,0	2007	306,3	452,9	32,4	1975	420,5	284,8	-47,6
										2007	284,8	452,9	37,1
S8	Non	2001	341,7	446,4	23,5	2001	341,7	446,4	23,5	1976	465,3	306,9	-51,6
										2001	306,9	446,4	31,3
S9	Non	Non	/	/	/	2011	319,4	504,8	36,7	1976	409,2	295,4	-38,5
										2009	295,4	462,7	36,2
S10	Non	1976	413,9	261,2	-58,5	1974	447	264,7	-68,9	1975	431,4	262,4	-64,4
S11	Non	Non	/	/	/	Non	/	/	/	2008	297,8	884,7	66,3
										2009	884,7	395,6	-123,6
S12	Non	Non	/	/	/	2007	347,1	491,6	29,4	1987	393,0	99,2	-296,2
										1990	99,2	385,6	74,3
S13	Non	Non	/	/	/	1972	532,1	353,5	-50,5	Non	/	/	/
S14	Non	2001	330,2	439,7		2007	336,6	499,1	32,6	2007	336,6	499,1	32,6
S15	Non	1980	429,9	312,9	-37,4	2007	316,1	479,4	34,1	1976	474,0	280,4	-69,0
										2007	280,4	479,4	41,5
S16	Non	2004	290,8	532,9	45,4	2007	297,2	602,2	50,6	2007	297,1	808,9	63,3
										2009	808,9	519,4	-55,7
S17	Non	Non	/	/	/	2009	312,8	485,9	35,6	1976	446,4	284,3	-57,0
										2009	284,3	485,9	41,5
S18	Non	2001	265,5	478,2	44,5	2001	265,5	478,2	44,5	1976	388,8	231,0	-68,3
										2001	231,0	484,0	52,3
S19	Non	Non	/	/	/	2007	360	479,1	24,9	Non	/	/	/
S20	Non	1976	384,1	236,9	-62,1	1976	384,1	236,9	-62,1	1976	384,1	218,1	-76,1
										2008	218,1	337,4	35,4

St. : Stations pluviométriques choisies

Les résultats du test de Hubert sont particulièrement instructifs car ils quantifient, station par station, ce que nous avons visualisé en figure III.9 dans l'étude des tendances sur l'ensemble de la période d'étude. Les 4 stations sur lesquelles nous avons obtenu une tendance générale très légèrement négative mettaient surtout en évidence un découpage de la période d'étude en trois grandes périodes : une première période de pluies importantes

jusque vers le milieu des années 1970, une dernière période de pluies à nouveau abondantes dans les années 2000, et une période intermédiaire plus sèche. Le test de Hubert nous permet de vérifier que ce comportement a été quasiment général au niveau du bassin versant. A l'exception des stations S2, S13 et S19, les séries de mesure font apparaître au minimum une des deux ruptures (5 stations), sinon les deux (12 stations). L'année de la première rupture s'échelonne entre 1973 et 1980, autour de 1976 (année de rupture pour 9 stations). L'année de la deuxième rupture s'échelonne entre 2001 et 2009 autour de 2007 (année de rupture pour 4 stations).

Les tests statistiques de Buishand, Pettitt, Lee et Heghinian semblent moins adaptés que celui de Hubert pour analyser une telle série temporelle qui comporte le plus souvent deux ruptures. Il est intéressant de noter que le test de Buishand n'apporte aucune information, que le test de Pettitt permet d'identifier des ruptures sur 11 stations (3 ruptures avant 1980, 8 après 1999), et que le test de Lee et Heghinian permet d'identifier une année de rupture pour 19 stations sur 20 (5 pour la décennie des années 1970, 14 pour la décennie des années 2000). Il est particulièrement instructif de voir que là où le test de Hubert ne concluait à aucune rupture claire, le test de Lee et Heghinian a quand même identifié une rupture (en 1976 à la station S2, en 1972 à la station S13 et en 2007 à la station S19).

Ces résultats nous montrent donc que, sur notre bassin versant, avec la complexité de la variation interannuelle des précipitations qui ont diminué pendant une période d'une trentaine d'années, les tests d'Hubert et de Lee et Heghinian sont les plus aptes à nous restituer une information claire et quantifiée. Ces informations entre elles sont cohérentes entre elles. Elles esquissent une variation de la pluviométrie sur la région tout à fait en accord avec les observations réalisées sur des bassins versants adjacents. La période de sécheresse accentuée au cours des années 1970 a même provoqué parfois des changements de régime hydrologique dans la décennie qui a suivi, comme sur l'oued Abd (passé de pérenne à intermittent, Achite et Ouillon, 2016). L'augmentation de température moyenne de 1.6°C entre 1977-1979 et 2000-2006 a été rapportée par Dahmani et Meddi (2009) sur le bassin de l'oued Fekan. La sécheresse accentuée au cours des années 1970 en Algérie a également été analysée par Meddi et Meddi (2009).



### III.6. Etude du régime hydrométrique

#### III.6.1. Choix des stations

Le choix des stations est basé essentiellement sur les critères ci-dessous désignés :

- La disponibilité des données hydrométriques (débit liquide instantané, débit moyen journalier et concentrations instantanées);
- L'accessibilité aux données hydrométriques par les services de l'A.N.R.H.;
- La durée des informations disponibles;
- La situation stratégique de la station hydrométrique qui contrôle le maximum des eaux transitant au barrage de Ouizert (grande superficie de drainage) (Figure III.11).

Nous avons ainsi sélectionné deux stations : la station de Oued Taria (H1) et la station de Sidi Boubeker (H2) sur l'oued Saïda (Tableau III.11).

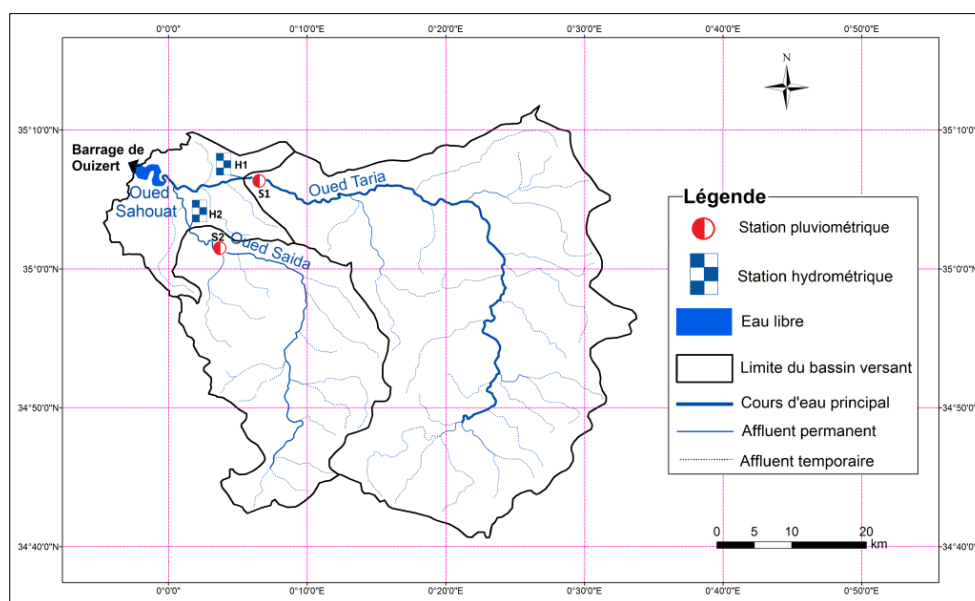


Figure III.11 : Bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert.

#### III.6.2. Période d'étude

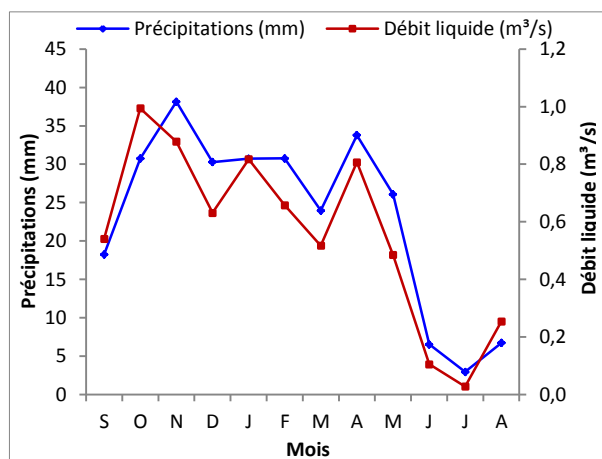
La période d'étude porte essentiellement de l'année 1991/92 jusqu'à l'année 2012/13 (date autorisée par les services de l'ANRH).

Tableau III.11 : Caractéristiques générales des stations hydrométriques mises en étude.

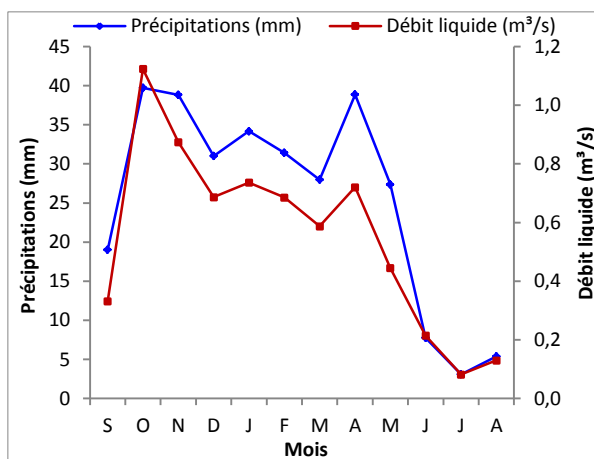
N°	Nom de la station	Code de la station	Oued	Wilaya	Coordonnées		Superficie (km <sup>2</sup> )	Période d'étude
					Long. (°) (')	Lat. (°) (')		
H1	Oued Taria	11 12 01	Taria	Mascara	0°07'E	35°10'N	1350	1991/92 – 2012/13
H2	Sidi Boubekeur	11 11 29	Saïda	Saïda	0°02'E	35°05'N	543	1991/92 – 2012/13

### III.6.3. Précipitation/débit liquide

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles des deux stations étudiées à savoir : l'oued Taria (S1) et Sidi Boubeker (S2) révèlent deux périodes bien distinctes, une période humide allant de Septembre à Mai et une période sèche allant de Juin à Août. L'analyse des débits liquides des deux stations hydrométriques, montre un comportement presque proportionnel avec les précipitations (Figure III.12 et Figure III.13).



**Figure III.12 :** Evolution annuelle de la pluviométrie de la station de l'oued Taria et du débit liquide de la station hydrométrique de l'oued Taria (1991/92 - 2012/13).



**Figure III.13 :** Evolution mensuelle de la pluviométrie de la station de Sidi Boubeker et du débit liquide de la station hydrométrique de Sidi Boudeker (1991/92 - 2012/13).

L'analyse des précipitations annuelles de la station pluviométrique (Figure III.14) de l'oued Taria (1991/92 - 2012/13) révèle un minimum de 129 mm (1998/99) et un maximum de 486 mm (1995/96) ce qui reflète une forte variation interannuelle, la pluviométrie moyenne interannuelle s'élève à 278 mm. Les années de sécheresse consécutives les plus marquantes sont situées entre (1996/97) et (2001/02). Le débit liquide de la station hydrométrique (H1) moyen annuel est de 0,55 m³/s avec un minimum de 0,12 m³/s (2006/07) et un maximum de 1,51 m³/s (2012/13). Ses variations interannuelles présentent un coefficient de variation  $Cv = 84 \%$ .

Pour la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13) l'irrégularité interannuelle des précipitations (Figure III.15) est marquée par un minimum de 145,1 mm (1998/99), un maximum de 527,2 mm (2008/09) et une moyenne interannuelle de 309,7 mm. Les débits liquides connaissent une tendance à la hausse et de même pour les précipitations. Le débit moyen annuel est de 0,55 m³/s soit presque identique à celui de la station de l'oued Taria, avec un minimum de 0,15 m³/s (2011/12) et un maximum de 1,51 m³/s (2012/13). La

variation interannuelle des débits liquides se caractérise par un coefficient de variation  $Cv = 79\%$ .

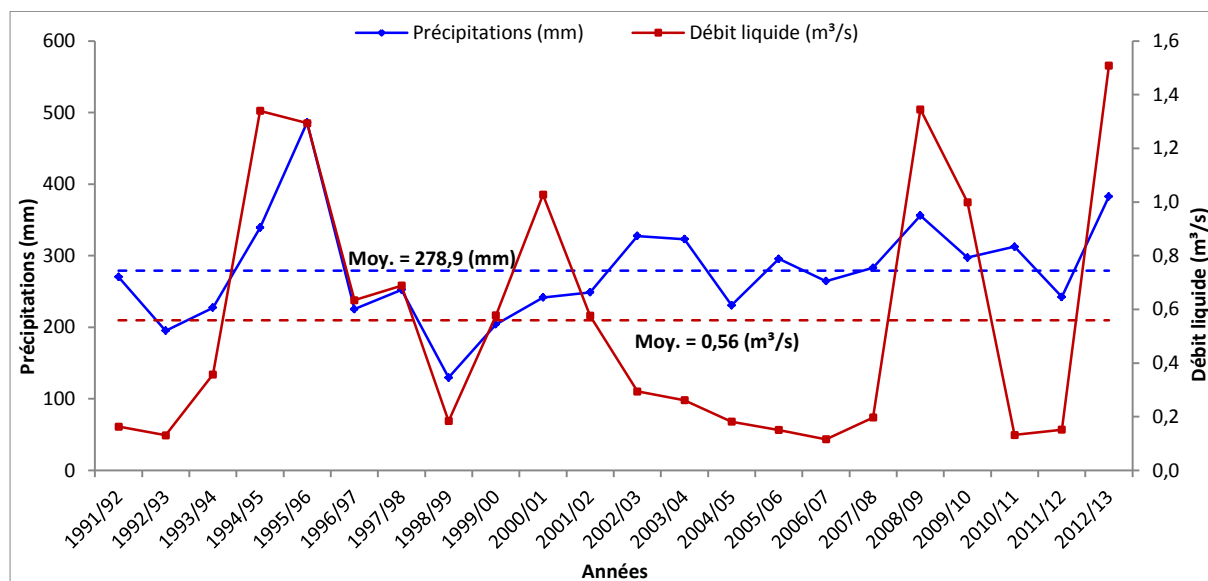


Figure III.14 : Evolution annuelle de la pluviométrie de la station de l'oued Taria et du débit liquide de la station hydrométrique de l'oued Taria (1991/92- 2012/13).

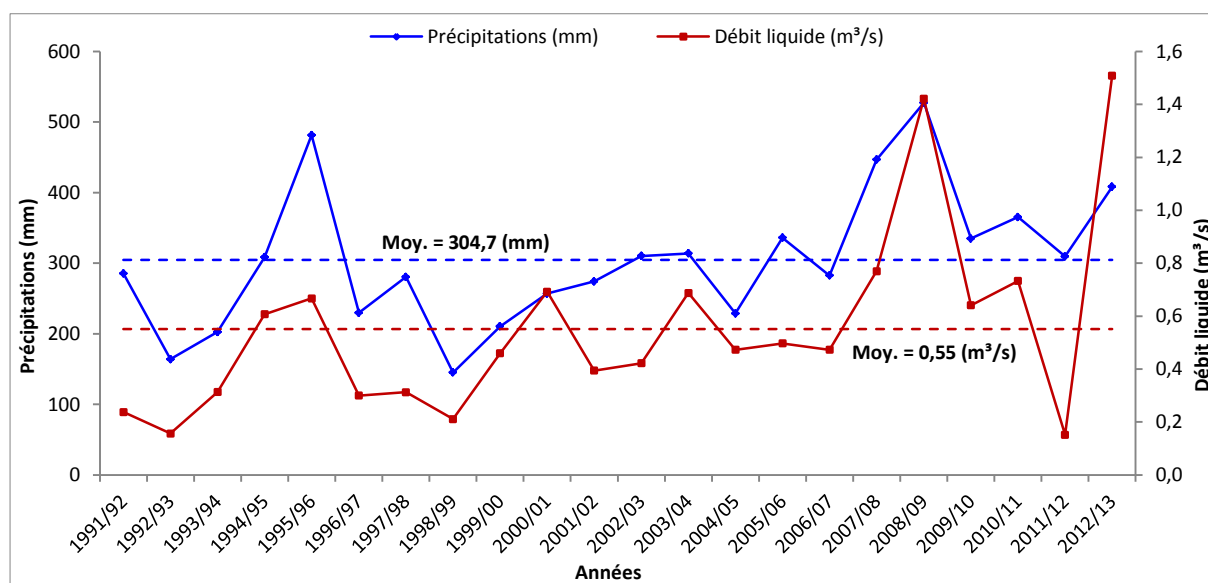


Figure III.15 : Evolution annuelle de la pluviométrie de la station de Sidi Boubeker et du débit liquide de la station hydrométrique de Sidi Boubeker (1991/92 – 2012/13).

Sur ces deux stations, on note une évolution semblable à l'ensemble du bassin, avec des précipitations qui augmentent au cours de la décennie des années 2000 par rapport aux années 1980 et 1990.

Le sous-bassin de l'oued taria draine une superficie de 1350 km<sup>2</sup> au droit de la station (H1) avec un débit moyen interannuel de 0,56 m<sup>3</sup>/s, par contre le sous-bassin de l'oued Saïda au droit de la station (H2) draine une superficie de 543 km<sup>2</sup> avec un débit interannuel de 0,55 m<sup>3</sup>/spresque identique, ceci revient au débit d'eau usée abondant rejeté au niveau de la station de Sidi Boubeker durant toute l'année (Photos III.1).



Photos III.1 : Ecoulement des eaux usées en période estivale au niveau de l'oued Saïda.

Photos, TOUBAL A. K. (25/07/2018)

#### III.6.4. Paramètres statistiques des débits liquides des stations étudiées

L'étude statistique des débits liquides au niveau des stations hydrométriques étudiées montre une variation bien distincte durant les mois de l'année, car le coefficient de variation augmente durant la saison estivale jusqu'à atteindre son maximum au mois de juillet avec une valeur de 300 % (station de l'oued Taria) par contre la variation maximale est observée au niveau de la station de Sidi Boubeker au mois d'aout d'où elle atteint une valeur de 200 % (Tableau III.12).

Tableau III.12 : Paramètres statistiques des débits liquides moyens mensuels et annuels des deux stations : Oued Taria et Sidi Boubeker (1991/92 – 2012/13).

Oued taria													
Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Annuel
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Max	4,8	6,3	4,4	3,9	5,2	3,3	1,9	5,6	3,2	1,2	0,2	3,6	1,5
Moy	0,5	1,0	0,9	0,6	0,8	0,7	0,5	0,8	0,5	0,1	0,0	0,3	<b>0,56</b>
Ecart-type	1,1	1,6	1,4	0,9	1,2	0,9	0,7	1,4	0,8	0,3	0,1	0,8	0,5
Cv(%)	220,0	160,0	155,6	150,0	150,0	128,6	140,0	175,0	160,0	300,0	100,0	266,7	89,3
Sidi Boubeker													
Paramètre	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Annuel
Min	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
Max	2,3	6,9	4,4	2,0	2,6	1,7	1,6	5,6	1,9	1,0	0,4	0,7	1,5
Moy	0,3	1,1	0,9	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	<b>0,55</b>
Ecart-type	0,5	1,7	0,9	0,4	0,6	0,5	0,5	1,2	0,5	0,3	0,1	0,2	0,4
Cv(%)	166,7	154,5	100,0	57,1	85,7	71,4	83,3	171,4	125,0	150,0	100,0	200,0	72,7

III.6.5. Tendances des débits liquides moyens annuels

Les tendances des débits moyens annuels des deux stations étudiées (Figures III.16 et III.17) montrent une tendance à la hausse des deux stations, la station de Sidi boubeker se caractérise par une tendance nettement plus supérieure que ce de l’oued Taria avec une pente positive de 0,03, la station de l’oued taria détient un coefficient de regression presque nul.

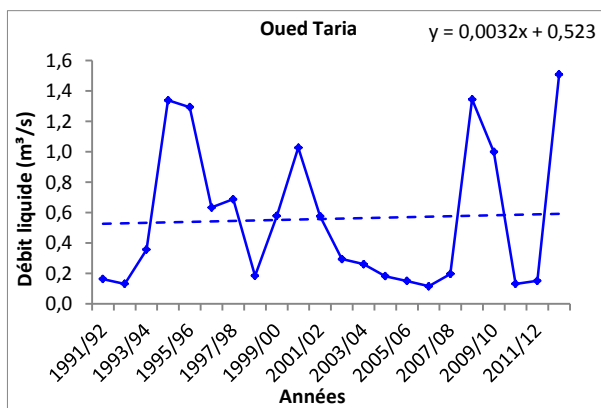


Figure III.16 : Tendances des débits liquides moyens annuels à la station d’oued Taria (1991/92 - 2012/13).

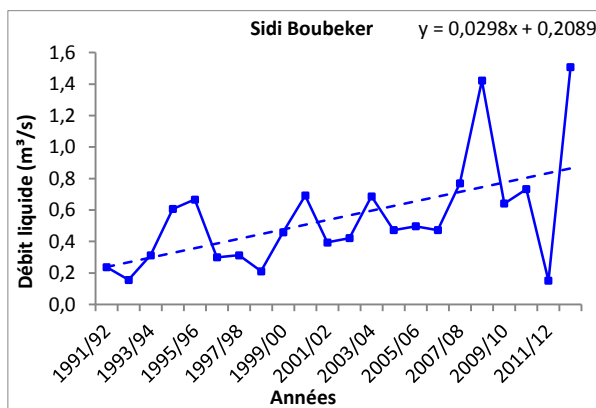


Figure III.17 : Tendances des débits liquides moyens annuels à la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13).

### III.6.6. Débits liquides moyens saisonniers

L'analyse des débits liquides moyens saisonniers des stations de jaugeage (Figures III.18 et III.19) montre que la saison automnale est la plus dominante pour les deux stations, ce qui augmente la forte susceptibilité d'avoir une érosion en cette saison caractérisée par des averses éclaircies et des conditions de couverture végétale qui favorise les pertes en sol.

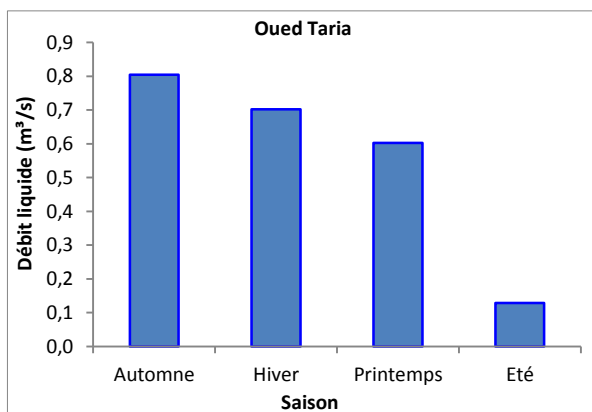


Figure III.18 : Débits liquides moyens saisonniers à la station d'oued Taria (1991/92- 2012/13).

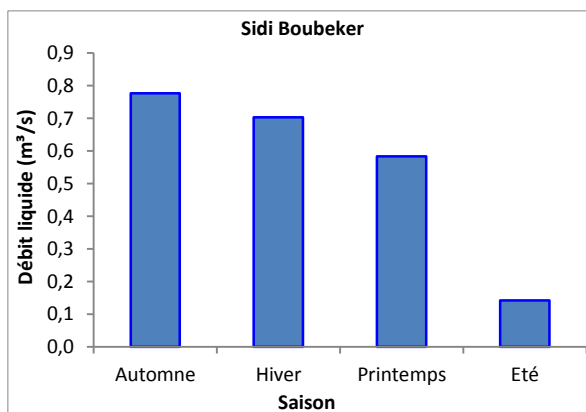


Figure III.19 : Débits liquides moyens saisonniers à la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13).

### III.6.7. Etude des extrêmes (débits max/débits min)

Les variations des débits liquides maximum au niveau des stations hydrométriques montrent une irrégularité remarquable au niveau de la station de Sidi Boubeker avec un  $Cv=84,5\%$ . La station de l'oued Taria montre un coefficient de variation  $Cv=68,6\%$  (Tableau III.13). La tendance des débits extrêmes au niveau de la station de Sidi boubeker est en augmentation avec le temps à l'encote de la station de l'oued Taria. Il faut noter que la station de Sidi Boubeker est alimentée par un débit d'eau usée relativement important. Le maximum est observé au niveau de la station de Sidi boubeker en 2000/01 avec un débit de  $520 \text{ m}^3/\text{s}$ , la valeur maximale de l'oued Taria est de  $385 \text{ m}^3/\text{s}$  en 2008/09 (Figure III.20).

Tableau III.13 : Paramètres statistiques des valeurs extrêmes journalières des deux stations hydrométriques étudiées.

Paramètre	Oued Taria		Sidi Boubeker	
	Qmin (m³/s)	Qmax (m³/s)	Qmin (m³/s)	Qmax (m³/s)
Min	0	21,2	0	7,9
Max	0	385,0	0	520,0
Moy	0	128,3	0	170,2
Ecart-type	/	88,0	/	143,9
Cv(%)	/	68,6	/	84,5

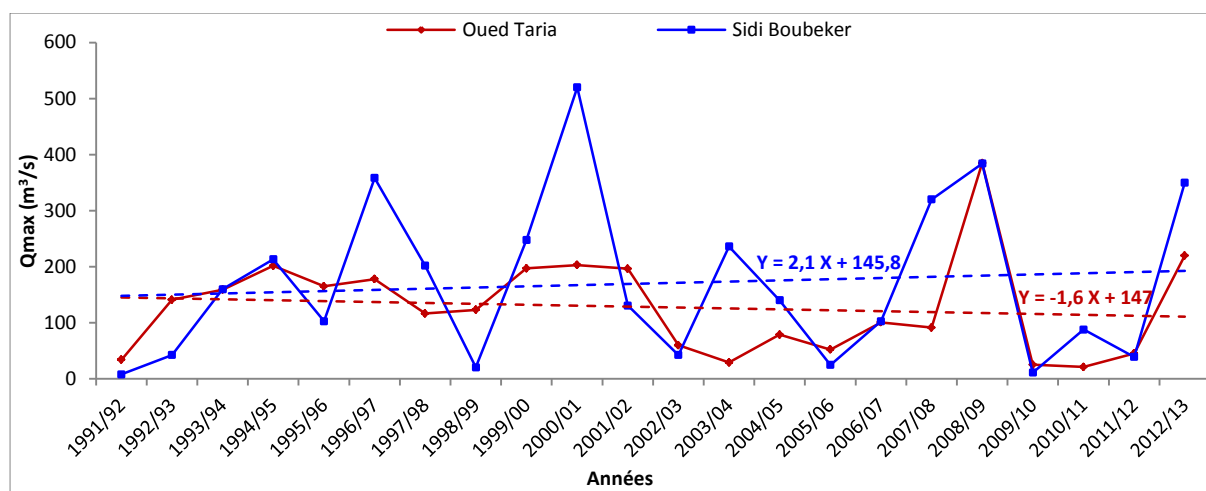


Figure III.20 : Valeurs extrêmes journalières des deux stations hydrométriques étudiées (1991/92 - 2012/13).

### III.6.8. Tests de rupture des séries de débits liquides des stations hydrométriques étudiées

Les tests de rupture des séries des débits liquides moyens annuels des deux stations étudiées sont représentés dans le tableau III.14.

Tableau III.14 : Résultats des tests statistiques (dont les années de ruptures) dans les séries hydrométriques étudiées.

St.	Nom de la station	Test de Buishand	Test de Pettitt	Test de Lee et Heghinian	Moyenne avant la rupture	Moyenne après la rupture	Rapport entre les deux moy. (%)	Test de Hubert
H1	Oued Taria	Non	Non	Non	/	/	/	Non
H2	Sidi Boubeker	Non	Non	2006	0,43	0,81	47,33	Non

St. : Station Hydrométrique étudiée.

Les différents tests de détection de ruptures appliqués au niveau des stations hydrométriques montrent que la station (H1) ne présente aucune rupture à travers la chronologie étudiée, par contre la station (H2) enregistre une rupture en 2006 avec un rapport entre les deux moyennes positives évaluées à 47,33%.

### III.7. Conclusion

Dans cette partie nous pouvons conclure que l'étude des précipitations moyennes de vingt stations pluviométriques dont la période d'étude s'étale de 1970/71 à 2014/15 révèle une homogénéisation des données des précipitations en appliquant la méthode des doubles

masses. La variabilité temporelle est inversement proportionnelle à l'échelle étudiée, car le coefficient de variation augmente en réduisant l'échelle d'étude.

Le régime pluviométrique saisonnier le plus dominant est de type (HPAE, Hiver-Printemps-Automne-Eté) avec une pluviométrie moyenne annuelle de 329 mm.

L'application des tests statistiques de détection des ruptures révèle certaines stations à la hausse et autres à la baisse.

La mise en étude des deux stations hydrométriques à savoir l'oued Taria (H1) et Sidi Boubeker (H2) durant la chronique 1991/92 jusqu'à 2012/13 montre un débit moyen interannuel presque identique respectivement (0,56 et 0,55 m<sup>3</sup>/s). il est à noter que la station H2 est influencée par un débit d'eau usée, ce qui augmente considérablement l'échantillonnage sur terrain.

Les débits liquides des deux stations ont tendance à la hausse avec le temps. L'application des tests statistiques de détection des ruptures a révélé une rupture durant l'année 2006 pour la station H2, par contre la station H1 ne présente aucune rupture.



***Chapitre IV :***  
***Evaluation du transport***  
***solide en suspension***

## Chapitre IV :

### Evaluation du transport solide en suspension



#### IV.1. Introduction

Le transport solide dans les oueds est une conséquence de l'érosion hydrique des sols. Le volume et les types de particules érodées et transportées par les oueds présentent une grande variabilité spatiale et temporelle (Achite et Ouillon, 2007). Les répercussions directes sont dévastatrices, tant en amont par des pertes de sols et des ravinements qu'à l'aval par des inondations et des dépôts sédimentaires (Touaïbia, 2010).

Ce chapitre a pour objectif principal, l'évaluation du transport solide en suspension par le modèle SRC au niveau des deux stations hydrométriques, l'oued Taria et Sidi Boubeker.

#### IV.2. Méthodologie

Le bassin versant de l'oued Sahouat dispose de cinq stations hydrométriques, notre choix porte sur les stations situées juste en amont du barrage de Ouizert afin d'avoir une bonne estimation du transport solide acheminé vers le barrage. La première station est celle de l'oued Taria qui contrôle les eaux de la partie Est du bassin versant; la seconde station nommée Sidi Boubeker contrôle les eaux de la partie Ouest du bassin. Les caractéristiques générales des deux stations sont illustrées dans le tableau III.11.

##### IV.2.3. Régression entre les débits solides et les débits liquides

L'approche méthodologique adoptée dans cette partie consiste à développer un modèle régressif « rating curve » pour l'évaluation du débit solide ( $Q_s$ ) journalier à partir du débit liquide ( $Q_l$ ) observé.

L'étude porte sur les valeurs instantanées des débits liquides ( $m^3/s$ ) et des débits solides ( $kg/s$ ). Notre base de données est constituée de 9051 observations instantanées réparties sur une période de 22 ans (1991/92 - 2012/13) pour la station de l'oued Taria ; après avoir établi la moyenne des concentrations journalières, le nombre de données d'établit à 547. La

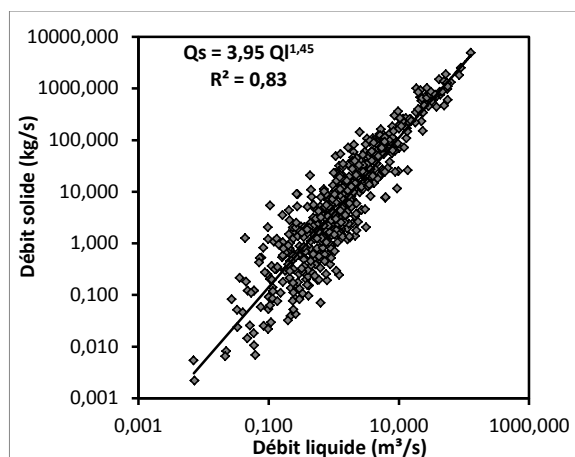
station de Sidi Boubeker comporte 2296 mesures instantanées sur une période de 22 ans (1991/92 - 2012/13) ; ce nombre est réduit à 1761 valeurs lorsque l'on considère non plus les valeurs instantanées mais les concentrations moyennes journalières.

En se basant sur le coefficient de détermination  $R^2$ , plusieurs modèles ont été ajustés (Tableau IV.1), le modèle puissance ( $Q_s = a Q_l^b$ ) étant le plus adapté pour représenter et donc estimer les apports solides à différentes échelles (Tableau IV.2, Figure IV.1 et IV.2)

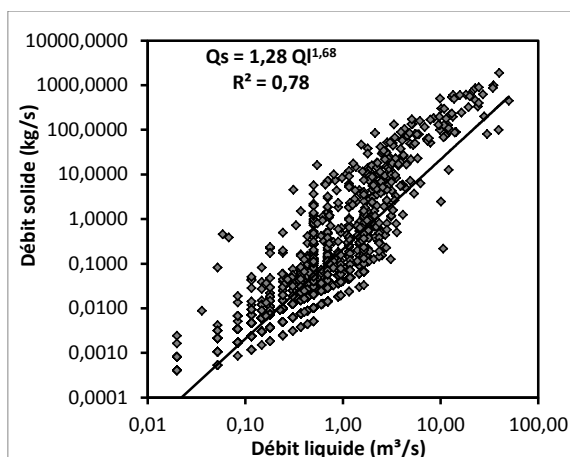
**Tableau IV.1 :** Coefficient de détermination ( $R^2$ ) des modèles retenus.

Station	Modèle				
	Linéaire	Logarithmique	Parabolique	Puissance *	Exponentiel
<b>Oued Taria</b>	0,75	0,26	0,74	0,83	0,35
<b>Sidi Boubeker</b>	0,65	0,21	0,65	0,78	0,40

\* Modèle retenu



**Figure IV.1 :** Relation débit liquide/débit solide observée à la station de l'oued Taria (1991/92 - 2012/13), établie pour les moyennes journalières.



**Figure IV.2 :** Relation débit liquide/débit solide observée à la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13), établie pour les moyennes journalières.

**Tableau IV.2 :** Modèles retenus pour la totalité de la série de chaque station hydrométrique.

Station hydrométrique	N	Modèle établi	$R^2$
<b>Oued Taria</b>	547	$Q_s = 3,95 Q_l^{1,45}$	0,83
<b>Sidi Boubeker</b>	1761	$Q_s = 1,28 Q_l^{1,68}$	0,78

avec : **N** : Nombre de mesures journalières;  **$Q_l$**  : Débit liquide moyen journalier;  
 **$Q_s$**  : Débit solide moyen journalier.

En considérant les valeurs de  $R^2$ , nous jugeons que les deux modèles puissance sont acceptables pour l'estimation des apports solides dans le bassin versant de l'oued Sahouat au droit du barrage de Ouizert.

Les coefficients de régression « a » et les exposants « b » présentent tous deux des valeurs proches de celles trouvées par bon nombre de chercheurs en Algérie sur d'autres bassins versants (Tableau IV.3).

**Tableau IV.3** : Résultats des valeurs du coefficient « a » et de l'exposant « b » trouvés dans des bassins versants voisins (pour une relation  $Q_s = a Q_l^b$ ).

Références	Bassin versant	A (km <sup>2</sup> )	Coefficient « a »	Exposant « b »	Durée
Terfous et al. (2001)	Oued Mouilah	2650	0,40	1,70	21 ans
Achite et Meddi (2005)	Oued Abd	4900	1,74	1,71	22 ans
Cherif et al. (2009)	Oued Mekerra	4102	4,88	1,30	52 ans
El Mahi et al. (2012)	Oued El Hammam	8348	5,12	1,37	12 ans
Yles et Bouanani (2012)	Oued Saida	543	2,36	1,63	31 ans
<b>TOUBAL et al., dans cette étude</b>	<b>Oued Taria</b>	<b>1350</b>	<b>3,95</b>	<b>1,45</b>	<b>22 ans</b>
	<b>Oued Saida</b>	<b>543</b>	<b>1,28</b>	<b>1,68</b>	<b>22 ans</b>

### IV.3. Variation du transport solide

Les valeurs des coefficients de détermination trouvés indiquent une forte liaison entre les débits solides et les débits liquides pour l'ensemble des échelles étudiées.

#### IV.3.1. Variabilité à l'échelle mensuelle

En établissant plusieurs modèles à l'échelle mensuelle entre le débit liquide instantané et le débit solide instantané (Tableau IV.4), nous remarquons que l'exposant « b » varie peu d'un mois à un autre durant toute la période étudiée. Pour la station de l'oued Taria (H1) les coefficients de régression dépassent largement ceux de la station de Sidi Boubeker (H2), avec une valeur maximale de 8,5 au mois d'août et une valeur minimale de 2,32 au mois de décembre. Pour la station de Sidi Boubeker la valeur maximale est observée au mois de Juin (a=0,84) et la valeur minimale (a=0,15) est observée en Décembre et Février. Pour la station oued Taria (H1) l'exposant du mois de Mai (b=1,47) est le plus représentatif de tous les mois car il est le plus proche du modèle annuel (b=1,46). Pour la station de Sidi Boubeker le mois de juin est le plus représentatif (b=1,82).

Tableau IV.4 : Modèles obtenus à l'échelle mensuelle des deux stations hydrométriques.

