

N° d'ordre 3365

# THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable

Structure de Recherche : Laboratoire Géosciences Eau et Environnement (LGEE)

Discipline : Sciences de la terre

Spécialité : Modélisation Hydrologique- SIG et Télédétection

Présentée et soutenue le 24 /10/2020 par :

**Khadija DIANI**

**Impact des changements climatiques sur les ressources en eau, Modélisation des risques hydriques et simulation de l'érosion hydrique, Cas du bassin versant du Haut Ziz (Sud-est Marocain)**

## JURY

Lhoussaine MASMOUDI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Rabat	Président
Ilias KACIMI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Rabat	Directeur de thèse
Hassan TABYAOUI	PES, Faculté Polydisciplinaire de Taza, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah-Fès	Co-Directeur de thèse
Hicham ELBELRHITI	PH, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II- Rabat	Rapporteur/Examinateur
Mohamed HILALI	PH, Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia, Université Moulay Ismail-Meknès	Rapporteur/Examinateur
Larbi BOUDAD	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Rabat	Rapporteur/Examinateur
Nadia KASSOU	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Rabat	Examinateur
Mahmoud ZAMZAMI	Dr, Cadre administrateur, Direction de la recherche et de la planification de l'eau, Direction générale de l'eau-Rabat	Invité

Année Universitaire : 2020/2021

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

وَلْحَمْدٌ لِلّٰهِ رَبِّ الْعَالَمِیْنَ وَالصَّلَاةُ وَالسَّلَامُ عَلٰی اَشْرَفِ الْاَنْبِیَاءِ وَالرَّسُلِیْنَ سَیِّدِنَا

مُحَمَّدٍ صَلَّى اللّٰهُ عَلَیْهِ وَسَلَّمَ

یَقُولُ اللّٰهُ تَعَالٰی

(وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَآءِ كُلَّ شَیْءٍ حَیٍّ)

[الأنبیاء: 30]

یَقُولُ اللّٰهُ تَعَالٰی

وَاَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَآءِ مَآءً بِقَدْرِ فَاَسْكَنَاهُ فِی الْاَرْضِ

وَاِنَّا عَلٰی ذَهَابٍ بِهٖ لِقَادِرُونَ

[المؤمنون: 81]

## *Dédicaces*

Au nom d'ALLAH le Puissant le Miséricordieux, je dédie ce fruit de longues années  
d'assiduité acharnée

A la mémoire de mon cher père **Moulay El HASSAN DIANI**, en témoignage de ma fidèle  
affection et de ma reconnaissance pour son amour, que dieu le garde dans sa sainte  
miséricorde.

A la source de tendresse, à celle qui apporté la torche du sacrifice pour éclairer mon chemin,  
à celle qui a fortifié ma volonté, qui m'a consolidé, et qui lève ses mains à chaque prière  
pour me souhaiter la réussite et le bonheur ; A ma très chère et adorable mère **LALLA  
FATIMA HACHIMI ALAOU**I, que dieu la préserve pour son inépuisable amour et son soutien  
infini.

Les deux ont toujours été là pour moi, qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et  
de persévérance, qui ont toujours fait preuve d'énormes sacrifices, qui n'ont pas cessé de me  
conseiller, encourager et soutenir à tout moment.

Mes sincères expressions d'amour, de respect de confiance ; à mes chers frères « **Mustapha,  
Ismail et Mohammed** » et mes chères sœurs « **Fatima, Zineb, Nezha, Asma, Amina et Maria** ».

A mes adorables **neveux** et **nièces**.

C'est avec un grand plaisir et immense joie que je vous dédie ce modeste travail en  
témoignage de notre amour fraternel. De tout mon cœur, je vous souhaite une vie pleine de  
bonheur et de prospérité.

A toute ma chère famille **DIANI**

A toute ma chère famille **HACHIMI ALAOU**I

A mes chers **Professeurs**.

A mes chers **Amis**

A tous mes proches

A tous ceux qui me sont chers

A tous ceux qui croient à la réussite.

Je dédie ce travail...

## Avant-propos

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En premier lieu, je remercie **le Doyen** de la Faculté des Sciences de Rabat et le Directeur de l'école doctorale de m'avoir donné l'opportunité de poursuivre mes études à cette faculté.

Le présent travail a été réalisé dans le cadre du laboratoire Géosciences, Eau et Environnement (LGEE), sous la direction du **Professeur Ilias KACIMI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et la direction **Professeur Hassan TABYAOU**, Professeur à la faculté polydisciplinaire de Taza.

J'exprime ma profonde gratitude au directeur de ma thèse **Pr. Ilias KACIMI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et Chef de département des Sciences de la Terre, d'avoir accepté de diriger cette thèse premièrement et de m'avoir offert l'opportunité de vivre cette aventure, ainsi que pour les moments de discussions. Je le remercie également de m'avoir accueilli au sein du laboratoire « Géosciences, Eau et Environnement », m'intégrer à l'équipe de recherche LGEE. Je le remercie infiniment pour le temps qu'il a consacré à corriger et améliorer mon manuscrit de thèse et ainsi pour sa sympathie et ses qualités scientifiques et humaines. Merci Professeur pour votre temps, votre inspiration, votre écoute, votre disponibilité. Vous étiez toujours attentif et disponible malgré vos nombreuses charges académiques et professionnelles. Votre compétence, rigueur scientifique et clairvoyance m'ont beaucoup appris.

Je remercie particulièrement mon co-directeur de thèse **Pr. Hassan TABYAOU**, Professeur à la Faculté Polydisciplinaire de Taza et Chef de département Biologie-Chimie-Géologie. Professeur Tabyaoui était mon encadrant de projet de fin d'études de Master à la Faculté Sciences et Techniques de Fès. Il n'a jamais hésité à m'écouter, me conseiller et à me guider. Je le remercie pour la correction de mon manuscrit de thèse. Ses directives et ses conseils permanents m'ont permis de mener à bien ce travail de thèse de Doctorat.

Mes reconnaissances vont à **Pr. Lhoussaine MASMOUDI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat, de m'avoir fait l'honneur d'être Président du jury de cette thèse. Je lui exprime mes très vifs remerciements et mon profond respect.

Mes vifs remerciements s'adressent aussi à **Pr. Hicham EL-BELRHITI**, Professeur à l'institut agronomique et vétérinaire, Hassan II de Rabat et rapporteur et examinateur de cette thèse, d'avoir accepté d'examiner mon travail et de l'enrichir par ses conseils. Je le remercie vivement pour toutes les discussions, suggestions et ses précieux conseils d'encouragement,



pour le temps qu'il a consacré pour la lecture du manuscrit de thèse. Je le remercie de m'avoir fait l'honneur d'être membre de jury.

Notre signe de reconnaissance va également à **Pr. Mohamed HILALI**, Professeur à la Faculté des Sciences et Technique d'Errachidia et rapporteur et examinateur de mon travail de thèse, d'avoir accepté d'examiner mon travail et de l'enrichir par ses remarques pertinentes et d'avoir accepté de faire partie des jurys.

Mes vifs remerciements vont à **Pr. Larbi BOUDAD**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et rapporteur et examinateur de mon travail de thèse. Ses remarques et recommandations m'étaient très importantes.

Je remercie vivement **Pr. Nadia KASSOU**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour le temps qu'elle a consacré pour la lecture du document de thèse et d'avoir accepté de faire partie des membres de jury de cette thèse et d'examiner cette thèse.

Spécial remerciements et reconnaissance à **Dr. Mahmoud ZAMZAMI**, Cadre administratif au sein de la Direction de la recherche et de la planification de l'eau à la Direction Générale de l'Eau au Ministère d'énergie et mines, Département Eau et Environnement. Je le remercie pour son accueil à chaque fois que j'ai sollicité son aide, malgré ses charges professionnelles. Ses multiples encouragements, notamment au cours des jours stressants d'avant soutenance, sa sympathie, sa disponibilité, son aide, ses idées et conseils m'ont été très précieux. Je le remercie d'avoir accepté de faire partie des jurys

Je remercie particulièrement **Pr. Youssef HAHOU**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat, grand connaisseur de la géologie et géomorphologie du bassin de Ziz pour ses conseils scientifiques. Mes remerciements et ma profonde reconnaissance d'avoir voulu m'orienter dans ce sens.

Mes sincères remerciements s'adressent à **Mr. Ali TORABI**, Professeur et Ingénieur en Eau, Energie et environnement à l'Université de Oulu (Finlande), de m'avoir introduit dans le monde des publications et de m'avoir bien appris la manière de rédiger des articles scientifiques publiables. Il m'a beaucoup soutenu et encouragé lors des moments de difficultés durant cette aventure. Je lui exprime mes très vifs remerciements et mon profond respect. Grâce à ses précieux conseils et orientations, ce travail n'aurait pu aboutir sans ses précieux conseils et orientations.

Je présente mes vifs remerciements et gratitudes à **Mr. Gaiji Stéphane**. Ingénieur expérimenté en hydraulique fluviale et hydrologie appliquée, France., d'avoir enrichir ma thèse par ses remarques et recommandations extrêmement importantes, Pour sa sympathie, sa disponibilité, ses idées et conseils, ainsi que pour son aide précieuse.

Je remercie également **Pr. Souad HAJJAJI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat, responsable du Centre de Recherche Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable « CERNE2D » d'avoir accepté ma demande d'intégrer le centre de recherche et au **Pr. Lachen YOUSSEFI**, Secrétaire Général de la Faculté des Sciences Rabat pour ses conseils fructueux et ses aides.

Mes vifs remerciements vont à Mme **Khomsy Kenza** qui m'a beaucoup soutenu et encouragé lors des moments de difficultés durant cette aventure. Je lui exprime mes très vifs remerciements et mon profond respect.

Je n'oublierai pas l'aide précieuse de la Direction et le personnel de l'Agence du Bassin Hydraulique du **Guir-Ziz-Rhénis (Mr Mahboub, Mr.Slimani, Mme Hala...)**, du Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification (**HCEFLCD**) et de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tafilalet (**ORMVAT**), ainsi que toutes les informations qu'ils m'ont pu communiquer.

Mes remerciements s'adressent à tous **les enseignants** du Département de Géologie et au corps professoral du Laboratoire Géosciences Eau et Environnement (**LGEE**) de la Faculté des Sciences de Rabat.

Un chaleureux remerciement est adressé à notre chère Madame **BOUJRADA Rachida**, la Secrétaire du Département de Géologie et **mes amis** et **mes collègues** sans exception pour leur soutien et leur amitié.

Finalement, ma dernière pensée ira vers ma **chère mère et famille**, pour leur irremplaçable et inconditionnel soutien, leur patience et leur encouragement au cours de la réalisation de ce travail. Merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à  
l'élaboration de ce sujet de thèse.

## **Résumé**

Cette étude a pour objectif de quantifier l'impact possible des changements climatiques sur les ressources en eaux et sur l'agriculture. Le site pilote a été choisi premièrement pour la cartographie des linéaments qui sont très importants dans le domaine de l'hydrologie surtout pour la gestion des eaux souterraines et superficielles, l'orientation de la circulation de ces dernières par l'accélération de l'érosion et l'altération, la compréhension et la gestion des catastrophes naturelles et environnementales telles que les glissements des terrains, les séismes, la pollution et les inondations. Deuxièmement pour la modélisation hydraulique par HEC-RAS, afin de lutter contre des inondations probables et évaluer la qualité et la complémentarité des informations géographiques liées à l'aléa, aux enjeux et aux stratégies adoptées dans la prévention contre ce risque dans le bassin versant en général, et dans le centre de Zaouiat Sidi Hamza en particulier. Par la suite, proposer des solutions d'aménagement pour protéger les zones à risque d'inondation. Cette étude a aussi pour but de caractériser la sécheresse hydrique à travers le calcul de l'indice standardisé de la sécheresse (SPI) et finalement évaluer l'érosion hydrique et la sensibilité de ce bassin à l'érosion à l'aide de la méthode PAP / CAR.