Station	Mois	Nombre d'observation	R <sup>2</sup>	Modèles retenus
Oued Taria	Séptembre	917	0,89	Qs = 7,43 Q <sub>l</sub> <sup>1,43</sup>
	Octobre	1022	0,88	Qs = 4,48 Q <sub>l</sub> <sup>1,51</sup>
	Novembre	1417	0,80	Qs = 3,59 Q <sub>l</sub> <sup>1,51</sup>
	Décembre	656	0,87	Qs = 2,32 Q <sub>l</sub> <sup>1,53</sup>
	Janvier	627	0,81	Qs = 3,82 Q <sub>l</sub> <sup>1,42</sup>
	Février	1231	0,75	Qs = 2,89 Q <sub>l</sub> <sup>1,27</sup>
	Mars	1107	0,80	Qs = 2,51 Q <sub>l</sub> <sup>1,51</sup>
	Avril	942	0,84	Qs = 3,10 Q <sub>l</sub> <sup>1,37</sup>
	Mai	472	0,85	Qs = 4,98 Q <sub>l</sub> <sup>1,47</sup>
	Juin	153	0,84	Qs = 3,66 Q <sub>l</sub> <sup>2,03</sup>
	Juillet	242	0,81	Qs = 4,37 Q <sub>l</sub> <sup>1,40</sup>
	Août	265	0,84	Qs = 8,52 Q <sub>l</sub> <sup>1,24</sup>
Sidi Boubeker	Séptembre	284	0,88	Qs = 0,61 Q <sub>l</sub> <sup>2,18</sup>
	Octobre	279	0,91	Qs = 0,48 Q <sub>l</sub> <sup>2,02</sup>
	Novembre	285	0,86	Qs = 0,21 Q <sub>l</sub> <sup>2,11</sup>
	Décembre	255	0,86	Qs = 0,15 Q <sub>l</sub> <sup>2,04</sup>
	Janvier	202	0,74	Qs = 0,17 Q <sub>l</sub> <sup>2,18</sup>
	Février	211	0,83	Qs = 0,15 Q <sub>l</sub> <sup>2,07</sup>
	Mars	233	0,85	Qs = 0,32 Q <sub>l</sub> <sup>2,27</sup>
	Avril	195	0,86	Qs = 0,18 Q <sub>l</sub> <sup>2,01</sup>
	Mai	165	0,87	Qs = 0,28 Q <sub>l</sub> <sup>2,07</sup>
	Juin	75	0,95	Qs = 0,84 Q <sub>l</sub> <sup>1,82</sup>
	Juillet	67	0,91	Qs = 0,36 Q <sub>l</sub> <sup>1,93</sup>
	Août	45	0,92	Qs = 0,16 Q <sub>l</sub> <sup>1,41</sup>

### IV.3.2. Variabilité à l'échelle saisonnière

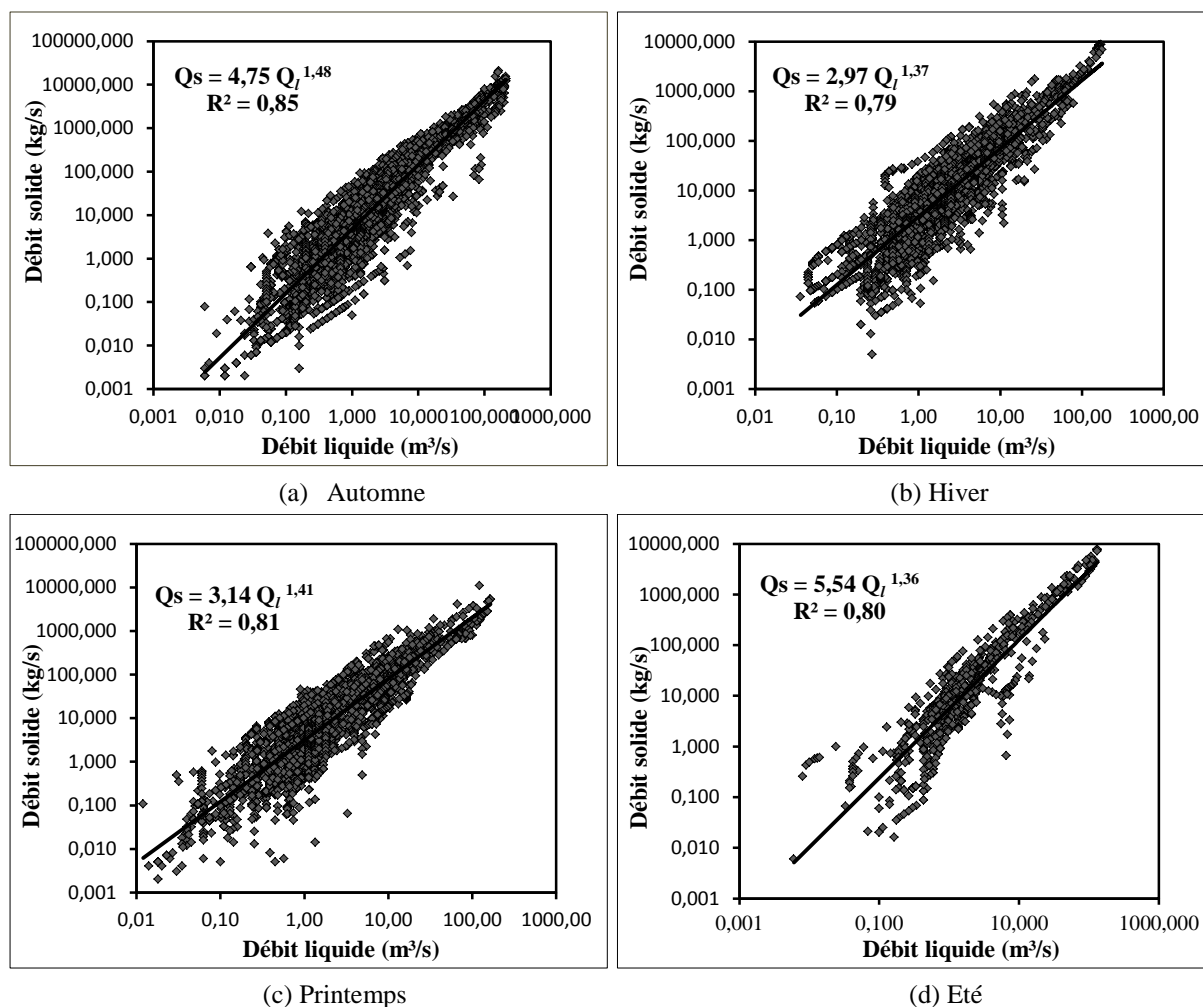
Les résultats L'établissement de la régression linéaire entre le débit liquide instantané et le débit solide instantané (Figure IV.3 et IV.4 (a), (b), (c) et (d)).

En automne et en été, les coefficients de régression présentent les valeurs maximales par rapport aux autres saisons, du fait de l'importance de l'érosion hydrique en ces périodes de l'année. Une période de sécheresse suivie d'une période humide est propice au détachement des particules de sol et à leur transport ; de plus en saison estivale les sols sont souvent dépourvus de végétation, à partir de ce moment, le phénomène d'érosion est accentué du fait des pluies orageuses et brèves. La zone d'étude est également caractérisée par des orages violents survenant pendant la saison d'automne.

L'automne est la saison la plus singulière de l'année car elle détient la valeur maximale de débit solide (21007 kg/s) survenue lors de la crue du 08 Octobre 1999 et correspondant à un débit de 164,1 m<sup>3</sup>/s au niveau de la station de l'oued Taria. En Hiver, le coefficient b (qui vaut 1,37) connaît une diminution, la charge en suspension est improportionnelle aux apports liquides, ceci s'explique par la crue survenue le 05 Décembre 1995 avec un débit solide

maximal s'élevant à 8748 kg/s et correspondant à un débit de 171,2 m<sup>3</sup>/s observé au niveau de la station de l'oued Taria. L'hiver présente généralement de plus faibles intensités que l'automne (Cosandey, 1999), la couverture végétale étant en stade d'évolution, les particules de sol sont protégées contre l'impact Splash, d'autre part les eaux de ruissellement sont ralenties par la végétation et par conséquent l'infiltration est favorisée.

Au printemps, le coefficient b (1,41) est le plus proche du coefficient interannuel établi avec des valeurs journalières. La crue du 16 Mars 1999 a fourni le débit solide maximum de 10986 kg/s correspondant à un débit liquide de 121 m<sup>3</sup>/s. L'été est caractérisé par les valeurs maximales des coefficients de régression respectivement (a=5,54) et (a=1,05) pour les stations H1 et H2 (Tableau IV.5).



**Figure IV.3 :** Relation débit liquide instantané/débit solide instantané observés à la station hydrométrique de l'oued Taria à l'échelle saisonnière (1991/92 - 2012/13).

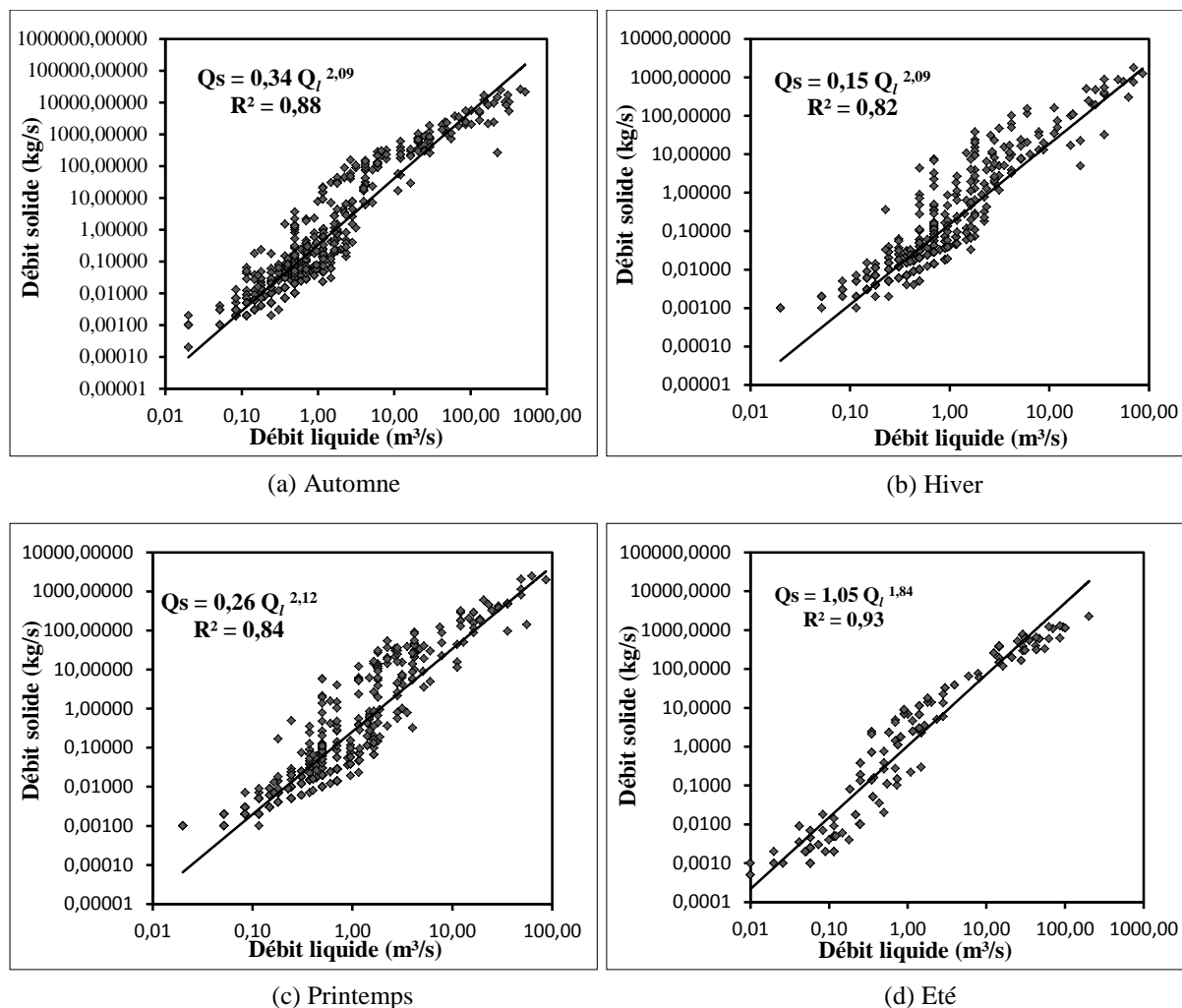


Figure IV.4 : Relation débit liquide instantané/débit solide instantané observés à la station de Sidi Boubeker à l'échelle saisonnière (1991/92 - 2012/13).

Tableau IV.5 : Modèles obtenus à l'échelle saisonnière des deux stations hydrométriques.

Station	Saison	Nombre d'observations	R <sup>2</sup>	Modèles retenus
Oued Taria	Automne	3356	0,85	$Q_s = 4,75 Q_l^{1,48}$
	Hiver	2514	0,79	$Q_s = 2,97 Q_l^{1,37}$
	Printemps	2521	0,81	$Q_s = 3,14 Q_l^{1,41}$
	Eté	660	0,80	$Q_s = 5,54 Q_l^{1,36}$
Sidi Boubeker	Automne	848	0,88	$Q_s = 0,34 Q_l^{2,09}$
	Hiver	668	0,82	$Q_s = 0,15 Q_l^{2,09}$
	Printemps	593	0,84	$Q_s = 0,26 Q_l^{2,12}$
	Eté	187	0,93	$Q_s = 1,05 Q_l^{1,84}$

### IV.3.3. Variabilité interannuelle

Les modèles obtenus à l'échelle annuelle varient d'une année à l'autre. Pour la station de l'oued Taria, le maximum est obtenu en (1992/93, a = 8,2), le minimum est observé en (19986/87) et (1987/88) (a=0,16) avec un coefficient de variation (Cv = 52 %). La station de

Sidi Boubeker connaît un minimum de ( $a=0,06$ ) pour l'année (2005/06) et un maximum de ( $a=0,85$ ) pour l'année (1997/98), cette station connaît une variation légèrement plus importante que (H1) avec un  $Cv = 61 \%$ .

**Tableau IV.6 :** Modèles obtenus à l'échelle annuelle des deux stations hydrométriques.

Station	Année	N	R <sup>2</sup>	Modèles retenus	Ds (t/km <sup>2</sup> /an)	Année	N	R <sup>2</sup>	Modèles retenus	Ds (t/km <sup>2</sup> /an)
Oued Taria	1991/92	226	0,54	$Q_s = 3,50 Q_i^{1,05}$	16,14	2003/04	520	0,75	$Q_s = 4,91 Q_i^{1,51}$	33,96
	1992/93	255	0,88	$Q_s = 8,20 Q_i^{1,42}$	20,74	2004/05	262	0,84	$Q_s = 2,27 Q_i^{1,55}$	47,29
	1993/94	602	0,85	$Q_s = 2,89 Q_i^{1,71}$	69,90	2005/06	165	0,90	$Q_s = 7,98 Q_i^{1,09}$	36,90
	1994/95	575	0,84	$Q_s = 3,33 Q_i^{1,55}$	518,61	2006/07	340	0,89	$Q_s = 5,29 Q_i^{1,25}$	19,57
	1995/96	750	0,83	$Q_s = 3,12 Q_i^{1,54}$	336,35	2007/08	320	0,79	$Q_s = 2,61 Q_i^{1,46}$	36,85
	1996/97	403	0,91	$Q_s = 3,81 Q_i^{1,57}$	187,26	2008/09	240	0,81	$Q_s = 4,22 Q_i^{1,39}$	198,74
	1997/98	589	0,85	$Q_s = 5,49 Q_i^{1,65}$	189,37	2009/10	356	0,83	$Q_s = 3,54 Q_i^{1,47}$	127,78
	1998/99	216	0,86	$Q_s = 3,96 Q_i^{1,88}$	29,06	2010/11	281	0,85	$Q_s = 4,78 Q_i^{1,58}$	7,64
	1999/00	214	0,81	$Q_s = 4,11 Q_i^{1,34}$	200,24	2011/12	276	0,50	$Q_s = 4,43 Q_i^{1,27}$	11,99
	2000/01	520	0,82	$Q_s = 3,30 Q_i^{1,51}$	350,17	2012/13	523	0,82	$Q_s = 1,77 Q_i^{1,43}$	441,43
2001/02	355	0,86	$Q_s = 6,60 Q_i^{1,33}$	233,69	/	/	/	<b>Moyenne</b>	<b>143,42</b>	
2002/03	638	0,86	$Q_s = 3,79 Q_i^{1,83}$	41,61						
Sidi Boubeker	1991/92	187	0,75	$Q_s = 0,22 Q_i^{2,18}$	5,14	2002/03	85	0,78	$Q_s = 0,24 Q_i^{2,24}$	24,62
	1992/93	92	0,74	$Q_s = 0,41 Q_i^{2,53}$	3,47	2003/04	77	0,75	$Q_s = 0,54 Q_i^{2,63}$	65,09
	1993/94	63	0,80	$Q_s = 0,31 Q_i^{2,91}$	35,48	2004/05	91	0,82	$Q_s = 0,57 Q_i^{2,80}$	40,44
	1994/95	76	0,88	$Q_s = 0,49 Q_i^{2,28}$	98,39	2005/06	87	0,81	$Q_s = 0,10 Q_i^{1,90}$	22,57
	1995/96	113	0,89	$Q_s = 0,51 Q_i^{2,10}$	72,99	2006/07	108	0,79	$Q_s = 0,06 Q_i^{1,52}$	17,76
	1996/97	67	0,93	$Q_s = 0,35 Q_i^{2,09}$	47,93	2007/08	112	0,76	$Q_s = 0,08 Q_i^{1,93}$	64,69
	1997/98	78	0,88	$Q_s = 0,85 Q_i^{2,49}$	14,13	2008/09	161	0,86	$Q_s = 0,20 Q_i^{2,04}$	367,00
	1998/99	123	0,88	$Q_s = 0,29 Q_i^{2,61}$	7,10	2009/10	93	0,62	$Q_s = 0,78 Q_i^{2,01}$	22,69
	1999/00	115	0,92	$Q_s = 0,42 Q_i^{2,15}$	70,95	2010/11	87	0,77	$Q_s = 0,83 Q_i^{1,97}$	43,82
	2000/01	151	0,92	$Q_s = 0,37 Q_i^{2,11}$	149,41	2011/12	97	0,74	$Q_s = 0,11 Q_i^{2,42}$	5,29
2001/02	144	0,92	$Q_s = 0,50 Q_i^{2,00}$	49,56	2012/13	105	0,80	$Q_s = 0,23 Q_i^{2,00}$	383,84	
									<b>Moyenne</b>	<b>73,29</b>

avec : Ds : Dégradation spécifique en (t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>).

Les différentes dégradations spécifiques trouvées à l'échelle annuelle (Tableau IV.6) sont comprises entre 7,64 et 518,61 t/km<sup>2</sup>/an (obtenues respectivement en 2010/11 et 1994/95) pour la station de l'oued Taria ; la valeur moyenne est estimée à 143,42 t/km<sup>2</sup>/an. La station de Sidi Boubeker connaît un maximum de dégradation spécifique en 2012/13 avec 384 t/km<sup>2</sup>/an, un minimum en 1992/93 avec 3,47 t/km<sup>2</sup>/an, et une moyenne interannuelle de 73,3 t/km<sup>2</sup>/an.

Les valeurs de la dégradation spécifique connaissent une forte irrégularité interannuelle avec un CV = 99 % pour la station de l'oued Taria et un CV = 142 % pour la station de Sidi Boubeker. La différence importante de production des sédiments au niveau des deux stations (H1, Ds = 143,42 t/km<sup>2</sup>/an) et (H2, Ds = 73,3 t/km<sup>2</sup>/an) s'explique par : (i) la topographie du terrain du sous bassin N°01 est plus accidentée que celle du sous-bassin N°02 (Figure II.6), (ii) le sous-bassin N°01 comprend une plus grande proportion de sols nus que le sous-bassin N°02.



Les valeurs obtenues de la dégradation spécifique à l'échelle annuelle sont proches de celles trouvées par plusieurs chercheurs dans différents pays à travers le monde (Tableau IV.7).

**Tableau IV.7** : Quelques résultats des études du transport solide à travers le monde.

Références	Bassin versant	A (km <sup>2</sup> )	D.S (t/km <sup>2</sup> /an)	Durée
Meddi (1999)	Oued Abd, Algérie	270	1875	21 ans
Megnounif et al. (2003)	Tafna, Algérie	256	1120	5 ans
Achite et Meddi (2005)	Mina, Algérie	4900	187	22 ans
Admasu (2005)	Engereb, Ethiopie	76,54	194	7 ans
Gartet et al. (2005)	Lebène, Maroc	1382	875	3 ans
Achite et Ouillon (2007)	Oued El-Abd, Algérie	2480	187	22 ans
Khanchoul et al. (2007)	Saf Saf, Algérie	322	461	22 ans
Ghenim et al. (2008)	Mouilah, Algérie	2650	165	18 ans
Estrany et al. (2009)	Na Borges, Espagne	319	< 1	2 ans
Khanchoul et al. (2009)	Oued Mellah, Algérie	550	562	24 ans
Cherif et al. (2009)	Oued Mekerra, Algérie	4102	111,15	52 ans
El Mahi et al. (2012)	Oued El Hammam, Algérie	8348	256	12 ans
Gao et Josefson (2012)	Oneida Creek, Etats Unis	311	251,4	2 ans
Harrington et Harrington (2013)	Bandon, Irlande	608	17,1	8 ans
	Owenabue, Irlande	105	18,8	
Gheraout et Remini (2014)	Oued Haddad, Algérie	304	288,5	25 ans
De Girolamo et al. (2015)	Celone, Italie	72	385	1 an
Yles et Bouanani (2012)	Oued Saida	543	55	31 ans
<b>TOUBAL &amp; al., dans cette étude</b>	<b>Oued Taria, Algérie</b>	<b>1305</b>	<b>143,42</b>	<b>27 ans</b>
	<b>Oued Saida, Algérie</b>	<b>543</b>	<b>73,29</b>	<b>24 ans</b>

A : Superficie en (km<sup>2</sup>), D.S : Dégradation spécifique en (t/km<sup>2</sup>/an).

#### IV.4. Variabilité temporelle des apports liquide et solide dans le bassin versant

##### IV.4.1. Echelle mensuelle

Les apports solides des deux stations hydrométriques connaissent une variabilité mensuelle considérable, due à la forte variabilité des précipitations et des facteurs associés, comme le couvert végétal. Pour les deux stations hydrométriques (Oued Taria et Sidi Boubeker), le mois d'Octobre est le mois dominant avec des valeurs maximales d'apports solides respectivement de  $50 \times 10^3$  t et  $38 \times 10^3$  t et un débit liquide moyen correspondant de  $2,66 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $3,01 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les valeurs minimales sont observées au mois de juillet ( $0,23 \times 10^3$  t et  $0,31 \times 10^3$  t) pour un débit de  $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivement (Figure IV.5 et IV.6).

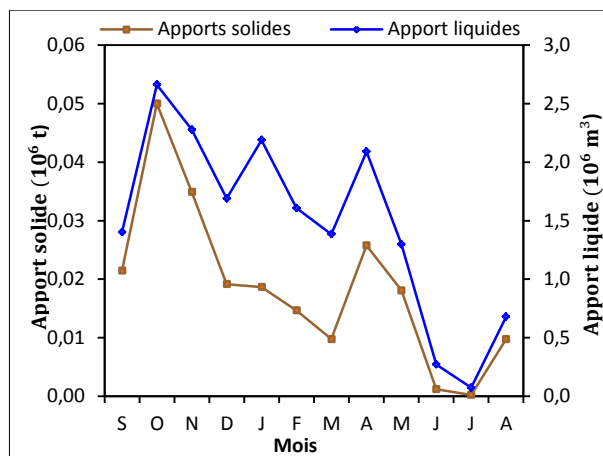


Figure IV.5 : Variabilité mensuelle des apports liquide et solide dans le sous-bassin versant de l'oued Taria (1991/92 - 2012/13).

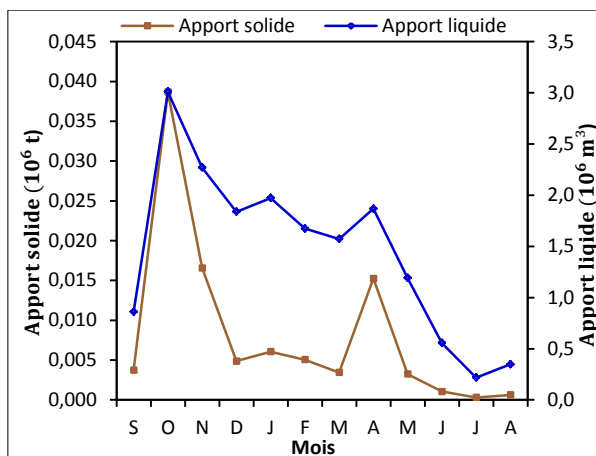


Figure IV.6 : Variabilité mensuelle des apports liquide et solide dans le sous-bassin versant de l'oued Saïda (1991/92 - 2012/13).

#### IV.4.2. Echelle saisonnière

La saison automnale contribue en grande partie aux apports solides par rapport aux autres saisons, soit 33,2 % pour l'oued Taria et 43,6 % à Sidi Boubeker (Figures IV.7 et IV.8). Cette dernière est marquée par des averses de forte intensité et de courte durée qui arrachent une quantité énorme de matériel et le transporte vers les oueds. En automne le sol est relativement nu et est exposé à la dégradation des sols, de plus l'exposition des sols nus aux périodes de chaleur intenses favorise la désagrégation des particules de sols.

En hiver le débit liquide est le plus fort de l'année, mais le débit solide est inférieur à celui observé en automne. Durant cette saison, l'érosion des sols est réduite du fait de la couverture végétale qui empêche la concentration des eaux pluviales en retardant le ruissellement et en limitant l'impact Splash.

L'été est caractérisé par la rareté des pluies et par conséquent un faible débit superficiel.

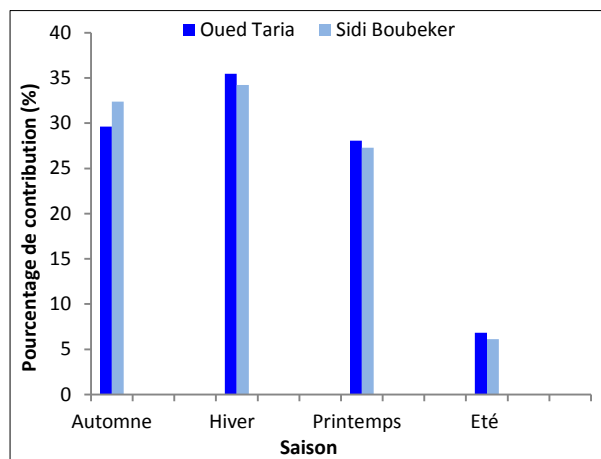


Figure IV.7 : Pourcentage saisonnier des apports liquides des deux stations hydrométriques.

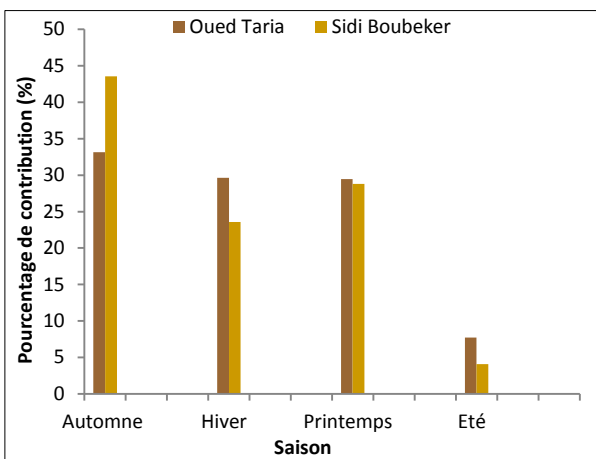


Figure IV.8 : Pourcentage saisonnier des apports solides des deux stations hydrométriques.

### IV.4.3. Echelle annuelle

L'analyse des résultats des apports liquide et solide à l'échelle annuelle montre que les années les plus productives en sédiments sont 1994/95 pour la station de l'oued Taria avec  $0,8 \times 10^6 \text{t}$ , et 2012/13, à Sidi Boubeker avec  $0,5 \times 10^6 \text{t}$  (Figures IV.9 et IV.10). De 1991/92 à la fin de la période d'étude, les deux sites présentent 4 pics de débits solides, pour les années 1994/95, 2000/01, 2008/09 et 2012/13. Ces années de pointe se caractérisent par des apports solides très importants, dus à des crues exceptionnelles. Les années de sécheresse, les débits solides sont très bas sur les deux sous-bassins (10 années d'apport solide  $< 0,1 \times 10^6 \text{t}$  sur l'oued Taria) ; on note juste une petite différence en 2003-2004, où le débit solide est équivalent à l'année précédente sur l'oued Taria mais est doublé à Sidi Boubeker. Les variations interannuelles des apports solides montrent une grande irrégularité ( $C_v = 99\%$ , Oued Taria) et ( $C_v = 141\%$ , Sidi Boubeker), liée à la variation des précipitations.

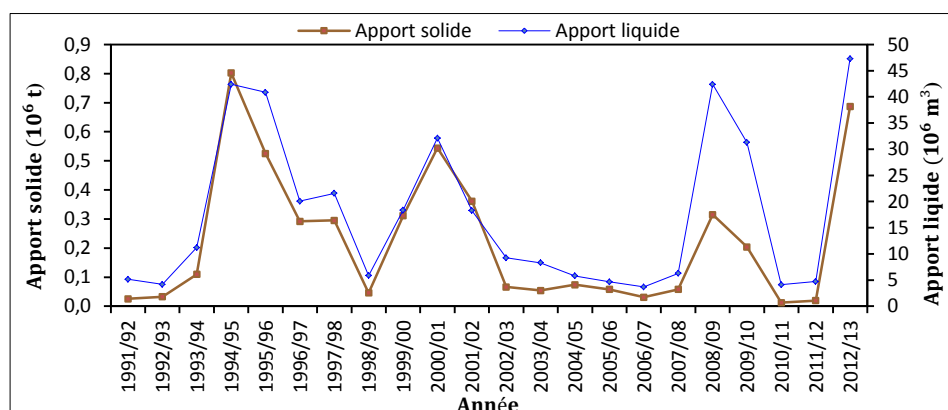


Figure IV.9 : Variabilité interannuelle des apports liquide et solide de la station de l'oued Taria (1991/92 - 2012/13).

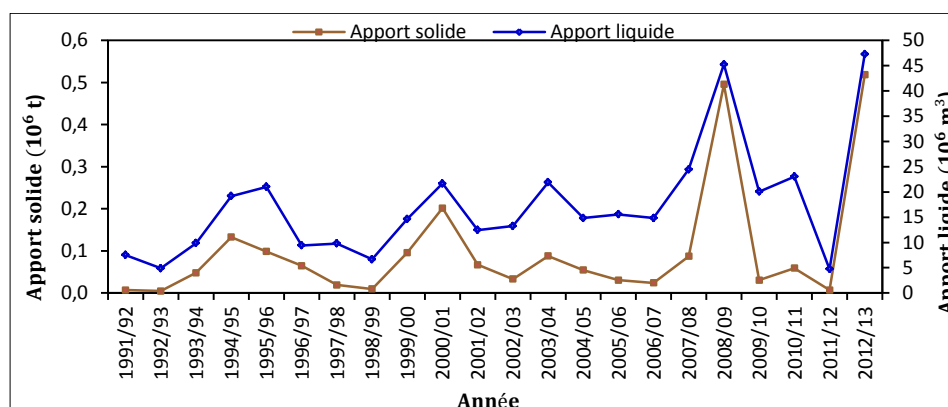


Figure IV.10 : Variabilité interannuelle des apports liquide et solide de la station de Sidi Boubeker (1991/92 - 2012/13).

**IV.5. Conclusion**

Sur la base de l'étude du transport solide des deux stations hydrométriques situées en amont du barrage de Ouizert à savoir, la station de l'oued Taria et Sidi Boubeker, sur la chroniques (1991/92 – 2012/13), nous pouvons dire que les apports solides sont très variables dans le temps. L'étude intra-annuelle révèle que le mois d'octobre est le plus productif en sédiments en suspension. L'analyse de la répartition saisonnière révèle que l'automne se caractérise par un transport solide très élevé dans les deux oueds, dû aux averses éclaires et aux conditions de la couverture végétale en cette période.

La dégradation spécifique du bassin versant au droit de la station hydrométrique de l'oued Taria ( $D_s = 143,42 \text{ t/km}^2/\text{an}$ ) est plus élevée que celle trouvée pour le sous-bassin voisin contrôlé par la station de Sidi Boubeker ( $D_s = 73,3 \text{ t/km}^2/\text{an}$ ), cette dégradation est favorisée par certaines conditions sur terrain tel que : la topographie du terrain, la discontinuité spatiale du couvert végétal et l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations.

Cette étude nous a permis aussi de déceler le sous-bassin le plus productif en sédiments et le plus nuisant au barrage de Ouizert, ce qui nous mène à dire que le sous-bassin contrôlé par la station hydrométrique de l'oued Taria est classé comme zone de priorité d'intervention contre l'érosion hydrique.

***Chapitre V :***  
***Distribution spatiale de***  
***l'érosion hydrique***



## Chapitre V :

# Distribution spatiale de l'érosion hydrique

### V.1. Introduction

Les zones semi-arides subissent une érosion accélérée (Bayramin et al., 2008), engendrent le transport solide dans les oueds et la sédimentation des retenues artificielles (Dutta, 2016; Wilkinson et McElroy, 2007) laissant à l'amont des sols totalement dégradés. Ce chapitre a pour objectif principal de quantifier et de dresser la carte du taux d'érosion hydrique du bassin versant de l'oued Sahouat en s'appuyant sur le modèle RUSLE. Pour y parvenir, il faut au préalable cartographier les différentes variables intervenant dans le modèle, à partir de plusieurs sources. A cet effet, la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique « SIG » sont particulièrement adaptés. Dans un deuxième temps, une validation et une supervision ponctuelle de la répartition spatiale du degré d'érosion hydrique avec Google Earth sera effectuée, ainsi que la priorisation des travaux de lutte antiérosifs par sous-bassin sera effectuée.

Ce chapitre reprend les résultats présentés dans un article paru en mars 2018 dans la revue *Environmental Monitoring and Assessment* et intitulé « Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the Wadi Sahouat basin, North-West of Algeria », par Toubal et al.

### V.2. Collecte des données

L'application du modèle RUSLE nécessite de cartographier sur le bassin versant les 5 paramètres R, K, LS, C et P. Pour ce faire, plusieurs séries de données ont été extraites de différentes sources (Tableau V.1), à savoir :

- 1) Les précipitations annuelles de 20 stations pluviométriques réparties sur le bassin versant d'une période de 45 ans (1970/71 - 2014/15), fournies par l'ANRH.

- 2) Les données topographiques (« Shuttle Radar Topography Mission » S.R.T.M.) ont été extraites du site internet <http://earthexplorer.usgs.gov/> pour générer un modèle numérique de terrain d'une résolution de 30m.
- 3) Une image satellite Landsat 8 OLI (Opérationnel Land Imager) & TIRS (Thermal Infrared Sensor) acquise le 31 octobre 2015 d'une résolution de 30m a été utilisée (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).
- 4) La base de données mondiale des sols établie par « l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture » (F.A.O.) a été téléchargée depuis le site (<http://webarchive.iiasa.ac.at>) (Tableau V.1).

Tableau V.1 : Description des données utilisées.

Type de données	Format	Description	Source
Précipitations	Excel (*.xls)	Pluviométrie annuelle (1970/71 – 2014/15)	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H)
Topographie (Shuttle Radar Topography Mission, S.R.T.M)	Raster (*.tif)	Résolution : 30m	United States Geological Survey ( <a href="http://earthexplorer.usgs.gov/">http://earthexplorer.usgs.gov/</a> )
Image satellite Landsat 8	Raster (*.tif)	Résolution : 30m Date d'acquisition : (31/10/2015)	United States Geological Survey ( <a href="http://earthexplorer.usgs.gov/">http://earthexplorer.usgs.gov/</a> )
Propriétés du sol	Raster + fichier Excel (*.tif+*.xls)	Base de données mondiale des propriétés du sol	harmonized world soil database (HWSD) version 1.2 ( <a href="http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/">http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/</a> )

### V.3. Automatisation du modèle RUSLE

#### V.3.1. Présentation et application du modèle Builder

L'automatisation du modèle RUSLE a été élaborée à partir du module « Model Builder » intégré dans Arcgis 10.2.2. Ce dernier facilite la création, la modification et l'exécution du géotraitement (ESRI 2000, Manegold 2003, Goodchild 2005). Les différentes tâches du processus de traitement pour la génération de chaque couche thématique sont réunies dans une seule opération.

Chaque processus consiste en plusieurs exécutions du module Arctoolbox. L'interface du module est symbolisée par 3 couleurs à savoir :

- 1) la couleur bleue ovale signifie les variables à traiter;
- 2) le rectangle orange est l'outil d'exécution;
- 3) la couleur verte ombrée représente le résultat de la commande exécutée;

4) les flèches servent à joindre les étapes du traitement entre elles (Figure V.1).

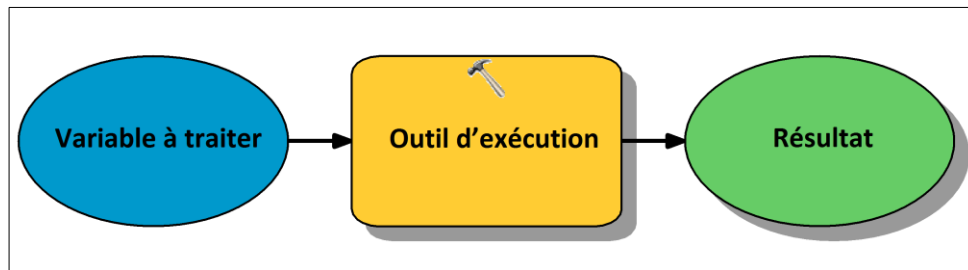
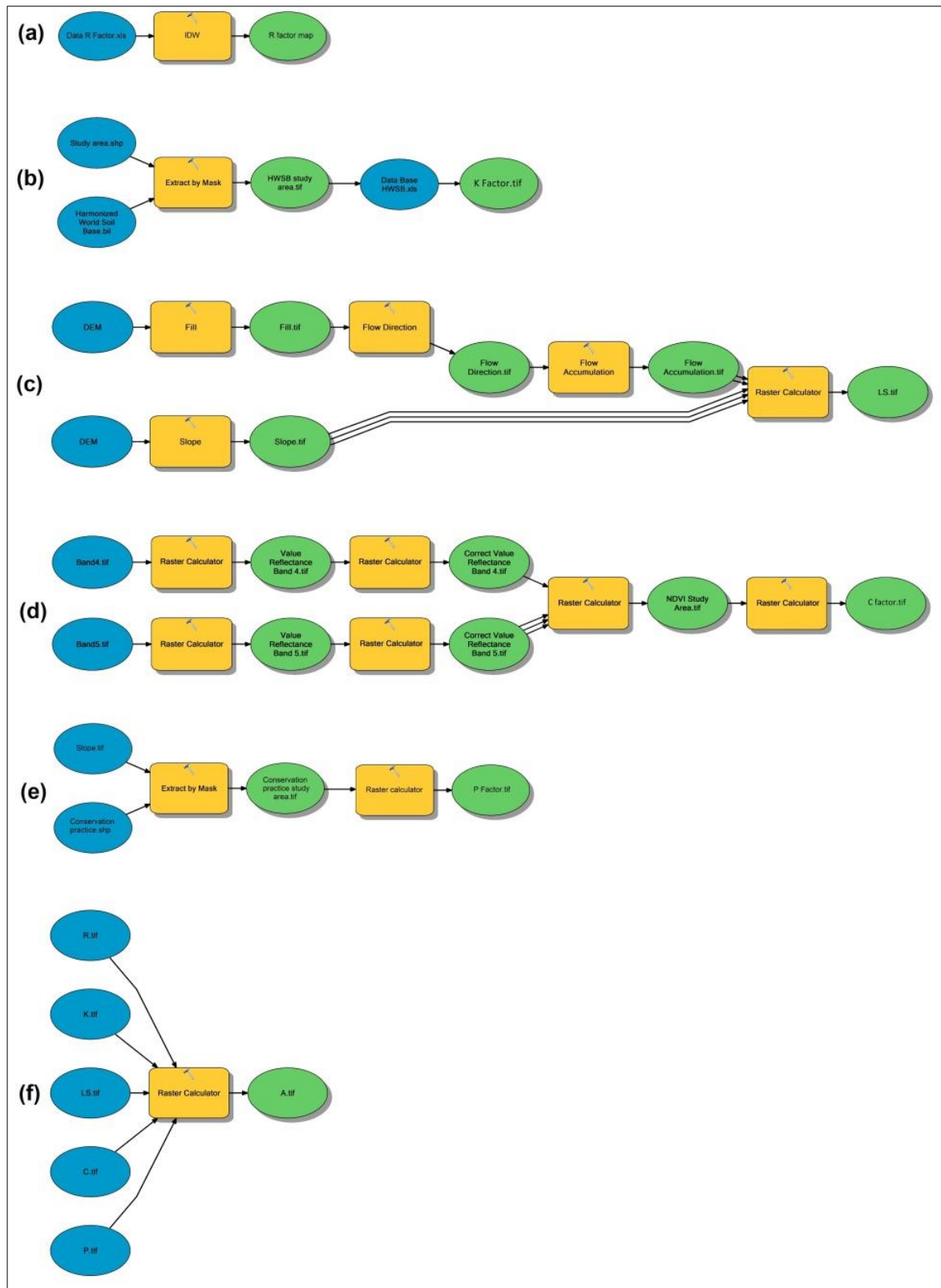


Figure V.1: Présentation du Modèle Builder.

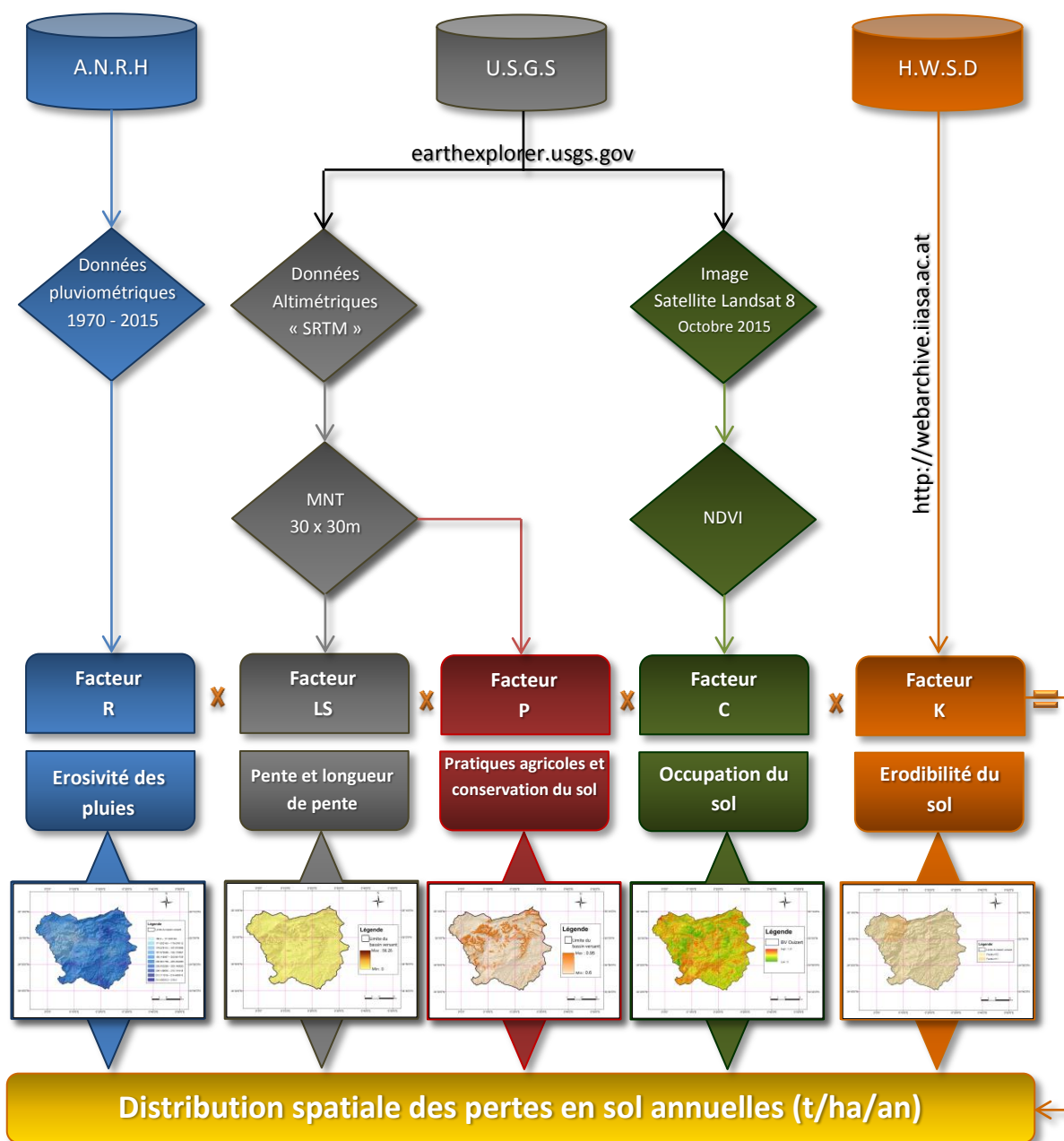
L'avantage du modèle Builder (figure V.1) réside en son adaptation pour n'importe quelle zone d'étude, il suffit seulement de modifier les variables d'entrée en les introduisant dans la boîte de dialogue. Les paramètres nécessaires pour le calcul du facteur LS et P sont la limite de la zone d'étude et le MNT, les données pluviométriques pour le calcul du facteur R, les données sur le sol (HWSD) pour le calcul du facteur K et les bandes rouge et proche infrarouge de l'image satellite Landsat pour le calcul du facteur C. Le résultat attendu par ces différentes démarches est le tonnage des pertes en sols du bassin versant de l'oued Sahouat exprimé en  $t\ ha^{-1}\ an^{-1}$ .

Afin de quantifier les pertes en sol annuelles du bassin versant de l'oued Sahouat en utilisant le modèle RUSLE, cinq couches ont été multipliées en format raster (\*.tif) à savoir : R, K, LS, C et P. Les pertes en sol de la zone d'étude ont été obtenues en multipliant la valeur de chaque paramètre, pixel par pixel (figures V.2 et V.3). La figure V.2 illustre les différentes étapes de calcul du modèle BUILDER, tandis que la figure V.3 présente l'organigramme général de calcul des pertes en sols avec le modèle RUSLE.





**Figure V.2 :** Modèle BUILDER pour le calcul des différents facteurs du modèle RUSLE. **(a)** calcul du facteur d'érosivité R; **(b)** calcul du facteur d'érodibilité K; **(c)** calcul du facteur topographique LS; **(d)** calcul du facteur de couverture végétale C; **(e)** calcul du facteur des pratiques antiérosives P; **(f)** calcul des pertes en sols de la zone d'étude.



A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques;  
 U.S.G.S : United States Geological Survey;  
 H.W.S.D : Harmonized World Soil Database.

Figure V.3 : Organigramme pour le calcul des pertes en sols avec le modèle RUSLE.

#### V.4. Estimation des paramètres du modèle

##### V.4.1. Facteur d'érosivité (R)

Le formule proposée par Wischmeier et Smith exige des données pluviométriques instantanées bien précises, qui sont très rarement disponibles sur les stations hydrologiques usuelles. Aussi, plusieurs chercheurs ont proposé des formules de substitution en fonction

des données disponibles, notamment à partir des données mensuelles et annuelles (Arnoldus (1980); Singh et al. (1981); Rango and Arnoldus (1987); Renard et Freimund (1994); Wang (1995); van der Knijff et al. (2000); Parveen et Kumar (2012)).

Dans cette étude nous allons appliquer le modèle de Diodato (2004, 2005) qui estime le facteur R ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{y}^{-1}$ ) comme suit:

$$R = b_0 \cdot P' \cdot \sqrt{d} (\alpha + b_1 \cdot L) \quad (2)$$

avec :

$$b_0 = 0,117 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1},$$

$$b_1 = -0,015 \text{ d}^{0,5} \text{ mm}^{-1,5},$$

$$\alpha = 2 \text{ d}^{0,5} \text{ mm}^{-0,5},$$

$L$  : Longitude de la station pluviométrique (°),

$P'$  : Précipitation moyenne interannuelle (mm),

$d$  : Précipitation moyenne maximale journalière sur plusieurs années (mm).

L'élaboration de la carte du facteur R est calculée à partir de 20 stations pluviométriques avec la méthode d'interpolation de l'inverse distance (Inverse Distance Weighting; IDW) (Figures V.4).

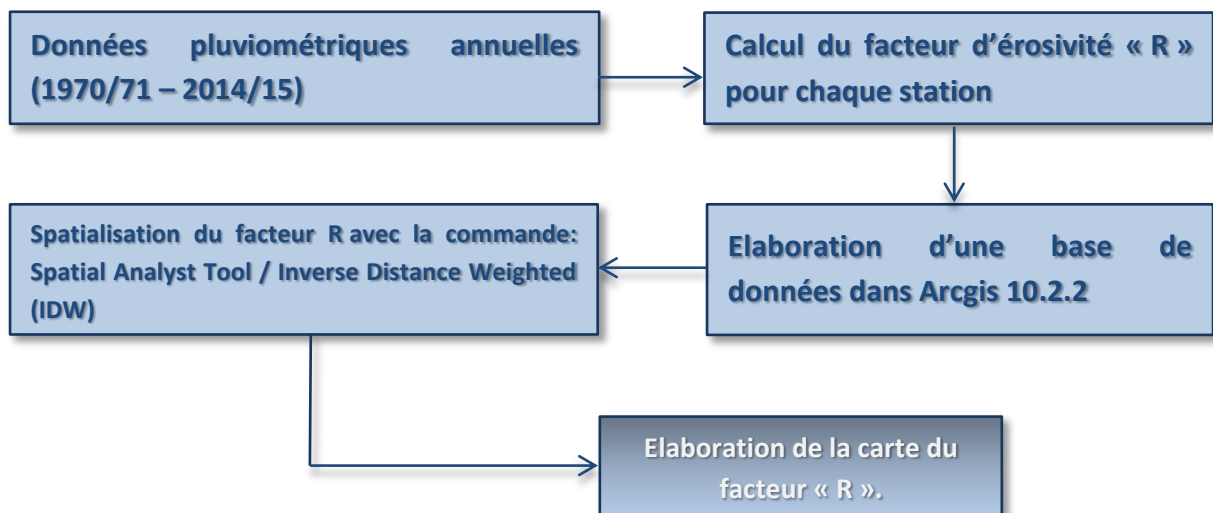


Figure V.4 : Organigramme de la détermination du facteur R.

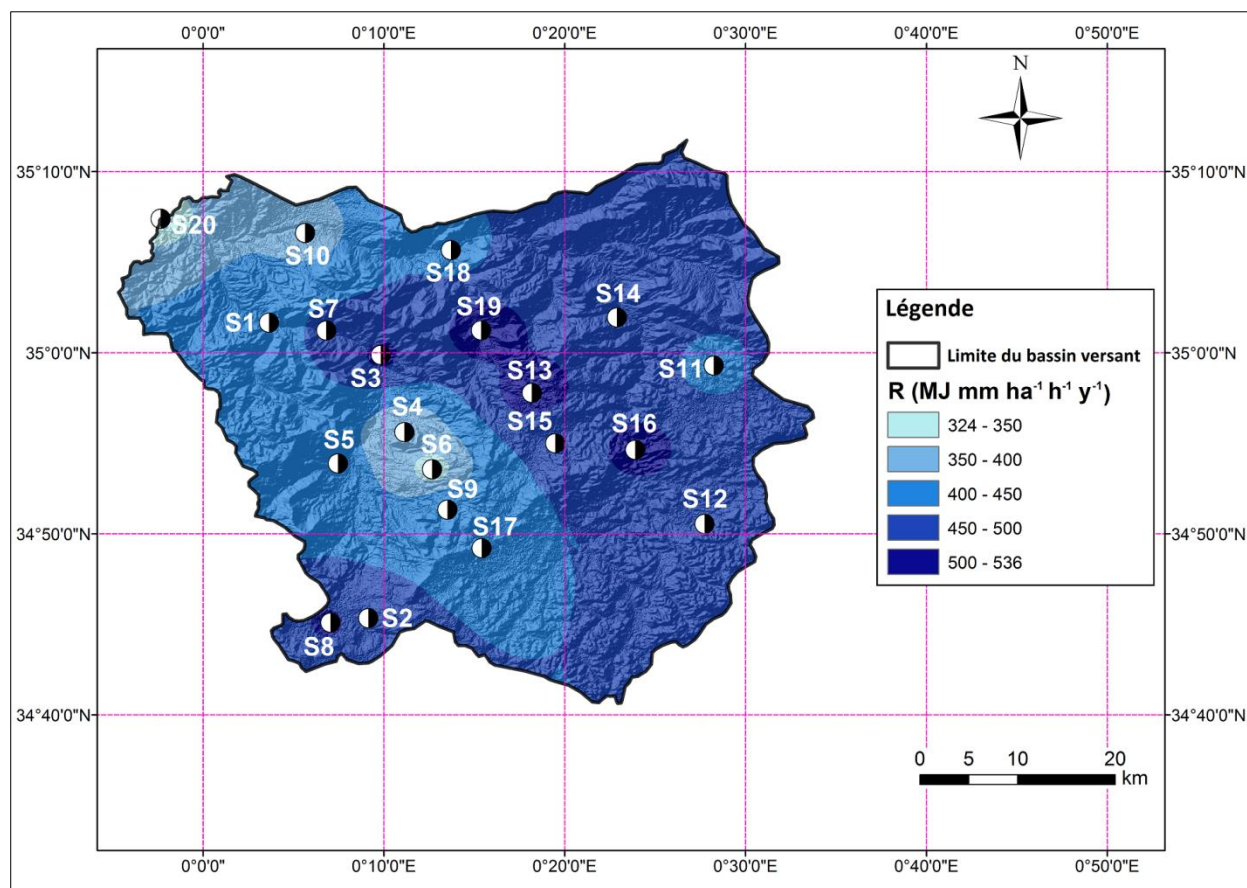


Figure V.5 : Carte du facteur d'érosivité R de la zone d'étude (1970/71 – 2014-15).

Les précipitations sont considérées comme le facteur principal de l'érosion hydrique (Jain et al, 2001; Dabral et al., 2008). La forte capacité érosive est conditionnée par une forte érosivité pluviale, tandis qu'une faible érosivité traduit un faible pouvoir érosif. L'érosivité de la pluie dans la zone d'étude varie principalement entre 324,1 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> au niveau de la station S6 et 535,8 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> au niveau de la station S13. Une forte érosivité est localisée à l'Est par contre une faible érosivité est localisée à l'ouest (Tableau V.2 et Figure V.5).

Plusieurs facteurs a priori peuvent expliquer ces constatations : (1) la localisation et l'exposition aux flux humides (Helioui et Hajri, 2015); (2) la variabilité des vents sur la zone; (3) la couverture végétale.

Tableau V.2 : Valeurs de l'érosivité des pluies du bassin versant de l'oued Sahouat.

N°	Nom	X (km)	Y (km)	L (°)	d (mm)	P (mm)	R (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )
S1	Meftah sidi boubekeur	259,5	195,8	0,05	35,90	294,66	413,0
S2	Ain El Hadjar	266,5	165,2	0,15	32,15	348,4	461,8
S3	Kilometre 50	268,5	192,0	0,17	39,04	350,5	511,8
S4	Hammam Rabi	270,4	184,5	0,18	30,39	273,0	351,7
S5	Djebel Karous	264,7	181,2	0,12	33,11	304,0	409,0
S6	Rebahia Ferme 917	272,6	180,5	0,21	25,36	275,4	324,1
S7	Sidi Amar	264,0	195,0	0,11	36,62	328,8	465,2
S8	Ferme du Syndicat	263,7	165,5	0,11	34,45	371,2	509,4
S9	Ain Zerga Ferme	273,9	176,4	0,23	32,79	331,8	443,8
S10	Oued Taria	262,4	204,9	0,09	32,18	284,4	377,3
S11	Oum El Djirane	296,9	190,6	0,47	36,72	304,8	430,7
S12	Ain Tifrit	290,1	182,5	0,40	36,70	369,6	522,3
S13	Ain Soltane	281,4	188,4	0,30	39,45	365,4	535,8
S14	Sidi Mimoun	289,1	196,1	0,38	32,87	361,9	484,1
S15	Bled El Beida	283,3	183,1	0,32	31,87	341,5	450,1
S16	Tamesna	295,6	174,5	0,46	33,90	344,6	467,9
S17	Domaine Bencherit	275,0	173,0	0,26	33,11	331,2	445,1
S18	Beniane	275,0	203,2	0,23	32,64	325,5	434,4
S19	Hasna domaine Bouchikhi	277,4	194,6	0,26	36,02	378,5	530,6
S20	Barrage de Ouizert	277,4	194,1	-0,04	30,17	259,9	334,1

#### V.4.2. Facteur d'érodibilité (K)

Aucune donnée détaillée sur la taille des particules n'était disponible pour cette région au niveau de plusieurs services concernés. Une méthode alternative appliquée par plusieurs chercheurs à travers le monde est mise en œuvre notamment ([Chadli, 2016](#)) au Maroc. A cet effet nous avons utilisé la base de données mondiale des sols harmonisés «Harmonized World Soil Database » (HWSD), version 1.2 ([FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009](#)) établie par la F.A.O (Food and Agriculture Organization) pour déterminer le facteur K.

La base de données résultante se compose de 21 600 lignes et 43 200 colonnes, qui sont liées à des données harmonisées de propriétés du sol. L'utilisation d'une structure standardisée permet la liaison des données avec la trame de la carte pour afficher ou interroger la composition en termes d'unités de sol et la caractérisation des paramètres de sol sélectionnés (carbone organique, pH, capacité de stockage de l'eau, profondeur du sol, capacité d'échange cationique du sol, fraction argileuse, somme des éléments nutritifs

échangeables, teneur en chaux et gypse, pourcentage d'échange de sodium, salinité, classe texturale et granulométrie) (Source : [www.fao.org](http://www.fao.org)) (Figure V.6 et V.7).

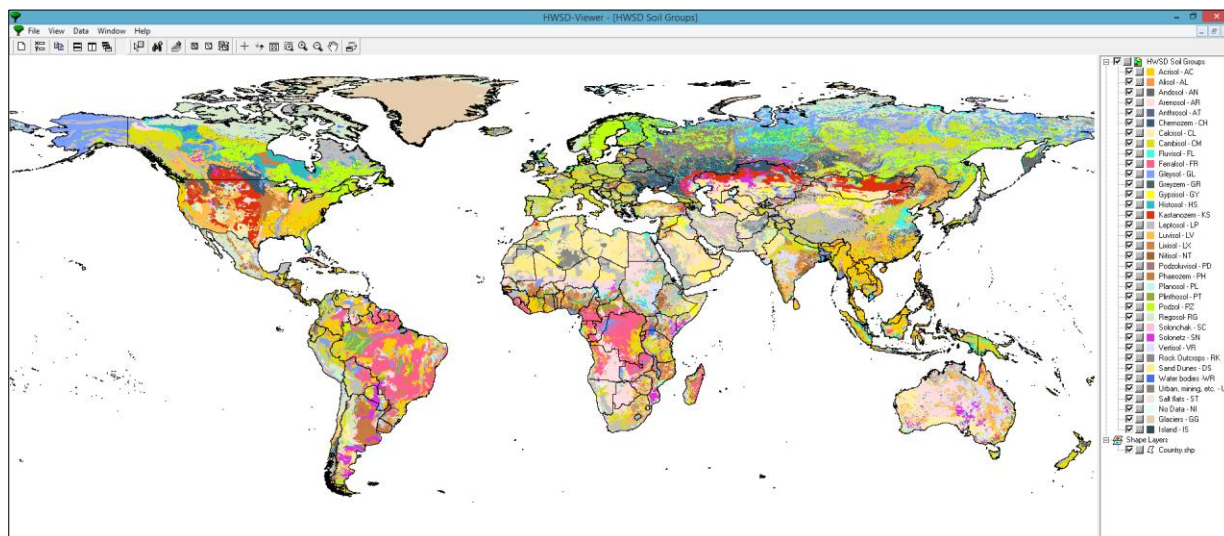


Figure V.6 : Carte de la base de données mondiale des sols.

Coverage		DGHW	
Soil Mapping Unit		1135	
Dominant Soil Group		CL - Calcisols	
Sequence	Dominant Soil	Associated Soils and Inclusions	
	1	2	3
Share in Soil Mapping Unit (%)	35	35	30
Database ID	38466	38467	38468
Soil Unit Symbol (FAO 74)	Bk	Bk	Vc
Soil Unit Name (FAO 74)	Calcic Cambisols	Calcic Cambisols	Chronic Vertisols
Soil Unit Symbol (FAO 85)	-	-	-
Soil Unit Name (FAO 85)	-	-	-
Soil Unit Symbol (FAO 90)	-	-	-
Soil Unit Name (FAO 90)	-	-	-
Topsoil Texture	Medium	Fine	Fine
Reference Soil Depth (cm)	100	100	100
PHASE1	-	-	-
PHASE2	-	-	-
Obstacles to Roots (ESDR) (cm)	-	-	-
Impermeable Layer (ESDR) (cm)	-	-	-
Soil Water Regime (ESDR)	-	-	-
Drainage class (0-0,5% slope)	Moderately well	Moderately well	Poor
AWC (mm)	150	150	125
Calcic Properties	No	No	No
Vertic Properties	No	No	Yes
Rebic Properties	No	No	No
<b>TOPSOIL (0-30 cm)</b>			
Topsoil Sand Fraction (%)	38	19	16
Topsoil Silt Fraction (%)	41	33	29
Topsoil Clay Fraction (%)	21	48	55
Topsoil USDA Texture Classification	loam	clay (light)	clay (light)
Topsoil Reference Bulk Density (kg/dm <sup>3</sup> )	1.4	1.24	1.21
Topsoil Bulk Density (kg/dm <sup>3</sup> )	1.42	1.3	1.65
Topsoil Gravel Content (%)	10	8	4
Topsoil Organic Carbon (% weight)	0.63	0.9	0.75
Topsoil pH (1:2.5)	8	8	7.9
Topsoil CEC (clay) (cmol/kg)	56	52	75
Topsoil CEC (soil) (cmol/kg)	16	29	44
Topsoil Base Saturation (%)	100	100	100
Topsoil TEB (cmol/kg)	27.1	36	46.2
Topsoil Calcium Carbonate (% weight)	7	6.5	2.5
Topsoil Gypsum (% weight)	0.1	0	0
Topsoil Sodium (ESP) (%)	1	2	1
Topsoil Salinity (ECe) (dS/m)	0.3	0.3	0.2
<b>SUBSOIL (30-100 cm)</b>			
Subsoil Sand Fraction (%)	36	23	15
Subsoil Silt Fraction (%)	41	34	28
Subsoil Clay Fraction (%)	23	43	57
Subsoil USDA Texture Classification	loam	clay (light)	clay (light)
Subsoil Reference Bulk Density (kg/dm <sup>3</sup> )	1.38	1.26	1.21
Subsoil Bulk Density (kg/dm <sup>3</sup> )	1.46	1.34	1.76
Subsoil Gravel Content (%)	10	6	5

Figure V.7 : Caractéristiques générale d'un type de sol.

Le dossier est composé d'un fichier raster et d'une base de données correspondante à ce dernier. Les étapes suivies pour la détermination du facteur K et le résultat obtenu sont illustrés respectivement en Figures V.8 et V.9.

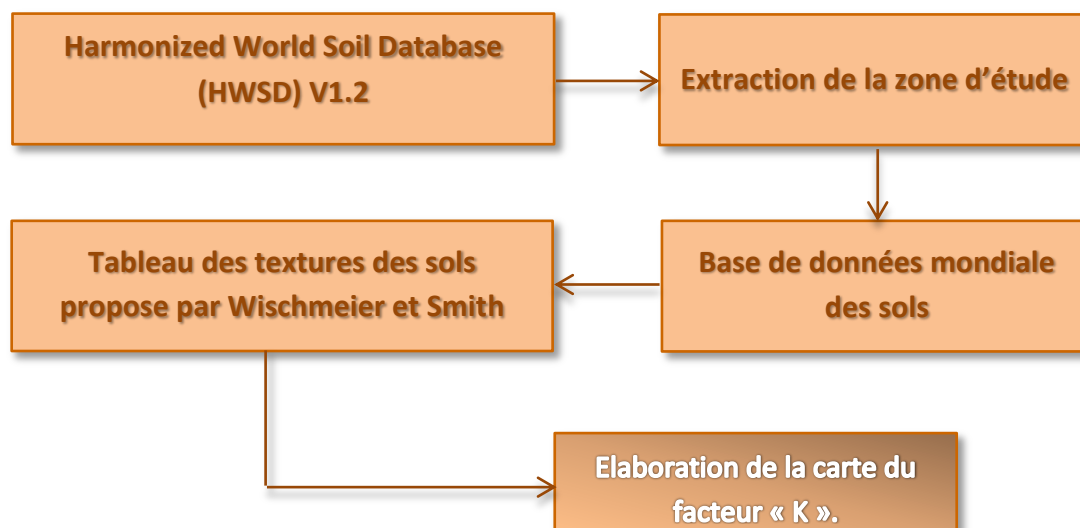


Figure V.8 : Organigramme de la détermination du facteur K.

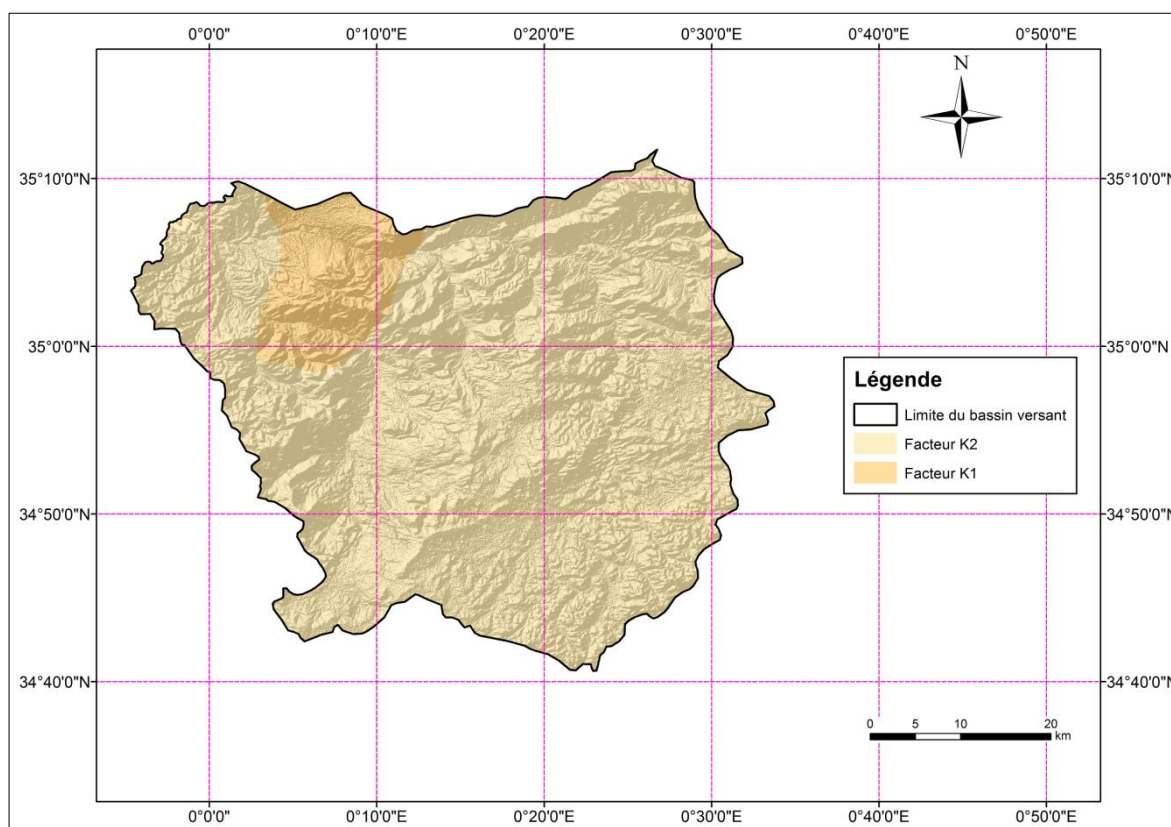


Figure V.9 : Carte du facteur K du bassin versant de l'oued Sahouat.

Une faible valeur du facteur K se traduit par une faible aptitude au détachement des particules de sol à l'effet Splash. La carte d'érodabilité du bassin versant obtenue révèle une répartition constante sur toute la zone  $k = 0,34 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . Cette valeur est de l'ordre de valeurs trouvées dans plusieurs bassins du Maroc, légèrement plus élevée que sur les autres bassins algériens.

### V.4.3. Facteur de pente et de longueur de pente (LS)

Plusieurs formules ont vu le jour notamment, McCool et al. (1987); Moore et Wilson (1992); Desmet et Govers (1996); Mitasova et al. (1996); Mitasova et al. (1996); Jiang et Zheng (2008); Winchell et al. (2008); Velàsquez (2013).

L'équation proposée par Moore et Bursh (1986) permettant le calcul du facteur LS a été utilisée par plusieurs auteurs notamment Prasannakumar et al. (2012), Chen et al. (2013), Dutta et al. (2015), Markose et Jayappa (2016), suivant :

$$LS = \left( \text{flow accumulation} \times \frac{\text{Cell size}}{22,1} \right)^{0,4} \times (\text{sin slope} \times 0.0896)^{1,3} \quad (3)$$

où :

**LS** : Facteur topographique qui combine la pente et sa longueur;

**Cell size** : Résolution du pixel ou de la carte.

Pour cette étude le facteur topographique a été déterminé à partir du MNT, à cet effet plusieurs opérations préliminaires ont été respectées en utilisant l'extension « Spatial Analyst » du logiciel Arcgis 10.2.2, à savoir :

- 1) l'élimination des dépressions suivant le sens de l'écoulement avec la commande « Fill »;
- 2) détermination de la direction de l'écoulement « Flow Direction »;
- 3) détermination des zones d'accumulation des débits « Flow Accumulation »;
- 4) Calcul de la pente du bassin versant « Slope » et enfin du facteur LS avec le « Raster Calculator ».

Les différentes étapes constitutives de calcul sous le résultat obtenu sont illustrées en Figures V.10 et V.11.



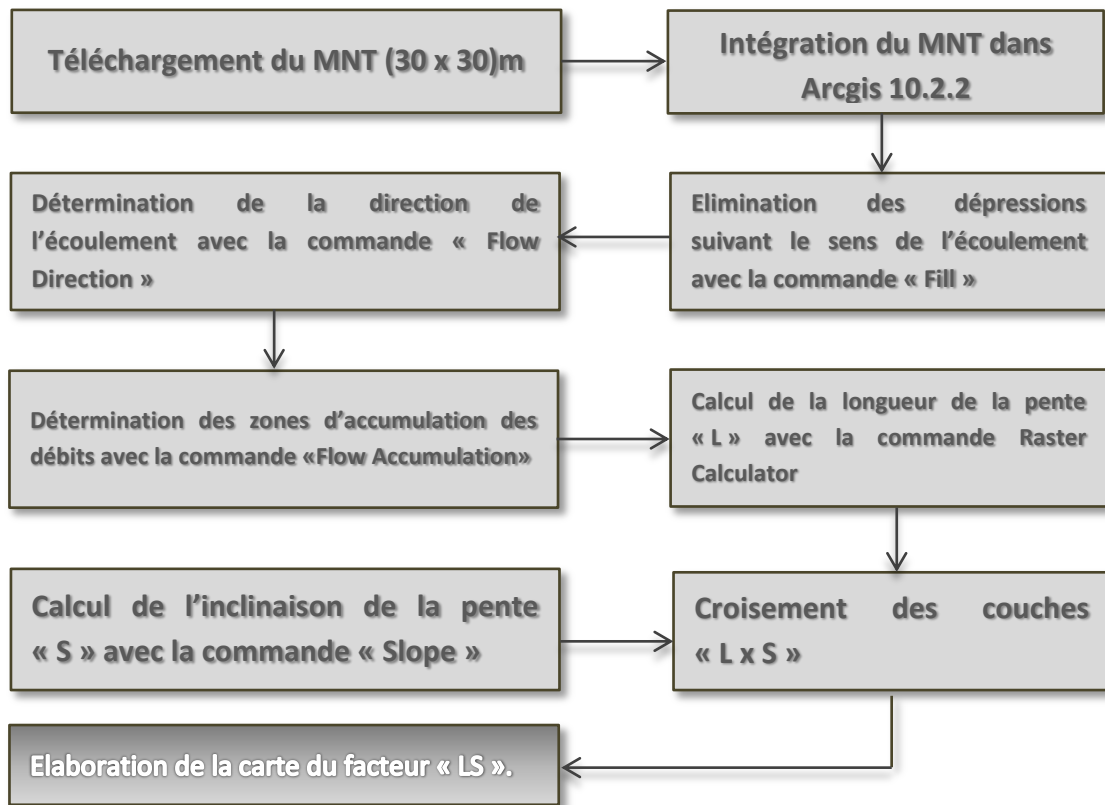


Figure V.10 : Organigramme de la détermination du facteur LS.

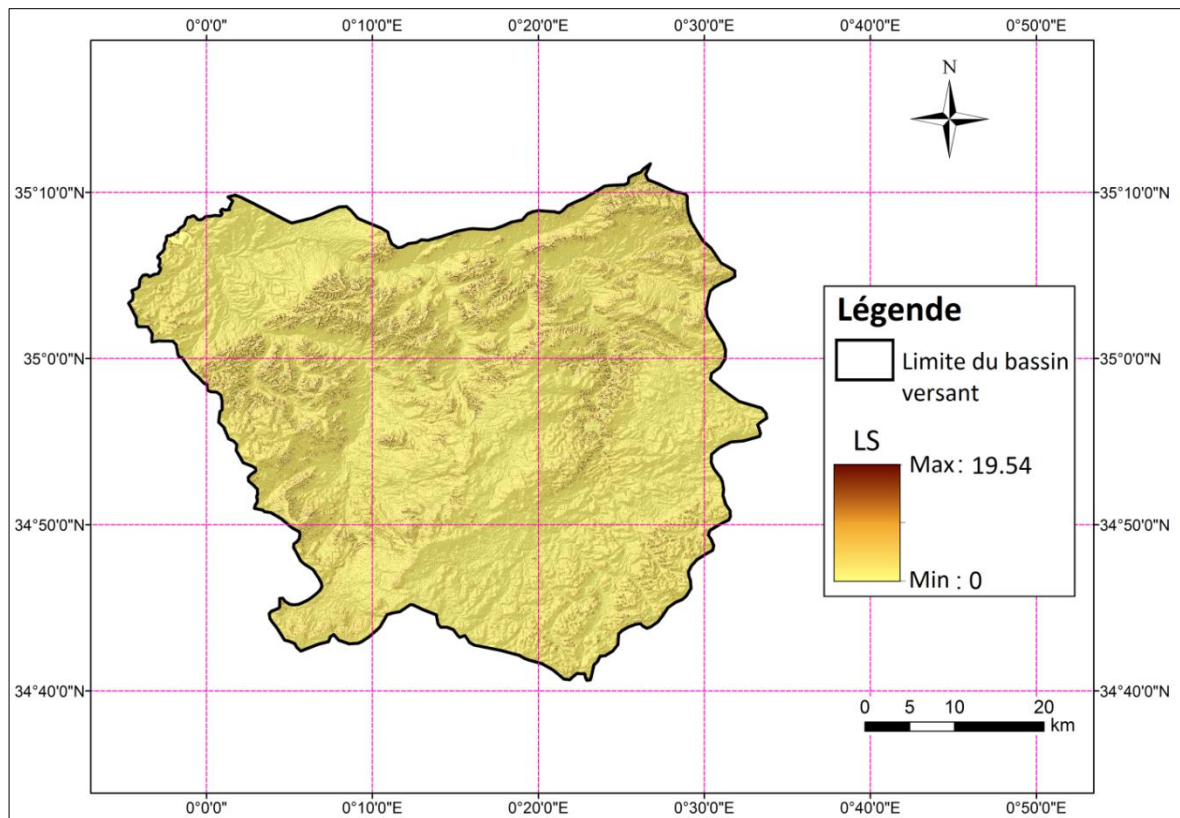


Figure V.11: Carte du facteur topographique LS.

L'analyse de la répartition de ce facteur dans le bassin versant montre une tranche de valeur allant de 0 à 19,54. Une concentration des valeurs élevées de ce facteur est localisée dans la partie centre de la zone d'étude d'où on relève un terrain accidenté et vulnérable à l'érosion linéaire.

#### V.4.4. Couverture végétale (C)

Il existe plusieurs méthodes pour obtenir le facteur C. Certaines études déterminent la valeur du facteur C en utilisant la carte de classification de couverture du sol en supposant que les mêmes couvertures du sol ont la même valeur du facteur C (Cebecauer et Hofierka (2008); Chatterjee et al. (2014); Lee (2004); Xu et al. (2011); Yang et al. (2012); Zhou et al. (2011)). L'autre méthode s'appuie sur la télédétection, elle consiste à l'interprétation de l'imagerie satellitaire en utilisant deux bandes bien spécifiques pour le calcul de l'indice de végétation normalisé (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), duquel on estime le facteur « C » à l'aide d'une formule adéquate ; cette méthode a été utilisée par : van der Knijff et al. (2000); Tweddale et al. (2000); Wang et al. (2002); Lin et al. (2002); Ma et al. (2003); Zhou et al. (2008); Kouli et al. (2009); Zivotic et al. (2012); Perovic et al. (2013); Xu et al. (2013); Kumar et al. (2014); Dutta et al. (2015); Markose et Jayappa (2016); Magesh et Chandrasekar (2016).

Le calcul du facteur C de la zone d'étude a été déterminée à partir de l'interprétation d'une image satellite, en suivant les étapes suivantes : (1) calcul de la valeur de la réflectance à partir des données par satellite; (2) correction de la valeur de réflectance avec l'angle du soleil; (3) calcul du NDVI à partir des bandes 4 et 5.

La génération de la couche raster du facteur C à partir du NDVI s'écrit sous la forme suivante : (Zhou et al., 2008; Kouli et al. 2009, Markose et Jayappa, 2016).

$$C = \exp \left[ \frac{-\alpha NDVI}{\beta - NDVI} \right] \quad (4)$$

où : C : le facteur de couverture végétale; NDVI : indice de végétation par différence normalisée;  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes ( $\alpha = 2$  and  $\beta = 1$ , van der Knijff et al. 2000).

Les démarches suivies et le résultat obtenu sont illustrés dans les Figures V.12 et V.13.

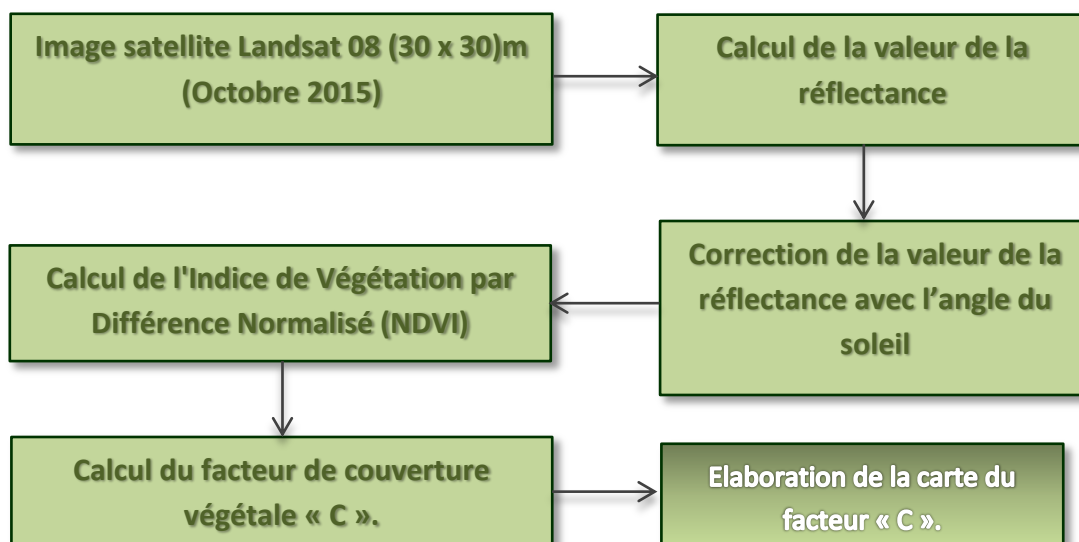


Figure V.12 : Organigramme de la détermination du facteur C.