Les résultats de cette étude montrent que les zones les plus vulnérables par l'inondation et l'érosion hydrique sont celles qui sont les plus arrosées du bassin et qui ont une pente très forte. L'augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse due à la diminution des précipitations et / ou une augmentation des taux d'évapotranspiration augmente le risque de mauvaises récoltes en raison de la sécheresse agricole. Cela nous permettra d'avoir une idée globale sur les scénarios climatiques passés et futurs. Ces résultats constituent un outil pour servir et orienter les décideurs pour élaborer des plans d'aménagement spécifiques à la zone étudiée afin de lutter contre ces risques et sensibiliser les populations concernées, afin d'améliorer l'évaluation et la prévision des ressources en eau et l'amélioration de la production agricole.

**Mots-clés** : Bassin versant du Haut Ziz, Inondation, Sècheresse, Erosion Hydrique, Télédétection, Modélisation, Changement climatique.

## ملخص

تهدف هذه الدراسة بالأساس إلى تحديد التأثير المحتمل للتغيرات المناخية على الموارد المائية وعلى الزراعة. حيث تم اختيار الموقع التجريبي أولاً من أجل رسم خرائط الأنماط التي تعتبر مهمة للغاية في مجال الهيدرولوجيا خاصة في إدارة المياه الجوفية والمياه السطحية، وتوجيه سريانها. ولفهم وإدارة الكوارث الطبيعية والبيئية مثل الانهيارات الأرضية، الزلازل، التلوث والفيضانات. ثانياً، من أجل النمذجة الهيدروليكية بواسطة HEC-RAS، قصد التصدي للفيضانات المحتملة وتقييم جودة وتكامل المعلومات الجغرافية المتعلقة بالخطر، وكذا الاستراتيجيات المعتمدة للوقاية منه داخل الحوض المائي العلوي من زيز بشكل عام، وفي وسط زاوية سيدي حمزة بشكل خاص. بعد ذلك، تم اقتراح حلول التهيئة لحماية المناطق المعرضة لخطر الفيضانات. تهدف هذه الدراسة أيضاً إلى تقييم الجفاف المائي من خلال حساب مؤشر الأمطار القياسي SPI. أخيراً، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم التعرية المائية وحساسية هذا الحوض المائي للتعرية باستخدام منهجية PAP/ CAR.

تظهر نتائج هذه الدراسة أن المناطق الأكثر عرضة للفيضانات وللتعرية المائية في الحوض، هي تلك التي تحتوي على أكبر كمية من الأمطار وتوجد بموضع شديد الانحدار. أما زيادة وتيرة حالات الجفاف فهي راجعة إلى انخفاض هطول الأمطار و / أو زيادة معدلات التبخر والتي تزيد من خطر تلف المحاصيل بسبب الجفاف الزراعي. مما يعطي فكرة عامة عن سيناريوهات المناخ في الماضي والمستقبل. تشكل هذه النتائج أداة لخدمة وتوجيه صناعات القرار لتطوير خطط التهيئة الخاصة بالمنطقة المدروسة، من أجل مكافحة هذه المخاطر ورفع مستوى الوعي بين السكان المعنيين، من أجل تحسين تقييم الموارد المائية والتنبؤ بها وتحسين الإنتاج الزراعي.

**الكلمات الرئيسية:** الحوض المائي العلوي من زيز، الفيضانات، الجفاف، التعرية المائية، الاستشعار عن بعد، النمذجة، للتغيرات المناخية.

### *Abstract*

This study aims to quantify the possible impact of climate change on water resources and agriculture. The pilot site was first chosen for the mapping of lineaments, which are very important in hydrology, especially for the management of groundwater and surface water, the orientation of the circulation of the latter by accelerating erosion and alteration, the understanding and management of natural and environmental disasters such as landslides, earthquakes, pollution and floods. Secondly, for hydraulic modeling by HEC-RAS, in order to fight against probable floods and assess the quality and complementarity of geographic information related to the hazard, the issues and the strategies adopted in the prevention against this. Risk in the watershed in general, and in the center of Zaouiat Sidi Hamza in particular. Then, propose development solutions to protect areas at risk of flooding. This study also aims to characterize water drought through the calculation of the standardized drought index (SPI) and finally to assess water erosion and the sensitivity of this basin to erosion using the method PAP / CAR.

The results of this study show that the most vulnerable area is to flooding and water erosion are those with the most water in the basin and which have a very steep slope. Increased frequency of drought episodes due to decreased rainfall and /or increased evapotranspiration rates increase the risk of crop failure due to agricultural drought. This will allow us to have a global idea on past and future climate scenarios. These results constitute a tool to serve and guide decision-makers to develop development plans specific to the area studied in order to fight against these risks and raise awareness among the populations concerned, in order to improve the assessment and forecasting of water resources and improving agricultural production.

---

**Key Words:** High Ziz watershed, Flood, Drought, Water Erosion, Modelling, Remote sensing, Climate change.

# Sommaire

Dédicaces .....	i
Avant-propos.....	ii
Résumé .....	v
ملخص.....	vi
Abstract.....	vii
Liste des figures .....	4
Liste des tableaux .....	7
Liste des abréviations et acronymes : .....	8
Introduction Générale.....	9
Chapitre 1 : Cadre géomorphologique du bassin versant du Haut Ziz.....	12
I. Introduction.....	13
II. Cadre géologique et structurale .....	13
III. Cadre morphologique .....	17
IV. Cadre Hydrologique .....	22
V. Cadre hydrogéologique .....	23
VI. Cadre Agro-Ecologie .....	25
VII. Cadre climatique .....	27
VIII. Cadre socio-économique.....	41
Chapitre 2 : Analyse par Télédétection de l'impact de la fracturation sur l'architecture du réseau hydrographique dans le bassin versant du Haut Ziz .....	42
I. Introduction.....	43
II. Exploitation des images de télédétection .....	43
III. Extraction des linéaments.....	45
1. Rehaussement des linéaments par filtrage.....	46
2. Analyse des directions préférentielles et validation des linéaments :.....	47
3. Analyse et interprétation des Linéaments.....	50
IV. Conclusion :.....	53
Chapitre 3 : Modélisation hydraulique et simulation des Crues de l'oued Zaouiate Sidi Hamza	54
I. Généralités .....	55
II. Etude hydrologique .....	55

III. Modélisation Hydraulique de l'Oued Sidi Hamza sur le tronçon passant par le centre de Zaouiate Sidi Hamza .....	70
IV. Simulation des crues pour les différentes périodes de retour et cartes des zones inondables .....	77
V. Résultats de la simulation de la crue .....	78
VI. Gestion des inondations .....	92
<b>Chapitre 4 : Caractérisation de la sécheresse hydrologique à l'aide de l'indice SPI dans le bassin versant du Haut Ziz.....</b>	<b>97</b>
I. La sécheresse .....	98
1. Rappels.....	98
2. Les différents types de sécheresse.....	98
3. Les différentes causes de sécheresse .....	99
4. Les conséquences de la sécheresse .....	99
II. Les indices de sécheresse.....	100
III. Indice normalisé (Standardisé) des précipitations (SPI) .....	101
IV. Test de tendance non paramétrique (Mann-Kendall) .....	102
V. Analyse du SPI et des caractéristiques de la sécheresse .....	103
VI. Analyses de tendance .....	105
VII. Conclusion : .....	109
<b>Chapitre 5 : Quantification de l'érosion hydrique par application des SIG et des directives PAP/CAR Cas du bassin versant du Haut Ziz.....</b>	<b>111</b>
I. Introduction.....	112
II. Généralités .....	112
1. L'érosion hydrique : .....	113
2. Processus de l'érosion hydrique des sols :.....	113
III. Modélisation de l'érosion hydrique par PAP/CAR .....	117
1. Présentation du modèle PAP/CAR : .....	118
2. Application des directives PAP/CAR au niveau du bassin du Haut Ziz : .....	118
3. Résultats de l'Approche prédictive .....	120
4. Résultats de l'approche descriptive : .....	128
5. Approche de l'intégration.....	129



<b>IV. Conclusion :</b> .....	<b>132</b>
<b>Conclusion Générale et Perspectives :</b> .....	<b>134</b>
<b>Références Bibliographiques</b> .....	<b>139</b>
<b>Références</b> .....	<b>140</b>

# Liste des figures

FIGURE 1: CARTE DE LA SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ .....	13
FIGURE 2: CARTE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ EXTRAITE DE LA CARTE GEOLOGIQUE DE MIDELT AU 1/200000 ET DE LA CARTE GEOLOGIQUE DE RICH ET BOUDNIB AU 1/200000 .....	14
FIG. 3: COLONNE LITHOSTRATIGRAPHIQUE DU HAUT ZIZ (SADKI, 1989 ; MEHDI, 2003).....	15
FIGURE 4 : HISTOGRAMME E HYPOMETRIQUE DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ.....	18
FIGURE 5 : REPARTITION DE LA SURFACE TOTALE PAR TRANCHES D'ALTITUDES .....	19
FIGURE 6: CARTE DES PENTES DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ.....	22
FIGURE 7 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ .....	23
FIGURE 8 : CARTE D'INVENTAIRE DES POINTS D'EAU SOUTERRAINE. ....	24
FIGURE 9 : SITUATION DES DIFFERENTES SOURCES.....	25
FIGURE 10 : CARTE MONTRANT LES DIFFERENTS TYPES DE SOLS EXISTANT DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ (ORMVAT, 2011) .....	26
FIGURE 11: CARTE D'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ (ORMVAT, 2011).....	27
FIGURE 12: SITUATION GEOGRAPHIQUE DES STATIONS METEOROLOGIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ .....	28
FIGURE 13: HOMOGENEITE DES SERIES DE MESURES DE : (A) STATION ZAOUATE SIDI HAMZA, (B) STATION M'ZIZEL, (C) STATION FOU M TILLICHT ET (D) STATION DE FOU M ZAABEL. ....	30
FIGURE 14: PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES DE LA STATION FOU M ZAABEL.....	31
FIGURE 15: PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES DE LA STATION FOU M ZAABEL .....	31
FIGURE 16 : PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES DE LA STATION FOU M TILLICHT.....	32
FIGURE 17 : PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES DE LA STATION FOU M TILLICHT.....	32
FIGURE 18 : PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES DE LA STATION M'ZIZEL.....	33
FIGURE 19 : PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES DE LA STATION M'ZIZEL.....	33
FIGURE 20 : PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES DE LA STATION ZAOUATE SIDI HAMZA.....	34
FIGURE 21 : PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES DE LA STATION ZAOUATE SIDI HAMZA.....	34
FIGURE 22 : TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES DE LA STATION FOU M ZAABEL (1983-2013).....	35
FIGURE 23 : TEMPERATURE MOYENNE MENSUELLE DE LA STATION FOU M ZAABEL (1983-2013) .....	36
FIGURE 24 : DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE DE GAUSSEN DE LA STATION FOU M ZAABEL.....	36
FIGURE 25 : VARIATION DE L'ETP EN FONCTION DE LA T° ET P (FOU M ZAABEL) .....	37
FIGURE 26 :VARIATION MENSUELLE DES DIFFERENTS PARAMETRES DU BILAN HYDRIQUE (STATION FOU M ZAABEL).....	40
FIGURE 27 : RESULTATS APRES LA CORRECTION RADIOMETRIQUE ET LA REFLECTANCE ATMOSPHERIQUE DE L'IMAGE LANDSAT 8 OLI CENTREE SUR LA REGION D'ERRICH.....	44
FIGURE 28: (A) COMPOSITIONS COLOREES A PARTIR DES TROIS PREMIERES BANDES DE L'ACP : CP1, CP2, ET CP3 (B) LA COMPOSITION FAUSSE COLOREE DE L'IMAGE LANDSAT 8 OLI.....	45
FIGURE 29: RESULTATS DE L'EXTRACTION DES LINEAMENTS A PARTIR D'IMAGE LANDSAT 8 OLI .....	46
FIGURE 30: CARTE DE SYNTHESE DES LINEAMENTS AU NIVEAU DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ .....	48
FIGURE 31: (A) FLECHES DES LONGUEURS CUMULEES DES LINEAMENTS. (B)LES ROSACES DIRECTIONNELLES DES LONGUEURS CUMULEES DES LINEAMENTS.....	49
FIGURE 32: CARTE DE LA DENSITE D'ENTRECROISEMENTS DES LINEAMENTS DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ .....	50
FIGURE 33: CONFRONTATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE AVEC LES LINEAMENTS DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ. ....	52

FIGURE 34 : AJUSTEMENT GRAPHIQUE DE LA SERIE DES DEBITS MAXIMUMS ANNUELS A LA LOI DE GUMBEL POUR LA STATION DE ZAOUATE SIDI HAMZA .....	60
FIGURE 35 : L'HYDROGRAMME ET VOLUME DES CRUES.....	69
FIGURE 36 : LOGICIEL HEC-RAS DE HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER.....	71
FIGURE 37 : PROFIL EN TRAVERS DE L'OUED ZAOUATE SIDI HAMZA.....	75
FIGURE 38: 2D FLOW AREA EDITOR DE SOUS BASSIN VERSANT DE L'OUED ZAOUIA SIDI HAMZA.....	76
FIGURE 39 : LES CONDITIONS AUX LIMITES DE L'OUED ZAOUIA SIDI HAMZA.....	77
FIGURE 40 : SIMULATION DES CRUES POUR L'OUED ZAOUIA SIDI HAMZA.....	78
FIGURE 41 :(A, B ET C) : RESULTATS RECAPITULANT QUELQUES FACTEURS CARACTERISANT LES REGIMES D'ECOULEMENT .....	79
FIGURE 42 : VUE EN PROFIL DE TRONÇON D'ETUDE AVEC LE NIVEAU ET LA SURFACE D'EAU DE L'OUED ET LE NIVEAU D'EAU DE CHAQUE PERIODE DE RETOUR.....	80
FIGURE 43 : LA VARIATION DE LA VITESSE D'ECOULEMENT D'EAU POUR CHAQUE PERIODE DE RETOUR .....	81
FIGURE 44: DEFINITION DE RISQUES SELON (SOMOT, 2005) .....	82
FIGURE 45 : DEFINITION DU RISQUE ET CARACTERISTIQUES DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE. ....	82
FIGURE 46 : L'ALEA ET LA VULNERABILITE (OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU).....	83
FIGURE 47 : ALEA (GONDRAND, 1995) .....	84
FIGURE 48 : CENTRE ETUDIE DE ZAOUIA SIDI HAMZA.....	85
FIGURE 49 : RESULTATS DE LA SIMULATION DE LA CRUE DECENNALE (PROFONDEUR(A), HAUTEUR D'EAU (B) ET VITESSE(C) D'EAU) .....	86
FIGURE 50 : RESULTATS DE LA SIMULATION DE LA CRUE VINGTENNALE (PROFONDEUR(A), HAUTEUR D'EAU (B) ET VITESSE(C))... ..	87
FIGURE 51: VUE SCHEMATIQUE DES METHODOLOGIES D'EVALUATION DES DIFFERENTS ASPECTS DE LA VULNERABILITE.....	88
FIGURE 52 : HAUTEUR D'EAU EN Q(T=5 ANS) POUR OUED ZAOUATE SIDI HAMZA .....	89
FIGURE 53 : LA VITESSE MAXIMALE D'ECOULEMENT LORS DE LA CRUE QUINQUENNALE D'OUED ZAOUATE SIDI HAMZA.....	89
FIGURE 54 : HAUTEUR D'EAU EN Q(T=10ANS) POUR OUED ZAOUATE SIDI HAMZA.....	89
FIGURE 55 : LA VITESSE MAXIMALE D'ECOULEMENT LORS DE LA CRUE DECENNALE D'OUED ZAOUATE SIDI HAMZA.....	89
FIGURE 56 : HAUTEUR D'EAU EN Q(T=20ANS) POUR OUED ZAOUATE SIDI HAMZA.....	90
FIGURE 57 : LA VITESSE MAXIMALE D'ECOULEMENT LORS DE LA CRUE VINGTENNALE D'OUED ZAOUATE SIDI HAMZA.....	90
FIGURE 58 : HAUTEUR D'EAU EN Q(T=50ANS) POUR OUED ZAOUATE SIDI HAMZA.....	90
FIGURE 59 : LA VITESSE MAXIMALE D'ECOULEMENT LORS DE LA CRUE DE (T=50 ANS) DE L'OUED ZAOUATE SIDI HAMZA .....	90
FIGURE 60 : HAUTEUR D'EAU EN Q(T=100 ANS) POUR OUED ZAOUATE SIDI HAMZA .....	91
FIGURE 61 : LA VITESSE MAXIMALE D'ECOULEMENT LORS DE LA CRUE DE (T=100 ANS) D'OUED ZAOUATE SIDI HAMZA.....	91
FIGURE 62 : HAUTEUR D'EAU EN Q(T=500 ANS) POUR OUED ZAOUATE SIDI HAMZA .....	91
FIGURE 63 : LA VITESSE MAXIMALE D'ECOULEMENT LORS DE LA CRUE DE (T=500 ANS) D'OUED ZAOUATE SIDI HAMZA.....	91
FIGURE 64 : LES DEUX PHASES DE LA NAO (CRISTOPHE, 2004).....	101
FIGURE 65 : VARIATION DE L'SPI EN DIFFERENTES PERIODES POUR A) LA STATION ZAOUATE SIDI HAMZA ET B) LA STATION M'ZIZEL, C) LA STATION FOUM ZAABEL ET D) LA STATION FOUM TILLICHT. 1, 2, 3 ET 4 INDIQUENT RESPECTIVEMENT LES DIFFERENTES PERIODES D'ANALYSE DE 12, 36, 60 ET 120 MOIS.....	105
FIGURE 66 : TENDANCE ANNUELLE DES PRECIPITATIONS EN A) ZAOUATE SIDI HAMZA, B) M'ZIZEL, C) FORUM TILLICH, ET D) STATIONS DE FOUM ZAABEL, LE FOND VERT CLAIR ET JAUNE INDIQUANT RESPECTIVEMENT UNE TENDANCE POSITIVE ET NEGATIVE.....	106

<b>FIGURE 67 : TENDANCE MENSUELLE DES PRECIPITATIONS DANS A) ZAQUIATE SIDI HAMZA, B) M'ZIZEL, C) FOUM TILLICHT, ET D) LES STATIONS FOUM ZAABEL, UN FOND VERT CLAIR ET JAUNE SUR LA FIGURE INDIQUENT UNE TENDANCE POSITIVE ET NEGATIVE. TENDANCE, SL : NIVEAU SIGNIFICATIF.....</b>	<b>107</b>
<b>FIGURE 68 : TENDANCE TRIMESTRIELLE DES PRECIPITATIONS DANS A) ZAQUIATE SIDI HAMZA, B) M'ZIZEL, C) FOUM TILLICHT, ET D) LES STATIONS FOUM ZAABEL, UN FOND VERT CLAIR ET JAUNE SUR LA FIGURE INDIQUENT UNE TENDANCE POSITIVE ET NEGATIVE. TENDANCE, SL : NIVEAU SIGNIFICATIF .....</b>	<b>108</b>
<b>FIGURE 69 : ANALYSE DES TENDANCES SEMESTRIELLES DES PRECIPITATIONS AU NIVEAU DES STATIONS DE A) ZAQUIATE SIDI HAMZA, B) M'ZIZEL, C) FOUM TILLICHT ET D) FOUM ZAABEL. TENDANCE MENSUELLE DES PRECIPITATIONS DANS A) ZAQUIATE SIDI HAMZA, B) M'ZIZEL, C) FOUM TILLICHT ET D) .....</b>	<b>109</b>
<b>FIGURE 70: LES PRINCIPAUX FACTEURS RESPONSABLES DE L'ÉROSION.....</b>	<b>113</b>
<b>FIGURE 71 : EFFET DES GOUTTES DE PLUIES (EFFET SPLASH) (TOURE, 2001) .....</b>	<b>114</b>
<b>FIGURE 72: COURBE DE BATTANCE.....</b>	<b>115</b>
<b>FIGURE 73: ÉROSION EN NAPPE .....</b>	<b>115</b>
<b>FIGURE 74: GLISSEMENT ROTATIONNEL .....</b>	<b>117</b>
<b>FIGURE 75: ÉROSION PAR LES COURS D'EAU .....</b>	<b>117</b>
<b>FIGURE 76: METHODOLOGIE ADOPTEE POUR L'ESTIMATION DE L'ÉROSION POTENTIELLE PAR LA METHODE PAP/CAR (OSMANA, 2017) .....</b>	<b>119</b>
<b>FIGURE 77: CARTE DE PENTE DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ .....</b>	<b>120</b>
<b>FIGURE 78 : CARTE DE RESISTANCE DU LITHOFACIES SELON LE TYPE DU SOL OCCUPE PAR LE BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ .....</b>	<b>121</b>
<b>FIGURE 79 : CARTE RESULTANTE D'ERODIBILTE .....</b>	<b>122</b>
<b>FIGURE 80 : CARTE DE RESISTANCE DES MATERIAUX A L'ÉROSION DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ .....</b>	<b>124</b>
<b>FIGURE 81 : CARTE DE LA DENSITE VEGETALE DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ .....</b>	<b>125</b>
<b>FIGURE 82 : CARTE DEGRE DE PROTECTION DES SOLS SELON PAP/CAR .....</b>	<b>126</b>
<b>FIGURE 83 : CARTE DES ETATS EROSIFS DU BASSIN VERSANT DE HAUT ZIZ.....</b>	<b>127</b>
<b>FIGURE 84 : CARTE DE FORME D'ÉROSION.....</b>	<b>128</b>
<b>FIGURE 85 : HISTOGRAMME DE FREQUENCE DES FORMES D'ÉROSION EN FONCTION DE POURCENTAGE DES DIFFERENTES FORMES</b>	<b>130</b>
<b>FIGURE 86 : CARTE DE CONSOLIDATION PAP/CAR .....</b>	<b>131</b>
<b>FIGURE 87: LA CARTE DE LA TENDANCE A L'ÉROSION HYDRIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ.....</b>	<b>131</b>