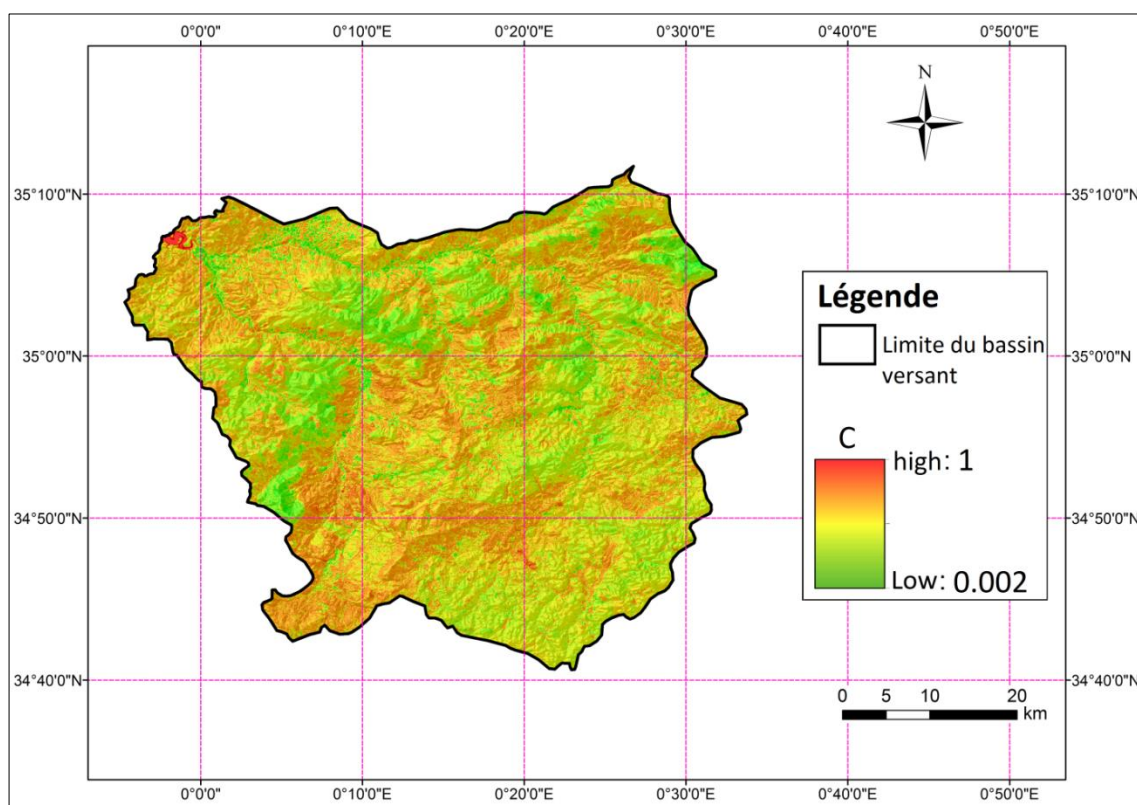


Figure V.13 : Carte du facteur de couverture végétale C.

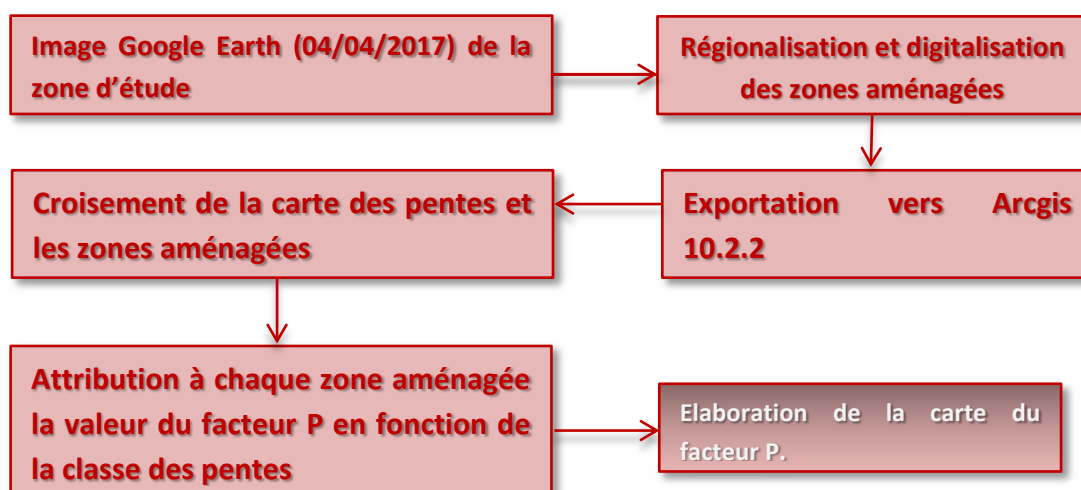
Ce facteur est considéré comme protecteur pour le bassin versant, car une zone dépourvue de couverture végétale présente un risque potentiel élevé de perte en sol, contrairement à une zone qui est munie de couvert végétal dense. Sur le bassin de l'oued Sahouat, le facteur C est évalué de 0,002 à 1 ; plus la valeur augmente plus le sol n'est pas protégé (Benkadja *et al.*, 2015).

#### V.4.5. Pratiques agricoles et conservation du sol (P)

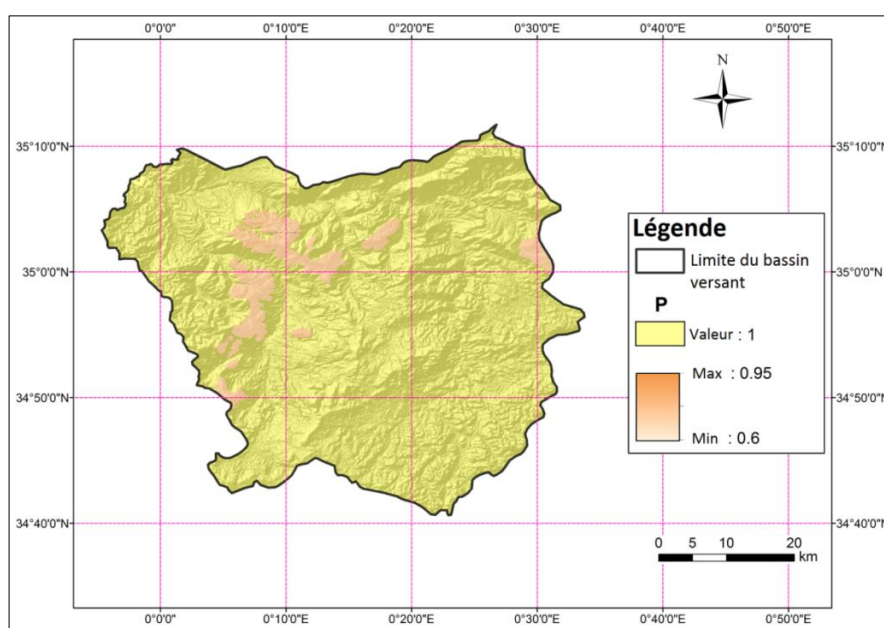
En l'absence d'informations plus précises sur le bassin d'étude, les valeurs du facteur P (Figures V.14 et V.15) varient principalement de 0,6 à 0,95 où le contrôle de l'érosion est pratiqué. Ailleurs, c'est-à-dire sur la majeure partie du bassin qui ne bénéficie pas du contrôle de l'érosion,  $P = 1$ . Dans ces zones, les sols ne sont pas protégés contre l'arrachement des particules et leur transport.

**Tableau V.3 :** Valeurs du facteur P en fonction de la pente du terrain (Panagos et al., 2015b)

Pente (%)	Valeur du facteur P
9 - 12	0,6
13 - 16	0,7
17 - 20	0,8
21 - 25	0,9
>25	0,95



**Figure V.14 :** Organigramme de la détermination du facteur P.



**Figure V.15 :** Carte du facteur des pratiques antiérosives P.

#### V.4.7. Estimation du potentiel érosif annuel

Les SIG nous ont permis d'estimer le risque du potentiel érosif annuel de la zone d'étude pixel par pixel (Figure V.16). Les pertes en sols varient principalement entre 0 et 255 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Ces valeurs sont dans l'ordre de grandeur des valeurs trouvées sur différents sites à travers le monde (Tableau V.4). Le facteur d'érosivité ainsi que le facteur topographique ont le plus grand rôle dans le déclenchement de l'érosion hydrique (Markose et Jayappa, 2016). Les zones à couverture végétale représentent celles à moindre risque, du fait de la réduction de l'impact Splash et du ruissellement, tandis que les forêts modérément ouvertes présentent un risque plus élevé (Kumar et Kushwaha, 2013).

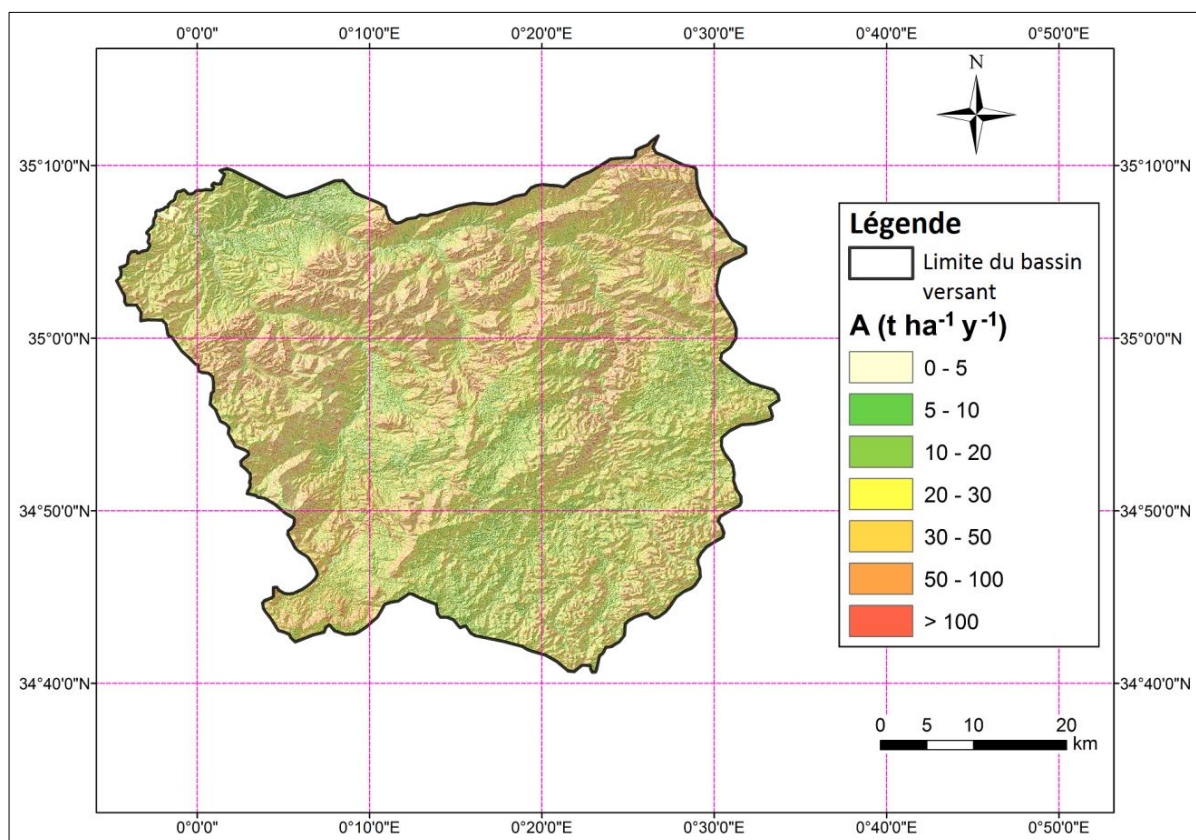


Figure V.16 : Distribution spatiale des pertes en sols du bassin versant de l'oued Sahouat.

Tableau V.4 : Quelques résultats trouvés par quelques auteurs en appliquant le modèle RUSLE.

Référence	Pays	R (MJ mm/ha /h/ an)		K (t ha h/ MJ/ mm)		LS		C		P		A (t/h/an)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Balasubramani et al. (2015)	Inde	333,6	414,2	0	0,109	0,008	22,12	0	0,5	0,28	1	0	95,54
Ferreira et al. (2015)	Portugal	851,7	892,0	0,021	0,039	0	91	0,035	0,79	1		0	0<A<40
Gaubli et al. (2017)	Tunisie	73	95,58	0	0,091	0	>150	0	1	1		0	> 150
Sadiki et al. (2009)	Maroc	135	190	0,38	0,6	0,48	87,9	0,1	1	0,3		0	>35
Markhi et al. (2015)	Maroc	41	57	0,24	0,86	0	>30	0	1	0,55		7	1221
El Garouani et al. (2008)	Maroc	56,3		0,22	0,46	/		0,08	0,75	1		60,74	333,7
Chadli (2016)	Maroc	1527	7963	0,14	0,17	0,03	29,4	0	0,1	0,5	1	10<A<200	
Toumi et al. (2013)	Algérie	20<R<70		/	/	0	55	0,033	1	1		0	1500
Benkadja et al. (2015)	Algérie	100	500	0,016	0,065	0<A<20		0,005	0,5	1		5<A<200	
Benchettouh et al. (2017)	Algérie	370,6	773,5	0,001	0,2	0,217	11,402	0,04	1,6	1		0	>100
Toual et al., dans cette étude	Algérie	324,1	535,8	0,34		0	19,54	0,002	1	0,6	1	0	255

Le tableau V.5 révèle que 87,18 % du bassin connaît une faible érosion hydrique, inférieure à 20 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Ce seuil (20 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) a été choisi par Roose et al. (2000) qui ont indiqué que l'érosion en nappe se produit à un taux d'érosion 0,1 à 20 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, l'érosion en rigoles entre 20 et 50 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, et que le ravinement correspond à un taux de pertes en sols supérieur à 50 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Dans le bassin versant de l'oued Sahouat, les zones touchées par une forte érosion (> 50 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) ne représentent que 8,36% de la superficie totale.

Tableau V.5 : Superficies des pertes en sols en fonction des classes d'érosion.

Classes d'érosion (t/ha/an)	A (km <sup>2</sup> )	A (%)
0 – 5	1339	62,57
5 – 10	373,92	17,47
10 – 20	152,63	7,13
20 – 30	64,77	3,03
30 – 50	30,82	1,44
50 – 100	105,67	4,94
>100	73,19	3,42
<b>Total</b>	<b>2140</b>	<b>100</b>

### V.5. Paramètres statistiques du modèle RUSLE

L'analyse des paramètres statistiques des différents facteurs du modèle RUSLE de la zone d'étude (Tableau V.6) révèle une forte variation des facteurs LS, C et A, par contre les autres facteurs présentent une faible variation spatiale.

Tableau V.6 : Paramètres statistiques des différents facteurs du modèle RUSLE.

Paramètre	Facteur R (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	Facteur K (t h MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	Facteur LS	Facteur C	Facteur P	Facteur A (t/ha/an)
Minimum	324	0,34	0	0,01	0,6	0
Maximum	536	0,34	19,54	1	1	255
Moyenne	450	0,34	0,18	0,63	0,66	16,75
Ecart type	34,20	0	0,52	0,15	0,11	44,78
CV	0,07	0	2,88	4,2	0,16	2,67

### V.6. Impact des pertes en sol sur la retenue du barrage de Ouizert

L'érosion des bassins versants est la source des dépôts dans les lits des oueds et les retenues des barrages (Biswas et Pani, 2015). Plus l'érosion des sols augmente et plus l'envasement est accéléré. Selon le rapport technique du levé bathymétrique élaboré en 2000 par l'Organisme National de Contrôle Technique de la Construction Hydraulique (C.T.H), le réservoir du barrage de Ouizert avait perdu 1,75 % (1,75 hm<sup>3</sup>) de sa capacité initiale (100 hm<sup>3</sup>) en 2000. Le taux d'envasement correspondant est de 0,12 hm<sup>3</sup>/an. Si l'on se réfère au dernier levé bathymétrique réalisé par l'entreprise française Geoid en collaboration avec le Laboratoire des Etudes Maritimes (L.E.M) d'Alger, le comblement du barrage valait 6,09% (6,09 hm<sup>3</sup>) en 2004, ce qui correspond en moyenne, depuis l'édification du barrage, à un comblement annuel de 0,32 hm<sup>3</sup> (Tableau V.7).

Tableau V.7 : Evolution de l'envasement du barrage de Ouizert (1986/2004).

Levé bathymétrique	Capacité initiale (hm <sup>3</sup> )	Capacité après levé bathymétrique (hm <sup>3</sup> )	Perte de capacité (hm <sup>3</sup> )	Taux d'envasement (%)	Perte moyenne annuelle (hm <sup>3</sup> /an)
1986 (Mise en eau)	100	/			
2000 C.T.H	/	98,250	1,750	1,75	0,12
2004 G.E.O.I.D – L.E.M		93,910	6,090	6,09	0,32

D'une façon générale le barrage de Ouizert a été réalisé dans le but de réduire la vitesse de comblement du barrage de Bouhanifia et par conséquent l'envasement du barrage de Fergoug et aussi de prolonger leurs durées de vie.

Quoiqu'il en soit de l'écart entre les deux mesures, le rapprochement des deux courbes hauteur/volume (Figure V.17) de l'année 2000 et de 2004 montre que le taux d'envasement (au maximum de 6 % après 19 ans d'exploitation) reste faible.

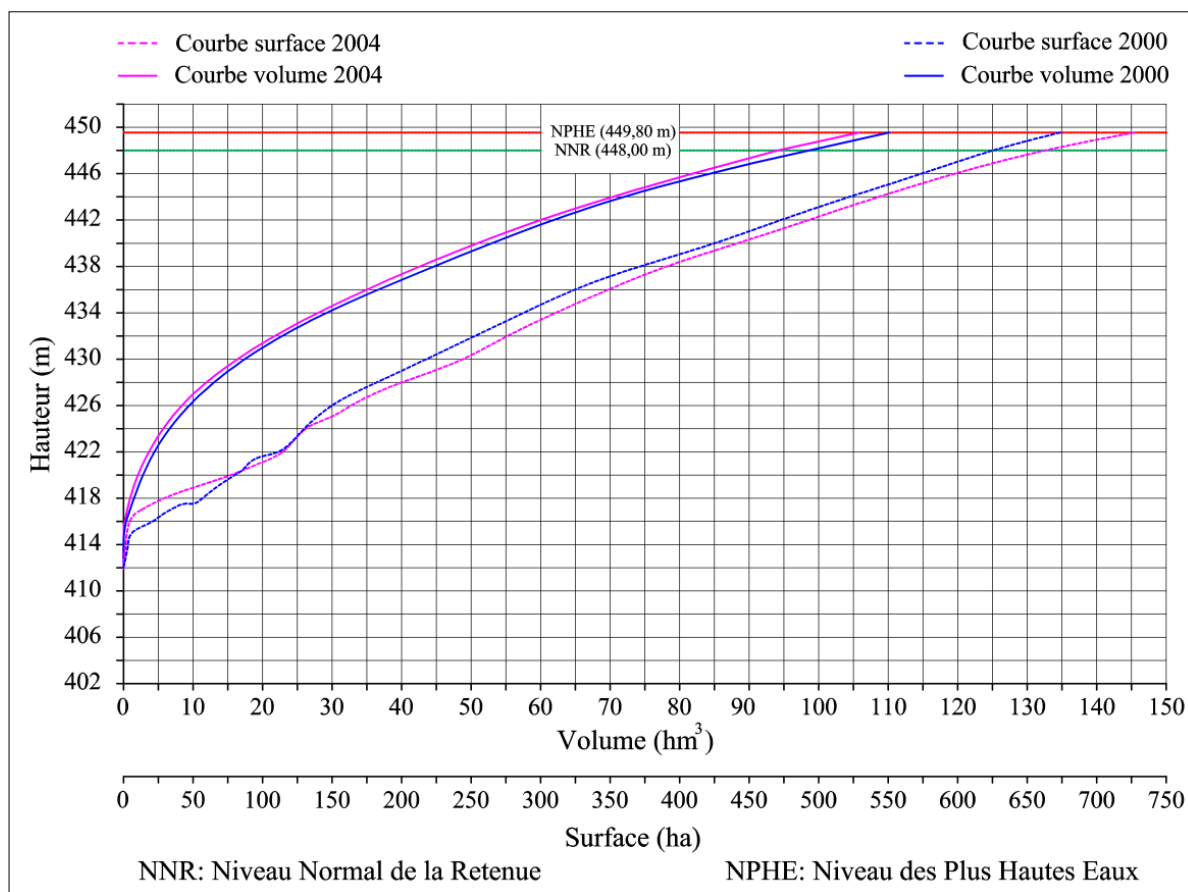


Figure V.17 : Courbe Hauteur/Volume /Surface du barrage de Ouizert (2000 et 2004).

### V.7. Comparaison entre le modèle RUSLE et les mesures bathymétriques

L'application du modèle RUSLE dans la zone d'étude estime les pertes en sol, en moyenne, à  $16,75 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , c'est-à-dire à un décapage des sols de  $3,58 \times 10^6 \text{ t/an}$  ; avec une densité des sols de l'ordre de  $1,6 \text{ t m}^{-3}$ , cela donne une perte en sol moyenne par érosion de  $5,728 \times 10^6 \text{ hm}^3/\text{an}$ . Rappelons-nous que cette estimation présente une incertitude importante, d'abord parce que les caractéristiques du bassin étudié avec ceux des bassins expérimentaux qui ont été à la base de la construction du modèle ne sont pas les mêmes (Ouechtati et Baldassarre, 2011), et d'autre part du fait de l'incertitude sur chacun des paramètres impliqués dans le calcul. Une estimation plus précise des pertes en sol demandera notamment de quantifier plus précisément les paramètres de protection (facteur P) et le couvert végétal (facteur C), mois par mois, à l'aide d'images satellites à très haute résolution.

Par ailleurs, le comblement du barrage mesuré a été estimé (si l'on se réfère au dernier levé bathymétrique) à  $0,32 \text{ hm}^3/\text{an}$  en moyenne sur 19 ans.



L'écart considérable entre ces deux valeurs s'explique aisément pour les raisons suivantes : (1) le modèle RUSLE concerne l'érosion de toute la superficie du bassin versant, alors que le levé bathymétrique concerne les sédiments piégés dans la retenue du barrage; (2) les sédiments érodés qui n'ont pas atteint le réseau hydrographique, se sont redéposés, le dépôt considérable des sédiments dans les cours d'eau (Biswas et Pani, 2015) causant une remontée de lit. Il leur faudra des mois, des années, peut-être des décennies ou des siècles pour atteindre l'exutoire du bassin versant; (3) Une quantité importante de sédiments est piégée avant d'atteindre le barrage de Ouizert dans les retenues collinaires implantées à l'amont ; (4) une partie des sédiments en suspension arrivant au barrage sont évacués par les organes de vidange du barrage (Benkadja et al., 2012).

Ces deux paramètres ne peuvent être comparés directement. Ils pourraient l'être et leur différence indiquerait le volume de particules érodées et déposées avant d'avoir atteint le barrage, que si l'on est capable d'estimer le flux sédimentaire en aval du barrage.

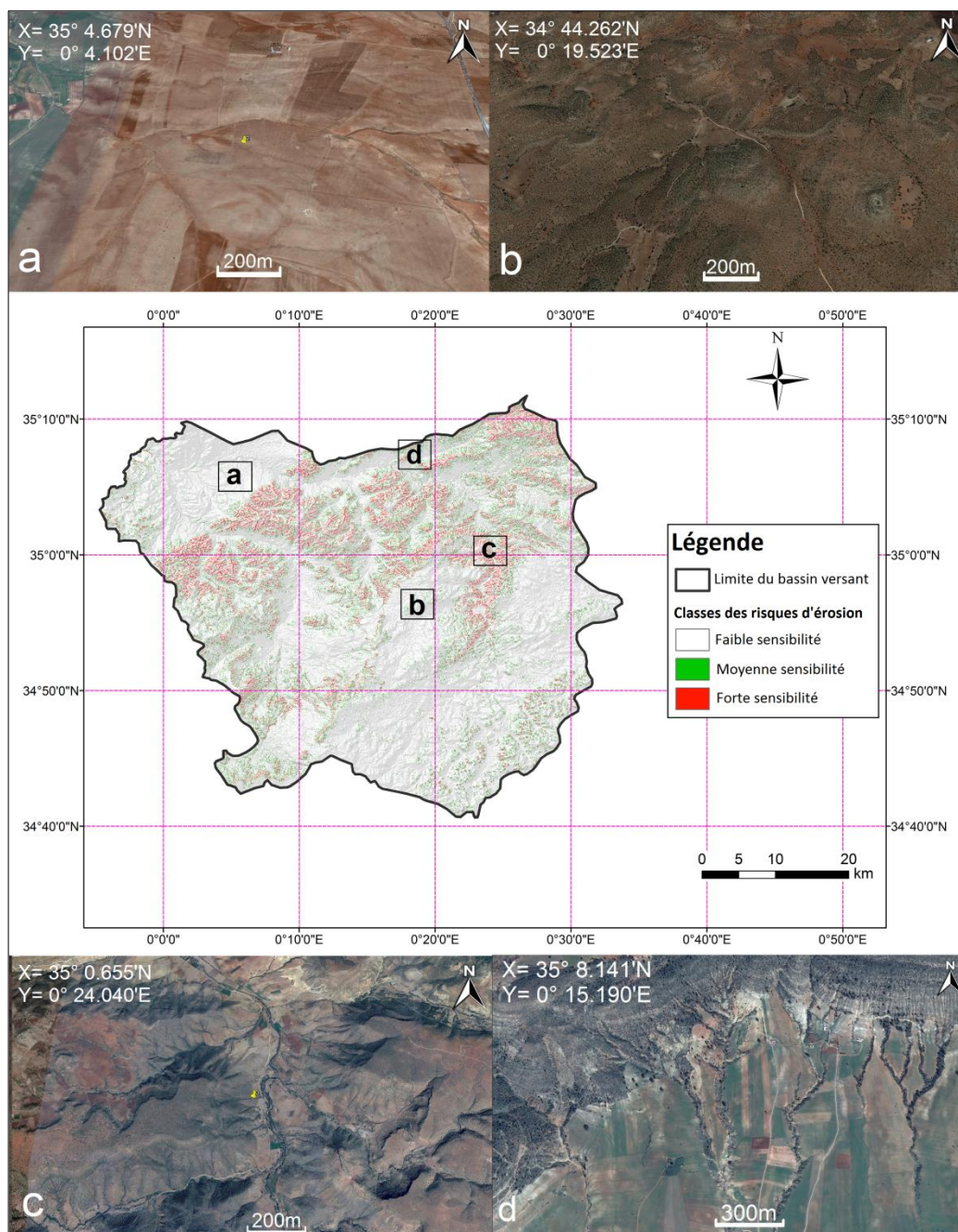
#### V.8. Localisation des zones hiérarchiques de l'érosion hydrique

La carte de sensibilité à l'érosion hydrique est déduite en se basant sur la carte des pertes moyennes annuelles précédemment établie. Un classement par zone d'érosion allant de la plus faible au plus intense a été établi (Figure V.18 et Tableau V.8).

La comparaison de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique aux images satellites de Google Earth acquises en 2016, montre une nette conformité du résultat obtenu avec l'état physique du sol sur terrain (Figure V.18 (a), (b), (c) et (d)).

**Tableau V.8** : Classification de la sensibilité à l'érosion hydrique selon le taux d'érosion.

Taux d'érosion (t/ha/an)	A (km <sup>2</sup> )	A (%)	Classe de sensibilité des sols
0 - 50	1961,1	91,6	Faible sensibilité
50 - 100	105,7	4,9	Moyenne sensibilité
> 100	73,2	3,4	Forte sensibilité



**Figure V.18 :** Classes de sensibilité à l'érosion hydrique selon le taux d'érosion hydrique. (a) faible sensibilité, (b) moyenne sensibilité, (c) et (d) forte sensibilité.

D'après les classes de sensibilité à l'érosion, nous pouvons déduire que la faible sensibilité à l'érosion hydrique (0 - 50 t/ha/an) couvre la plus grande superficie du bassin versant 91,6 %, elle est concentrée au nord-ouest et au sud-Est du fait des pratiques agricoles dans ces zones, par contre la moyenne et la forte sensibilité respectivement (50 - 100 t/ha/an) et (>100 t/ha/an) concernent presque la même superficie (105 et 73 km<sup>2</sup>, respectivement), pour un total correspondant à 8,3 % du bassin versant. Le ravinement est observé dans les

zones fortement pentues de 12,5% et plus. Les zones moyennement ravinées sont repérées au pied des montagnes en présence de pentes moyennes < 12,5%.

### V.9. Altitude et sensibilité à l'érosion

Les superficies des différentes classes d'érosion hydrique des sols associées aux classes d'altitudes du bassin versant sont représentées dans le Tableau V.9. Les zones les plus sensibles à l'érosion se situent majoritairement entre 700 et 1000 m d'altitude. Cette zone doit bénéficier de moyens de lutttes antiérosives afin de réduire le risque d'érosion hydrique.

Tableau V.9 : Classes de sensibilité à l'érosion en fonction des altitudes.

Altitude (m)	A (km <sup>2</sup> )	A (km <sup>2</sup> )			A (%)		
		Faible sensibilité	Moyenne sensibilité	Haute sensibilité	Faible sensibilité	Moyenne sensibilité	Haute sensibilité
424 - 500	80,25	78,99	1,10	0,17	98,42	1,37	0,21
500 - 600	177,42	172,96	3,74	0,71	97,49	2,11	0,40
600 - 700	221,33	200,31	13,24	7,78	90,50	5,98	3,51
700 - 800	284,08	247,38	19,52	17,18	87,08	6,87	6,05
800 - 900	241,25	204,46	17,52	19,27	84,75	7,26	7,99
900 - 1000	261,40	230,51	16,50	14,39	88,18	6,31	5,50
1000 - 1100	428,52	405,09	15,84	7,60	94,53	3,70	1,77
1100 - 1200	335,03	320,21	11,05	3,76	95,58	3,30	1,12
1200 - 1300	109,57	100,20	7,06	2,32	91,45	6,44	2,12
1300 - 1331	1,22	1,10	0,10	0,01	90,75	8,28	0,96
<b>Total :</b>	<b>2140,08</b>	<b>1961,21</b>	<b>105,67</b>	<b>73,19</b>	<b>/</b>	<b>/</b>	<b>/</b>

### V.10. Priorité d'intervention

La priorité d'intervention consiste à la hiérarchisation d'un plan d'action de conservation des eaux et des sols dans le bassin versant. Pour ce faire, un découpage automatique basé sur le modèle numérique de terrain de la zone d'étude a été réalisé. Cette opération a distingué en définitive 32 sous-bassins (Figure V.19).

La priorisation d'un plan d'action par sous-bassin nécessite une stratégie restant soumise à trois conditions principales, à savoir :

- 1) le taux moyen de pertes en sols du sous-bassin considéré doit être connu ou estimé ;
- 2) la protection du barrage de Ouizert contre un engorgement accéléré est établie en considérant la distance curviligne de l'exutoire du sous-bassin par rapport à la queue de la retenue du barrage ;

Dans ce contexte, une matrice de décision a été élaborée pour procéder à la priorité d'intervention par sous-bassin. Cinq classes ont été désignées, de la très urgente à la non urgente (Tableau V.10). Les résultats obtenus sont illustrés dans le Tableau V.11 et la Figure V.20.

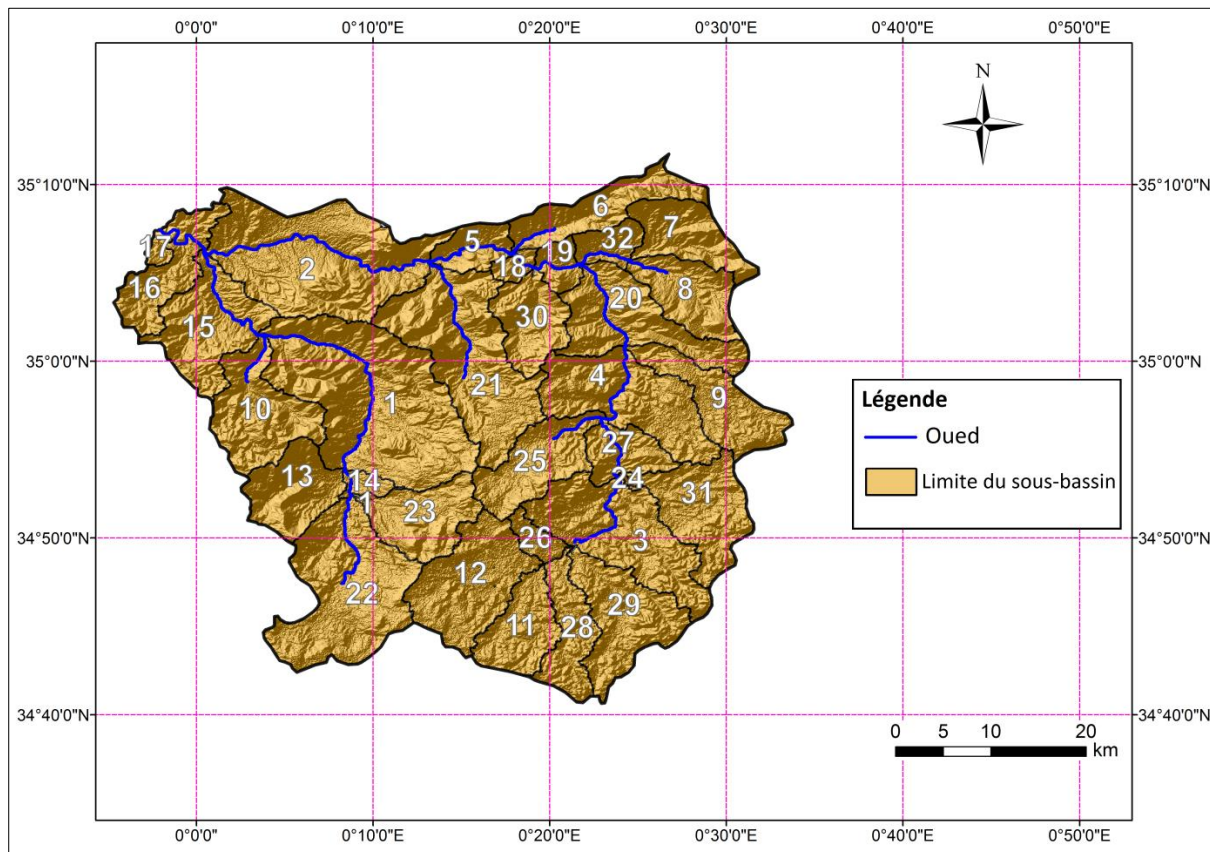


Figure V.19 : Découpage de la zone d'étude en sous-bassins versants.

Tableau V.10 : Matrice de décision pour la priorité d'intervention.

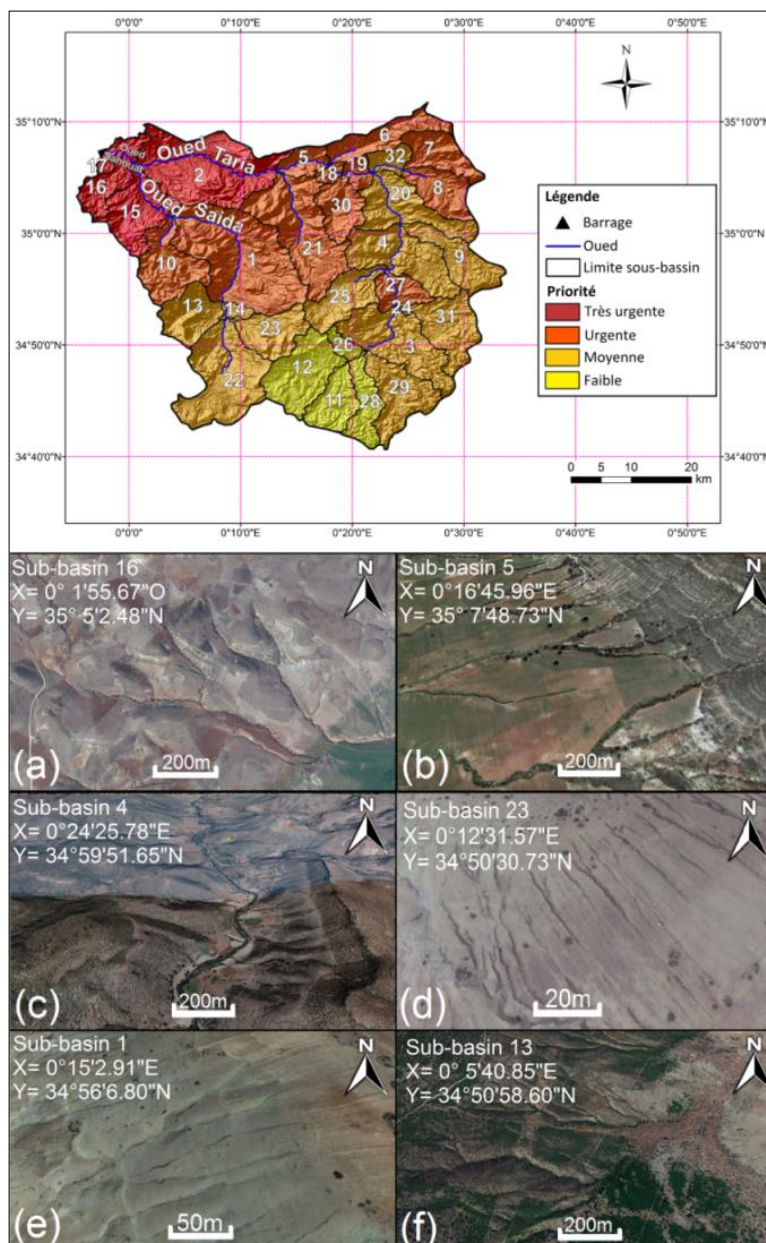
Pertes en sol (t/ha/an)	Distance/barrage (km)					Priorité
	> 100	50 - 100	20 - 50	10 - 20	0 - 10	
0 - 5	Non urgente	Basse priorité	Moyenne priorité	Moyenne priorité	Moyenne priorité	
5 - 7.4	Basse priorité	Basse priorité	Moyenne priorité	Moyenne priorité	Moyenne priorité	
7.4 - 12	Basse priorité	Moyenne priorité	Moyenne priorité	Urgente	Urgente	
12 - 20	Moyenne priorité	Moyenne priorité	Urgente	Urgente	Très urgente	
> 20	Moyenne priorité	Urgente	Urgente	Très urgente	Très urgente	

Tableau V.11 : Priorité d'intervention par sous-bassin de la zone d'étude.