# Liste des tableaux

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DES SOUS-BASSINS VERSANTS DU HAUT ZIZ .....	17
TABLEAU 2 : LA REPARTITION DES COURBES D'ALTITUDES .....	18
TABLEAU 3 : CRITERES DE CLASSIFICATION DES SOUS BASSINS PAR TYPE .....	20
TABLEAU 4 : INDICE DE COMPACITE DES BASSINS DE LA ZONE D'ETUDE.....	20
TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS DE LA ZONE D'ETUDE .....	21
TABLEAU 6 : INDICES D'ALLONGEMENT DES SOUS-BASSINS VERSANTS DE LA ZONE D'ETUDE .....	21
TABLEAU 7: LES CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES ,METEOROLOGIQUES ET CLIMATIQUES DE STATIONS.....	28
TABLEAU 8 : VARIATION DE L'ETP EN FONCTION DE LA T° ET P (FOUM ZAABEL).....	38
TABLEAU 9 : CALCUL DE L'ETR PAR LA METHODE DE THORNTHWAITE (1961-2009).....	39
TABLEAU 10: LES RESULTATS DE L'ETR ANNUELLE (STATION FOUM ZAABEL) .....	40
TABLEAU 11 : LA POPULATION DES COMMUNES DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ (D'APRES (HCP, 1994) ET (HCP, 2004) .....	41
TABLEAU 12: STATIONS PLUVIOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ (ABH-GZR, 2011).....	56
TABLEAU 13: DONNEES DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES MAXIMUM (MM) DES QUATRE STATIONS DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ DEPUIS 1970 A 2018 D'APRES L'ABH-GZR.....	57
TABLEAU 14 : CARACTERISTIQUES STATISTIQUES DE RESULTATS DES AJUSTEMENTS POUR LA LOI DE GUMBEL.....	59
TABLEAU 15 : RESULTAT DE L'AJUSTEMENT A LA LOI DE GUMBEL (MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE) POUR STATION ZAOUIATE SIDI HAMZA .....	59
TABLEAU 16: CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT DU HAUT ZIZ.....	61
TABLEAU 17: RECAPITULATIF DES TEMPS DE CONCENTRATION CALCULES POUR LES SOUS BASSINS VERSANTS DE LA ZONE D'ETUDE. 63	
TABLEAU 18 : LES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES SOUS BASSINS.....	67
TABLEAU 19 : DEBITS DE CRUE RETENUS POUR ZAOUIATE SIDI HAMZA.....	68
TABLEAU 20 : LES VALEURS DU COEFFICIENT DE MANNING POUR DIFFERENTS TYPES DE TERRAINS (ABH-GZR, 2011) .....	73
TABLEAU 21 : CLASSIFICATION DE SEVERITE DE SECHERESSE SELON (MCKEE, 1993). .....	102
TABLEAU 22 : PERIODES LES PLUS HUMIDES ET LES PLUS SECHES BASEES SUR LA VALEUR DU SPI DANS DIFFERENTES STATIONS....	104
TABLEAU 23 : LES CLASSES DE RISQUE LIE A LA VALEUR DE PENTE.....	120
TABLEAU 24 : CLASSES DES LITHOFACIES ET LEURS DEGRES DE RESISTANCE.....	121
TABLEAU 25 : MATRICE DES PENTES VS LITHOFACIES .....	123
TABLEAU 26 : CLASSIFICATION DE LA CARTE D'OCCUPATION DES SOLS .....	123
TABLEAU 27 : MATRICE D'OCCUPATION DU SOL VS COUVERT VEGETAL .....	125
TABLEAU 28 : CLASSES DU DEGRE DE PROTECTION DES SOLS SELON PAP/CAR.....	126
TABLEAU 29: MATRICE DES ETATS EROSIFS DES SOLS .....	127
TABLEAU 30 : SUPERFICIES RELATIVES DES FORMES D'EROSION.....	129

## Liste des abréviations et acronymes :

**ABHGZR** : Agence du Bassin Hydraulique de Guir-Ziz-Rhéis

**ETP** : Evapotranspiration réelle

**ETR** : Evapotranspiration Potentielle

**DRPE** : Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau

**FAO** : Food and Agriculture Organization

**G.I.E.C.** : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

**HCP** : Haut-Commissariat au Plan

**HCEFLCD** : Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification

**HEC-RAS**: Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain

**NDVI** : Indice de Végétation par Différence Normalisée

**N°IRE** : Numéro de l'Inventaire des Ressources en Eau ;

**NOAA**: National Oceanic and Atmospheric Administration

**ORMVAT** : Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tafilalet

**PAP /CAR** : Programme d'Actions Prioritaires du Centre d'activités Régionales

**PDAIRE** : Plan Directeur d'Aménagement intégré des Ressources en Eau

**RGPH** : Recensement Général de la Population et de l'Habitat ;

**PNE** : Plan National de l'Eau

**RFU** : Réserve facilement utilisable

**SIG** : Système d'Information Géographique

**SPI** : Indice de Précipitations standardisé

**Tc** : temps de concentration.

**TIN** : triangulated Irregular Networks.

**RCP** : Representative Concentration Pathways

**PAM** : Plan d'action pour le méditerrané

**PNUD** : Programme des nations unis pour le développement.

**PDSI** : Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer.

# **Introduction Générale**



## Introduction Générale

L'eau est un élément rare et un facteur essentiel qui conditionne fortement l'avenir de notre pays, elle prend une importance croissante dans notre vie. Apprendre à la gérer, c'est apprendre à maîtriser sa rareté mais aussi sur excès, à assurer l'alimentation en eau potable, agricole et industrielle, à l'utiliser pour créer de l'énergie et aussi à maintenir la qualité de notre environnement. Cette gestion exige l'élaboration des méthodes adéquates et l'usage d'outils afin de réduire les risques d'inondation ou d'étiage.

Depuis toujours, l'Homme a préféré s'installer dans des régions à relief plat et aux environs des points d'eau lui assurant la disponibilité en grandes quantités de cette ressource qui lui permet de réaliser ses activités habituelles (agriculture, industrie...). Alors, des cités entières se sont développées au fur et à mesure à proximité des cours d'eau qui, en recevant des débits importants, font apparaître des difficultés d'évacuation, et les eaux envahissent momentanément ces zones causantes ainsi, des dégâts considérables à l'Homme et à ses biens. Les crues des rivières sont des phénomènes naturels que l'Homme ne peut contrôler. Partout dans le monde, la montée des eaux des rivières a lieu de façon récurrente avec une ampleur plus ou moins importante.

A l'instar des pays méditerranéens, et indépendamment de tout changement climatique, le Maroc pays à climat essentiellement semi-aride à aride dans la majeure partie de son territoire, est confronté au problème du développement et de la gestion durable de ses ressources en eau. En raison de sa situation en zone subtropicale semi-aride, la pluviométrie est le paramètre climatique dominant, étant d'une part, généralement insuffisante, et, d'autre part, beaucoup plus variable que la température. Généralement, le changement climatique entraînera le déplacement des zones climatiques et la modification des régimes pluviométriques. Par ailleurs, durant ces dernières décennies, le prolongement des épisodes secs est devenu une réalité dans cette partie du globe, notamment le Maroc. C'est un pays en stress hydrique qui devrait connaître, au-delà de 2025, une situation de pénurie d'eau et. Le climat de la région a connu un réchauffement significatif depuis les années soixante-dix. Ce réchauffement s'est accompagné particulièrement au Maroc d'une diminution nette des précipitations (jusqu'à 1995). Pendant ces décennies, le bilan en eau de la région était très déficitaire, et la problématique de l'eau s'est posée avec acuité. Et puisque c'est un pays très fragile au regard des effets du changement climatique, des estimations nationales supposent que d'ici 2099, les températures moyennes annuelles au Maroc accroîtront de deux à trois degrés, voire de quatre à cinq degrés à l'est et au sud-est du pays (GIEC, 2007). De plus, les précipitations beaucoup plus irrégulières baisseraient en moyenne de 20 % (dans l'Atlas et dans le nord-est même de 50 %). Etant donné que le Maroc est un pays essentiellement agricole, les effets du changement climatique entraînent des conséquences immédiates pour la population. Selon des statistiques officielles, 40 % des marocains travaillent dans l'agriculture. Malgré ces contraintes qu'il connaît, pour mettre en œuvre un programme national efficace de gestion des ressources en eau, le Maroc a consenti et continue à consentir un effort considérable pour un approvisionnement durable de l'eau.

Le potentiel hydraulique limité nécessite une maîtrise des phénomènes hydrologiques extrêmes (crues, sécheresses et érosion hydrique) par l'établissement des plans directeurs de développement des ressources en eau à l'échelle des bassins versants, d'adopter une stratégie de gestion de la demande en eau afin de satisfaire les besoins en eau et d'assurer les conditions d'une utilisation bénéfique de ces ressources hydriques, d'améliorer les performances des infrastructures (barrages, ouvrages de transfert d'eau, forages), pour faire face à ces contraintes.

Plusieurs régions du Maroc ont été confrontées à des séries de périodes sèches depuis le début des années 1980 et qui ont eu des conséquences non négligeables sur l'économie du pays. Différentes

études de projections climatiques futures, faisant appel à des modèles climatiques, préconisent que le Maroc est l'un des pays les plus susceptibles à être menacé par le changement climatique et enregistrera une réduction des cumuls pluviométriques d'ici la fin du siècle courant (GIEC, 2007). En effet, le climat du Maroc s'est réchauffé de façon significative au cours de la période 1961-2008. Une tendance générale vers l'assèchement est constatée. La plupart des tendances annuelles sont comprises entre 0.2°C et 0.4 °C par décennie (Driouech, 2010) et la diminution des précipitations est quasi-générale sur l'ensemble du territoire marocain.

Plusieurs régions ont aussi connu des phénomènes hydrologiques extrêmes, représentés par des crues et des inondations répétitives : Séfrou en 1950, la vallée de Moulouya en 1963, la vallée du Haut Atlas de Marrakech en 1995, la région d'El Hajeb en 1997, la région de Settat et Mohammedia en 2002, Tan Tan, Nador, Al Hoceima et Khénifra en 2003, Tinghir et Merzouga en 2006 et la vallée de Ziz en 1965. La région qui fait l'objet de cette étude est connue aussi par des faibles précipitations aléatoires et des séries de sécheresses très longues. La conséquence immédiate de ces conditions est un faible développement sur le plan social, industriel et agricole.

Le bassin du Haut Ziz au Sud-Est du Maroc, est parmi les bassins au Maroc menacé par le phénomène d'inondation.

Notre étude a pour objectif fondamental de quantifier l'impact possible des changements climatiques sur les ressources en eaux et ce à travers l'analyse détaillée des facteurs de prédisposition : données climatiques, morphologiques, lithologiques et structurales, etc., la modélisation hydraulique et la simulation de crues, la caractérisation de la sécheresse climatique et hydrologique et la cartographie et la quantification de l'érosion Hydrique. Cette étude se présente en cinq chapitres :

- ❖ Le chapitre 1 présente le cadre géomorphologique du bassin versant du Haut Ziz, ses caractéristiques géologiques et structurales, son cadre hydrologique et hydrogéologique, les paramètres morphologiques, climatiques et socio-économiques ;
- ❖ Le chapitre 2 est une analyse par télédétection spatiale de l'impact de la fracturation sur l'architecture du réseau hydrographique dans le bassin versant du Haut Ziz. Il apporte des précisions sur le réseau de linéaments à partir de techniques d'analyse des images Landsat ;
- ❖ Le chapitre 3 s'intéresse à la modélisation hydraulique et la simulation des crues de l'oued Zaouiate Sidi Hamza. Il détaille les étapes de la modélisation hydraulique, la simulation des crues et se termine par une cartographie de l'aléa d'inondation dans le sous bassin de Zaouiate Sidi Hamza ;
- ❖ Le chapitre 4 est une caractérisation de la sécheresse hydrologique à l'aide de l'indice normalisé de la sécheresse dans le bassin du Haut Ziz en général et le sous bassin de Zaouiate Sidi Hamza en particulier. Il définit les types d'indices de sécheresse, les tests de tendance non paramétriques et analyse la tendance annuelle pour la période de 1970 à 2018.
- ❖ Le chapitre 5 traite le problème d'érosion hydrique dans le bassin du Haut Ziz, et la sensibilité de ce bassin à l'érosion à l'aide de la méthode PAP / CAR. Il commence par un aperçu sur l'érosion hydrique et les processus d'érosion des sols et passe à la modélisation de l'érosion hydrique par le modèle PAP/CAR. Différentes cartes sont réalisées et la carte de synthèse par approche descriptive et d'intégration détaille les taux d'érosion hydrique dans le bassin du Haut Ziz.

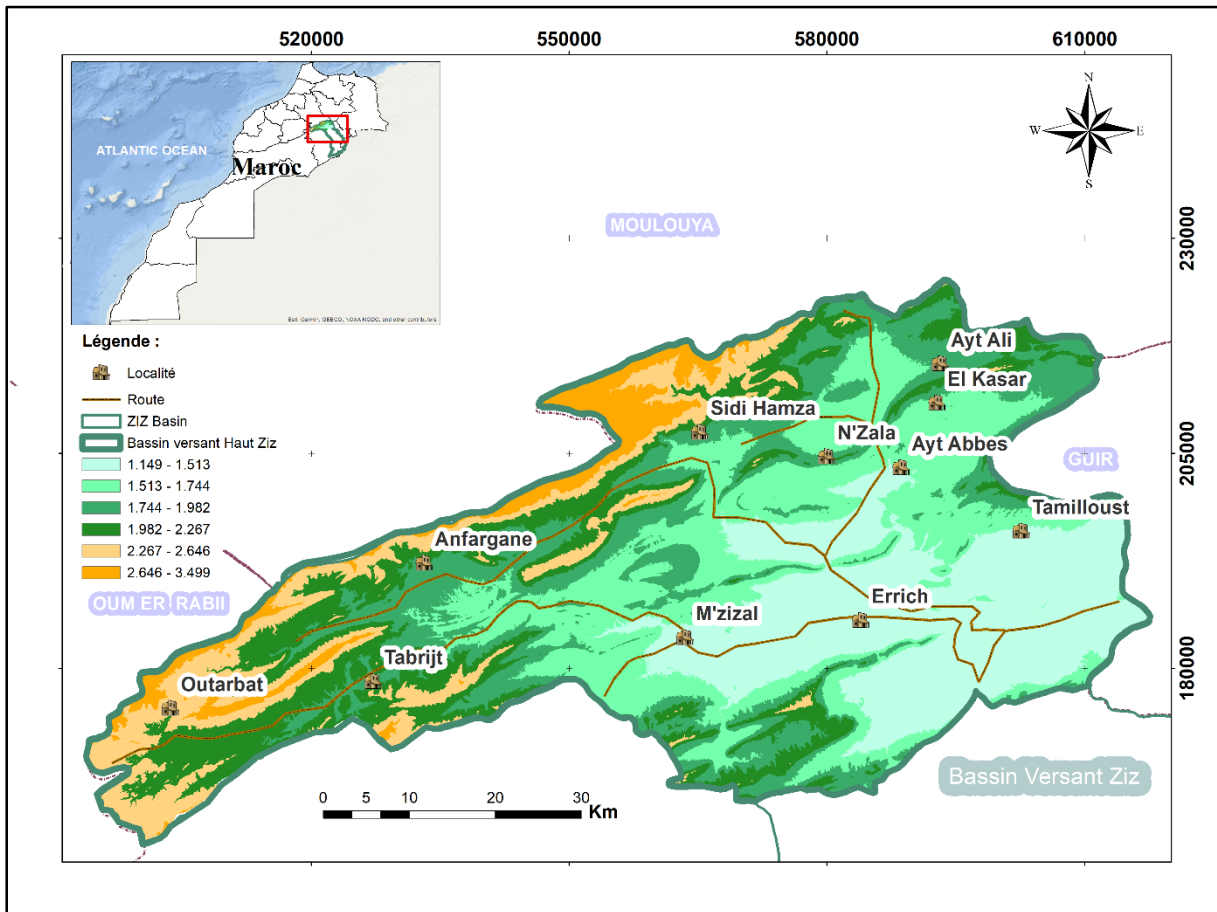
**Chapitre 1**  
**Cadre géomorphologique du bassin versant**  
**du Haut Ziz**

## I. Introduction

Géographiquement, le secteur d'étude s'étend de l'extrême Est du Haut Atlas central jusqu'à la partie Ouest du Haut Atlas Oriental. Il est limité au Nord par la Haute Moulouya (Meseta orientale), au Sud par l'Anti-Atlas oriental. (Fig.1). Le bassin versant est situé entre les coordonnées Lambert suivantes : ( $X_1 = 610\ 000\ m$ ,  $Y_1 = 240\ 000\ m$ ) et ( $X_2 = 510\ 000\ m$ ,  $Y_2 = 130\ 000\ m$ ).

Le bassin versant du Haut Ziz fait partie de la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique de Guir-Ziz-Rhéris (ABHGZR) ; Occupe la partie haute du grand bassin versant Ziz. (Fig.1). Sur le plan administratif, la zone d'étude est située sur le territoire de deux provinces à savoir : Er-Rachidia (5 %), et Midelt (95%) ; 2 cercles (Imilchel et Errich) avec 7 communes rurales. (Fig.1)

Dans ce chapitre, on rappellera brièvement les définitions des principaux caractères physiques du bassin qu'ils sont nécessaires et vraisemblablement suffisants à connaître, ainsi à définir les caractéristiques géographiques, climatiques et géologiques de la zone d'étude.



## II. Cadre géologique et structurale

Le bassin versant du Haut Ziz se situe au sud dans le Haut Atlas central. Cette chaîne représente une morphologie structurale très remarquable (Fig.2) de direction majeure WSW-ENE. Sa topographie est sous forme de zones tabulaires à environ 2000 m d'altitude, séparées par des crêtes culminant à plus de 3500 m comme le cas de Jebel Mgoun (4071m) et Azouki (3685m). Il est prédominé par des formations souvent plissées du Mésozoïque, associées avec des massifs de roches basiques notamment dans la région d'Imilchel. (ONHYM, 2002).

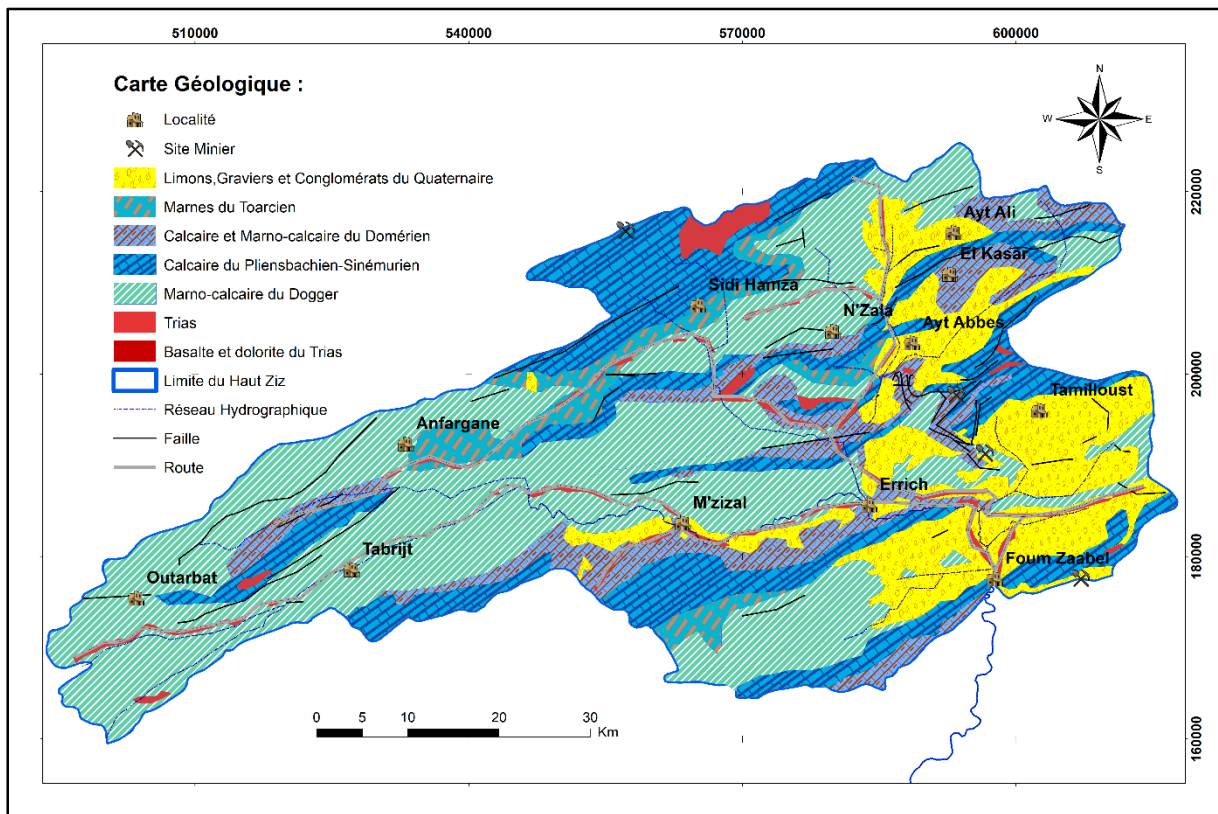


Figure 2: Carte géologique du bassin versant du Haut Ziz extraite de la carte géologique de Midelt au 1/200000 et de la carte géologique de Rich et Boudnib au 1/200000

La carte géologique de la zone d'étude a été élaborée à partir des cartes géologiques de Midelt, d'Errich et Boudnib au 1/200000 (Lyazidi, 1956 ; Choubert, 1956 ; Diani, 2019) (Figs. 2.3). Le Trias, composé de dépôts détritiques, basaltes doléritiques et parfois des évaporites, repose en discordance angulaire sur le substratum paléozoïque déformé et structuré par plusieurs phases tectoniques. Les séries jurassiques forment la majeure partie des terrains mésozoïques du Haut Atlas. Leur nature lithologique est essentiellement constituée par des dolomies, des calcaires, des alternances marno-calcaires et des dépôts détritiques silico-clastiques. (Sadki, 1999 ; Ettaki, 2003 ; Chafiki, 2007 ; Baidder, 2007), Elles reposent en concordance sur les formations rouges du Trias-Lias inférieur. Ces dernières sont de dépôts détritiques, basaltes doléritiques et parfois des évaporites, repose en discordance angulaire sur le substratum paléozoïque déformé et structuré par plusieurs phases tectoniques.

La colonne de la **figure 2** décrit en détail les séries stratigraphiques qui affleurent et qui se présentent comme suit :

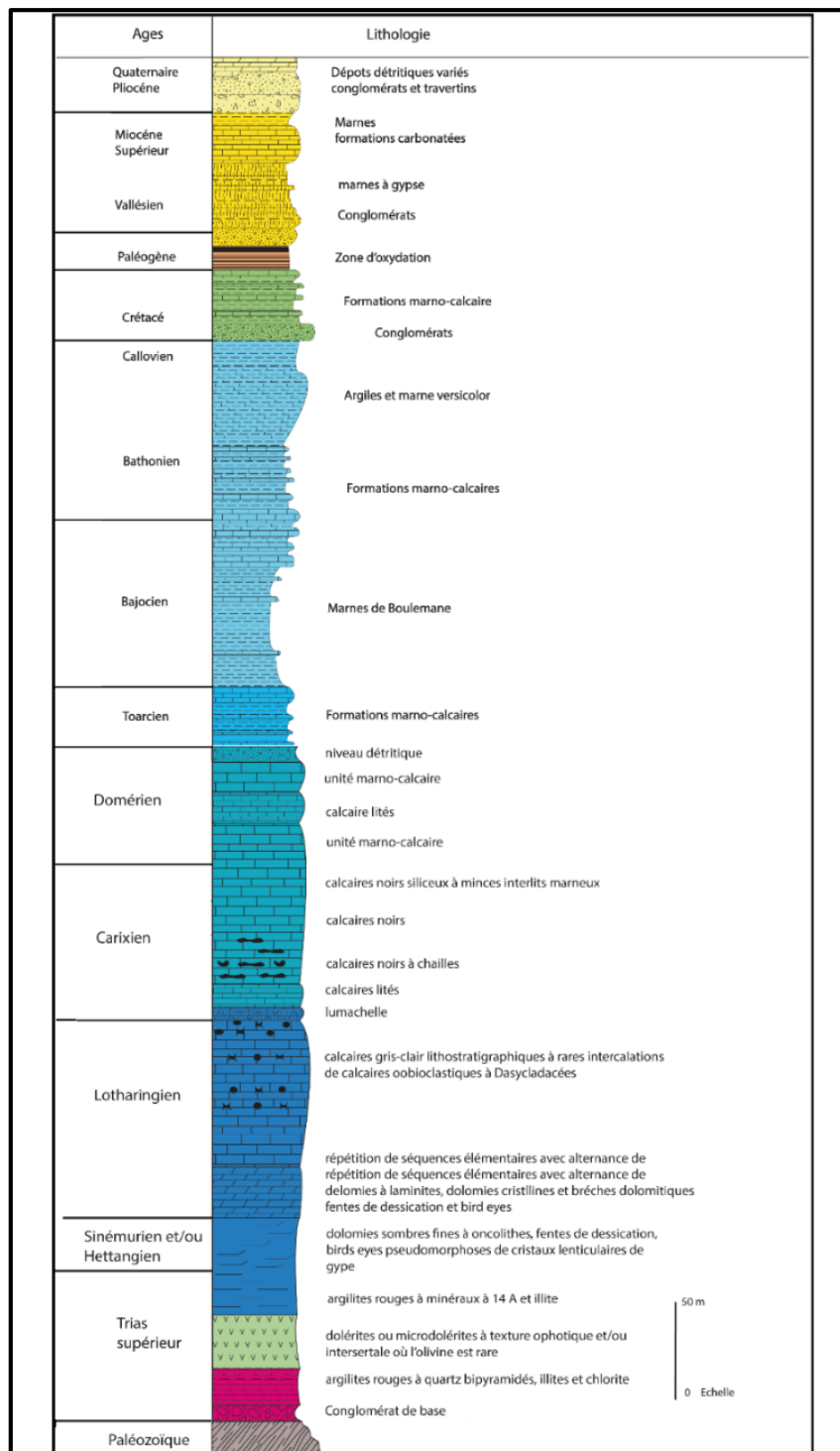


Fig. 3: Colonne lithostratigraphique du Haut Ziz (Sadki, 1989 ; MEHDI, 2003)

#### - Le Paléozoïque :

Les affleurements paléozoïques sont rares et le meilleur affleurement se trouve au sud du tunnel de Foum Zaabel. Il représente toute la série, du Carbonifère qui est essentiellement détritique sous forme de grés rosés, grés quartziques, conglomérats très consolidés et schistes.