N° Sous-bassin	A (km <sup>2</sup> )	A <sub>moy</sub> (t/ha/year)	Distance /barrage (km)	Priorité
16	53,9	13,14	0	Très urgente
17	6	12,18	0	Très urgente
2	177,3	14,93	9,79	Très urgente
15	82,8	16,01	9,79	Très urgente
1	213,6	18,05	25,2	Urgente
10	81,9	24,3	26,1	Urgente
5	26,2	16,35	45,14	Urgente
21	146,6	20,67	45,14	Urgente
18	9,4	23,08	55,15	Urgente
6	58,8	25,24	55,6	Urgente
19	16,8	25,19	58,91	Urgente
30	49	27,04	58,91	Urgente
7	51,9	22,23	76,12	Urgente
27	34,5	20,81	89,92	Urgente
14	9,6	8,91	53,2	Moyenne priorité
13	57,9	14,6	54,1	Moyenne priorité
23	60,4	15,21	58,63	Moyenne priorité
20	86,6	19,85	64,22	Moyenne priorité
32	20,9	15,91	64,87	Moyenne priorité
22	143,6	17,08	73,63	Moyenne priorité
8	53,2	18,38	76,12	Moyenne priorité
4	100,8	19,52	77,07	Moyenne priorité
9	60,9	12,31	77,07	Moyenne priorité
25	63,4	10,64	88,82	Moyenne priorité
3	111,3	11,87	98,51	Moyenne priorité
31	76,5	11,21	99,11	Moyenne priorité
24	0,9	16,19	99,31	Moyenne priorité
29	79,5	12,39	112,3	Moyenne priorité
26	14,3	8,78	112,3	Basse priorité
28	46,5	11,54	112,3	Basse priorité
11	51,5	8,94	116,22	Basse priorité
12	93,5	8,65	117,64	Basse priorité

Parmi les 32 sous-bassins constituant la zone d'étude, les sous-bassins 16, 17, 2 et 15 sont les plus urgents à aménager du fait de leur proche distance par rapport au barrage évalué à 10 km et au taux moyen de pertes en sols estimé respectivement à 13,1; 12,2 ; 14,9 et 16,0 t/ha/an. Pour la priorité d'intervention très urgente, une superficie de 15,7 km<sup>2</sup> de terres hautement sensibles à l'érosion devrait être aménagée. Dix sous-bassins sont classés en priorité urgente avec des pertes moyennes de sols comprises entre 16,3 et 27,0 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Ils sont principalement situés dans la partie centrale du bassin versant. Les sous-bassins

situés dans les parties sud-ouest et Est du bassin ont montré une priorité modérée. Le bassin de l'oued Sahouat présente une multitude de formes d'érosion linéaire, caractérisées par des rigoles et des ravines jusqu'à des ravins (de Vente et Poesen, 2005). Plusieurs sous-bassins et leurs formes d'érosion sont illustrés sur la figure 10 avec des ravins (Figure V.20 a, b, c et f) et des ravines (Figure V.20 d et e). La Figure V. 21 illustre une synthèse récapitulative des différentes étapes établies pour la priorité d'intervention pas sous-bassin de la zone d'étude.



**Figure V.20 :** Priorité d'intervention par sous bassin et localisation des différentes formes de manifestation de l'érosion hydrique dans le bassin versant, (a) et (b) : ravines, (c); (d); (e); (f) ravins.

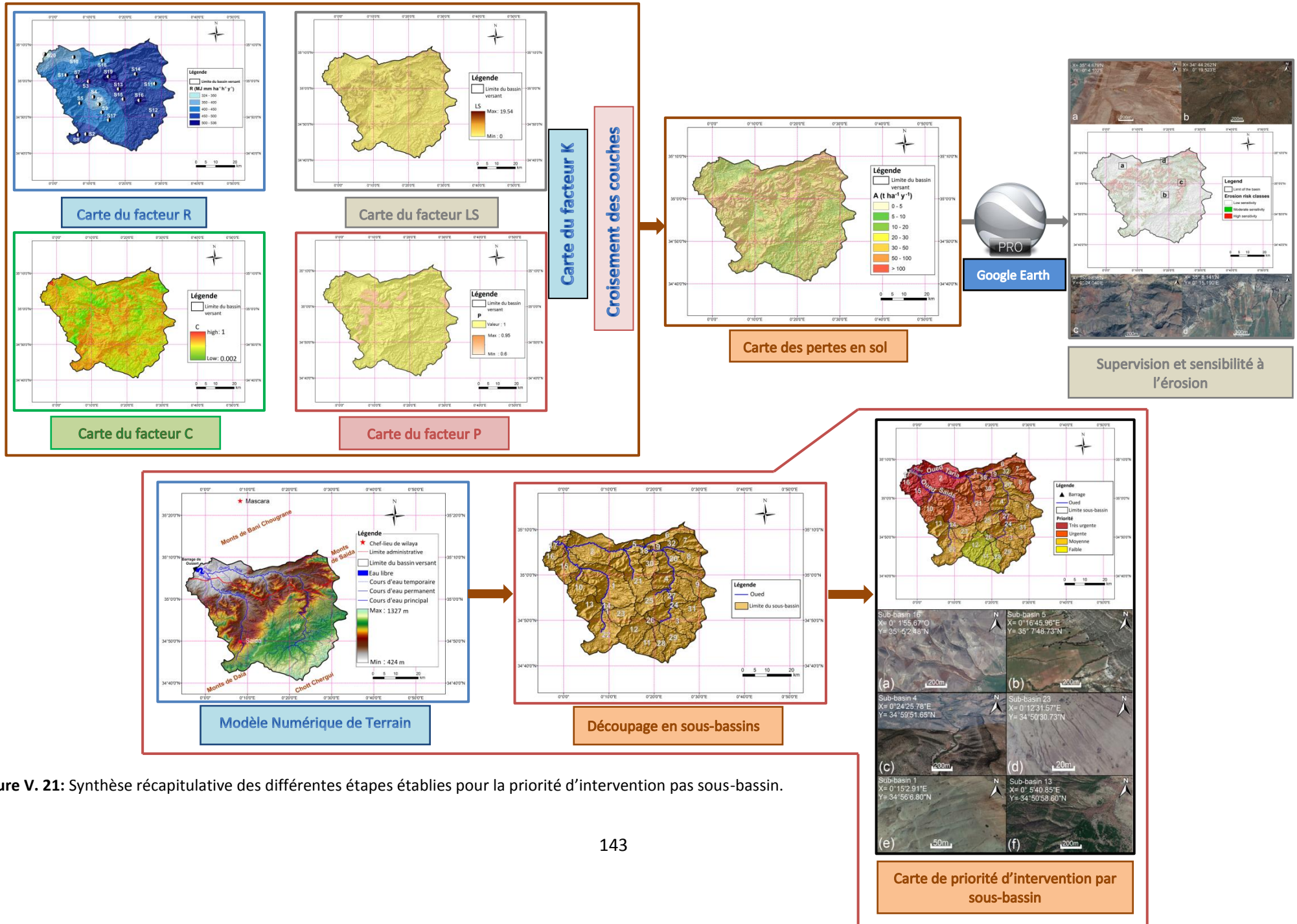


Figure V. 21: Synthèse récapitulative des différentes étapes établies pour la priorité d'intervention pas sous-bassin.

### V.11. Comparaison entre la dégradation issue du modèle RUSLE et le modèle SRC

La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes RUSLE et SRC consiste à comparer les « dégradations spécifiques » correspondant à l'érosion (RUSLE) et au transport au droit des stations hydrométriques (SRC). Il est ici très important d'apporter une précision de vocabulaire car ce point porte parfois à confusion dans la littérature. Le même terme générique de « dégradation spécifique » est parfois employé alors qu'il s'agit en réalité de deux paramètres différents, l'un calculé à partir des flux transportés (SRC) et l'autre à partir de la dénudation des sols (RUSLE). Walling et Webb (1996) et Ouillon (2018) expliquent clairement la différence. Les débits et les concentrations permettent par la méthode SRC d'estimer la charge sédimentaire qui, ramenée à la surface du bassin versant donne accès à la *charge sédimentaire spécifique* « specific sediment yield ». Les modèles comme RUSLE estiment la perte en sol (« soil loss », « soil degradation ») qui, ramenée à la surface du bassin donne accès à la *perte en sol spécifique*. Comme l'indiquent Walling et Webb (1996), il est estimé à l'échelle mondiale qu'entre 13% et 20% des pertes en sol sont actuellement évacués à l'exutoire des bassins vers les océans – ce qu'ils appellent le rapport d'apports sédimentaires ou « sediment delivery ratio » (SDR). Il est donc important de bien différencier la charge sédimentaire spécifique et la perte en sol spécifique.

Les étapes de comparaison de ces deux paramètres consistent à :

- Faire l'extraction par sous-bassin à l'aide du logiciel ArcGis au droit des stations hydrométriques H1 et H2 (Figure V. 22);
- Déduire les pertes en sol dans chaque sous-bassin;
- Calculer les différentes classes de sensibilité à l'érosion pour déduire le sous-bassin le plus dégradé (Tableau V.12).



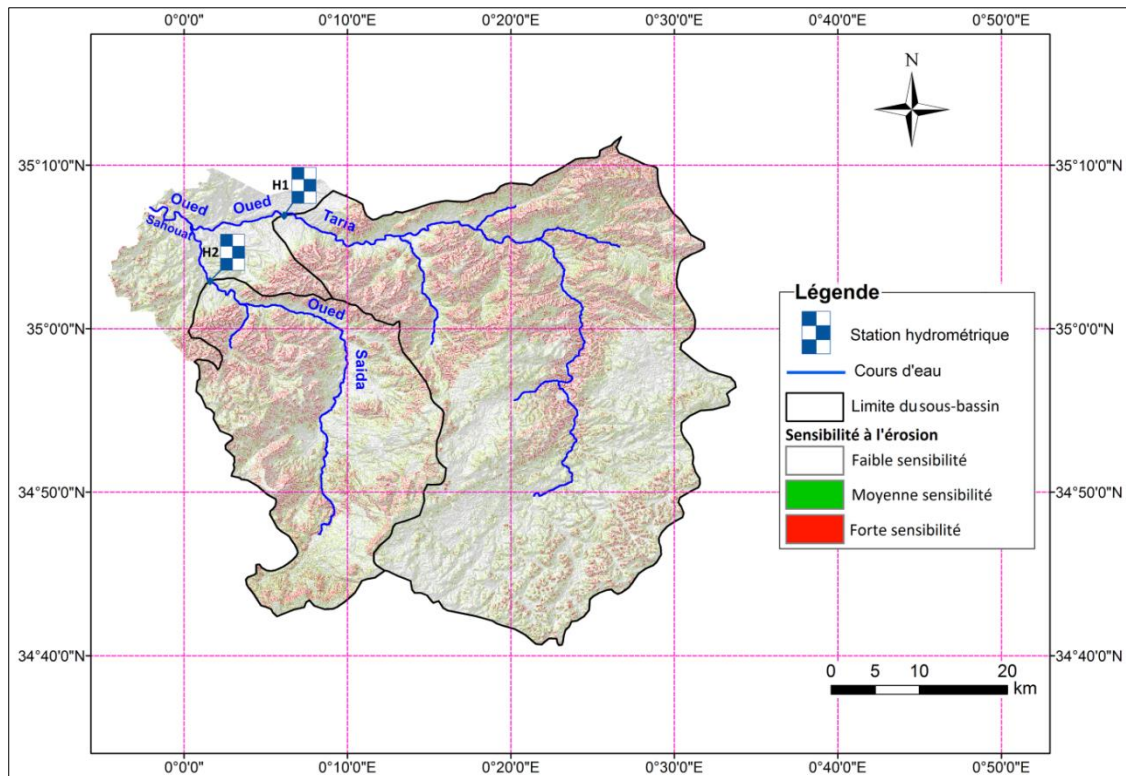


Figure V. 22 : Sensibilité à l'érosion au droit des stations hydrométriques.

Si l'on s'en tient aux valeurs au droit de chaque station hydrométrique avec le modèle RUSLE on trouve respectivement :

**Station (H1):** La perte en sol spécifique issue du modèle RUSLE est de  $18,35 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  ( $1835 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ), tandis que les flux sédimentaires spécifiques au droit de la station de l'oued Taria sont de  $143,42 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , ce qui donne sur ce sous-bassin un ratio d'apports sédimentaires (ou SDR) de 7,8 %.

**Station (H2) :** Le modèle RUSLE fournit une perte en sol spécifique de  $15,66 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  soit  $1566 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$  comparativement à la charge sédimentaire spécifique au droit de la station H2 qui s'évalue à  $73,3 \text{ t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , d'où un SDR de 4,7%.

La différence entre ces valeurs nous mène à conclure que :

- Le volume de particules érodées chaque année n'atteignent pas le point de jaugeage du transport solide H1 et H2;
- Une forte probabilité que les particules érodées se déposent dans le bassin et n'atteignent pas le réseau hydrographique;
- Les sédiments véhiculés par le courant se déposent dans le lit causant sa remontée;

- Le piégeage des sédiments détachés au niveau des aménagements de lutte antiérosifs.

On observe que le taux de rétention dans les bassins des particules érodées et redéposées avant de parvenir à l'exutoire (92.2 % à H1 et 95.3 % à H2) est un peu supérieur au taux moyen mondial qui est estimé entre 80 et 87 %. Ces valeurs élevées peuvent s'expliquer par la très grande variation de dénivellation au sein des sous-bassins. Pour étudier cet aspect plus en détail, une approche possible pourrait être d'utiliser un modèle hydrologique qui prend en compte à la fois l'érosion et le transport sur chaque domaine élémentaire du bassin versant, comme le modèle SWAT (Zettam *et al.*, 2017, Wei *et al.*, 2019).

**Tableau V.12** : Classes de sensibilité à l'érosion au droit des stations hydrométriques.

Sous-bassin / Superficie	A (km <sup>2</sup> )	A (km <sup>2</sup> )			A (%)		
		Faible sensibilité	Moyenne sensibilité	Haute sensibilité	Faible sensibilité	Moyenne sensibilité	Haute sensibilité
Sous-bassin Oued Taria (H1)	1350	1128,60	118,30	103,10	83,60	8,76	7,64
Sous-bassin Sidi Boubeker (H2)	543	440,00	52,96	50,05	81,03	9,75	9,22

D'après le tableau des classes de sensibilité à l'érosion hydrique des deux sous-bassins nous pouvons conclure que :

- Le sous-bassin (H1) détient la plus grande superficie à haute sensibilité avec 103 km<sup>2</sup>, soit le double du sous-bassin (H2);
- Le sous-bassin (H1) est le plus productif en sédiments et contribue en grande partie à l'envasement progressif du barrage de Ouizert;

D'après la carte du facteur R, nous remarquons que les pluies sont plus agressives au niveau du bassin (H1) que (H2), cette analyse nous renseigne sur une forte susceptibilité d'avoir des terres dégradées par le martellement des précipitations.

## V.12. Conclusion

L'érosion des sols est un phénomène qui entraîne un risque pour le patrimoine agro-pédologique. Cette étude a présenté l'évaluation quantitative d'une cartographie des pertes locales de sols dans le bassin de de l'oued Sahouat en amont du barrage de Ouizert basée sur le modèle RUSLE. L'utilisation d'un SIG a joué un rôle important et précieux dans la cartographie de ces pertes en sol. Le bassin subit des pertes de sol estimées

entre 0 et 255 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, avec une valeur moyenne sur le bassin de 16,7 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Bien que ces valeurs soient basées sur une couverture végétale donnée (octobre 2015) qui peut varier saisonnièrement et d'une année à l'autre, elles montrent la grande sensibilité des sous-bassins à l'érosion hydrique. Cette opération peut être répétée avec plusieurs cartes de la couverture végétale pour étudier la sensibilité des pertes de sol à la couverture végétale saisonnière. L'utilisation d'images satellitaires à très haute résolution devrait fournir des estimations plus détaillées des taux de perte de sol ([Biswas et Pani, 2015](#)).

L'utilisation de la division de notre bassin d'étude en sous-bassins permet de prioriser le niveau d'urgence du plan d'action pour limiter l'envasement du barrage de Ouizert. Cela devrait englober de nombreux types de mesures, y compris les travaux antiérosifs, l'augmentation de la couverture végétale, l'utilisation de gabions et de seuils en pneus usés et de petits barrages intermédiaires.

# ***CONCLUSION GENERALE***

## **CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS**

### **1. Conclusion générale**

Au terme de cette étude, qui s'inscrit dans le domaine de l'érosion hydrique et du transport solide en suspension, avec pour objectif principal l'évaluation de l'érosion hydrique et du transport solide du bassin versant de l'oued Sahouat (2140 km<sup>2</sup>) au droit du barrage de Ouizert, reprenons les principales conclusions de notre travail :

Le bassin versant de l'oued Sahouat présente une forme allongée avec un coefficient de Gravelius  $K= 1,4$  et un temps de concentration des eaux à l'exutoire estimé à 18,48 heures.

L'étude du relief a révélé que la zone d'étude est située dans une tranche d'altitudes allant de 424 à 1327 m, le bassin versant est classé comme relief fort avec une dénivelée spécifique de 347,41 m.

La température moyenne interannuelle au niveau de la station climatique de Saïda durant la chronique 1977 à 2010 donne une valeur de 16,7 °C. La pluviométrie moyenne interannuelle (1977- 2010) s'élève à 345,3 mm. La région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride avec un hiver humide et froid et un Eté sec et chaud.

Le barrage de Ouizert a été réalisé entre 1974 et 1986 par le Groupement Algéro-Roumain de Ouizert (G.A.R.O) pour l'alimentation en eau potable des villes d'Oran, Arzew et Mohammadia ainsi que pour l'irrigation du périmètre de Hacine et Habra. La capacité initiale du barrage s'élève à 100 hm<sup>3</sup>. Selon le dernier levé bathymétrique de 2003 réalisé par l'entreprise GEOID (France) et le Laboratoire des Etudes Maritimes (LEM) Algérien, la capacité du barrage a enregistré une perte de 6,09 hm<sup>3</sup> à cause de l'envasement progressif, soit 93,91 hm<sup>3</sup> de capacité utile restante.

La mise en étude de 20 stations pluviométriques réparties dans le bassin versant durant une période de 45 ans (1970/71 - 2014/15) révèle que les valeurs du coefficient de variation ne semblent pas suivre la grandeur de la hauteur pluviométrique car plus l'échelle est grande plus les précipitations sont stables. Les tests statistiques de détection des ruptures effectués pour les vingt stations étudiées montrent des tendances à la hausse et à la baisse.

L'étude hydrométrique des deux stations, à savoir : Sidi Boubeker et Oued Taria durant la période 1991/92 - 2012/13, a révélé qu'elles présentent un débit presque identique respectivement  $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$ , malgré la superficie drainée qui est largement différente. En effet la station hydrométrique de Sidi Boubeker est influencée par un débit d'eau usée considérable ce qui augmente sa valeur lors de la mesure.

L'application du modèle SRC basé sur la relation débit liquide - débit solide au niveau des deux stations hydrométriques, révèle que les apports solides sont très variables à l'échelle temporelle. Les pics des apports solides sont observés durant le mois d'octobre.

La dégradation spécifique du bassin versant au droit de la station hydrométrique de l'oued Taria ( $D_s = 143 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ) est plus élevée que celle trouvée pour le sous-bassin voisin contrôlé par la station de Sidi Boubeker ( $D_s = 73 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ), cette dégradation est favorisée par certaines conditions sur terrain telles que la topographie du terrain, la discontinuité spatiale du couvert végétal et l'irrégularité spatio-temporelle des précipitations.

L'utilisation du SIG a joué un rôle important et précieux dans la cartographie des pertes en sols, il permet de gérer d'une façon rationnelle une multitude de données relatives aux différents facteurs du modèle RUSLE. Le SIG permet également l'enrichissement et l'actualisation permanente et offre la possibilité d'une mise à jour continue de la base de données.

L'élaboration du modèle Builder nous est d'un grand secours en particulier pour une éventuelle étude spatio-temporelle des pertes en sols, en effet l'approche RUSLE combinée au SIG a favorisé l'estimation de l'érosion hydrique pixel par pixel et en finalité la distribution spatiale des pertes en sols, ainsi que la visualisation de chaque paramètre dans une seule couche.

La superposition entre les cinq paramètres du modèle RUSLE à savoir : l'agressivité des pluies (R), l'érodibilité des sols (K), la pente et sa longueur (LS), le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives (P) a donné une estimation des pertes en sols allant de 0 à  $255 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  avec une moyenne de  $16,75 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ . Une proportion majoritaire de 87,18 % du bassin connaît une faible érosion hydrique inférieure à  $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , 4,47% des sols sont touchés par une érosion en rigoles avec un taux de pertes allant

de 20 et 50 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, le ravinement correspond à un taux de pertes en sol supérieur à 50 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> et ne représente que 8,36% de la superficie totale.

L'érosion hydrique et le transport solide au niveau du bassin versant affecte le barrage de Ouizert avec un taux de comblement moyen annuel de 0,32 hm<sup>3</sup>/an (au dernier levé bathymétrique de 2003) cette valeur reste relativement faible comparativement à d'autres barrages au nord algérien.

La comparaison de la carte de sensibilité à l'érosion hydrique aux images satellites de Google Earth acquises en 2016 montre une nette conformité du résultat obtenu avec l'état physique du sol sur terrain. La tranche d'altitude située entre 700 et 1000 m renferme les terres à hautes sensibilité à l'érosion hydrique.

En se basant sur le découpage de la zone d'étude en 32 sous-bassins à partir du MNT, le taux moyen annuel de pertes en sols par sous-bassin et la distance par rapport au barrage de Ouizert, nous avons pu conclure que la priorité d'intervention est de la faible urgence à la très urgente. La très urgente est localisée aux alentours du barrage de Ouizert, la priorité urgente est située au centre du bassin, la moyenne urgente en amont et la faible urgence au sud-est du chef-lieu de la wilaya de Saida.

## **2. Perspectives de travail (mesures et analyses)**

La mise en place et l'application du modèle RUSLE a rencontré plusieurs difficultés qui concernent essentiellement la collecte des données nécessaires au niveau des services de l'ANRH, l'Agence des Bassins Hydrographiques (A.B.H.), l'Office Nationale de la Météorologie (O.N.M), l'Institut national de cartographie et de télédétection (I.N.C.T) pour renforcer et alimenter la base de données, en particulier celles que nous ne possédons pas comme la pédologie, les données instantanées des précipitations, la haute résolution de l'image satellitaire.

Il est par ailleurs recommandé de superviser les résultats obtenus sur terrain, afin de déceler et localiser les résultats erronés, reconnaître la source et l'origine de l'erreur et mettre à jour la base de données d'une manière continue.

Cette étude pourrait être approfondie avec de meilleurs résultats en considérant certaines perspectives :

**a- Estimation avec le modèle SRC**

- Le prélèvement doit se faire suivant une verticale et non pas au bord de l'oued afin d'établir une moyenne du transport solide véhiculé;
- Prendre en considération le charriage;
- Utiliser des appareils et dispositifs de mesure de haute technologie;
- Ajouter l'échantillonnage de nuit, en particulier nécessaire en période de crue;
- Automatiser les stations hydrométriques afin de mesurer en continu le débit véhiculé par l'oued et le transport solide correspondant.

**b- Estimation avec le modèle RUSLE**

- La fourniture des données pluviométriques instantanées de la part des services de l'ANRH permettrait d'estimer plus précisément le facteur d'érosivité R;
- L'utilisation des images satellitaires à très haute résolution revêt une grande importance afin de mieux estimer des facteurs du modèles RUSLE, tel que le facteur topographique LS et le facteur de couverture végétale C;
- La fourniture de la carte des pratiques antiérosives réalisées en détail et à très haute résolution de la part des services de la conservation des forêts permettrait de mieux localiser les aménagements de lutte antiérosifs;
- L'étude de la variabilité temporelle de la distribution des pertes en sols surtout à l'échelle mensuelle et saisonnière permettrait de préciser l'influence du couvert végétal sur l'érosion hydrique;
- La supervision sur terrain à l'aide d'un Global Positioning System (GPS) des zones à risque d'érosion hydrique, allant de la plus faible à la plus sensible dans différents points du bassin versant, serait également utile pour améliorer la validation des diagnostics du modèle.

**3. Recommandations pour l'aménagement du bassin versant de l'oued Sahouat**

De tout ce qui précède afin de protéger et préserver les ressources naturelles, notamment les eaux et les sols, les recommandations destinées à l'aménagement du bassin versant se résument comme suit :

- La priorité d'intervention au niveau du bassin versant reste soumise à la pérennité du barrage de Ouizert et des zones aux alentours ; à cet effet, on a recours à des moyens



de lutte préventifs comme l'aménagement du bassin versant avec des techniques mécaniques (seuils en pierres sèches, gabionnage, terrasses seuils en pneus usés, banquettes en grillage, cordons de pierres isohypses, banquettes...) et biologiques (haies vives, reboisement, paillage,...).

- Durant l'année 2004 une étude d'aménagement du bassin versant de l'oued Sahouat a été menée par le bureau d'étude Canadien Tecslut International Limitée à cet effet : les services forestiers doivent être attentifs et suivre à la lettre la réalisation des travaux car la non-conformité de la réalisation avec le plan d'exécution mène à un échec du projet;
- L'amélioration de l'infiltration au niveau de la zone d'étude revêt une grande importance ; à cet effet il faut éviter de tenter de reboucher la ravine sinon avec le temps elle retrouvera un autre lit;
- Connaissant l'importance du facteur anthropique qui contribue en grande partie à l'érosion, notamment le surpâturage, il est conseillé sinon urgent de sensibiliser la population locale de l'échec de certains projets précédents de Conservation des Eaux et des Sols (C.E.S);
- La gestion des ressources en sols vise à réduire l'érosion hydrique, pour cela l'intégration de la population est recommandée;
- L'aménagement mis en place sur le terrain doit remplir deux conditions principales: briser l'énergie cinétique de l'eau et éviter que les sédiments atteignent le réseau hydrographique;
- L'abondance de la matière première constitue le principal choix de la technique à employer.
- Le bétail doit être tenu à l'écart de l'aménagement, ce dernier dégrade la végétation.

#### **4. Recommandations pour la protection du barrage de Ouizert contre l'envasement**

Les recommandations dictées en cette partie visent l'augmentation de la durée de vie du barrage de Ouizert, elles s'énumèrent comme suit :

- L'aménagement des berges du barrage de Ouizert constitue la première opération, car l'érosion d'une particule de sol en cet endroit est directement liée à l'envasement sans passer par un temps de transport solide dans les cours d'eau;

- L'aménagement des cours d'eaux est souhaité du nord vers le sud surtout au niveau et après la confluence des deux oueds (Oued Taria et Oued Saida) car l'augmentation du débit associé à la pente provoque une production d'une énergie capable de générer différentes érosions (érosion du fond du lit et érosion des berges);
- Une bonne gestion des courants de densité par le chef d'exploitation du barrage assure la prolongation de la durée de vie de l'ouvrage;
- Selon le levé bathymétrique de 2004, la perte de capacité est de 6%, le barrage de Ouizert ne nécessite pas des opérations de dragage dans l'immédiat, mais en contrepartie un levé bathymétrique doit être mis au programme.

Au cours de cette étude réalisée tant par des visites, des déplacements sur les lieux, des renseignements recueillis auprès des établissements concernés, nous espérons avoir dressé un tableau relatif à l'érosion hydrique et du transport solide du bassin versant de l'oued Sahouat.

***REFERENCES***

***BIBLIOGRAPHIQUES***

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achite M, Meddi M (2004)** Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* ; 15 (4) : 367-73.
- Achite M, Meddi M (2005)** Variabilité spatio-temporelle des apports liquides et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (nord-ouest algérien). *Rev Sci Eau* 18:37–56. <https://doi.org/10.7202/705575ar>
- Achite M, Ouillon S (2007)** Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *J Hydrol* 343:187–202. [doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.026](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.026)
- Achite, M. Ouillon, S. (2016)** Recent changes in climate, hydrology and sediment load in the Wadi Abd, Algeria (1970–2010), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 1355-1372. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1355-2016>
- Achite M, Touaibia B, Ouillon S (2006)** Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences & Perspectives, 14th International Soil Conservation Organization Conference, Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments, Marrakech, Morocco, May 14-19, 2006 (ISCO 2006).
- Achite M, Toubal A K, Bettahar N, Ballah A (2014)** Evaluation de l'envasement du barrage Sidi M'hamed Benaouda dans le bassin versant de la Mina par l'application du modèle P.I.S.A. *International Journal for Environment & Global Climate Change*. Vol 2, Issue 3, 86-94 pp.
- Admasu A (2005)** Study of sediment yield from the watershed of Angereb reservoir. Master thesis, Alemaya University, Ethiopia, p 114.
- Aké, G.É., Kouadio, B.H., Adja, M.G., Ettien, J.B., Effebi, K.R., Biémi, J. (2012)** Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Volume 6 : *Varia*. Pp. 1-42.
- Ammari A (2012)** Vulnérabilité à l'Envasement des Barrages (cas du bassin Hydrographique des Côtiers Algérois) Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 195p.
- A.N.B.T (2014)** Fiches signalétiques des barrages en exploitation en Algérie, 135 p.
- Arnoldus, H.M.J. (1980)** An Approximation of the Rainfall Factor in the Universal Soil Loss equation. *Assessment of Erosion*, John Wiley and Sons, New York, 127-132.

- Arthur J H (2003)** An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes* 17, 3387–3409. <https://doi.org/10.1002/hyp.1299>
- Asselman N E M (2000)** Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology* 234 (2000) 228-248. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00253-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00253-5)
- Aytek A, Kişi Ö (2008)** A genetic programming approach to suspended sediment modelling. *Journal of Hydrology* (2008) 351, 288– 298. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.005>
- Balasubramani K, Veena M, Kumaraswamy K, Saravanabavan V (2015)** Estimation of soil erosion in a semi-arid watershed of Tamil Nadu (India) using revised universal soil loss equation (rusle) model through GIS. *Model Earth Syst. Environ.*, 1 (2), 10. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0015-4>
- Barnes K K, Frevert RK (1954)** A runoff sampler for large watersheds. Part I. Laboratory studies *Agricultural Engineering* 35(2):88-90.
- Bayramov E, Schlager P, Kada M, Buchroithner M, Bayramov R (2019)** Quantitative assessment of climate change impacts onto predicted erosion risks and their spatial distribution within the landcover classes of the Southern Caucasus using GIS and remote sensing. *Modeling Earth Systems and Environment* (2019) 5:659–667 PP. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0557-3>
- Bayramin I, Basaran M, Erpul G, Mustafa R, Canga (2008)** Assessing the effects of land use changes on soil sensitivity to erosion in a highland ecosystem of semi-arid Turkey, *Environ Monit Assess* 140:249–265. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9864-2>
- Belleudy, P., Valette, A. et Graff, B. (2007).** Passive hydrophone monitoring of bedload in river beds : First trials and exploration. Technical report, USGS Scientific Investigations Report.
- Benchettouh A, Kouri L, Jebari S. (2017)** Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). *Arab J Geosci* (2017) 10:79. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2875-6>
- Benkadja R, Boussag F, Benkadja A (2015)** Identification et évaluation du risque d'érosion sur le bassin versant du K'sob (Est Algérien), *Bull Eng Geol Environ* 74:91–102. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0611-y>
- Benkhadja, R., Hattab, A., Mahdaoui, N., Zehar, C. (2012).** Assessment of soil losses and siltation of the K'sob hydrological system (semiarid area-East Algeria). *Arab J Geosci* (2013) 6: 3959. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0653-z>

- Benkhaled A, Remini B (2003)** Analyse de la relation de puissance: debit solide-débit liquide à l'échelle du bassin versant de l'oued Wahrane (Algérie). *Rev Sci Eau* 16(3):333–356. <https://doi.org/10.7202/705511ar>
- Biswas SS, Pani P (2015)** Estimation of soil erosion using RUSLE and GIS techniques: a case study of Barakar River basin, Jharkhand, India. *Model Earth Syst. Environ*, 1:42. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0040-3>
- Blanco H, Lal R (2010)** Principles of Soil Conservation and Management, ISBN 978-1-4020-8708-0, Springer Dordrecht Heidelberg London New York. Library of Congress Control Number: 2008932254. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8709-7>
- Bouguerra S (2016)** Quantification et modélisation du transport solide dans un cours d'eau de l'Algérie septentrionale : cas du bassin versant de l'oued Boumessaoud (Tlemcen). Mémoire de Magister, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen Algérie. 141p
- Borges A L O (1993)** Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des alpes du sud. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I - France. 258p.
- Boyer, J.F., (2002)** Software Khronostat chronological series of statistical analysis. IRD UR2, Program 21 FRIEND AOC, Team UMRGBE Hydrology, University of Montpellier II, Ecole des Mines de Paris.
- Brilly,M., Smith, M.&Vidmar, A. (1993)** Spatially oriented surface water hydrological modelling and GIS. In: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management (e<l. by K. Kovar &c H. P. Nachtnebel) (Proc. Vienna Conf.), 547-557. IAHS Publ. no. 211.
- Brown L.R., Abramovitz, J., Bright, C., Flavin, C., Gardner, G., Kane, H., Platt, A., Postel, S., Roodman, D., Sachs, A., et Starke, L. (1996)** L'état de la planète. Editions Economica, Paris, France.
- Brown H E, Hansen E A, Norman E, Champagne Jr (1970)** A System for Measuring Total Sediment Yield from Small Watersheds *Water Resour. Res.*, 6, 818-826. <https://doi.org/10.1029/WR006i003p00818>
- Browning G.M., Parish C.L. et Glass J.A. (1947)** - A method for determining the use and limitation of rotation and conservation practices in control of soil erosion in Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* n° 48, pp. 249-264.
- Bryan, R. and Yair, A. (Eds) (1982)** Badland Geomorphology and Piping 1 -12 pp.
- Buishand T.A., (1982)** Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 50, 11-27.

- Buishand T.A., (1984).** Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 73, 51 - 69. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam--Printed in The Netherlands. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90032-5)
- Cebecauer T, Hofierka J (2008)** The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology* 98:187–198 pp. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.035>
- Chandra Pal S, Chakraborty R (2019)** Modeling of water induced surface soil erosion and the potential risk zone prediction in a sub-tropical watershed of Eastern India. *Modeling Earth Systems and Environment* (2019) 5:369–393. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0540-z>
- Chatterjee S, Krishna AP, Sharma AP (2014)** Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India, *Environ Earth Sci* 71:357–374. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2439-3>
- Chadli K (2016)** Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). *Model, Earth Syst Environ*, 2:51. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y>
- Chen H, Teng Y, Wang J (2013)** Load estimation and source apportionment of nonpoint source nitrogen and phosphorus based on integrated application of SLURP model, ECM, and RUSLE: a case study in the Jinjiang River, China. *Environ Monit Assess* 185:2009–2021. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2684-z>
- Camenen B (2011)** Mesure in situ de la dynamique sédimentaire des cours d'eau outils et méthodes, Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique, Irstea Lyon, Rapport techniques. 72p.
- Campbell, F. B. and Bauder, H. A. (1940)** A rating-curve method for determining silt-discharge of streams. *Trans. Amer. Geophys. Uni.* 21, 603 - 607.
- Cosandey C (1999).** Conséquence de la forêt sur le bilan d'écoulement annuel. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 37,1999/2, 63-73.
- Crowder D W, Demissie M, Markus M (2007)** The accuracy of sediment loads when log-transformation produces non linear sediment load–discharge relations. *Journal of Hydrology* (2007) 336, 250– 268. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.024>
- Dahmani A, Meddi M (2009)** Climate Variability and its Impact on Water Resources in the Catchment Area of Wadi Fekan Wilaya of Mascara (West Algeria). *European Journal of Scientific Research*, Vol.36 No.3 (2009), 458-472 pp.

- Dabral, P.P., Baithuri, N., Pandey, A., (2008).** Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing. *Water Resources Management* 22 (12), 1783e1798. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9253-9>
- Demmak, A., (1982)** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Dr. Ing., Université de Pierre et Marie Curie, Paris XI.
- Demmak, A. (2010).** Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau, Programme MEDA de l'Union Européenne, Alger, Algérie, 102 p.
- Demirci M, Baltaci A (2013).** Prediction of suspended sediment in river using fuzzy logic and multilinear regression approaches. *Neural Comput & Applic* (2013) 23 (Suppl 1): S145–S151. <https://doi.org/10.1007/s00521-012-1280-z>
- Di Cenzo P, Luk S (1997)** Gully erosion and sediment transport in a small subtropical catchment, South China. *Catena* 29 (1997) 161-176. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00053-7)
- Djoukbala O, Hasbaia M, Benselama O, Mazour M (2019)** Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0562-6>
- Djoukbala O, Mazour M, Hasbaia M, Benselama O (2018)** Estimating of water erosion in semiarid regions using RUSLE equation under GIS environment. *Environmental Earth Sciences* (2018) 77:345. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7532-1>
- De Martonne, E. (1926).** Aréisme et indice d'aridité. *Comptes Rendus de L'Acad Sci, Paris*, 182, 1395-1398 pp.
- De Noni G, Viennot M, Asseline J, Trujillo G (2001)** Terres d'altitude, terres de risque La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes. Éditions de l'IRD, 216p.
- De Roo, A P J, Wesseling C G, Ritsema C J (1996)** LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins, I: Theory, input and output, *Hydrological Processes*, 10 (8), 1107–1117. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199608\)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4)
- Desmet, P., Govers, G., (1996)** A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51 (5), 427–433.
- Dautrebande S., Cordonnier H., Thirion M., Bièlders C. (2006)** Lutter contre l'érosion des terres. Les livrets de l'Agriculture n° 12, 44p.



- De Girolamo, G. Pappagallo, A. Lo Porto (2015)** Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). *Catena* 128 (2015) 135–143. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.020>
- De Vente, J., & Poesen, J. (2005)** Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semiquantitative models. *Earth-Science Reviews*, 71, 95–125. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>
- Diaconu C (1974)** phénomènes d'érosion des bassins versant reflétés par le transport solide des cours d'eau. *IAHS Publ*, N° 113, 87 – 95 pp.
- Diodato N (2004)** Estimating Rusle's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. *J Hydrol Earth Syst Sci* 8:103–107. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00304798>
- Diodato N (2005)** Geostatistical uncertainty modelling for the environmental hazard assessment during single erosive rainstorm events. *Environ Monit Assess* 105:25–42. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-2815-x>
- Duley F L, Ackerman F G (1934)** Runoff and erosion from plots of different lengths. *J. Agr. Res.* 48(6):505-510.
- Dutta D (2016)** Soil erosion, sediment yield and sedimentation of reservoir: a review. *Model. Earth Syst. Environ.*, 2:123. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0182-y>
- Dutta D, Das S, Kundu A, Taj A (2015)** Soil erosion risk assessment in Sanjal watershed, Jharkhand (India) using geo-informatics, RUSLE Model and TRMM data. *Model Earth Syst. Environ*, 1:37. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0034-1>
- Cherif E, Errih M, Madani Cherif H (2009)**: Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne, *Hydrological Sciences Journal*, 54:2, 338-348. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.2.338>
- El Garouani A, Chen H, Lewis L, Tribak A, Abharour A. (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. *Téledétection*, Editions scientifiques GB, 2008, 8 (3), pp.193-201. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00434258>
- Ellison W D (1944)** Studies of raindrop erosion. *Agric. Eng.*, 25: 131-181.
- El-Mahi A, Meddi M, Bravard J P (2012)** Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord). *Hydrological Sciences Journal*, 57:8, 1642-1661. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2012.717700>
- Emmett W (1980)** A Field Calibration of the Sediment-Trapping Characteristics of the Helley-Smith Bedload Sampler. United States Government Printing Office, Washington 54p.