#### - Le Mésozoïque

##### o Le Trias

Le Trias comprend des basaltes doléritiques, des marnes et argiles à niveaux salifères. Il joue un rôle important comme substratum imperméable de la série Jurassique et est à l'origine de la plupart des

eaux salifères de la région. Le Trias affleure à Fom Zaabel, au Nord du barrage Hassan Addakhil, injecté le long de l'accident atlasique Il est représenté par :

- Une série pélitico-argileuse, débutant par des conglomérats polygéniques, puis des grès rouges à intercalations argileuses,
- Une série de basaltes doléritiques, dans lesquels, sont parfois interstratifiés des niveaux de calcaires siliceux, (Sadki, 1999).
- Des argiles rouges, à violacées, plus au moins gréseuses et parfois gypsifères.

#### ○ **Le Jurassique**

Il constitue la quasi-totalité du Haut-Atlas et affleure sur la bordure nord du bassin Er-Rachidia-Boudnib et de la vallée du Ziz. Les différentes formations jurassiques sont constituées par des couches rouges exclusivement de grès calcaires et de marnes de couleur rouge ou verte et par l'alternance de niveaux de marnes, marno-calcaires et de bancs de calcaires et calcaires gréseux.

#### **Le Jurassique inférieur :**

- Lias inférieur calco-dolomitique est perméable et constitue le niveau présentant la plus grande continuité. Il donne à la chaîne atlasique (Haut-Atlas) ses formes structurales en arêtes redressées de calcaires massifs dolomitiques rouges (Michard, 1976). Sur le site du barrage Hassan Addakhil, au niveau de l'anticlinal de Jebel Hamdoun, le Lias est formé par des bancs de calcaires dolomitiques massifs avec de rares intercalations marneuses. (Dresnay, 1971).

- Lias supérieur : cet étage débute par une régression qui affecte le domaine anti-atlasique déterminant ainsi une lacune de sédimentation dans les régions à faible profondeur (Michard, 1976). Ce phénomène est produit par un léger mouvement tectonique ainsi le Toarcien inférieur se trouve exclusivement dans les sillons atlasiques (Bernascouni, 1983). Au Toarcien moyen survient une transgression conditionnant une sédimentation à dominance marneuse avec des alternances calcaires.

Dans la région de Fom Rhiour, l'affleurement du Toarcien est formé principalement de marnes vertes avec des interlits marno-calcaires.

#### **Le Jurassique moyen :**

Le Dogger débute par la transgression aalénienne qui donne naissance à des rivages au sud dépassent légèrement l'accident sud atlasique. (Choubert, 1962).

#### **Le Jurassique Supérieur :**

Lors de la tectonique intra-bathonienne, la sédimentation marine passe à une sédimentation continentale détritique à prédominance gréseuse appelée « Jurassique continental » (Choubert, 1962), et « couches rouges » (Jenny, 1981). Au Nord d'Er-Rachidia, des grès rouges affleurent dans la cuvette du Barrage Hassan Addakhil, à l'Ouest de la route RP 13. Ils débutent par des conglomérats hétérogènes et des grès grossiers.

Sur le plan structural (**Fig.3**), le régime d'extension orienté NW-SE, qui régnait au cours des temps triasico-jurassiques, a contrôlé la formation des bassins atlasiques. Le rifting est initié à partir du Trias, alors que l'individualisation de ces bassins et la subsidence contemporaine à la sédimentation a eu lieu au cours du Jurassique. Le cadre paléogéographique et morfo-structural est dominé à l'époque par un système de blocs basculés essentiellement vers le NW ou vers le SE (Nouayti, 2017). Ces derniers sont limités par des failles normales majeures NE-SW à ENE-WSW que séparent des failles de transfert WNW-ESE. (Beauchamps, 1996 ;Nouayti, 2015). Au Tertiaire, une phase de compression bi-épisodique,



d'abord NW-SE puis N-S, reprend les anciennes failles normales NE-SW en failles inverses ou en décrochevements senestres. Les failles transverses WNW-ESE sont réactivées en décrochements dextres. Cette compression qui initie la fermeture des bassins atlasiques à partir de l'Eocène supérieur se concrétise au cours de l'Oligo-Miocène et du Plio-Quaternaire (Beauchamps, 1996).

Du point de vue minéralogique, les dépôts des minerais de Pb-Zn sont nombreux. Les gisements du minerai de Zn ont été longtemps exploités à des fins locales et artisanales. (Emberger, 1969). Au Maroc, les montagnes du Haut Atlas renferment un grand nombre de gisements de minerais de Pb-Zn. Des études antérieures ont établi un lien génétique entre les gisements de minerai, la structuration plissée et/ou faillée du Haut Atlas marocain. En effet, cette région a connu des circulations hydrothermales importantes, en relation avec l'évolution de l'Atlantique central. (Bazin, 1968). Les nombreuses prospections minières dans le Haut Atlas font de lui une région économiquement importante pour l'extraction de métaux de base. Parmi les gisements dans le Haut Atlas de Ziz : le gisement Aït Labbes (32.38 ° N, 4.38 ° W), Le gisement Tizi n'Firest (32.18 ° N, 4.29 ° W), en plus des minerais de galène, blende, césurite, barytine, fluorine, Wulfénite (Nouayti, 2015).

Deux périodes métallogéniques de dépôt de minerai de sulfure Pb –Zn ont été identifiées comme des sites miniers. **(Fig.2)** :

- Le Jurassique inférieur : corps minéralisés marqués par stratiformes lentilles de sulfures de Zn-Pb-Fe et ont été considérés comme syngénétiques (Bazin, 1968 ;Agard, 1965 ;Nouayti, 2016). La paléogéographie en horst et graben, et les failles normales du Lias ont largement contrôlé la formation du minerai.

- Le Jurassique moyen : structures minéralisées étroitement liées à la mise en place des magmas basiques et l'héritage tectonique de la région. Le minerai est principalement disséminé dans du gabbro avec une minéralisation rapide de Cu-Ni (Chèvremont, 1975). Et plus tard un épisode de minéralisation Zn-Pb d'origine hydrothermale dans les roches calcaires. Il correspond à des corps minéralisés contemporains aux intrusions magmatiques du Jurassique moyen. (Hadri, 2003 ;Mouguin, 1992)

### III. Cadre morphologique

La délimitation du bassin versant objet de la présente étude sur les cartes topographiques au 1/50000<sup>e</sup> donne les caractéristiques géométriques du bassin versant du Haut Ziz et des sous-bassins **(Tab.1)**.

Tableau 1 : Caractéristiques des sous-bassins versants du Haut Ziz

Sous-Bassins	Oued	Superficie en Km <sup>2</sup>	Z max	Z min	Longueur en Km	Pente	Périmètre
Zaouiate Sidi Hamza	Zaouiate Sidi Hamza	1298,5	3499	1314	36,9	0,059214	204,3
Bas Ziz	ZIZ	1802	3379	1313	49,7	0,041569	278,1
Foum Zaabel	ZIZ	900,8	2.365,0	1.149,0	25,6	0,0	176,8
Haut Ziz	ZIZ	4.001,3	3.499,0	1.149,0	78,7	0,0	390,6

#### 1. Données hypsométriques

Puisque, les facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude, il est important d'étudier l'hypsométrie d'un bassin versant en calculant l'aire de chaque tranche d'altitude. Le tableau **(Tab. 2)** et l'histogramme **(Fig. 4)** révèlent la répartition des altitudes sur l'ensemble du bassin versant réparties sur la carte hypsométrique **(Fig.4)**.

Tableau 2 : La répartition des courbes d'altitudes

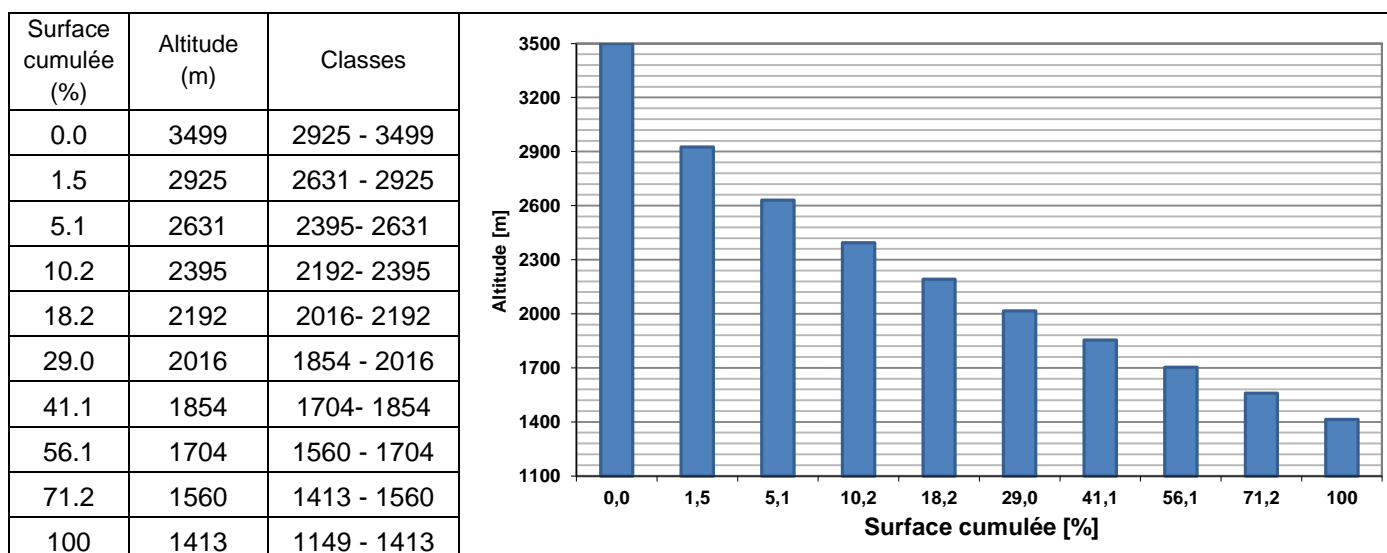


Figure 4 : Histogramme e hypsométrie du bassin versant du Haut Ziz

Les altitudes caractéristiques sont définies comme étant les côtes les plus basses et plus hautes du bassin (**Tab.2 et Fig.4**). La côte la plus basse est de 1149 m et la plus haute est de 3499 m. les autres données sont :

- L'altitude moyenne : Elle est définie comme étant la moyenne entre l'altitude la plus haute et la plus basse, dans le cas étudié, elle est de 2324 m.
- L'altitude médiane : Elle traduit l'altitude de fréquence qui correspond à 50% de la courbe hypsométrie. Elle est de l'ordre de 1800 m.
- L'altitude la plus fréquente : C'est l'altitude qui correspond à la tranche d'altitude qui représente le maximum de l'histogramme des fréquences altimétriques, soit 1149 m à 3499 m, le bassin versant du Haut Ziz est un bassin d'une altitude modérée.