- ENERGOPROJEKT (1973)** Monographie du barrage de Ouizert, Mascara, Algérie. Phase C, Avant-projet détaillé (Mémoire de synthèse), 56 p.
- ESRI (2000)** Model Builder for ArcView Spatial Analyst 2. ESRI Press, Redlands.
- Estrany J, Garcia C, Batalla R J (2008)** Groundwater control on the suspended sediment load in the Na Borges River, Mallorca, Spain. *Geomorphology* 106 (2009) 292–303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.11.008>
- Fagnano M, Diodato N, Alberico I, Fiorentino N (2012)** An overview of soil erosion modelling compatible with RUSLE approach, *Rend, Fis, Acc, Lincei* 23:69–80. <http://dx.doi.org/10.1007/s12210-011-0159-8>
- FAO (1990)** : Conservation des eaux et des sols dans les zones semi arides. Bulletin pédologique 68, 153 p.
- FAO (1993)** *Field measurement of soil erosion and runoff*. Chapter 5 Sediment transport. Natural resources management and environment department. Rome.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC (2009)** Harmonized world soil database (version 1.1). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria
- Ferguson, R. I. (1987)** Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth Surf. Processes and Landforms* 12, 95-104. <https://doi.org/10.1002/esp.3290120111>
- Fernandez J Q, Wu D K, McCool, Stockle C O (2003)** Soil and Water Conservation Society, *Journal of Soil and Water Conservation* 58 (3):128-136.
- Ferreira V, Panagopoulos T, Cakulab A, Andradea R, Arvela A (2015)** Predicting soil erosion after land use changes for irrigating agriculture in a large reservoir of southern Portugal, *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4: 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.006>
- Fournier C F (1960)** Climat et érosion. Paris, PUF, 201 p.
- Fournier F (1965)** Mesure de l'érosion : principes de base et incidence de l'instrumentation nouvelle sur l'établissement des réseaux de mesure. Paris : AIHS, (67), 343-355 pp.
- Gao P, Josefson M (2012)** Temporal variations of suspended sediment transport in Oneida Creek watershed, central New York. *Journal of Hydrology* 426–427 (2012) 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.012>
- Gaubi I, Chaabani A, Ben Mammou A, Hamza M. H. (2017)**. A GIS-based soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia) *Nat Hazards* (2017) 86:219–239. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2684-3>

- Gartet A, Gartet J, Conesa YC (2005)** Dégradation spécifique et transports solides dans le bassin de l'oued Lebène (Prérief Central, Maroc septentrional). *Papeles Geogr* 41–42:85–100.
- Gay M, Cheret V, AndDenux J P (2002)** Apport de la télédétection dans l'identification du risque d'érosion, *La Houille Blanche*, 1(81) 86. <https://doi.org/10.1051/lhb/2002013>
- Geay T (2017)**. Mesure acoustique passive du transport par charriage dans les rivières. Sciences de la Terre. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, Français
- Geoid & L.E.M (2004)** Levés bathymétriques des barrages en exploitation, lots I et IV, rapport technique du barrage de Ouizert. Wilaya de Mascara, Algérie, 33p.
- Gilley, J. E. (2005)** Erosion water-induced, p. 463 - 469. In Hillel, D. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier Editor, 4 volumes and 2,200 p.
- Giandotti, M. (1937)** *Idrologia*, Florence (IT): Barbera Edizioni.
- Ghadiri H (2004)** Crater formation in soils by raindrop impact. *Earth Surf Processes Landforms* 29:77–89. <https://doi.org/10.1002/esp.1014>
- Ghenim A, Seddini A, Terfous A (2008)** Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (nord-ouest Algérien) / Temporal variation of the specific sediment yield of the Wadi Mouilah basin (northwest Algeria), *Hydrological Sciences Journal*, 53:2, 448-456. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.2.448>
- Ghenim A , Terfous A , Seddini A (2007)** Étude du transport solide en suspension dans les régions semi-arides méditerranéennes : cas du bassin-versant de l'oued Sebdou (Nord-Ouest algérien). *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Volume 18, numéro 1. 39-44 pp. <https://doi.org/10.1684/sec.2007.0067>
- Ghenim A, Seddini A, Terfous A (2008)** Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'oued Mouillah (nord-ouest Algérien). *Hydrol Sci J* 53(2):448–456. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.2.448>
- Gheraout R, Remini B (2014)** Impact of suspended sediment load on the silting of SMBA reservoir (Algeria). *Environ Earth Sci* (2014) 72:915–929. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3125-9>
- GLYMPH L.M (1954)** Studies of Sediment Yields from Watersheds, Assemblée générale de Rome *Comptes Rendus et Rapports de la Commission d'Érosion Continentale Association Internationale de l'Hydrologie Scientifique* N°.36 178 – 191 pp.
- Goodchild MF (2005)** GIS, spatial analysis and modeling overview. In: Maguire DJ, Batty M, Goodchild MF (eds) *GIS, spatial analysis, and modeling*. ESRI Press, Redlands, 1–18 pp.

- Graciela S., F., Salmuni, M., Maldonado, L.M., Inés, C., Puigdemolas, (1996)** Delimitation of the hydric erosion using Digital image processing of Landsat TM, in the aluvional plain of Valle Fértil Dept. - San Juan. Argentine. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, INPE, p. 375-380.
- Granier J P (1963)** La mesure In situ du débit solide des cours d'eau. O.R.S.T.O.M Service hydrologique France. 128p
- Hug M. (1975)** Mécanique des fluides appliquée aux problèmes d'aménagement et d'énergétique. Eyrolles. Paris, 1195 p.
- Harrington S T, Harrington J R (2013)** An assessment of the suspended sediment rating curve approach for load estimation on the Rivers Bandon and Owenabue, Ireland. *Geomorphology* 185 (2013) 27–38. <https://doi.org/10.2495/SDP-V9-N6-861-873>
- Heino, R. (1996).** Metadata and their role in homogenization. Proc. Seminar on Homogenization of surf. Instrum. Data, Budapest, 5-8 pp.
- Helley, E.J. and Smith, W., (1971)** Development and Calibration of a Pressure-Difference Bed Load Sampler. U.S. Geological Survey Open File Report, Washington, USA.
- Helioui Y, Hajri J (2015)** Erosivité des pluies dans la région du cap bon (Tunisie), XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège-Belgique. 509-514 pp.
- Hubert P.I., Carbonnel J.P., et Chaouche A., (1989).** Segmentation des séries hydrométéorologiques- application a des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-367, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in The Netherlands.
- Hu B, Wang H, Yang Z, Sun X (2011)** Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. *Quaternary International* 230 (2011) 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.08.018>
- HYDRATEC (2007).** Manuel d'analyse - Dossier B : Modélisation hydrologique – Indice 2.1 32P.
- Jain, S.K., Kumar, S., Varghese, J., (2001)** Estimation of soil erosion for a Himalayan watershed using GIS technique. *Water Resources Management* 15 (1), 41-54 <https://doi.org/10.1023/A:1012246029263>
- Jiang L, Yao Z, Liu Z, Wu S, Wang R, Wang L (2015)** Estimation of soil erosion in some sections of Lower Jinsha River based on RUSLE, *Nat Hazards* 76: (3) 1831–1847. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1569-6>
- Jiang ZS, Zheng FL (2008)** Water erosion process prediction model. Science Press, Beijing (In Chinese)

- Julien, P. Y. (2010)** Erosion and sedimentation. 2nd edition. Cambridge University Press. 392 p.
- Kabouya M (1990)** Modélisation pluie débit au pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de doctorat, Université de Paris Sud – France 353 p.
- Kanwar, J.S. (1982)** Managing soil resources to meet the challenge to mankind. Presidential address of 12th Int. Congress of Soil Science, New Delhi, India. 8-16 February 1982. Plenary Session paper, pp. 1-32. <http://oar.icrisat.org/id/eprint/4071>
- Kattan Z., Gac J.Y. & Probst J.L., (1987)** Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin, estimation of the runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *Journal of hydrology*. 92, 59–76.
- Khanchoul K, Altschul R, Assassi F (2009)** Estimating suspended sediment yield, sedimentation controls and impacts in the Mellah Catchment of Northern Algeria. *Arab J Geosci* (2009) 2:257–271. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0040-6>
- Khanchoul K, Jansson MB, Lange Y (2007)** Suspended sediment yield in two catchments, northeast Algeria. *Z Geomorph* 51 (1):63–94. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2007/0051-0063>
- Koirala S., P., Cabral, (2007)** Land Use Land Cover Change And Its Impact On Soil Erosion Process In Begnas Tal Rupa Tal Watershed Using Geospatial Tools, Kaski District, Nepal. European Commission, Erasmus Mundus Programme, M.Sc. in Geospatial Technologies, project n°2. 2007 – 0064. 13 P. <http://hdl.handle.net/10362/2732>
- Kouli, M., Soupios, P., & Vallianatos, F. (2009)** Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental Geology*, 57, 483–497 <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1318-9>
- Kouri, L., Gomer, D. (2010)** Analyse des processus de ravinement et détermination de la sensibilité des terrains marneux dans le Tell oranais (Algérie), Sécheresse, Volume 21, Numéro 4. PP: 257- 65. <https://doi.org/10.1684/sec.2010.0248>
- Kumar S, Kushwaha SPS (2013)** Modelling soil erosion risk based on RUSLE-3D using GIS in a Shivalik sub-watershed. *J Earth Syst Sci* 122:389–398 <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0276-0>
- Laborde, J-P. (2000).** Eléments d'hydrologie de surface. Centre National de la Recherche Scientifique. Nice, France. 191 p.
- Lamba J, Karthikeyan K G, Thompson A M (2015)** Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting, *Geoderma* 239–240: 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.024>

- Lang SS (2006)** Slow insidious soil erosion threatens human health and welfare as well as the environment, Cornell study by asserts chronicle online, Cornell university, USA.
- Lee A. F. S. et Heghinian S. M., (1977)** A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables - A Bayesian approach. *Technometrics* 19(4), 503-506. <https://doi.org/10.1080/00401706.1977.10489592>
- Lee S (2004)** Soil erosion assessment and its verification using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information System: a case study at Boun, Korea. *Environ Geol* 45:457–465. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0897-8>
- Leguédois S (2003)** Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Université d'Orléans, France. 179p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00516390>
- Lespinas, F. (2008).** Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon, Thèse de doctorat, Université de Perpignan, France, 332 p.
- Lin, C. Y., Lin, W. T., Chou, W. C. (2002)** Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil & Tillage Research*, 68(2), 143–152.
- Magesh N S, N. Chandrasekar (2016)** Assessment of soil erosion and sediment yield in the Tamiraparani sub-basin, South India, using an automated RUSLE-SY model. *Environ Earth Sci* (2016) 75:1208. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6010-x>
- Markhi A, Laftouhi N E, Soulaïmani A, Fnguire F, (2015)** Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG. Application dans le bassin versant n'fis dans le haut atlas de Marrakech (Maroc). *European Scientific Journal*, 11 (29), ISSN: 1857 – 7881.
- Manegold J (2003)** Using the Model Builder of ArcGIS 9 for landscape modeling. In: Buchmann E, Ervin S (eds) *Trends in landscape modeling. Proceedings at Anhalt University of Applied Sciences*. Wichmann, Heidelberg, 240–245 pp.
- Markose V J, Jayappa K S (2016)** Soil loss estimation and prioritization of sub-watersheds of Kali River basin, Karnataka, India, using RUSLE and GIS. *Environ Monit Assess* 188: 225. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5218-2>
- Mc Bean EA, Al-Nassri S (1988)** Uncertainty in suspended sediment transport curves. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 114(1):63-74. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:1\(63\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:1(63))
- McCool DK, Brown LC, Foster GR (1987)** Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Trans. ASAE* 30:1387–1396.

- Meddi M (1999)** Etude du transport solide dans le bassin versant de l'oued Ebda (Algérie). *Z Geomorph NF* 43(2):167–183
- Megnounif A, Terfous A, Bouanani A (2003)** Production et transport des matières solides en suspension dans le bassin versant de la haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien). *Rev Sci Eau* 16(3):369–380. <https://doi.org/10.7202/705513ar>
- Miller, C. R. (1951)** Analysis of flow duration sediment rating curve method of computing sediment yield. US Bureau of Reclamation Report.
- Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire (2000)** Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement, 95p
- Mitasova H, Hofierka J, Zlocha M, Iverson LR (1996)** Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Int J Geogr Inf Sci* 10(5):629–641. <https://doi.org/10.1080/02693799608902101>
- Mokhtari N, Mrabet R, Lebailly P, Bock L (2013)**. Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* (2014) 2 (1):50-66 PP.
- Meddi H., Meddi M., (2009)**. Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. Article de recherche *Sécheresse*; 20 (1) : 57-65. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0169>
- Mestre, O. (2000)**. Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 229 p.
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986)**. Physical basis of the length slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1294–1298. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
- Moore and J. P. Wilson, (1992)** Length Slope Factor for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified Method of Solution, *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 47, No. 4, 1992, pp. 423-428.
- Morgan R. P. C., (1986)** Soil Erosion and Conservation. Longman, Essex, RU. 298p. <https://doi.org/10.1180/claymin.1987.022.2.14>
- Morgan, R.P.C. (1995)** Soil erosion & conservation. John Wiley & Sons, New York. 198 p.
- Morgan, R.P.C., (2005)** Soil Erosion and Conservation, third ed. Blackwell Science Ltd., 304ISBN: 1-4051-1781-8. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.0756f.x>

- Morsli, B., Habi, M., Mazour, M., Hamoudi, A., Halitim, A., (2012).** Erosion et ruissellement en montagnes méditerranéennes d'Algérie du Nord: analyse des facteurs conditionnels sous pluies naturelles et artificielles. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét* 1: 33-40. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/1743>
- Musgrave G.W. (1947)** The quantitative evaluation of factors in water erosion: A first approximation. *J. Soil Water Conserv.* N°2, pp. 133-138.
- Naqvi R H, Mallick J, Devi L M, Siddiqui M A (2013)** Multi-temporal annual soil loss risk mapping employing Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model in Nun Nadi Watershed, Uttrakhand (India). *Arab J Geosci* 6:4045–4056, <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0661-z>
- Ouechtati, S., Baldassare, G. (2011).** Evaluation du transport solide et de l'envasement dans le bassin versant de Siliana (Tunisie): cas des barrages Siliana et Lakhmess. *Bull Eng Geol Environ* 70(4): 709-722. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0376-5>
- Olivéros C (1996)** Transports solides : modèles et condition d'application en région PACA. Rapport BRGM R39474. 40p.
- Benselama O, Mazour M, Hasbaia M, Djoukbala O, Mokhtari S (2018)** Prediction of water erosion sensitive areas in Mediterranean watershed, a case study of Wadi El Maleh in north-west of Algeria. *Environmental monitoring and assessment* 190: 735. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7117-1>
- Ouillon S., (2018)** Why and how do we study sediment transport? Focus on coastal zones and ongoing methods, editorial, *Water*, 10, 390. <https://doi.org/10.3390/w10040390>
- Pan J, Wen Y (2014)** Estimation of soil erosion using RUSLE in Caijiamiao watershed, China. *Nat Hazards* 71:2187–2205. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1006-2>
- Panagos P, Borrelli P, Meusburger K, Zanden A H, Poesen J, Alewell C (2015b)** Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale, *Environmental Science & Policy* 51: 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012>
- Panagos P, Borrelli P, Poesen J, Ballabio C, Lugato E, Meusburger K, Montanarella L, Alewell C (2015a)** The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* 54 (2015) 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>
- Parveen R, Kumar U (2012)** Integrated approach of universal soil loss Equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil loss risk assessment in Upper South Koel basin, Jharkhand. *J Geogr Inf Syst* 4:588–596. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46061>



- Perovic V, Zivotic L, Kadovic R, Dordevic A, Jaramaz D, Mrvic V, Todorovic M (2013)** Spatial modeling of soil erosion potential in a mountainous watershed of South-eastern Serbia. *Environ Earth Sci* 68:115–128. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1720-1>
- Peters-Kaummerly B.E. (1973)** Untersuchungen auber Zusammensetzung und Transport von Schwebstoffen in einigen Schweizer Flaussen. *Geographica Helvetica*, 28, 137-151.
- Pettitt A. N., (1979)** A non-parametric approach to the change-point problem. *App. Statist.* 28 (2), 126-135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Pimentel D (2006)** Soil erosion: a food and environmental threat, *Environ Dev Sustain* 8:119–137 pp. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8>
- Pitaud G, (1973)** Etude hydrogéologique pour la mise en valeur de la vallée de l’oued Saïda (rapport de synthèse), division des ressources hydriques.
- Podobnikar T (2016).** Methods for visual quality assessment of a digital terrain model, 11P.
- PORÊBA G Z (2011)** Caesium-137 as a soil erosion tracer: A review. *Geochronometria* Vol. 25, pp 37-46, 2006 – Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology. <http://www.geochronometria.pl/>
- Porto P, Walling B E, La Spada C (2013)** Using caesium-137 measurements to establish a sediment budget for the catchment of a small reservoir in southern Italy Considering Hydrological Change in Reservoir Planning and Management Proceedings of H09, IAHS- IAPSO- IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013 (IAHS Publ. 362, 2013).
- Prasannakumar V, Vijith H, Abinod S, Geetha N (2012)** Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geosci Front* 3(2):209–215. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003>
- Probst J.L., Bazerbachi A., (1986)** Transport en solution et en suspension par la Garone supérieure, *Sci. Géol. Bull.*, Vol. 39; No1, pp: 79–98.
- Raissouni, A. (2012)** Modélisation et cartographie de la sensibilité et de l’aléa d’érosion des sols à l’échelle régionale par SIG et USLE (Rif Nord occidental, Maroc). Thèse de Doctorat, Université Abdelmalek Essaadi, Maroc. 208 p.
- Rajae T, Mirbagheri S. A, Nourani V, Alikhani A. (2010)** Prediction of daily suspended sediment load using wavelet and neurofuzzy combined model. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 7 (1), 93-110. <https://doi.org/10.1007/BF03326121>
- Rango, A. & Arnoldus, H.M.J. (1987)** Aménagement des bassins versants. Cahiers techniques de la FAO. 36p.

- Razafindramanana N C, Douzet J M, Barthès B, Rabeharisoa L, Albrecht A (2012)** Evaluation des effets de systèmes de semis direct à couverture végétale pérenne (SCV) sur l'érosion hydrique et la production agricole sur les Hautes-Terres de Antsirabe (Madagascar). IRD Editions. 12 P.
- Recking, A. Liébault F, Peteuil C, Jolimet T (2010)** Evaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle, Rapport final, Programme de recherche CEMAGREF, 41 p.
- Remini B (2005)** La Problématique de l'eau en Algérie, Office des Publications Universitaires Alger. 1 vol. (162 p.)
- Renard K G, Foster G R, Wessies G A, Porter J P (1991)** Revised universal soil loss equation, Journal of Soil Water Conservation, (46): 30-33
- Renard K G, Foster G R, Weesies G A, McCool D K, Yoder D C (1997)** Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE), Washington, DC: USDA Agricultural Research Services, Agriculture handbook no, 703P.
- Renard K G, Freimund J R (1994)** Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. Journal of Hydrology 157:287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Renard K G, Yoder D, Lightle D, Dabney S (2011).** Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation, Handbook of erosion modelling, Blackwell Publ, Oxford, 137–167.
- Roche, M. (1963).** Hydrologie de Surface, Gauthier-Villars Editeur, Paris, France, 429 p.
- Roose E. (1994)** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin Pédologique FAO 70 (Rome) : 420 p.
- Roose E., Chebbani R. et Bourougaa L. (2000)** Ravinement en Algérie : typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse*, vol. 11, p. 317-326.
- Rupesh J P (2018)** Spatial Techniques for Soil Erosion Estimation Remote Sensing and GIS Approach. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74286-1>
- Sadeghi S H R, Mizuyama T, Miyata S, Gomi T, Kosugi K, Fukushima T, Mizugaki S, Onda Y (2008)** Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. Geoderma 144 (2008) 198–211. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.008>

- Sadiki A (2005)** Estimation de l'état de dégradation des sols dans le bassin versant de l'oued Boussouab, Maroc nord oriental : Application du modèle empirique (USLE), de la technique du radio-isotope Cs-137 et de la susceptibilité magnétique. Thèse de Doctorat, Université Mohammed Premier Oujda – Maroc. 289 P.
- Sadiki, A., Faleh A., Zêzere J.L., Mastass H (2009)** Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla Rif central Maroc. Cahiers Géographiques, n°6/2009, 59-70
- Scheffé, H. (1959)** The analysis of variance. Wileyed., New-York, 447 p.  
<https://doi.org/10.1002/bimj.19610030206>
- Singh G, Chandra S, Babu R (1981)** Soil loss and prediction research in India, Central Soil and Water Conservation Research Training Institute, Bulletin No, T-12/D9
- Syvitski, J P M, Morehead M D, Bahr D B, Mulder T (2000)** Estimating fluvial sediment transport: the rating parameters. Water Resources Research 36 (9), 2747–2760.  
<https://doi.org/10.1029/2000WR900133>
- Smith D.D. (1941)** Interpretation of soil conservation data field use. Agric. Eng. N° 22, pp. 173-175 pp.
- Smith D D, Whitt D M (1947)** Estimating soil losses from areas of claypan soil. Soil Sci. Soc. Am. N°12, pp. 485-490.
- Smith D.D. et Whitt D.M. (1948)** Evaluating soil loss from field area. Agric. Eng. N° 29, pp. 394-398.
- Stone R P, Hilborn D (2000)** Équation universelle des pertes en Terre (USLE), Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales, Ontario, Canada. 08 P.
- Stone RP, Hilborn D (2012)** Universal soil loss equation (USLE) factsheet. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ontario.
- Stroosnijder (2005)** Measurement of erosion: Is it possible? Catena 64 (2005) 162–173 pp.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.004>
- Tecslut International Limitée. (2004).** Étude de la protection des bassins versants de l'ensemble des barrages en études d'Avant-Projet Détaillé (lots nos 1 à 4) et des bassins versants des barrages en exploitation (lots nos 5 et 6). Experts-conseils 85, Rue STE-Catherine Ouest, Montréal, Québec, Canada.
- Terranova O., L., Antronico, R., Coscarelli, P., Iaquina, (2009)** Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy). Geomorphology journal 112 (2009) 228–245.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.009>

- Terfous A., Megnounif A., Bouanani A., (2001)** Etude du transport solide en suspension dans l'oued Mouillah. *Revue des sciences de l'eau*, vol 14 n°2, pp 175-187. <https://doi.org/10.7202/705416ar>
- Touaïbia, B. (2004).** Manuel pratique d'hydrologie. Presses Madani frères Guerrouaou, Blida-Algérie. 159 p.
- Touaïbia B (2010)** Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. *Sécheresse* ; 21 (1e) : 1-6. <https://doi.org/10.1684/sec.2010.0281>
- Touaïbia B, Aidaoui A, Gomer D, Achite M. (2001)** Quantification et variabilité temporelles de l'écoulement solide en zone semi-aride de l'Algérie du Nord. *Hydrological Sciences Journal* ; 46 : 41-53. <https://doi.org/10.1080/02626660109492799>
- Toubal A K, Achite M, Ouillon S, Dehni A (2018)** Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the Wadi Sahouat basin, North-West of Algeria. *Environ Monit Assess.* <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6580-z>
- Tóth B, Bódis E (2015)** Estimation of suspended loads in the Danube River at Göd (1668 river km), Hungary. *Journal of Hydrology* 523 (2015) 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.031>
- Toumi S (2013)** Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued mina. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure de l'hydraulique, Blida – Algérie. 189p. <https://www.ensh.dz/index.php>
- Toumi S, Meddi M, Mahé G, Brou Y T (2013)** Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG, *Hydrological Sciences Journal*, 58 (7), 1542-1558. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>
- Tweddle SA, Echlschlaeger CR, Seybold WF (2000)** An improved method for spatial extrapolation of vegetative cover estimates (USLE/RUSLE C factor) using LCTA and remotely sensed imagery. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory, ERDC Technical Report.
- USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service) (1972)** SCS National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. Chapter 10, Estimation of Direct Runoff From Storm Rainfall. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C., pp 10.1–10.24.
- Van der Knijff J M, Jones R J A, Montanarella L (1999)** Soil erosion risk assessment in Italy, European Soil Bureau Research Report EUR 19044 ENp, 58p.

- Van der Knijff J M, Jones R J A, Montanarella L (2000)** Soil erosion risk assessment in Europe, European Soil Bureau Research Report EUR 19044 ENp, 34p.
- Van Rijn, L., Gaweesh, M., (1992)** New total sediment-load sampler. *Journal of Hydraulic Engineering* 112 (12), 1686–1691.
- Velásquez S (2013)** Manual spatial analyst: erosion de suelos utilizando la (RUSLE). Turrialba, Costa Rica
- Verheijen FGA, Jones RJA, Rickson RJ, Smith CJ. (2009).** Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews* 94: 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.02.003>
- Vivian H. (1980)** Erosion et transports solides dans le bassin du Drac au Sautet. *CNRS Equipe de recherche 30 C/O biologie végétale*, Grenoble.
- Vrieling, A., (2006)** Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena*, 17 p. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.10.005>
- Walling, D. E. (1977a)** Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. *Wat. Resour. Res.*, 13, 531-53. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00531>
- Walling, D. E. (1977b)** Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with particular reference to British rivers. In: *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters* (Proc. Paris Symp., July 1977), 34-48. IAHS Publ. no. 12
- Walling, D. E. & Webb, B. W. (1981)** The reliability of suspended sediment load data. In: *Erosion and Sediment Transport Measurement* (Proc. Florence Symp., June 1981), 177-194. IAHS Publ. no. 133.
- Walling, D.E.; Webb, B.W., (1996)** Erosion and sediment yield: a global overview. IAHS Publ. 236, 3-19.
- Waliing, D.E. (1994)** Measuring Sediment yield from River Basins, Chapter3 , pp.39-80: *Soil Erosion Research Methods*, second edition, Soil and Water Conservation society, Ankeny, St. Lucy Press.
- Wang W. Z. (1995)** Study on rainfall erosivity in China, *Journal of Soil and Water Conservation*, 9 (4), 5–18.
- Wang G, Wentz S, Gertner GZ, Anderson A (2002)** Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with landsat thematic mapper images, *International Journal of Remote Sensing* 23:3649–3667. <https://doi.org/10.1080/01431160110114538>

- Wei X., Sauvage S., Le T.P.Q., Ouillon S., Orange D., Vinh V.D., Sanchez-Perez J.M., (2019)** A modeling approach to diagnose the impacts of global changes on discharge and suspended sediment concentration within the Red River basin, *Water*, 11(5), 958, <https://doi.org/10.3390/w11050958>
- Wilkinson, B.H., McElroy, B.J., (2007)** The impact of humans on continental erosion and sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*. 119, 140–156. <https://doi.org/10.1130/B25899.1>
- Wilkinson S N, Dougall C, Kinsey-Henderson A E, Searle R D, Ellis R J, Bartley R (2014)** Development of a time-stepping sediment budget model for assessing land use impacts in large river basins. *Science of the Total Environment* 468–469 (2014) 1210–1224. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.049>
- Winchell, M.F., Jackson, S.H., Wadley, A.M., Srinivasan, R., (2008)** Extension and validation of a geographic information system-based method for calculating the Revised Universal Soil Loss Equation length-slope factor for erosion risk assessments in large watersheds. *J. of Soil and Water Conservation*. 63 (3). <https://doi.org/105-111.10.2489/jswc.63.3.105>
- Wischmeier W H, Smith D D (1978)** Predicting rainfall erosion losses, USDA Agricultural Research Services Handbook 537, Washington, DC: USDA, 57p
- Xu L, Xu X, Meng X (2013)** Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: a case study of Bohai Rim, China. *Catena* 100:74–82. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.012>
- Xu YQ, Luo D, Peng J (2011)** Land use change and soil erosion in the Maotiao River watershed of Guizhou Province. *Journal of Geographical Sciences* 21:1138–1152. <https://doi.org/10.1007/s11442-011-0906-x>
- Yang C T, Marsooli R, Aalami M T (2009)** Evaluation of total load sediment transport formulas using ANN. *International Journal of Sediment Research* 24 (2009) 274-286. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60003-0](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60003-0)
- Yang G, Chen Z, Yu F, Wang Z, Zhao Y, Wang Z (2007)** Sediment rating parameters and their implications: Yangtze River, China. *Geomorphology* 85 (2007) 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.03.016>
- Yang M, Li X, Hu Y, He X (2012)** Assessing effects of landscape pattern on sediment yield using sediment delivery distributed model and a landscape indicator. *Ecological Indicators* 22:38–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.08.023>
- Yildirim U (2011)** Assessment of soil erosion at the Deđirmen Creek watershed area, Afyonkarahisar, Turkey, In: Ayvaz M (ed), *Proceedings of the International Symposium on Environmental Protection and Planning: Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) Applications (ISEPP)*, 28-29 June 2011, Izmir, 73-80.

- Yles F (2014)** Hydrologie et transport solide dans le bassin versant de l'oued Saïda : Modélisation pluie-débit - Transport solide. Thèse de doctorat Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen - Algérie 150p.
- Yles F, Bouanani A (2012)** Quantification et modélisation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Saïda (hauts plateaux algériens). *Sècheresse*; 23 : 289–96. <https://doi.org/10.1684/sec.2012.0367>
- Zettam, A.; Taleb, A.; Sauvage, S.; Boithias, L.; Belaidi, N.; Sánchez-Pérez, J.M., (2017)** Modelling Hydrology and Sediment Transport in a Semi-Arid and Anthropized Catchment Using the SWAT Model: The Case of the Tafna River (Northwest Algeria). *Water*, 9, 216. <https://doi.org/10.3390/w9030216>
- Zhang, W., Wei, X., Zheng, J., Zhu, Y., & Zhang, Y. (2012).** Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves. *Continental Shelf Research*, 38, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.02.017>
- Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., Gao, P. (2013).** Soil erosion, conservation, and Eco-environment changes in the Loess Plateau of China, *Land Degradation & Development*, 24, 499- 510, <https://doi.org/10.1002/ldr.2246>
- Zhou J, Zhang X, He D, Zhou J, Zhou X, Wang Z (2011)** Soil erosion evaluation of small watershed in Wuling Mountain based on GIS and USLE. *Resour Environ Yangtze Basin* 20(4):468–474 (in Chinese)
- Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., Nieminen, J. (2008)** Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75(3), 319–325. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.010>
- Zingg, A. W. (1940)** Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agric. Eng.*, N°21, pp. 59-64.
- Zivotic L, Perovic V, Jaramaz D, Dordevic A, Petrovic R, Todorovic M (2012)** Application of USLE, GIS, and Remote Sensing in the assessment of soil erosion rates in Southeastern Serbia. *Pol. J. Environ. Stud.* 21:1929–1935.

***ANNEXE***



Tableau 1 : Facteur de correction K.

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

# ARTICLE

## Publié dans la revue *Environmental Monitoring and Assessment*.

Springer Link

» Sign up / Log in English Academic edition

Search

Home • Books A-Z • Journals A-Z • Videos • Librarians

» Browse Volumes & Issues

Search within this journal

### Environmental Monitoring and Assessment

An International Journal Devoted to Progress in the Use of Monitoring Data in Assessing Environmental Risks to Man and the Environment

ISSN: 0167-6369 (Print) 1573-2959 (Online)


#### Description

- Covers design and development of monitoring systems
- Describes methods and procedures for pollution risk assessment
- Examines the synthesis of monitoring data with toxicological, epidemiological and health data

Managing Editor: G. Bruce Wiersma, College of Natural Resources, Forestry, and Agriculture, University of Maine, USA

Environmental Monitoring and Assessment discusses technical developments and data arising from environ ... [show all](#)

[Browse Volumes & Issues](#)



Impact Factor	Available
1.959	1981 - 2019
Volumes	Issues
191	431
Articles	Open Access
11,680	<a href="#">336 Articles</a>

#### Latest Articles

OriginalPaper

[Improved assessment of pasture availability in semi-arid grassland of South Africa](#)

Mamokete N. V. Dinggaan, Mitsuru Tsubo (November 2019)

#### Stay up to Date

- Article abstracts by RSS
- Register for journal updates

#### Find a Volume or Issue

# Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the Wadi Sahouat basin, North-West of Algeria

Abderrezak Kamel Toubal · Mohammed Achite ·  
Sylvain Ouillon · Abdelatif Dehni

Received: 6 November 2017 / Accepted: 26 February 2018  
© Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018

**Abstract** Soil losses must be quantified over watersheds in order to set up protection measures against erosion. The main objective of this paper is to quantify and to map soil losses in the Wadi Sahouat basin (2140 km<sup>2</sup>) in the north-west of Algeria, using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model assisted by a Geographic Information System (GIS) and remote sensing. The Model Builder of the GIS allowed the automation of the different operations for establishing thematic layers of the model parameters: the erosivity factor (R), the erodibility factor (K), the topographic factor (LS), the crop management factor (C), and the conservation support practice factor (P). The average annual soil loss rate in the Wadi Sahouat basin ranges

from 0 to 255 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, maximum values being observed over steep slopes of more than 25% and between 600 and 1000 m elevations. 3.4% of the basin is classified as highly susceptible to erosion, 4.9% with a medium risk, and 91.6% at a low risk. Google Earth reveals a clear conformity with the degree of zones to erosion sensitivity. Based on the soil loss map, 32 sub-basins were classified into three categories by priority of intervention: high, moderate, and low. This priority is available to sustain a management plan against sediment filling of the Ouizert dam at the basin outlet. The method enhancing the RUSLE model and confrontation with Google Earth can be easily adapted to other watersheds.

**Keywords** Erosion · Wadi Sahouat · RUSLE · Model Builder · GIS · Remote sensing · Algeria

---

A. K. Toubal (✉) · M. Achite  
Faculty of Nature and Life Sciences, Water and Environment  
Laboratory, Hassiba Benbouali University of Chlef, P. Box 151,  
Hay Salem, 02000 Chlef, Algeria  
e-mail: toubalabderrezak@gmail.com

M. Achite  
e-mail: achitemohammed@gmail.com

S. Ouillon  
LEGOS, IRD, CNRS, CNES, UPS, Université de Toulouse,  
Toulouse, France  
e-mail: sylvain.ouillon@ird.fr

A. Dehni  
Department of Information Systems with Spatial Reference,  
Center for Spatial Techniques, 1 Avenue of the Palestine,  
31200 Arzew, Oran, Algeria  
e-mail: adehni@yahoo.fr

## Introduction

Water erosion results from soil's detachment under the energy of raindrops splash. Its consequences such as reduction of soil (Blanco and Lal 2010; Zhao et al. 2013), nutrient and organic matter depletion (Blanco and Lal 2010; Verheijen et al. 2009), and compaction of soil (Blanco and Lal 2010; Pimentel 2006) are dramatic for watersheds and their ecology (Valentin et al. 2005; Dutta 2016). Globally, about 30% of arable lands have become unproductive (Lang 2006). Water erosion is nowadays an important challenge at global scale (Lal and Stewart 1990; Pimentel et al. 1995; Pimentel and

Kounang 1998; Prasannakumar et al. 2012, Morsli et al. 2012).

The accelerated erosion in semi-arid area (Bayramin et al. 2008) degrades soils and increases sediment fluxes to artificial reservoirs (Wilkinson and McElroy 2007; Dutta 2016). In Algeria, geological, geomorphological, and hydro-climatic conditions are particularly favorable to erosion. The silting of dams constitutes in Algeria a major obstacle in storage capacity of superficial water resources (Remini et al. 2009).

Sediment fluxes are generally quantified in wadis from temporal series of discharge and sediment concentration, with appropriate models (Achite and Meddi 2004, 2005; Zhang et al. 2012; El-Mahi et al. 2012). A recent analysis showed that sediment transport in North-West Algeria has increased over the last 40 years due to climate change (early summer rains) and its consequences, such as a change in hydrological regime (Achite and Ouillon 2016). However, sediment fluxes in wadis are a consequence of erosion but should be distinguished from the local erosion, because sediments experience a succession of erosion and deposition in their transport up to the outlet, either in a reservoir, a lake, or an estuary (e.g., Walling and Webb 1996; de Vente and Poesen 2005; Alekseevskiy et al. 2008). Suitable methods are necessary in order to characterize and map the sensibility of soil to erosion to help manager in prioritize areas for soil protection measures, by biological means such as revegetation, reforestation, and by mechanical means such as gabion, terraces, and hill reservoirs.

In this study, we applied the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model (Renard et al. 1991) which is a revised version of the "USLE" model (Wischmeier and Smith 1978) to the Wadi Sahouat basin (2140 km<sup>2</sup>). Its use is widespread in the scientific community in semi-arid zones, particularly in India (Ismail and Ravichandran 2008), in Chile (Lobo and Bonilla 2015), in Ethiopia (Fenta et al. 2016), in Turkey (Bayramin et al. 2008), in Portugal (Ferreira et al. 2015), in Morocco (Tribak et al. 2009; Sadiki et al. 2009; Markhi et al. 2015; Chadli 2016), in Tunisia (Hamza et al. 2007; Hermassi et al. 2014; Gaubi et al. 2017), and in Algeria (Mostephaoui et al. 2013; Toumi et al. 2013; Benkadja et al. 2015; Benchettouh et al. 2017). Different sources of information are used to provide the requested parameters to complete it. The use of a Geographic Information System (GIS) is appropriate for this study and provides a map of risk over the area. The GIS we

propose is based on topographic data issued from a Digital Elevation Model (DEM) which provides topographic factors (LS) and the conservation practice factor (P). Rainfall data enabled to calculate erosivity factor (R), soil erodibility (K) was extracted from a database of world soil properties, and satellite image data were used to calculate the cover management factor (C). In a second step, the sensitivity to erosion inferred from the model is compared to Google Earth data for validation. The results can be used to determine criteria for priorities of intervention by sub-basins in order to avoid the siltation of the dam at the outlet. The adaptation of the RUSLE model to the site of study and the confrontation with Google Earth, which are presented step by step in this article in the test basin, can be easily adapted to other watersheds.

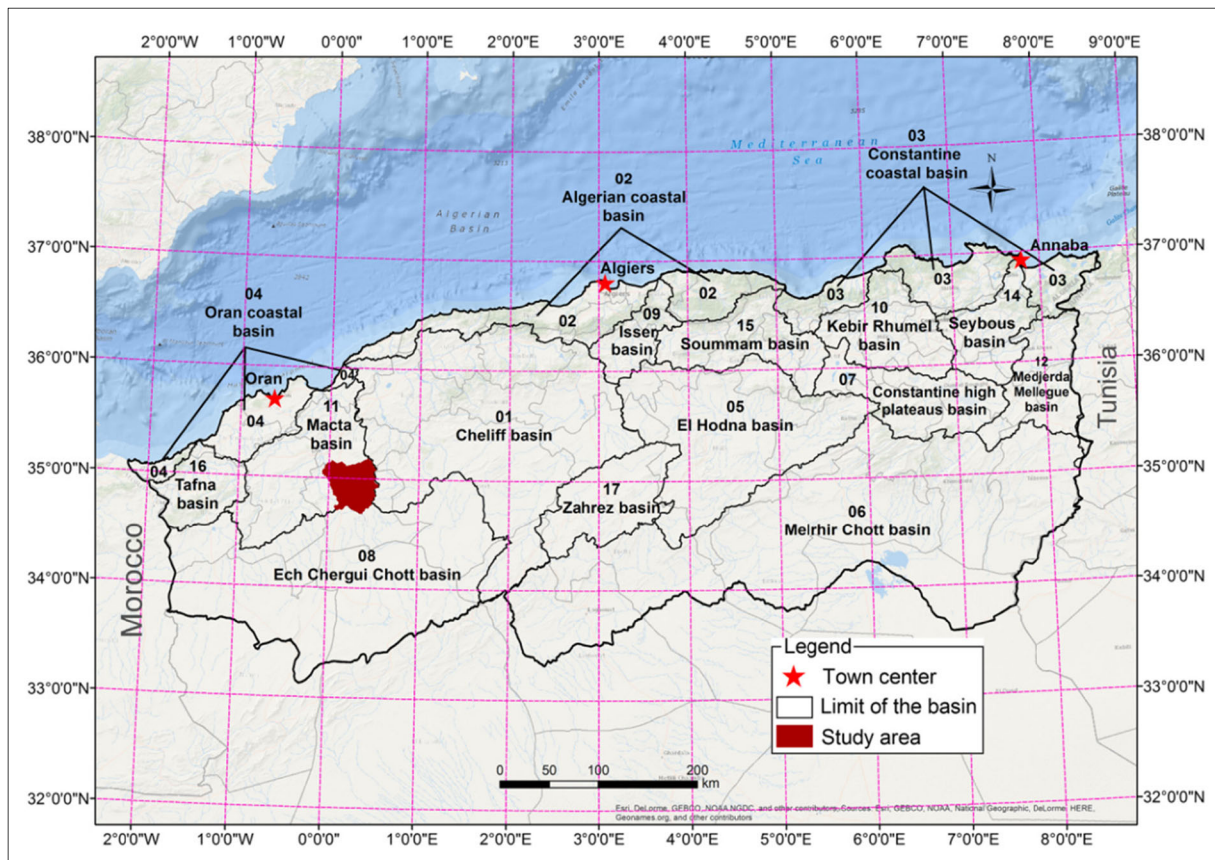
### Study area

The Wadi Sahouat basin (2140 km<sup>2</sup>) is a sub-basin of the Macta basin (14,390 km<sup>2</sup>), located 400 km to the west of Algiers, which leads to the Ouizert dam reservoir (Fig. 1). It is limited between  $-0^{\circ} 07'$  and  $0^{\circ} 56'$  East longitude and between  $34^{\circ} 67'$  and  $35^{\circ} 20'$  North latitude. The basin encompasses of two mains provinces of Saida (75% of the total area) and Mascara (25%) (Fig. 1).

The Digital Elevation Model (DEM, downloaded from the website <http://earthexplorer.usgs.gov/>) (Fig. 2a) with a resolution of 30 m shows that the study area is located between 424- and 1327-m altitudes. The watercourse of the Wadi Sahouat is formed by the confluence of Wadi Taria and Wadi Saida. It presents a total length of 98 km which supplies the Ouizert dam with an initial capacity of 100 hm<sup>3</sup>. The drainage density is 1.32 km<sup>-1</sup>. Its concentration time, defined by Roche (1963) as the time that a water particle comes from the furthest part of the basin to reach its outlet, and calculated following Giandotti (1937), is 18.5 h (see Appendix 1).

The hypsometric study of the basin shows the dominance of the altitude class 1000 to 1200 m with 35.22% of the total area and a minor class between 1200- and 1327-m level (Fig. 2b). The southern part of the basin is the highest and the average altitude is 902 m.

The slope map (Fig. 2c) derived directly from the Digital Elevation Model. It reveals the dominance of very low slopes (0–3%) within 43.46% of the total area (Table 1). The land with moderate slopes (3–12.5%)



**Fig. 1** Location of study area

encompasses an area of 42.65%. The central part from the East to the West, composed of steep slopes between 12.5 and 25%, occupies 13.04% of the basin which present a very high risk of erosion. Land with slopes greater than 25% covers 0.85% of the total area and is located mainly in the center and south-east. According to the classification of ORSTOM—now IRD—(Dubreuil and Guiscafre 1971), the Wadi Sahouat basin falls into the category of high relief with a specific height difference of 349.8 m (see Table 1 and Appendix 2).

The basin of the Wadi Sahouat is occupied by a geological series ranging from primary to quaternary (Fig. 3), with quaternary lands in the depressions and hollows of valleys. Pliocene lands are exposed to great extent in the north and west of the basin. Jurassic formations (grey-green marls) dominate almost the entire basin. The geological formations of the primary age appear in the south-east region, consisting essentially of schists and quartzites, which occur in the Wadi Tiffrit valley, Wadi Sidi Mimoun, and Wadi Hasna with the

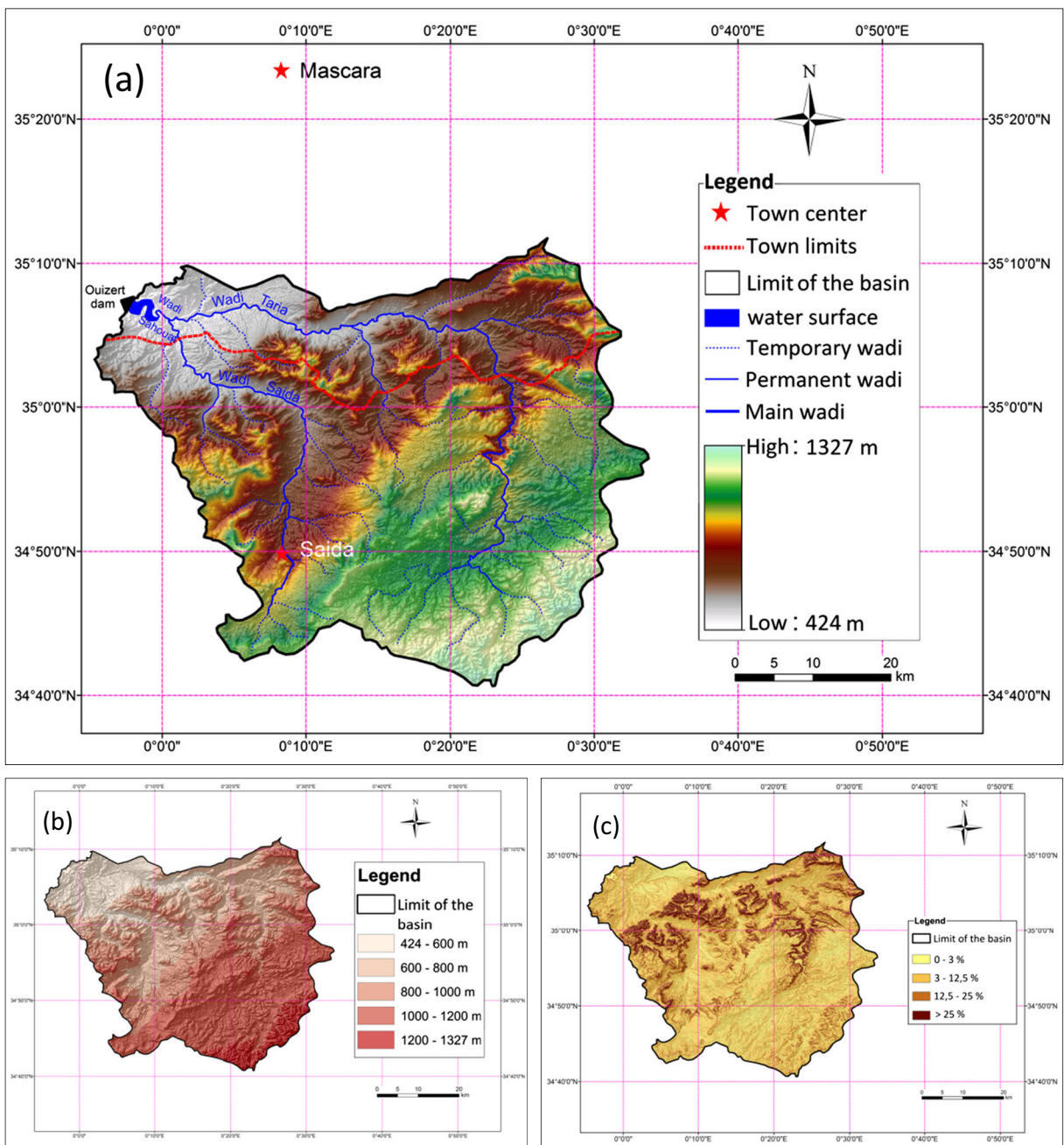
presence of granitic intrusion and flows of basaltic lava (Pitaud 1973).

Annual temperature analysis at the Saïda climatic station over 34 years from 1977 to 2010 reveals an average temperature of 16.7 °C. The basin is characterized by a semi-arid climate with a wet and cold winter and a warm dry summer. The mean rainfall (1970/71–2014/15) is 320 mm year<sup>-1</sup>.

**Materials and methods**

**Data**

To achieve our objectives, several types of data from different sources were used: (1) annual rainfall of 20 rain gauge stations which spread over the basin in a period of 45 years (1970/71–2014/15) were provided by the National Agency for Hydraulic Resources, NAHR (locally called ANRH); (2) the topographic data of the Shuttle Radar Topography Mission



**Fig. 2** Thematic map of Wadi Sahouat basin. **a** Digital Elevation Model (DEM). **b** Altitude map. **c** Slope map

(SRTM) was downloaded from the website <http://earthexplorer.usgs.gov/> to generate the DEM at a resolution of 30 m; (3) a Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) satellite image acquired on 30 October 2015 with a resolution of 30 m (<http://earthexplorer.usgs.gov/>); (4) the soil properties map proposed by the Food Administration Organization (FAO) of the

United Nations downloaded from the website <http://webarchive.iiasa.ac.at> (Table 2).

#### Description of the model

In this study, soil losses were estimated using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

**Table 1** Classes of slope of the study area

Classes (%)	A (km <sup>2</sup> )	A (%)
0–3	930.00	43.46
3–12.5	912.80	42.65
12.5–25	279.00	13.04
>25	18.20	0.85
Total	2140.00	100.00

developed by Renard et al. (1991), a revised version of USLE model from Wischmeier and Smith (1978), based on the following equation:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

where *A* is the annual soil loss rate (t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>), *R* the rainfall erosivity (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>), *K* the soil erodibility (t h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>), *LS* the dimensionless topographic factor obtained by combining the slope and its length, *C* the cover management factor, and *P* a factor without dimension which takes account of the anti-erosive cultural techniques.

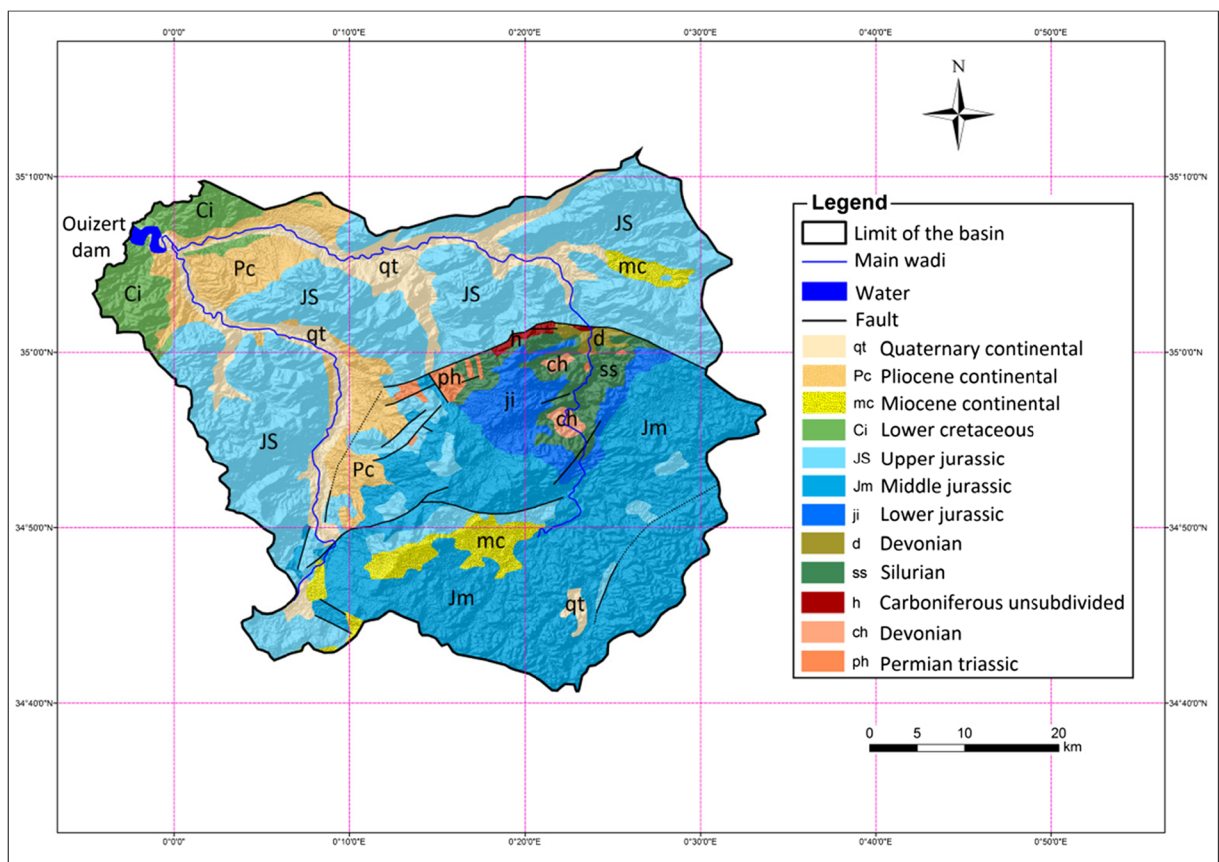
According to De Roo et al. (1996) and Chatterjee et al. (2014), the combined use of the RUSLE model with a GIS has several advantages: (1) the application of this method to large catchments and (2) the ability to display each parameter in a specific map.

The RUSLE model is an empirical model applied increasingly on large scales, at the continental scale (van der Knijff et al. 2000; Panagos et al. 2015a), on a territorial scale (van der Knijff et al. 1999; Gay et al. 2002), and at the basin scale (Prasannakumar et al. 2012; Toumi et al. 2013; Pan and Wen 2014; Balasubramani et al. 2015; Markose and Jayappa 2016).

The different constitutive steps of the organizational chart for the generation of a soil erosion map are illustrated in Fig. 4.

### Automation of the RUSLE model

The RUSLE model was developed from the “Model Builder” module in ArcGis 10.2.2. which facilitated the geoprocessing creation and modification (ESRI



**Fig. 3** Geological map of study area

**Table 2** Description of the data used

Data type	Format	Description	Source
Rainfall data	Excel (*.xls)	Annual rainfall (1970/71–2014/15)	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)
Topographic data (Shuttle Radar Topography Mission SRTM)	Raster (*.tif)	Resolution: 30 m	United States Geological Survey ( <a href="http://earthexplorer.usgs.gov/">http://earthexplorer.usgs.gov/</a> )
Satellite image Landsat 8	Raster (*.tif)	Resolution: 30 m Acquisition date: (31/10/2015)	United States Geological Survey ( <a href="http://earthexplorer.usgs.gov/">http://earthexplorer.usgs.gov/</a> )
Soil properties	Raster + Excel file (*.tif + *.xls)	Harmonized world soil database	Harmonized world soil database (HWSD) version 1.2 ( <a href="http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/">http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/</a> )

2000; Manegold 2003; Goodchild 2005). This model enables to process a combination of individual operations, each process involving the Arctoolbox module. The Model Builder is shown on Fig. 5 with three kinds of symbols of distinct colors: (1) blue ovals are used for variables to be processed, (2) orange rectangles correspond to execution tools, (3) shaded green ovals stand for the result of the executed command, and (4) arrows are used to join the different steps of the treatment. The parameters which are necessary are the limit of the study area and the DEM for the calculation of the LS and  $P$  factor, rainfall data for the  $R$  factor calculation, soil data for the  $K$  factor calculation, and satellite data for the  $C$  factor. The expected result is the soil loss of the Wadi Sahouat basin, expressed in  $\text{t ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ .

#### Rainfall erosivity factor

The rainfall erosivity factor ( $R$ ) is the most important one which determines the soil loss's rate (Jain et al. 2001; Dabral et al. 2008; Naqvi et al. 2013), the main driver of the initiation of sheet erosion, and rill erosion by the impact of splash and runoff (Naqvi et al. 2013). The more intense the rainfall, the longer it lasts, the greater the risk of erosion (Stone and Hilborn 2000; Markose and Jayappa 2016).

The  $R$  factor formula established by Wischmeier and Smith (1978) required accurate instantaneous rainfall data, which is practically impossible in an area lacking this type of data. To this end, several researchers have developed formulas adapted to the available monthly and annual data (Singh et al. 1981; Renard and Freimund 1994; Wang 1995; van der Knijff et al. 2000; Parveen and Kumar 2012). In this study, we

applied the model of Diodato (2004, 2005) which estimates the rainfall erosivity  $R$  ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{year}^{-1}$ ) as follows:

$$R = b_0 \cdot P' \cdot \sqrt{d} (\alpha + b_1 \cdot L) \quad (2)$$

where  $b_0 = 0.117 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ ,  $b_1 = -0.015 \text{ day}^{0.5} \text{ mm}^{-1.5}$ ,  $\alpha = 2.00 \text{ day}^{0.5} \text{ mm}^{-0.5}$ ,  $L$  ( $^\circ$ ) is the site longitude,  $P'$  is the annual rainfall (mm), and  $d$  is the annual maximum daily precipitation (in  $\text{mm day}^{-1}$ ) averaged over a multi-year period.

$R$  values are calculated at the 19 rainfall gauging stations of the basin then a map of  $R$  values at each pixel is extrapolated from these 19 values using the inverse distance weighting (IDW) interpolation (Fig. 5a).

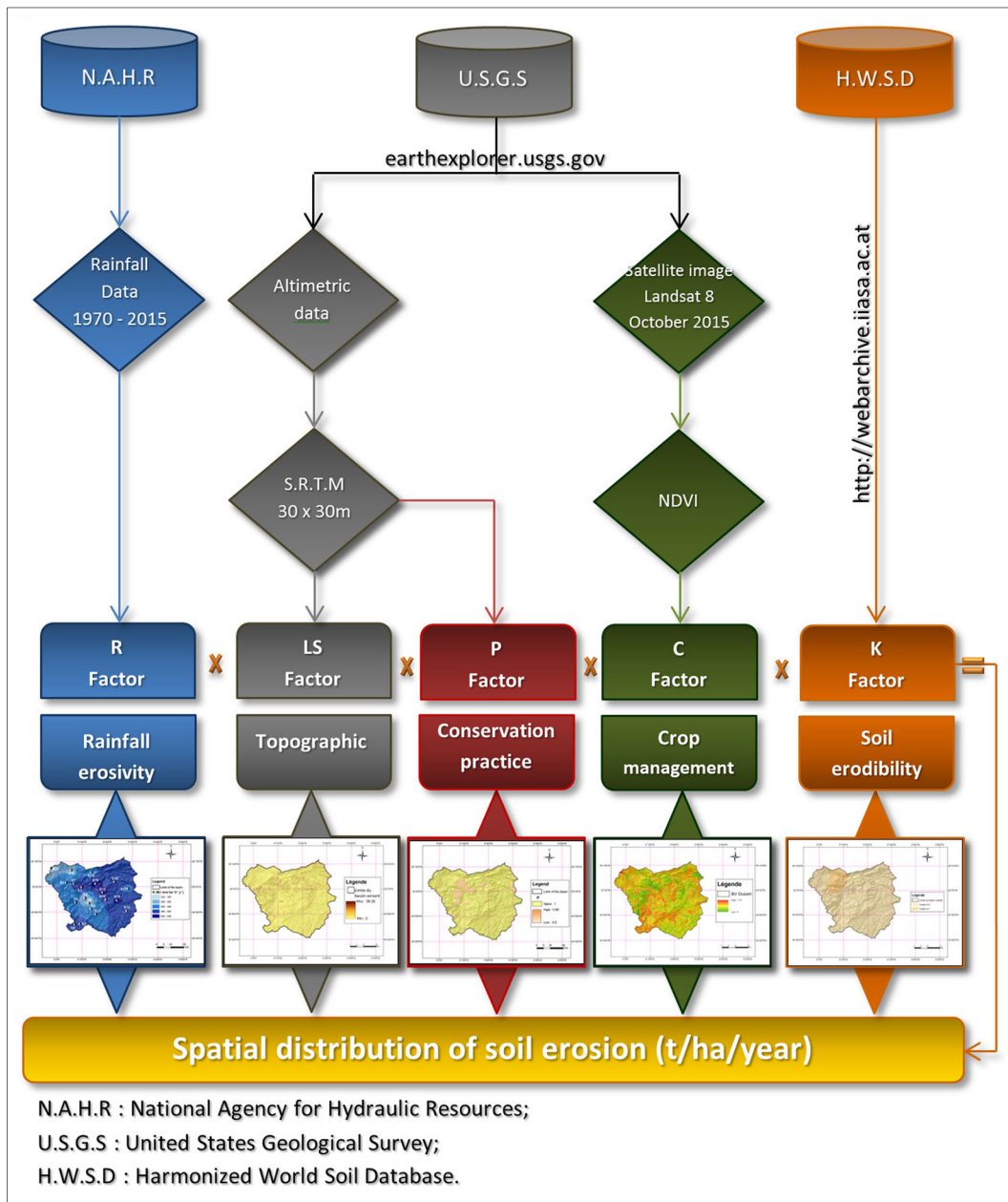
#### Soil erodibility factor

All of texture and organic matters are factors which determine the soil erodibility (Toumi et al. 2013; Balasubramani et al. 2015). Soil losses, which occur during rain events, are very sensitive to the soil texture and to its content in organic matters (Renard et al. 1997; Toumi et al. 2013). In this study, the soil erodibility factor,  $K$ , is extracted from the Harmonized World Soil Database (HWSD) version 1.2 (FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC 2009) (Fig. 5b).

#### Topographic factor

This factor represents the influence of topography on soil erosion (Ganasri and Ramesh 2016). It is the product of the slope of the ground ( $S$ ) and its length ( $L$ ). Soil losses increase with increasing slope (Yildirim 2011), the longer the slope, the greater risk

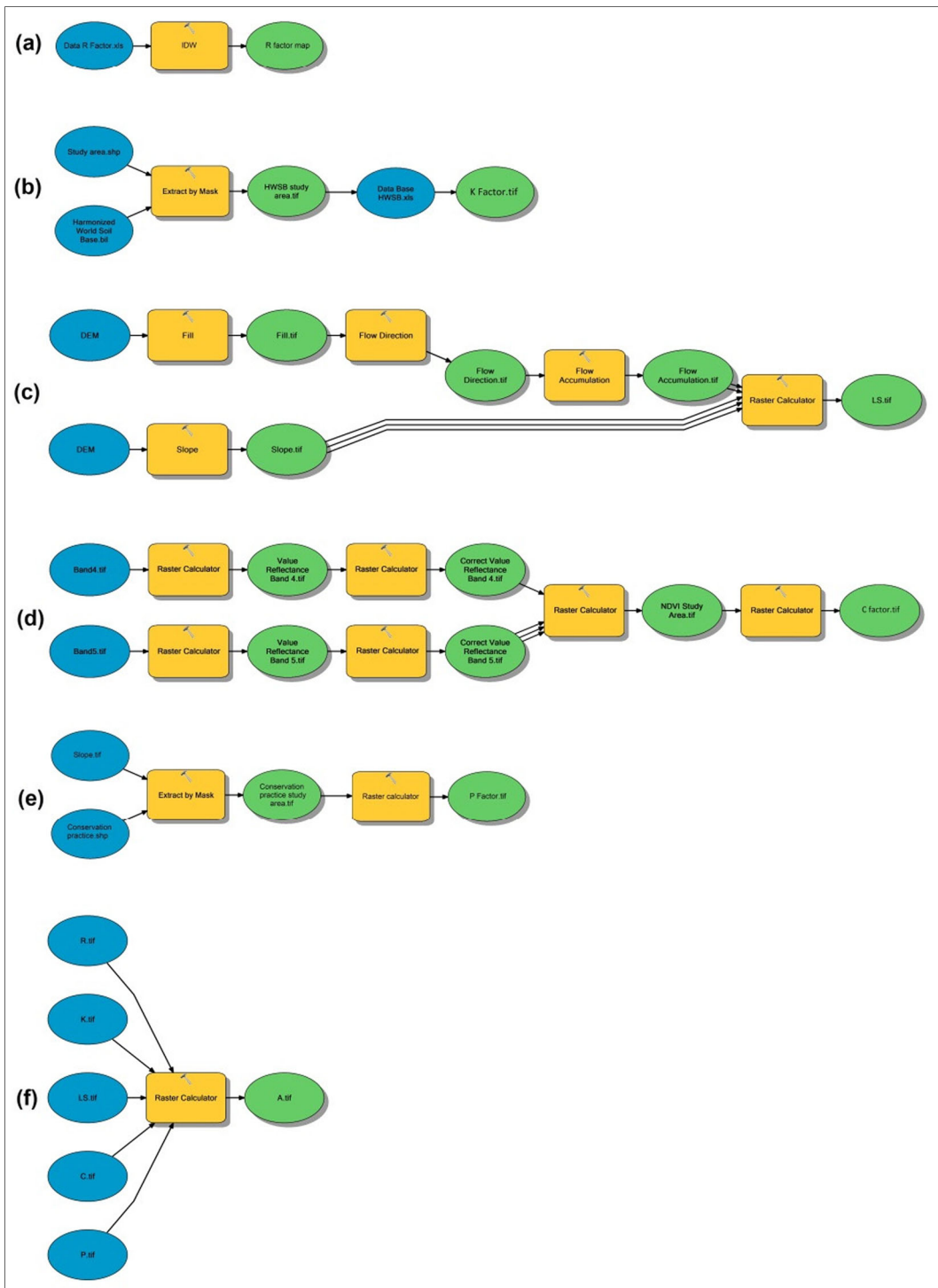




**Fig. 4** Organizational chart for the generation of soil erosion map

of erosion (Stone and Hilborn 2012). For this study, the topographic factor was determined from the DEM which necessitated several preliminary operations using the Spatial Analyst extension of the ArcGis 10.2.2 software, namely (1) elimination of depressions following the direction of flow with the command “Fill”, (2) determination of the direction of flow “Flow Direction”, (3) determination of flow

accumulation zones, and (4) calculation of the slope basin and finally of the LS factor with the Raster Calculator. The equation proposed by Moore and Burch (1986) for calculating the topographical factor (LS), which has been used by several authors such as Chen et al. (2013), Prasannakumar et al. (2012), Dutta et al. (2015), and Markose and Jayappa (2016), was considered:



**Fig. 5** Model Builder for the calculation of the different factors of the RUSLE model. **a** Calculation of rainfall erosivity factor *R*. **b** Calculation of erodibility factor *K*. **c** Calculation of the

topographic factor *LS*. **d** Calculation of the vegetation cover factor *C*. **e** Calculation the anti-erosion factor *P*. **f** Final calculation of soil losses over the study area

$$LS = \left( flow\ accumulation \times \frac{Cell\ size}{22,1} \right)^{0,4} \times (sin\ slope \times 0.0896)^{1,3} \tag{3}$$

The constitutive steps of its computation are illustrated in Fig. 5c.

*Crop management factor*

The factor *C* is an important parameter which may favor or reduce water erosion (Renard et al. 2011). It corresponds to the vegetation factor and compares losses over a land subject to a specific crop and management system to the corresponding losses in a field that is constantly left fallow (Stone and Hilborn 2000). Different techniques have been developed for the calculation of *C* factor using in particular the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (De Jong et al. 1999; Wang et al. 2002; Lin et al. 2002). The land use of the study area was determined from remote sensing through the following steps: (1) calculation of the reflectance values from Landsat OLI data, (2) correction of the reflectance values with the angle of the sun, and (3) calculation of the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) from reflectance in bands 4 (red, R4) and 5 (near infra-red, R5).

The generation of the raster layer of the *C* factor from the NDVI is written as follows (Zhou et al. 2008; Kouli et al. 2009; Markose and Jayappa 2016):

$$C = exp \left[ \frac{-\alpha NDVI}{\beta - NDVI} \right] \tag{4}$$

where *C* is the plant cover factor; NDVI = (R5 - R4) / (R5 + R4);  $\alpha$  and  $\beta$  are constants ( $\alpha = 2$  and  $\beta = 1$ , van der Knijff et al. 2000).

The different steps of its calculation are illustrated in Fig. 5d.

*Conservation support practice factor*

The areas where erosion control is practiced and their contours were determined by a careful analysis of satellite data from Google Earth. This factor corresponds to water and soil conservation practices, which considerably reduce the effect of water erosion, such as terraces,

strip crops, and tillage (Ferreira et al. 2015). In the absence of specific data about conservation practices over the Sahouat basin, we estimated the *P* values according to Morgan (2005) who proposed *P* values as a function of the slope of the terrain (Table 3). This method is used in the literature (e.g., Panagos et al. 2015b).

*Annual soil loss rate*

Five layers were obtained in raster format (\*.tif) for the five factors *R*, *K*, *LS*, *C*, and *P*. The annual soil losses of the study area were obtained by multiplying the value of each factor pixel by pixel over the whole Wadi Sahouat basin, according to the general RUSLE equation (Fig. 5f).

**Results and discussion**

*Model parameters*

*Rainfall erosivity*

We obtained rainfall erosivity values over the rainfall gauging stations between 324.1 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> at station S6 and 535.8 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> at station S13 (Table 4). It gave high erosivity to the East and low to the West (Fig. 6a). Different factors explain these findings: (1) the interannual irregularity of erosivity directly follows the interannual rains; (2) locations and their respective exposure to precipitations are determinant factors of this irregularity within the basin (3) wind’s variability over the area; (4) vegetation cover.

This range of values is comparable to ranges obtained over other basins in Algeria or over other basins of Mediterranean climate (Table 5).

**Table 3** *P* factor for contour support practice for different slope gradient (after Morgan 2005)

Slope (%)	<i>P</i>
9–12	0.6
13–16	0.7
17–20	0.8
21–25	0.9
> 25	0.95

**Table 4** Rainfall erosivity factor at the rainfall gauging stations

N°	Name	X (km)	Y (km)	L(°)	d (mm)	P (mm)	R (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )
S2	Ain El Hadjar	266.5	165.2	0.15	32.15	348.4	461.8
S3	Kilometre 50	268.5	192.0	0.17	39.04	350.5	511.8
S4	Hammam Rabi	270.4	184.5	0.18	30.39	273.0	351.7
S5	Djebel Karous	264.7	181.2	0.12	33.11	304.0	409.0
S6	Rebahia Ferme 917	272.6	180.5	0.21	25.36	275.4	324.1
S7	Sidi Amar	264.0	195.0	0.11	36.62	328.8	465.2
S8	Ferme du Syndicat	263.7	165.5	0.11	34.45	371.2	509.4
S9	Ain Zerga Ferme	273.9	176.4	0.23	32.79	331.8	443.8
S10	Oued Taria	262.4	204.9	0.09	32.18	284.4	377.3
S11	Oum El Djirane	296.9	190.6	0.47	36.72	304.8	430.7
S12	Ain Tifrit	290.1	182.5	0.40	36.70	369.6	522.3
S13	Ain Soltane	281.4	188.4	0.30	39.45	365.4	535.8
S14	Sidi Mimoun	289.1	196.1	0.38	32.87	361.9	484.1
S15	Bled El Beida	283.3	183.1	0.32	31.87	341.5	450.1
S16	Tamesna	295.6	174.5	0.46	33.90	344.6	467.9
S17	Domaine Bencherit	275.0	173.0	0.26	33.11	331.2	445.1
S18	Beniane	275.0	203.2	0.23	32.64	325.5	434.4
S19	Hasna domaine Bouchikhi	277.4	194.6	0.26	36.02	378.5	530.6
S20	Ouzert's dam	277.4	194.1	-0.04	30.17	259.9	334.1

### Soil erodibility factor

The erodibility factor extracted from the HWSD world database is uniform over the catchment area with a value  $K = 0.34 \text{ t ha MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . This value is in the range of values found in several basins of Morocco, slightly higher than over other Algerian basins (see Table 5).

### Topographic factor

The distribution of the LS factor shows values ranging from 0 to 19.54 (Fig. 6b). High values were obtained in the central part of the basin where a rough ground is exposed and vulnerable to linear erosion. The obtained range is comparable to other basins of semi-arid climate (Table 5).

### Crop management factor

The factor  $C$  was estimated from 0.002 to 1 (Fig. 6c), the higher the value, the most protected is the soil (Benkadja et al. 2015). Area with no vegetation cover has a high potential risk of soil erosion, whereas a zone with a dense vegetation cover has a low susceptibility to soil

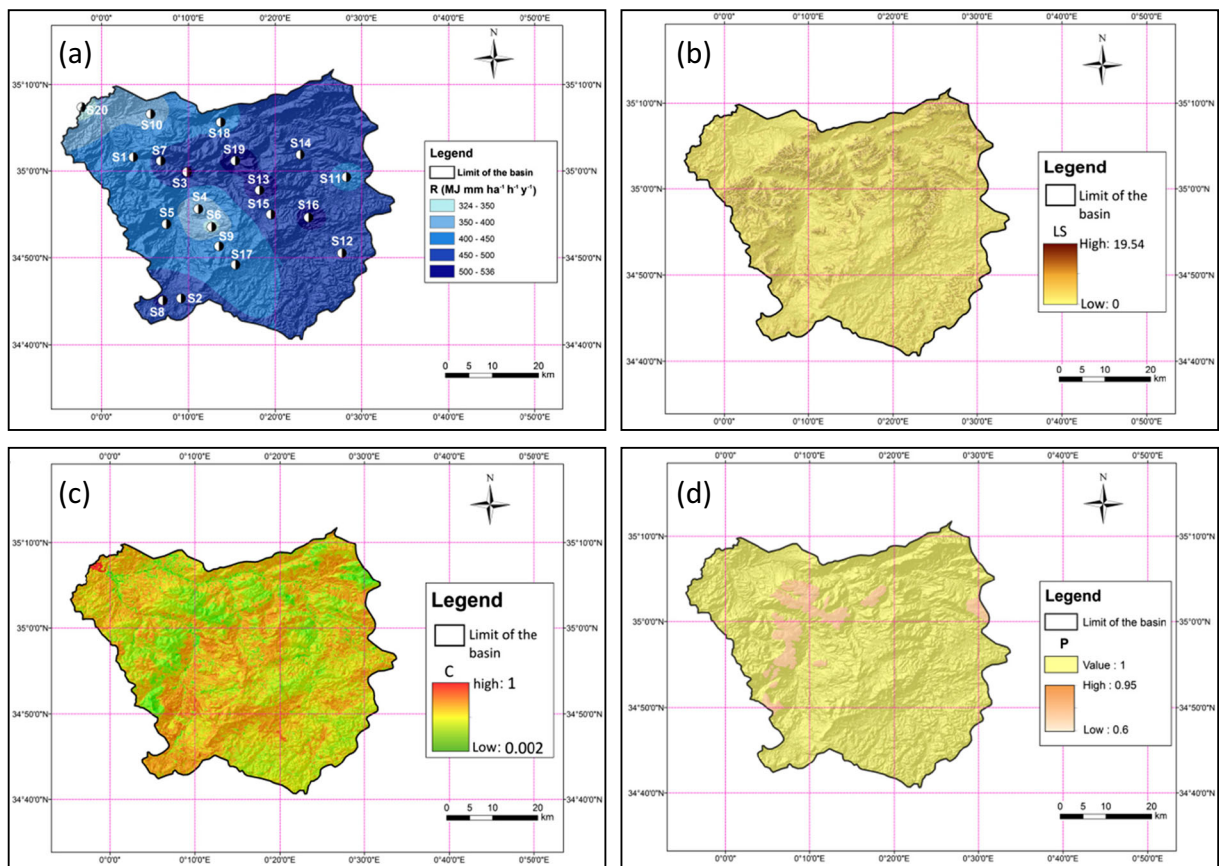
erosion. The obtained range is consistent with other basins of Algeria or over other basins of semi-arid climate (Table 5).

### Conservation support practice factor

The values of factor  $P$  (Fig. 6d) vary mainly from 0.6 to 0.95 where erosion control is practiced. Most of the basin does not benefit from erosion control, which explains why the  $P = 1$  value dominates. In these areas, soils are not protected against the run-off transport of splashed particles.

### Estimated annual erosive potential

The GIS allowed us to estimate the annual erosive potential of the study area pixel by pixel. The spatial distribution of soil losses in the Wadi Sahouat basin is shown in Fig. 7. Soil losses vary between 0 and  $255 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . The average potential soil loss is  $16.75 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , in line with the literature (Table 5). The erosivity factor as well as the topographic factor has the greatest role of triggering water erosion (Markose and Jayappa 2016). Vegetation cover areas are less risky,



**Fig. 6** Parameters of the RUSLE model applied to the study area. **a** Map of the rainfall erosivity factor *R*. **b** Map of the topographic factor *LS*. **c** Map of the vegetation cover factor *C*. **d** Map of the anti-erosive practices factor *P*

due to reduced splash impact and runoff; however, moderately open forests pose a higher risk (Kumar and Kushwaha 2013).

Table 6 shows that 87.18% of the area has a low water erosion of less than  $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . These lands are little sensitive to linear erosion due to agricultural practices and vegetation cover. This threshold ( $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) was selected from Roose et al. (2000) who indicated that over Mediterranean small mountains, sheet erosion occurs at erosion rates  $0.1\text{--}20 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , rill erosion in the range  $20\text{--}50 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , and gully erosion above. In the Sahouat basin, areas affected by high erosion ( $> 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) only account for 8.36% of the total area.

The statistical parameters of the different factors of the RUSLE model of the study area (Table 7) reveals a strong variation of the *LS* and *C* factors which mainly constraint the variability of *A*, whereas *R*, *P*, and *K* show a small spatial variability. These variability ranges and

the discontinuity of the factors reflect the variability of the soil losses.

#### Impact of soil losses on the reservoir of the Ouizert dam

When basin erosion is increasing, siltation is accelerated (Biswas and Pani 2015). According to the technical report of the bathymetric survey performed in 2000 by the National Organization for Technical Control of Hydraulic Construction (CTH), the reservoir of the Ouizert dam lost 1.75% ( $1.75 \text{ hm}^3$ ) of its initial capacity ( $100 \text{ hm}^3$ ), 14 years after its impoundment. Another estimation of 6.09% loss ( $6.09 \text{ hm}^3$ ) was obtained in 2004 from a bathymetric survey carried out by the French company Geoid in collaboration with the Laboratory of Maritime Studies (LEM) of Algiers. Thus, the capacity of the reservoir decreased by about  $0.12 \text{ hm}^3$  annually from the first estimation until 2000, and by about  $0.33 \text{ hm}^3$  annually from the second survey until 2004 (Table 8).

**Table 5** Values of the factors and parameters found in scientific papers dealing with the application of the 627 RUSLE model in semi-arid areas

Reference	Country	R (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )		K (t h MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )		LS		C		P		A (t ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Balsubramani et al. 2015	India	333.6	414.2	0	0.109	0.008	22.12	0	0.5	0.28	1	0	95.54
Ferreira et al. 2015	Portugal	851.7	892.0	0.021	0.039	0	91	0.035	0.79	1	1	0	<A>40
Gaubi et al. 2017	Tunisia	73	95.58	0	0.091	0	>150	0	1	1	1	0	>150
Sadiki et al. 2009	Morocco	135	190	0.38	0.6	0.48	87.9	0.1	1	0.3	0	0	>35
Markhi et al. 2015	Morocco	41	57	0.24	0.86	0	>30	0	1	0.55	7	7	1221
El Garouani et al. 2008	Morocco	56.3	7963	0.22	0.46	/	29.4	0.08	0.75	1	1	60.74	333.7
Chadli 2016	Morocco	1527	20<R<70	0.14	0.17	0.03	55	0	0.1	0.5	1	10	<A>200
Toumi et al. 2013	Algeria	100	500	/	/	0	11,402	0.033	1	1	0	0	1500
Benkadja et al. 2015	Algeria	370.6	773.5	0.016	0.065	0<A<20	19.54	0.005	0.5	1	1	5	<A>200
Benchetouh et al. 2017	Algeria	324.1	535.8	0.001	0.2	0.217	0	0.04	1.6	1	1	0	>100
Toubal et al., this study.	Algeria	324.1	535.8	0.34	0.2	0	19.54	0.002	1	0.6	1	0	255

The Ouizert dam was designed to reduce the filling rate of the Bouhanifia dam and consequently the silting of the Fergoug dam and also to prolong their lifetimes. In average over 18 years, the siltation rate is seen to be low (~6%); however, this rate was seen to increase at the end of the period, if we compare the estimations from 2000 and 2004.