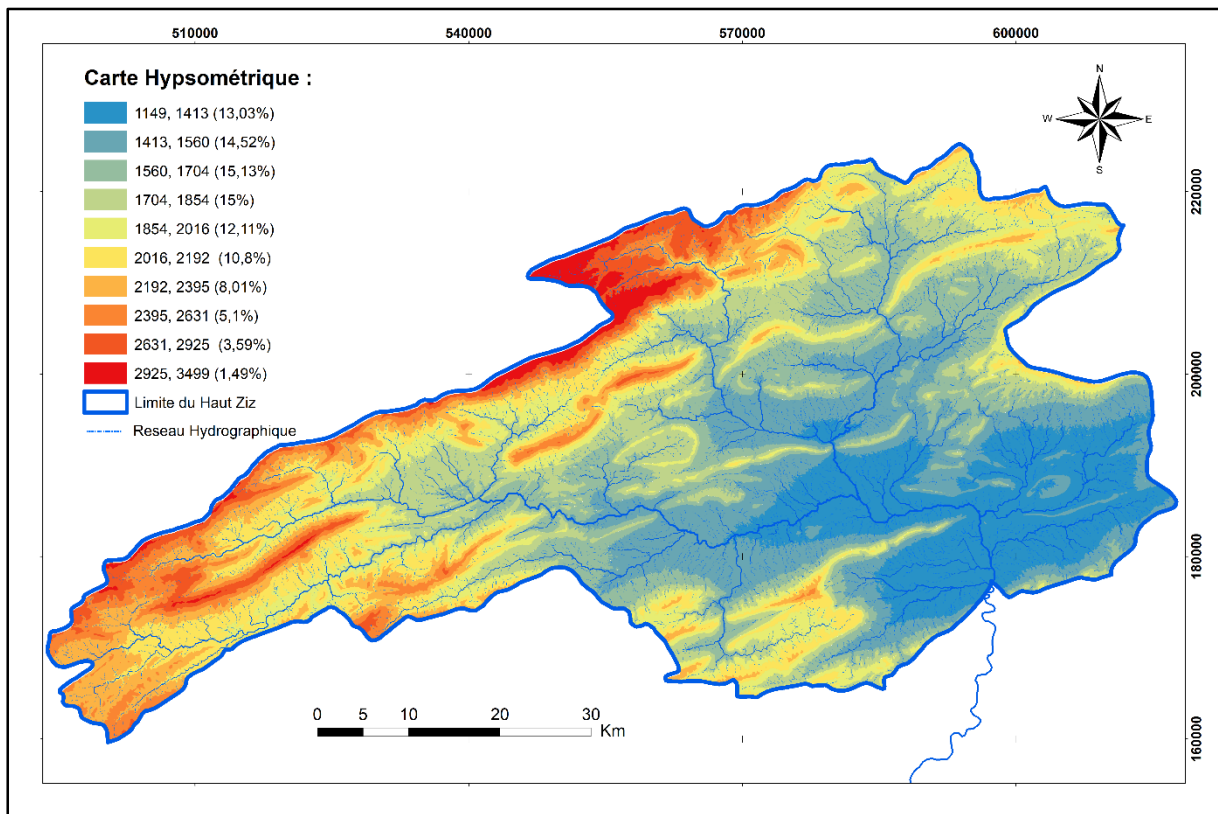


Figure 5 : Répartition de la surface totale par tranches d'altitudes

## 2. L'indice de compacité de Gravelius

Cet indice sert à qualifier la forme du bassin en le comparant à un cercle de même surface pour lequel  $KG=1$ . En plus de ceci, il donne une idée générale concernant l'influence de la forme d'un bassin donné sur la durée de déclenchement des crues. Plus le  $KG$  tend vers 1, plus sa forme est ramassée, et plus le temps nécessaire pour rassembler l'eau de tout le bassin versant est court. Sa formule est :

$$KG = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Et

$$KH = \frac{A}{L^2}$$

Où,

$KG$  : l'indice de Gravelius sans dimensions ;

$KH$  : indice de Horton

$P$  : le périmètre du bassin versant en km ;

$A$  : la surface du bassin versant en km<sup>2</sup>.

$L$  : Longueur du talweg le plus long en Km.

La classification des sous-bassins par type en fonction de l'indice de forme de (Horton, 1932) et l'indice de compacité de (Gravelius, 1914) est donnée dans les tableaux suivants (**Tab.3 et 4**) :

Tableau 3 : Critères de classification des sous bassins par type

Type de bassin	Intervalle
Ramassé	$K_H > 1$ et $K_G < 1.15$
Allongé	$K_H < 1$ et $K_G > 1.5$

Et ci-après le KG résultant après le calcul pour chaque sous bassin :

Tableau 4 : Indice de compacité des bassins de la zone d'étude

Bassin versant	Sous Bassin	Superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	Indice de Gravelius	Indice de Horton
Haut ZIZ	Sidi Hamza	1298	204.3	1,60	0.17
	Bras Ziz	1802	278.1	1,85	0.11
	Foum Zaabel	900	176.8	1,66	0.15
	Haut Ziz	4001	390.6	1,74	0.16

D'après les valeurs de l'indice KG, on peut dire que le bassin versant présente une forme allongée.

### 3. Le rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est une représentation du bassin versant sous forme d'un rectangle de même surface. L'objectif de son utilisation est de pouvoir comparer les bassins entre eux. On lui associe couramment les tranches d'altitudes qui permettent un aperçu plus facile du relief. Sa longueur et sa largeur sont calculées par les deux formules suivantes :

On assimile notre bassin à un rectangle défini par sa longueur "L", sa largeur "l" est la même superficie du bassin versant "S".

$$L = \frac{Kc \sqrt{s}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{Kc \sqrt{s}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right]$$

Où, L : la longueur du rectangle en km ;

l : la largeur du rectangle en km ;

KG : l'indice de Gravelius sans dimensions ;

A : la surface du bassin en km<sup>2</sup>.

L'application sur le Haut Ziz donne le tableau ci-dessous (**Tabl. 5**) :

Tableau 5 : Caractéristiques des bassins versants de la zone d'étude

Bassin versant	Sous Bassin	Superficie (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	L (km)	l (km)
Haut ZIZ	Zaouiate Sidi Hamza	1298	204.3	86.73	14.79
	Bas Ziz	1802	278.1	124.2	14.52
	Foum Zaabel	900	176.8	76.64	11.76
	Haut Ziz	4001	390.6	156	23.23

Les caractéristiques obtenues sont : la superficie (4001 Km<sup>2</sup>), périmètre (390 Km), la forme (selon Le coefficient de compacité de Gravelius  $K_G = 1,74$  donc une forme allongée induire les débits de point et le rectangle équivalent (L= 156 Km et l = 23.23Km).

#### 4. Coefficient d'allongement (Tabl. 6) :

Ce coefficient est obtenu par la relation :

$$Ca = \frac{L^2}{S}$$

Où, L : la longueur du thalweg principal (Km) et S : la superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

Tableau 6 : Indices d'allongement des sous-bassins versants de la zone d'étude

Sous Bassin	Superficie en Km <sup>2</sup>	Longueur en Km	Indice d'allongement
<i>Zaouiate Sidi Hamza</i>	1298,5	36,9	1,05
<i>Bas Ziz</i>	1802	49,7	1,37
<i>Foum Zaabel</i>	900,8	25,6	0,72
<i>Haut Ziz</i>	4.001,3	78,7	1,55

Les résultats obtenus confirment la forme allongée du bassin versant du Haut Ziz, ce qui permet de se faire une idée sur le débit de point.

#### 5. Carte des pentes :

La pente est un facteur principal pour l'évaluation de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. La carte des pentes a été synthétisée à partir du modèle numérique du terrain issue d'une image satellitaire ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) (Fig.6), et à l'aide de l'outil SIG. L'image satellitaire utilisée a été mise en ligne le 08 juillet 2018 par la NASA. Elle a une résolution de 30m, et elle a été téléchargée depuis le site de la NASA.

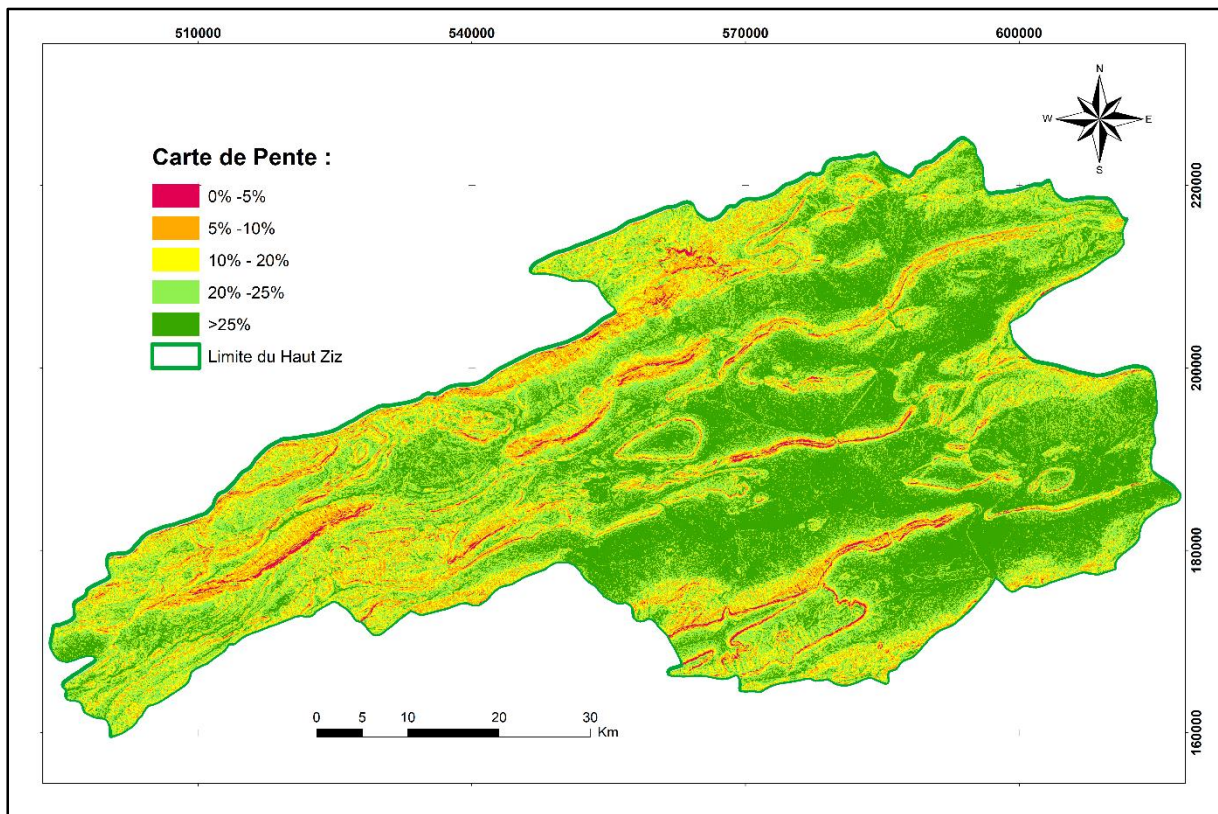


Figure 6: Carte des pentes du bassin versant du Haut Ziz

#### IV. Cadre Hydrologique

Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant est sous la dépendance du climat, de la lithologie, du relief et de l'occupation du sol. L'organisation du réseau hydrographique et la pente des talwegs, fruits de l'évolution géomorphologique, sont liés au relief, mais aussi – par certains aspects – directement à la lithologie. Leur prise en compte est indispensable à une bonne compréhension du déclenchement et de la propagation des écoulements de crue.