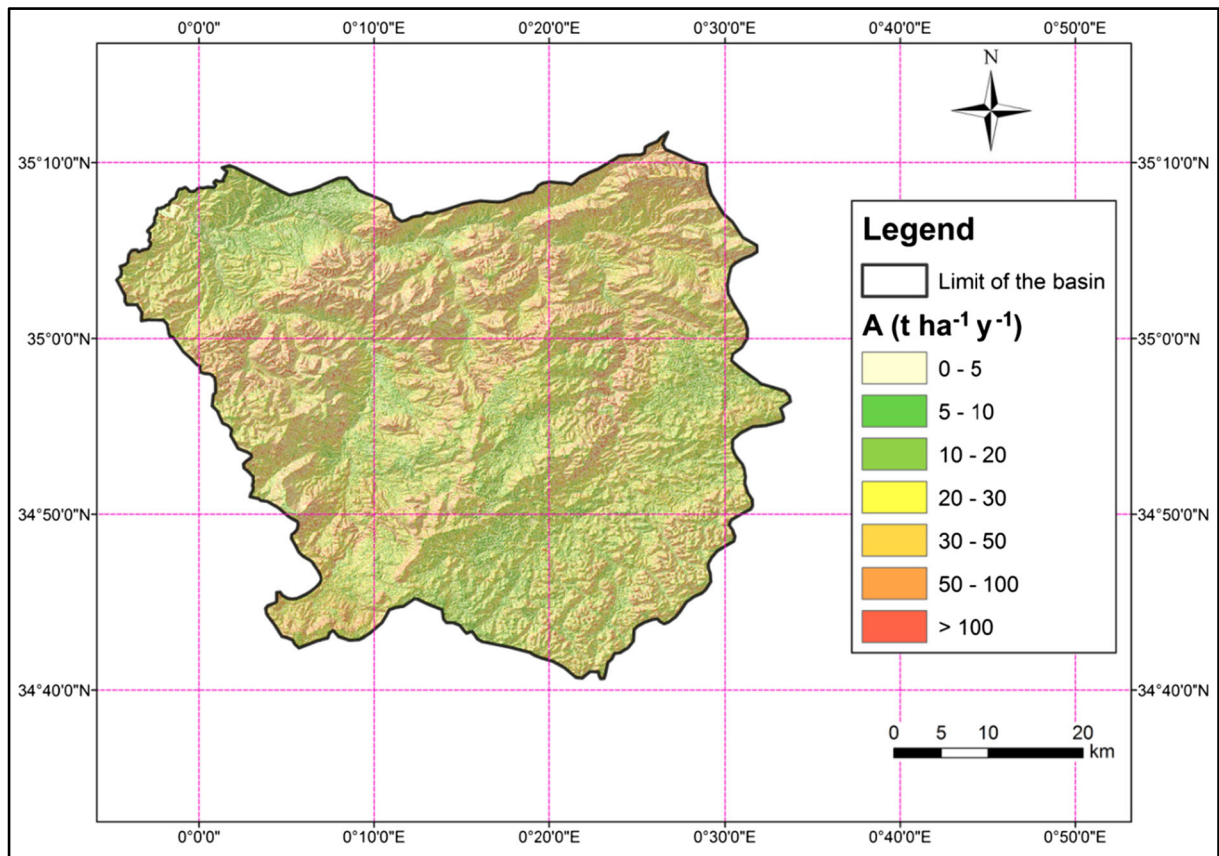
Comparison between the RUSLE model and the bathymetric measurements

The application of the RUSLE model provided an estimation of soil loss of 16.75 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, corresponding to 2.24 hm<sup>3</sup> year<sup>-1</sup>, which is much over the measured siltation of the Ouizert dam at the rate of 0.33 hm<sup>3</sup> year<sup>-1</sup>. In fact, the soil loss obtained by the RUSLE model can be compared to sediment flux only over small basins or parcels. The RUSLE model is based on similarity between the studied basin with parcels for which it was developed, this a main limit of its application (Ouechtati and Baldassare 2011). The wider the basin, the more chance have eroded particles to settle on their way to downstream. Over large basins, sediments are trapped in the streambed, along the banks, or in hill dams. Buffering processes were described by Walling (1999). The two quantities refer to distinct parameters and thus cannot be directly compared.

Location of hierarchical areas of water erosion

The sensitivity to water erosion can be deduced from the annual soil loss with a classification from the weakest to the most intense (Table 9 and Fig. 8). The supervision of this water erosion sensitivity map may benefit from Google Earth satellite imagery. Images from 2016 were considered in our study and show a clear conformity of the obtained result with the physical condition of ground over low sensitive (Fig. 8a), moderately sensitive (Fig. 8b), and highly sensitive (Fig. 8c, d) zones to erosion.

According to the water erosion classes, we can deduce that low sensitivity of water erosion (0–50 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) covers the largest areas of basin 91.6% (Table 9). They concentrate in north-west and in south-east parts of the basin where agriculture is developed. The moderately (50–100 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) and highly (> 100 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) sensitive zones almost cover the same proportion (~4% each). Gullying is evident in steeply sloped areas of 12.5% and more. Medium gully areas are located at the foot of mountains with average slopes < 12.5%.



**Fig. 7** Soil erosion map in the Wadi Sahouat basin

Erosion’s elevation and its susceptibility

The different classes of water erosion of the soil are compared with the altitudes classes of the basin which in Table 10. The areas the most sensitive to high risk of erosion lies between 600 and 1000 m of altitude. These

**Table 6** Area of soil losses classes

Classes of erosion (t ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	A (km <sup>2</sup> )	A (%)
0–5	1339	62.57
5–10	373.92	17.47
10–20	152.63	7.13
20–30	64.77	3.03
30–50	30.82	1.44
50–100	105.67	4.94
> 100	73.19	3.42
Total	2140	100

zones should concentrate different means in order to fight erosion risk.

Priority of intervention

The priority of intervention consists to hierarchize an action plan conservation against water erosion, based on the digital model of the study area. This operation resulted in 32 sub-basins (Fig. 9).

The prioritization of the action plan by sub-basins (Fig. 9) needs a strategy that includes two main conditions, namely (1) the average soil loss rate of the sub-basin concerned and (2) the protection of the Ouzert dam against siltation acceleration, considering the distance of the outlet of the sub-basin to the dam’s reservoir.

In this context, a decision matrix was developed in order to define the priority levels for each sub-basin. Five classes were designed from non-urgent to very urgent action (Table 11). Results are illustrated in Table 12 and Fig. 10.

**Table 7** Statistics parameters of the different factors of the RUSLE model

Parameter	R factor (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	K factor (t h MJ <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	LS factor	C factor	P factor	A (t ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )
Minimum	324	0.34	0	0.01	0.6	0
Maximum	536	0.34	19.54	1	0.95	255
Mean	450	0.34	0.18	0.63	0.66	16.75
St. deviation	34.20	0	0.52	0.15	0.11	44.78
CV	0.07	0	2.88	4.2	0.16	2.67

Of the 32 sub-basins of the study area, four sub-basins (numbered 16, 17, 2, and 15) are the most urgent to develop and implement an action plan since their distance to the dam is less than 10 km and their average soil loss was estimated to be 13.14, 12.18, 14.93, and 16.01 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, respectively (Table 12). The zones of high priority of intervention cover 15.7 km<sup>2</sup> of soils to be protected.

Ten sub-basins are classified as urgent priority with average soil losses between 16.35 and 27.04 t/ha/year. They are mainly located in the central part of the catchment. The sub-basins which are located in the southwestern and in the eastern parts of the basin shown a moderate priority. The Wadi Sahouat basin has a multitude of manifestation forms of linear erosion, characterized by rills and gullies until ravines (de Vente and Poesen 2005). Several sub-basins and their forms of erosion are illustrated on Fig. 10 with ravines (Fig. 10a, b, c, f) and gullies (Fig. 10d, e).

Several conservation measures can be proposed, such as building terraces, bankets, isohypse stone dikes, dry-stone steps, gabion (e.g., Kumar et al. 2014), conservation tillage (or no-till farming), contour plowing, and bio-engineering (cover crops, reforestation, improving soil productivity) (Kumar and Kushwaha 2013). These means aim to: (1) intercept and reduce the speed of

**Table 9** Classification of the sensitivity to water erosion according to the rate of erosion

Rate of erosion (t/ha/year)	A (km <sup>2</sup> )	A (%)	Classes of sensitivity
0–50	1961.1	91.6	Low sensitivity
50–100	105.7	4.9	Moderate sensitivity
> 100	73.2	3.4	High sensitivity

runoff and convey it at non-erosive speeds, (2) trapping sediment and nutrients, (3) promote the formation of natural terraces over time, and (4) reduce sedimentation in watercourses (Blanco and Lal 2010) and prevent sediment trapping in the reservoir dam.

The withdrawal of density currents by bottom dam flushing minimizes the risk of siltation of the Ouizert dam. Dam managers need to be aware of the flood events in order to proceed with rational opening of gates because a rapid increase in the opening height leads to a huge waste of clear water (Coyne and Bellier 1980).

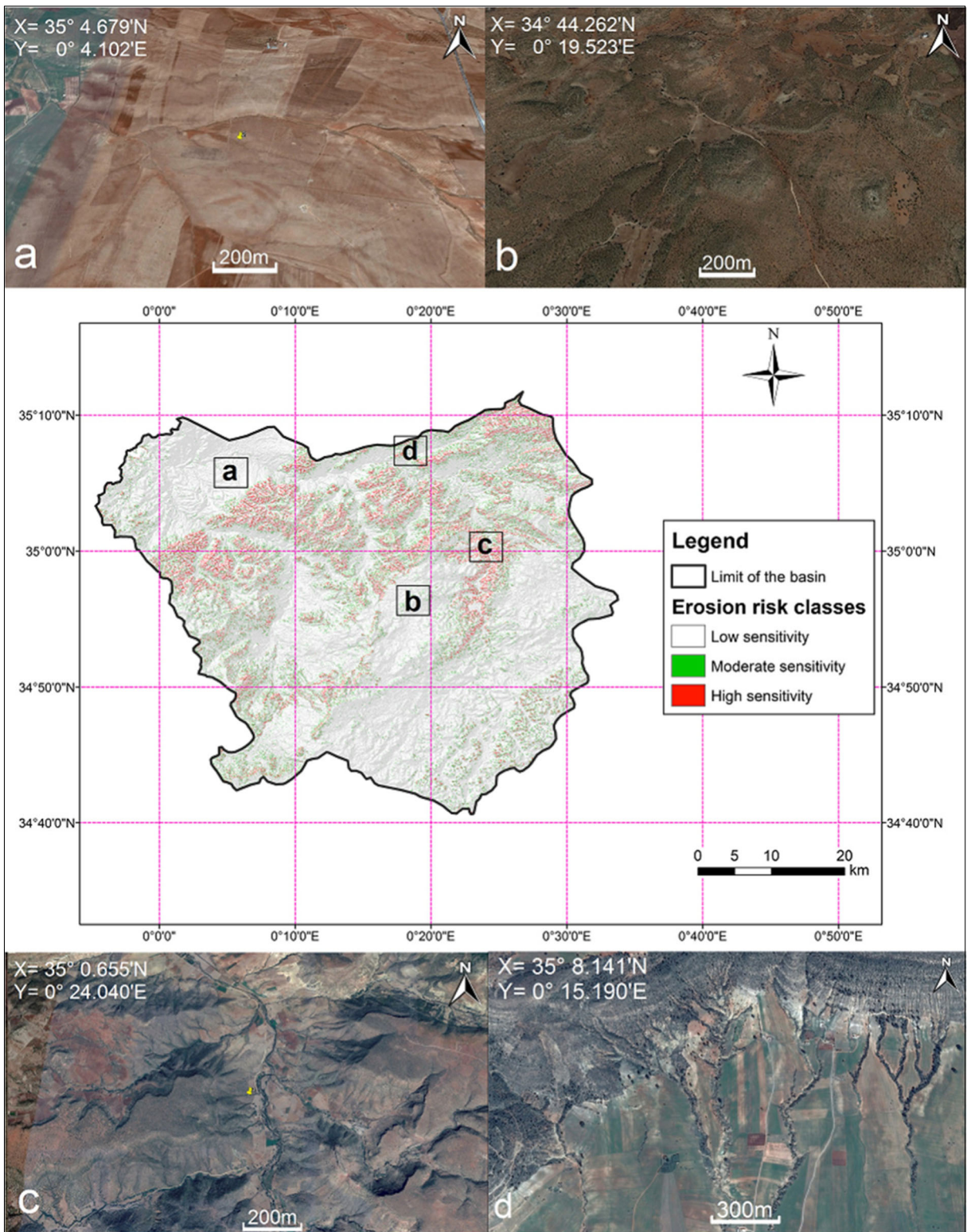
## Conclusion

Soil erosion is a phenomenon in the environment which causes a risk for the agro-soil heritage. This study presented the quantitative evaluation and mapping of local soil losses within the Wadi Sahouat basin upstream the Ouizert dam reservoir with the RUSLE model. Using a GIS played a great and valuable role to map this parameter. The basin experiences soil losses estimated between 0 and 255 t ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. Although these values were based on a given vegetation cover (in October 2015) which may vary seasonally and from a year to another, they show the high range of sensitivity of sub-basins to water erosion. This operation can be repeated with several vegetation cover map to investigate the sensitivity of the soil losses to the seasonal vegetation

**Table 8** Evolution of the silting of the Ouizert dam (1986/2004)

Bathymetric survey	Initial capacity (hm <sup>3</sup> )	Capacity after bathymetric survey (hm <sup>3</sup> )	Loss of capacity (hm <sup>3</sup> )	Silting rate (%)	Average annual loss (hm <sup>3</sup> /year)
1986	100	/			
2000 C.T.H	/	98.250	1.750	1.75	0.12
2004 G.E.O.I.D–L.E.M		93.910	6.090	6.09	0.33





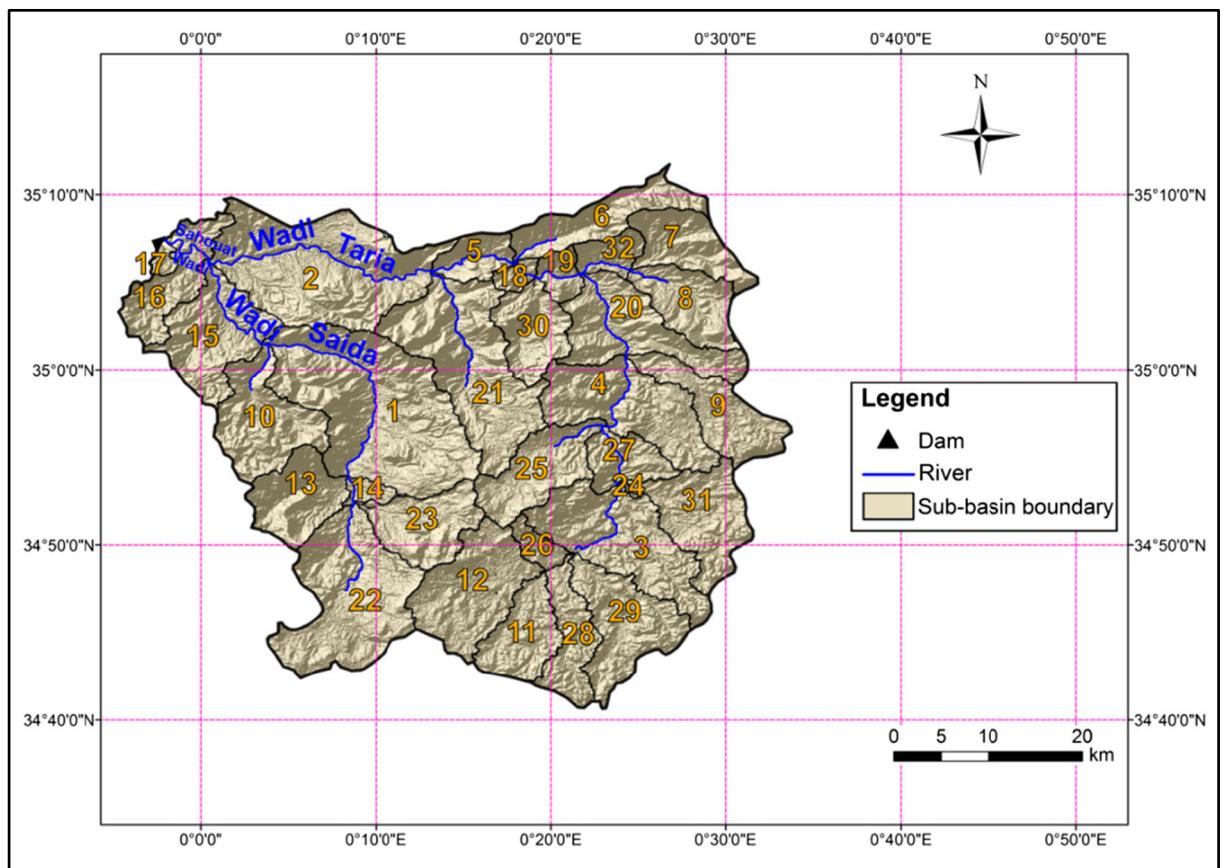
**Fig. 8** Classes of sensitivity to water erosion according to the rate of water erosion. **a** Low sensitivity, **b** moderate sensitivity, and **c**, **d** high sensitivity

**Table 10** Area of soil erosion category under different elevation zones

Elevation (m)	A (km <sup>2</sup> )	A (km <sup>2</sup> )			A (%)		
		Low sensitivity	Moderate sensitivity	High sensitivity	Low sensitivity	Moderate sensitivity	High sensitivity
424–500	80.25	78.99	1.10	0.17	98.42	1.37	0.21
500–600	177.42	172.96	3.74	0.71	97.49	2.11	0.40
600–700	221.33	200.31	13.24	7.78	90.50	5.98	3.51
700–800	284.08	247.38	19.52	17.18	87.08	6.87	6.05
800–900	241.25	204.46	17.52	19.27	84.75	7.26	7.99
900–1000	261.40	230.51	16.50	14.39	88.18	6.31	5.50
1000–1100	428.52	405.09	15.84	7.60	94.53	3.70	1.77
1100–1200	335.03	320.21	11.05	3.76	95.58	3.30	1.12
1200–1300	109.57	100.20	7.06	2.32	91.45	6.44	2.12
1300–1331	1.22	1.10	0.10	0.01	90.75	8.28	0.96
Total:	2140.08	1961.21	105.67	73.19	/	/	/

cover. The use of very high resolution satellite images should give more detailed estimates of soil loss rates (Biswas and Pani 2015).

Using the division of our study basin into sub-basins enables to prioritize the emergency level of action plan to limit the silting up of the Ouizert dam reservoir. This



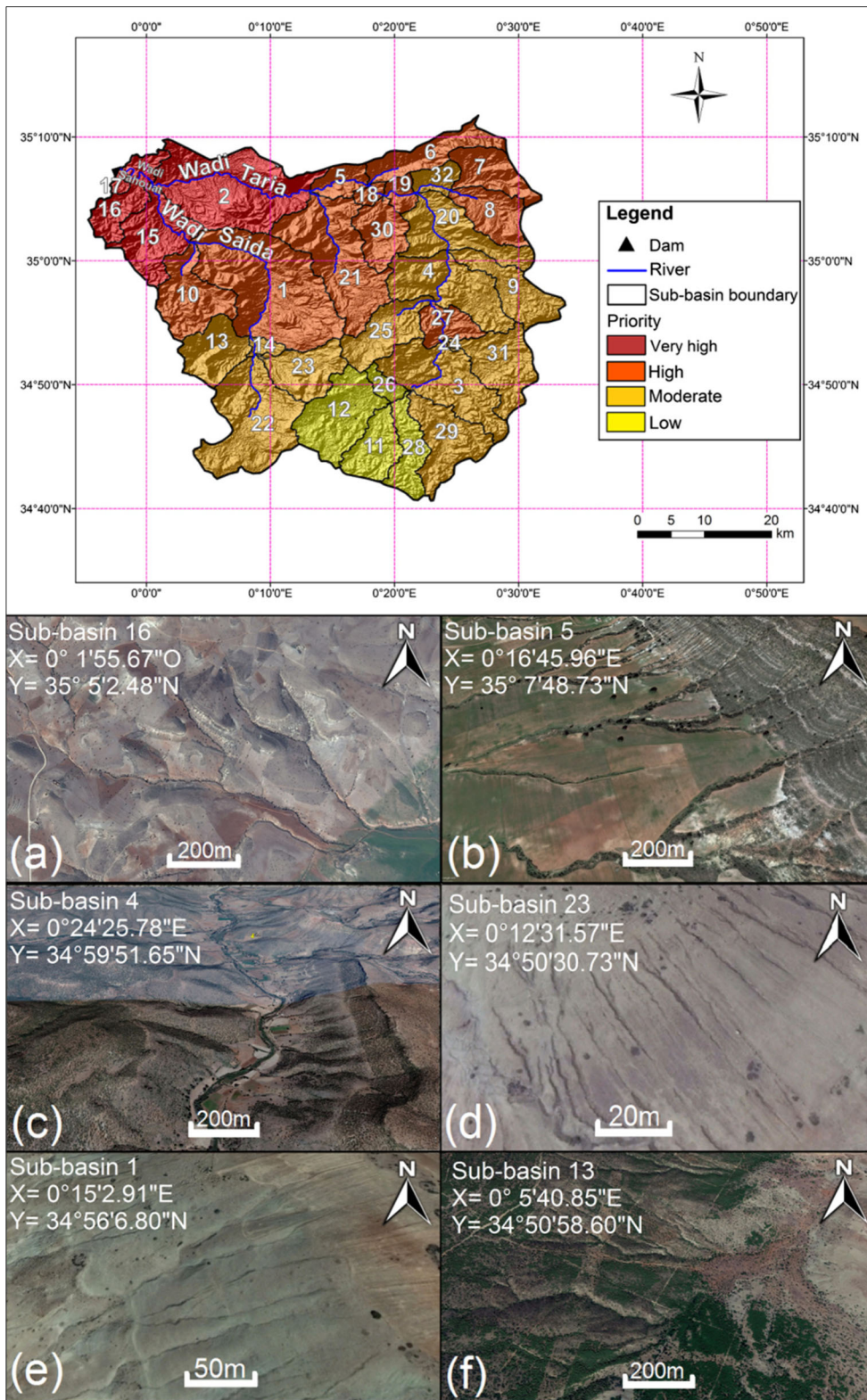
**Fig. 9** Delineation sub-basins of Wadi Sahouat basin

**Table 11** Decision matrix of the priority intervention

Soil loss rate (t/ha/year)	Distance/dam (km)					Priority
	> 100	50–100	20–50	10–20	0–10	
0–5	Not urgent	Low	Low	Low	Low	Priority
5–7.4	Low	Low	Moderate	Moderate	Moderate	
7.4–12	Low	Moderate	Moderate	High	High	
12–20	Moderate	Moderate	High	High	Very high	
> 20	Moderate	High	High	Very high	Very high	

**Table 12** Priority classes of 32 sub-basin of Wadi Sahouat basin

N° sub-basin	A (km <sup>2</sup> )	Mean A (t/ha/year)	Distance/dam (km)	Priority
16	53.9	13.14	0	Very high
17	6	12.18	0	Very high
2	177.3	14.93	9.79	Very high
15	82.8	16.01	9.79	Very high
1	213.6	18.05	25.2	High
10	81.9	24.3	26.1	High
5	26.2	16.35	45.14	High
21	146.6	20.67	45.14	High
18	9.4	23.08	55.15	High
6	58.8	25.24	55.6	High
19	16.8	25.19	58.91	High
30	49	27.04	58.91	High
7	51.9	22.23	76.12	High
27	34.5	20.81	89.92	High
14	9.6	8.91	53.2	Moderate
13	57.9	14.6	54.1	Moderate
23	60.4	15.21	58.63	Moderate
20	86.6	19.85	64.22	Moderate
32	20.9	15.91	64.87	Moderate
22	143.6	17.08	73.63	Moderate
8	53.2	18.38	76.12	Moderate
4	100.8	19.52	77.07	Moderate
9	60.9	12.31	77.07	Moderate
25	63.4	10.64	88.82	Moderate
3	111.3	11.87	98.51	Moderate
31	76.5	11.21	99.11	Moderate
24	0.9	16.19	99.31	Moderate
29	79.5	12.39	112.3	Moderate
26	14.3	8.78	112.3	Low
28	46.5	11.54	112.3	Low
11	51.5	8.94	116.22	Low
12	93.5	8.65	117.64	Low



**Fig. 10** Priority map of sub-basin of Wadi Sahouat basin and localization of the different forms of water erosion. **a, b, c, and f:** ravine; **d and e:** gully

should encompass many kinds of measures including anti-erosion works—terraces, the use of gabion and used tyre thresholds—, conservation tillage, contour plowing, increasing vegetation cover, and bio-engineering.

**APPENDIX**

Appendix 1

Giandotti (1937) proposed to calculate the concentration time by:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + (1, 5L_{cp})}{0, 8 \sqrt{H_{av} - H_{min}}} \tag{A1}$$

where  $T_c$  is the time concentration of the watershed (h),  $A$  is the watershed area (km<sup>2</sup>),  $L_{cp}$  is the length of the main stream (km),  $H_{av}$  is the mean altitude of the basin (m), and  $H_{min}$  is the minimum altitude of the basin (m).

Appendix 2

The slope index of a drainage basin decreases with increasing basin area. It is thus difficult to compare the slope index of basins of different areas. For that purpose, Dubreuil and Guiscafre (1971) introduced the specific height difference ( $D_s$ ), its name being originally “Dénivelé spécifique,” expressed (in m) and calculated by:

$$D_s = I_g \sqrt{A} \tag{A2}$$

where  $I_g$  is the global slope index (in %) and  $A$  the basin area (in km<sup>2</sup>). Appendix Table 13 indicates the ORSTOM classification of basin relief based on the specific height difference.

**Table 13.** Classification of relief based on  $D_s$  (Dubreuil and Guiscafre 1971)

R1	Very low relief	$D_s < 10$ m
R2	Low relief	$10 \text{ m} < D_s < 25$ m
R3	Rather low relief	$25 \text{ m} < D_s < 50$ m
R4	Moderate relief	$50 \text{ m} < D_s < 100$ m
R5	Rather high relief	$100 \text{ m} < D_s < 250$ m
R6	High relief	$250 \text{ m} < D_s < 500$ m
R7	Very high relief	$500 \text{ m} < D_s$

**References**

Achite, M., & Meddi, M. (2004). Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l’oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse*, 15(4), 367–373.

Achite, M., & Meddi, M. (2005). Variabilité spatio-temporelle des apports liquides et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l’oued Mina (nord-ouest algérien). *Revue des Sciences de l’Eau*, 18, 37–56.

Achite, M., & Ouillon, S. (2016). Recent changes in climate, hydrology and sediment load in the Wadi Abd, Algeria (1970–2010). *Hydrology of Earth System Sciences*, 20, 1355–1372 <https://doi.org/10.5194/hess-20-1355-2016>.

Alekseevskiy, N. I., Berkovich, K. M., & Chkalov, R. S. (2008). Erosion, sediment transportation and accumulation in rivers. *International Journal of Sediment Research*, 23, 93–105. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(08\)60009-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(08)60009-8).

Balasubramani, K., Veena, M., Kumaraswamy, K., & Saravanabavan, V. (2015). Estimation of soil erosion in a semi-arid watershed of Tamil Nadu (India) using revised universal soil loss equation (rusle) model through GIS. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(2), 10. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0015-4>.

Bayramin, I., Basaran, M., Erpul, G., & Canga, M. R. (2008). Assessing the effects of land use changes on soil sensitivity to erosion in a highland ecosystem of semi-arid Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 140, 249–265. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9864-2>.

Benchettouh, A., Kouri, L., & Jebari, S. (2017). Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 79. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2875-6>.

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*, 74, 91–102. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0611-y>.

Biswas, S. S., & Pani, P. (2015). Estimation of soil erosion using RUSLE and GIS techniques: a case study of Barakar River basin, Jharkhand, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1, 42. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0040-3>.

Blanco, H., & Lal, R. (2010). *Principles of soil conservation and management*. Dordrecht, ISBN 978-1-4020-8708-0: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8709-7>.

Chadli, K. (2016). Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 51. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y>.

Chatterjee, S., Krishna, A. P., & Sharma, A. P. (2014). Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India. *Environmental Earth Sciences*, 71, 357–374. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2439-3>.

Chen, H., Teng, Y., & Wang, J. (2013). Load estimation and source apportionment of nonpoint source nitrogen and phosphorus based on integrated application of SLURP model, ECM, and RUSLE: a case study in the Jinjiang River, China.

- Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 2009–2021. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2684-z>.
- Coyne and Bellier (1980). Barrage Es Saada sur l’oued Mina, Consignes d’exploitation. Technical report, “Coyne et Bellier” consulting and engineering company, Paris.
- Dabral, P. P., Baithuri, N., & Pandey, A. (2008). Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing. *Water Resources Management*, 22(12), 1783e1798. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9253-9>.
- De Jong, S. M., Paracchini, M. L., Bertolo, F., Folving, S., Megier, J., & de Roo, A. P. J. (1999). Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data. *Catena*, 37(3–4), 291–308. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00038-7).
- De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., & Ritsema, C. J. (1996). LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins, I: Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 10(8), 1107–1117. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199608\)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4).
- de Vente, J., & Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews*, 71, 95–125. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>.
- Diodato, N. (2004). Estimating Rusle’s rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 103–107. <https://doi.org/10.5194/hess-8-103-2004>.
- Diodato, N. (2005). Geostatistical uncertainty modelling for the environmental hazard assessment during single erosive rain-storm events. *Environmental Monitoring and Assessment*, 105, 25–42. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-2815-x>.
- Dubreuil, P., & Guiscafne, J. (1971). La planification du réseau hydrométrique minimal. *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, VIII(2), 3–37.
- Dutta, D. (2016). Soil erosion, sediment yield and sedimentation of reservoir: a review. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 123. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0182-y>.
- Dutta, D., Das, S., Kundu, A., & Taj, A. (2015). Soil erosion risk assessment in Sanjal watershed, Jharkhand (India) using geo-informatics, RUSLE Model and TRMM data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1, 37. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0034-1>.
- El-Mahi, A., Meddi, M., & Bravard, J. P. (2012). Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l’Oued El Hammam (Algérie du Nord). *Hydrological Sciences Journal*, 57(8), 1642–1661. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.717700>.
- ESRI. (2000). *Model builder for arcview spatial analyst 2*. Redlands: ESRI Press.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. (2009). *Harmonized world soil database (version 1.1)*. Rome: FAO.
- Fenta, A. A., Yasuda, H., Shimizu, K., Haregeweyn, N., & Negussie, A. (2016). Dynamics of soil erosion as influenced by watershed management practices: a case study of the Agula watershed in the semi-arid highlands of northern Ethiopia. *Environmental Management*, 58, 889–905. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0757-4>.
- Ferreira, V., Panagopoulos, T., Cakulab, A., Andrade, R., & Arvela, A. (2015). Predicting soil erosion after land use changes for irrigating agriculture in a large reservoir of southern Portugal. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.006>.
- Ganasri, B. P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS—a case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7, 953–961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>.
- Gaubi, I., Chaabani, A., Ben Mammou, A., & Hamza, M. H. (2017). A GIS-based soil erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Lebna watershed, Cap Bon, Tunisia). *Natural Hazards*, 86, 219–239. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2684-3>.
- Gay, M., Cheret, V., & Denux, J. P. (2002). Apport de la télédétection dans l’identification du risque d’érosion. *La Houille Blanche*, 1(81), 86.
- Giandotti, M. (1937). *Idrologia*, Florence (IT): Barbera Edizioni.
- Goodchild, M. F. (2005). GIS, spatial analysis and modeling overview. In D. J. Maguire, M. Batty, & M. F. Goodchild (Eds.), *GIS, spatial analysis, and modeling* (pp. 1–18). Redlands: ESRI Press.
- Hamza, M. H., Added, A., Rodrigue, R., Abdeljaoued, S., & Ben Mammou, A. (2007). A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline-Ras Jebel-Raf Raf Aquifer, Northern Tunisia). *Journal of Environmental Management*, 84, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.004>.
- Hermassi, T., Cherif, M. A., & Habaieb, H. (2014). Etude du transport solide au niveau du bassin versant de Merguelli, Tunisie centrale : cas des bassins versants d’Ettiouret et de Rajela. *La Houille Blanche*, 4, 88–96.
- Ismail, J., & Ravichandran, S. (2008). RUSLE2 model application for soil erosion assessment using remote sensing and GIS. *Water Resources Management*, 22, 83–102. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9145-9>.
- Jain, S. K., Kumar, S., & Varghese, J. (2001). Estimation of soil erosion for a Himalayan watershed using GIS technique. *Water Resources Management*, 15(1), 41e54. <https://doi.org/10.1023/A:1012246029263>.
- Kouli, M., Soupios, P., & Vallianatos, F. (2009). Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental Geology*, 57, 483–497. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1318-9>.
- Kumar, S., & Kushwaha, S. P. S. (2013). Modelling soil erosion risk based on RUSLE-3D using GIS in a Shivalik sub-watershed. *Journal of Earth System Science*, 122, 389–398. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0276-0>.
- Kumar, A., Devi, M., & Deshmukh, B. (2014). Integrated remote sensing and geographic information system based RUSLE modelling for estimation of soil loss in Western Himalaya, India. *Water Resources Management*, 28, 3307–3317. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0680-5>.
- Lang, S. S. (2006). *Slow insidious soil erosion threatens human health and welfare as well as the environment, Cornell study by asserts chronicle online*. USA: Cornell University.
- Lin, C. Y., Lin, W. T., & Chou, W. C. (2002). Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan

- experience. *Soil & Tillage Research*, 68(2), 143–152. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00114-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00114-9).
- Lobo, G. P., & Bonilla, C. A. (2015). Effect of temporal resolution on rainfall erosivity estimates in zones of precipitation caused by frontal systems. *Catena*, 135, 202–207. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.002>.
- Manegold, J. (2003). Using the Model Builder of ArcGIS 9 for landscape modeling. In: Buchmann E, Ervin S (eds) Trends in landscape modeling. Proceedings at Anhalt University of Applied Sciences. Wichmann, Heidelberg, 240–245 pp.
- Markhi, A., Laftouhi, N. E, Soulaïmani, A., & Fniguire, F., (2015). Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG. Application dans le bassin versant n°fis dans le haut atlas de Marrakech (Maroc). *European Scientific Journal*, 11(29), ISSN: 1857–7881.
- Markose, V. J., & Jayappa, K. S. (2016). Soil loss estimation and prioritization of sub-watersheds of Kali River basin, Karnataka, India, using RUSLE and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 225 <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5218-2>.
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Physical basis of the length slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1294–1298.
- Morgan, R.P.C. (2005). Soil erosion and conservation third ed. Blackwell Science Ltd., 304ISBN: 1-4051-1781-8.
- Morsli, B., Habi, M., Mazour, M., Hamoudi, A., & Halitim, A. (2012). Erosion et ruissellement en montagnes méditerranéennes d'Algérie du Nord: analyse des facteurs conditionnels sous pluies naturelles et artificielles. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 1, 33–40.
- Mostephaoui, T., Merdas, S., Sakaa, B., Hanafi, M. T., & Benazzouz, M. T. (2013). Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant d'el Hamel (Boussaâda), Algérie. *Journal Algérien des Régions Arides. N° Spécial*, 131–147.
- Naqvi, R. H., Mallick, J., Devi, L. M., & Siddiqui, M. A. (2013). Multi-temporal annual soil loss risk mapping employing Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model in Nun Nadi Watershed, Uttrakhand (India). *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 4045–4056. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0661-z>.
- Ouechtati, S., & Baldassare, G. (2011). Evaluation du transport solide et de l'envasement dans le bassin versant de Siliana (Tunisie): cas des barrages Siliana et Lakhmess. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70(4), 709–722. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0376-5>.
- Pan, J., & Wen, Y. (2014). Estimation of soil erosion using RUSLE in Caijiamiao watershed, China. *Natural Hazards*, 71, 2187–2205. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1006-2>.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., & Alewell, C. (2015a). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Zanden, A. H., Poesen, J., & Alewell, C. (2015b). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, 51, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012>.
- Parveen, R., & Kumar, U. (2012). Integrated approach of universal soil loss equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil loss risk assessment in Upper South Koel basin, Jharkhand. *Journal of Geographic Information System*, 4, 588–596. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46061>.
- Pimentel, D. (2006). Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8, 119–137. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8>.
- Pimentel, D. C., & Kounang, N. (1998). Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1, 104–123. <https://doi.org/10.1007/s100219900035>.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., & Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267, 1117–1123. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>.
- Pitaud, G. (1973) Etude hydrogéologique pour la mise en valeur de la vallée de l'oued Saïda (rapport de synthèse), division ressource hydrique.
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S., & Geetha, N. (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using revised universal soil loss equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003>.
- Remini, B., Hallouche, W., & Achour, B. (2009) L'Algérie : Plus d'un siècle d'envasement des barrages. Chapitre 8. Etat des ressources en eau du Maghreb, UNESCO, 123–142.
- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, 287–306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4).
- Renard, K. G., Foster, G. R., Wessies, G. A., & Porter, J. P. (1991). Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 30–33.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Washington, DC: USDA Agricultural Research Services, Agriculture handbook no, 703.
- Renard, K. G., Yoder, D., Lightle, D., & Dabney, S. (2011). *Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation, Handbook of erosion modelling* (pp. 137–167). Oxford: Blackwell Publ.
- Roche, M. (1963). *Hydrologie de Surface*. Paris: Gauthier-Villars Editeur 429 p.
- Roose, E., Chebbani, R., & Bourougaa, L. (2000). Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse*, 11(4), 317–326.
- Sadiki, A., Faleh A., Zêzere J.L., & Mastass, H. (2009). Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla Rif central Maroc. *Cahiers Géographiques*, n°6/2009, 59–70.
- Singh, G., Chandra, S., & Babu, R. (1981). Soil loss and prediction research in India, Central Soil and Water Conservation Research Training Institute, Bulletin N°T-12/D9.

- Stone, R. P., Hilborn, D. (2000). Équation universelle des pertes en Terre (USLE), Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales, Ontario. 08P.
- Stone, R. P., & Hilborn, D. (2012). *Universal soil loss equation (USLE) factsheet*. Ontario: Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
- Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., & Brou, Y. T. (2013). Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1542–1558. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.824088>.
- Tribak, A., El Garouani, A., & Abahrour, A. (2009). Evaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du Pré Rif oriental (Maroc): cas du sous-bassin de l'oued Tlata. *Sécheresse*, 20(4), 333–337.
- Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2–3), 132–153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>.
- van der Knijff, J. M., Jones R. J. A., & Montanarella, L. (1999). Soil erosion risk assessment in Italy, European Soil Bureau, Research Report EUR 19044 ENp, 58p.
- van der Knijff J. M., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (2000). Soil erosion risk assessment in Europe, European Soil Bureau Research Report EUR 19044 ENp, 34p.
- Verheijen, F. G. A., Jones, R. J. A., Rickson, R. J., & Smith, C. J. (2009). Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94, 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.02.003>.
- Walling, D. E. (1999). Linking land use, erosion and sediment yield. *Hydrobiologia*, 410, 223–240.
- Walling, D. E., & Webb, B. W. (1996). Erosion and sediment yield: a global overview. *IAHS Publ*, 236, 3–19.
- Wang, W. Z. (1995). Study on rainfall erosivity in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 9(4), 5–18.
- Wang, G., Wenté, S., Gertner, G. Z., & Anderson, A. (2002). Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat thematic mapper images. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 3649–3667. <https://doi.org/10.1080/01431160110114538>.
- Wilkinson, B. H., & McElroy, B. J. (2007). The impact of humans on continental erosion and sedimentation. *GSA Bulletin*, 119, 140–156. <https://doi.org/10.1130/B25899.1>.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses, USDA Agricultural Research Services Handbook 537*. Washington, DC: USDA 57p.
- Yildirim, U. (2011). Assessment of soil erosion at the Deđirmen Creek watershed area, Afyonkarahisar, Turkey, In: Ayvaz M (ed), Proceedings of the International Symposium on Environmental Protection and Planning: Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) Applications (ISEPP), 28–29 June 2011, Izmir, 73–80.
- Zhang, W., Wei, X., Zheng, J., Zhu, Y., & Zhang, Y. (2012). Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves. *Continental Shelf Research*, 38, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.02.017>.
- Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., & Gao, P. (2013). Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 24, 499–510. <https://doi.org/10.1002/ldr.2246>.
- Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., & Nieminen, J. (2008). Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75(3), 319–325. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.010>.