Le réseau hydrographique du Haut Ziz (**Fig.7**) se compose essentiellement de trois affluents prenant naissance dans le Haut Atlas à savoir l'Oued N'Igli, l'Oued Sidi Hamza et l'Oued N'Zala, qui vont se rejoindre en aval, après avoir parcouru les deux tiers du bassin en question, pour former l'Oued Ziz. A grande échelle, la ramification du réseau est plus prononcée en amont qu'en aval, vu les accidents géologiques très abondants dans les moyennes et hautes altitudes. Dans le Haut Ziz, la classification de Strahler (Strahler, 1952) permet de définir trois classes hiérarchiques la classe d'ordre 8 n'est apparent qu'en aval du bassin.

Le bassin versant de Haut Ziz comporte un réseau de mesure composé des stations de mesures de débits (stations hydrométriques) montrées sur la (**Fig.8**) et des stations de mesures de pluies (stations pluviométriques) dont l'emplacement est montré sur la même Figure.

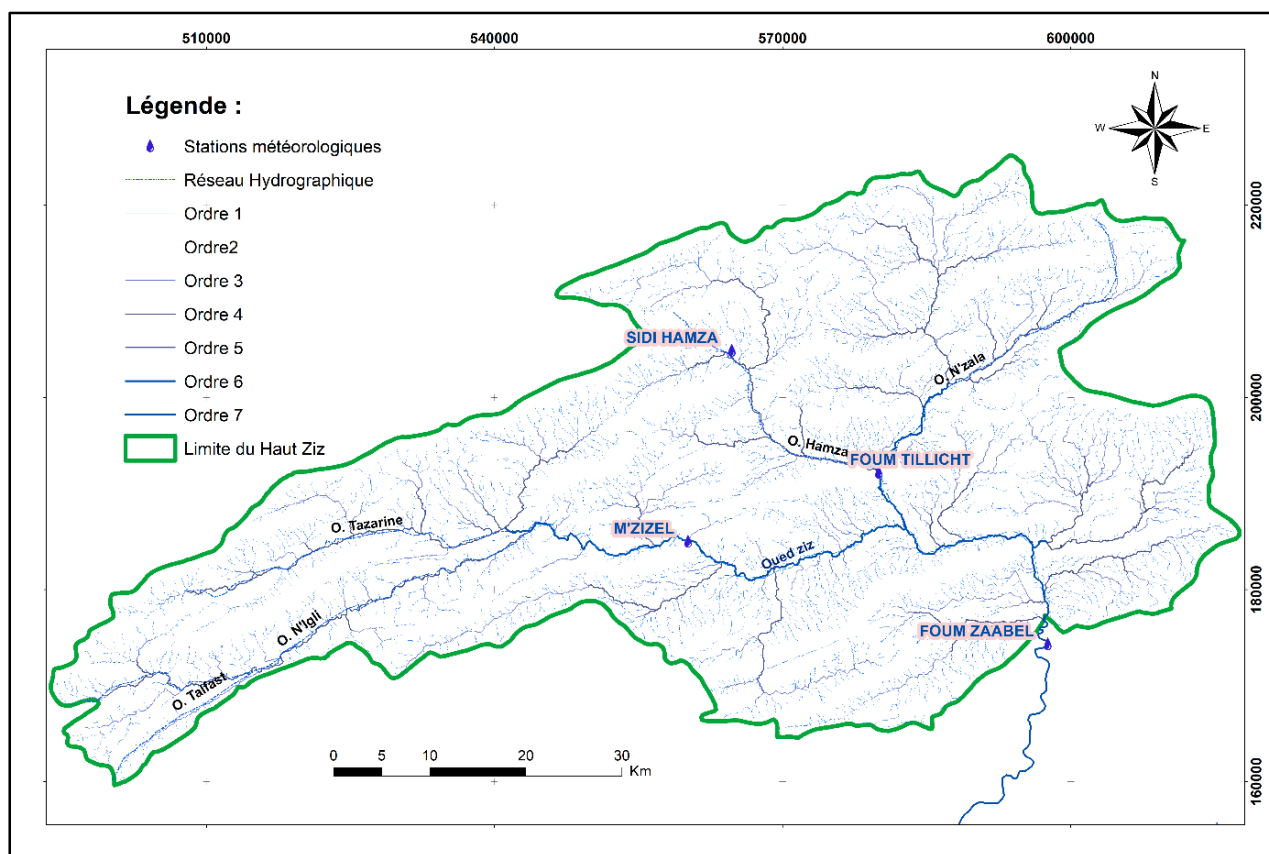


Figure 7 : Réseau Hydrographique du bassin versant du Haut Ziz

## V. Cadre hydrogéologique

Les ressources en eau souterraines dans le Haut Atlas circulent principalement dans les calcaires et les dolomites Jurassiques. Ces calcaires karstiques du Jurassique sont dotés de grandes potentialités hydrogéologiques et un débit d'étiage naturel pérenne. Le substratum Primaire – Trias constitue le mur imperméable général continu dans toute la chaîne atlasique. Les réseaux aquifères du Lias inférieurs formant un système relativement continu. Le niveau imperméable du Toarcien-Aalénien inférieur joue un rôle d'écran hydrogéologique dans le Haut Atlasique calcaire.

Les réseaux aquifères et nappes de la série Aalénienne-Dogger, sont fragmentés en bassins séparés dans chaque cuvette synclinale et généralement sans communication et comprenant parfois plusieurs niveaux aquifères. Les deux niveaux aquifères (Lias inférieur et Jurassique moyen) sont séparés par le niveau imperméable (Toarcien-Aalénien inférieur) et la communication entre les deux niveaux est conditionnée par la présence de failles. A ces deux ensembles aquifères, se superposent des systèmes de nappes phréatiques. (ABH-GZR, 2011)

### 1. Forage et Puits :

D'après les responsables de l'ABHGZG, près de 292 forages d'eau sont exécutés dans le Haut bassin du Ziz. La plupart des travaux de forage ont pour objectif de prospecter ou d'exploiter les formations du Jurassique (calcaire, marno-calcaire, etc.) (Nouayti, 2017). La figure 8 représente les points d'eau inventoriés dans la zone d'étude (puits/forages et sources).



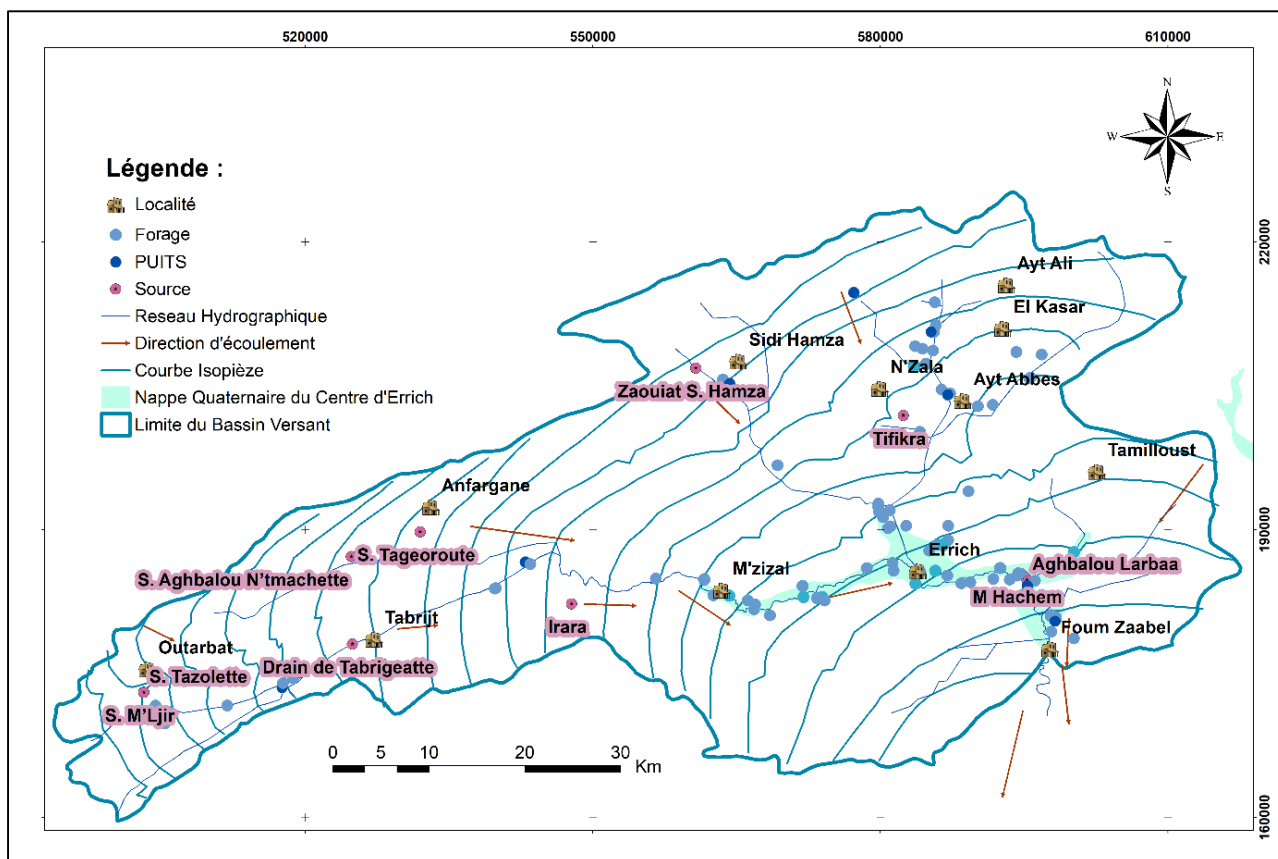


Figure 8 : Carte d'inventaire des points d'eau souterraine.

## 2. Les sources :

Les sources existantes au niveau du bassin versant du Haut Ziz sont très nombreuses, mais les plus importantes apparaissent au niveau du Lias Inférieur avec des débits importants de plusieurs litres par seconde (**Fig. 8**). Donc on cite les principales sources qui sont :

- Source de Zaouiate Sidi Hamza est l'une des plus importantes sources du Haut Ziz. Elle sort du Lias inférieur dans les gorges en amont de Zaouiate Sidi Hamza, à près de 21 Km à partir de la route principale Errachidia – Meknès. Le débit de la source reste généralement important avec des fluctuations saisonnières et qui sont impactées par l'effet de la recharge pluviale ou l'effet de sécheresse (Nouayti, 2017).
- Source de Hammat Moulay Hachem et Aghbalou Larbaà : sont situées à 15 Km à l'ESE de la ville d'Errich. Ces sources émergent sur la rive droite de l'Oued Ziz au niveau des formations Calcareo-dolomitiques du Domérien. La source de My Hachem se présente sous forme de plusieurs griffons situés à moins de 20m l'un de l'autre. Son débit est de 7l/s. Le débit de la source d'Aghbalou Larbaà est de 14l/s. Ces sources servant essentiellement à l'irrigation des périmètres situés en amont du centre de Kerrando. La source a présenté une diminution de son débit durant la période des années 80 et début des années 2000, ce qui reflète l'effet de la sécheresse (Nouayti, 2017).
- Source Hammat Moulay Ali Cherif : Emerge sur la rive gauche de l'Oued Ziz dans le fond de la vallée. Elle est située à 300 m environ du Radier du Ziz Tiaallaline au passage de la route nationale N°21 de Meknès - Errachidia. C'est la source la plus fréquentée par les habitants qui leur attribuent diverses propriétés thérapeutiques. Elle sort au niveau des calcaires Domériens vers le fond de la vallée de Kerrando et présente un débit estimé à 2l/s. L'eau de la source est



Artemisia sur « terra rossa » et sur roches calcaires mésozoïques, en association avec des espaces dénudés, rocailloux et désertiques.

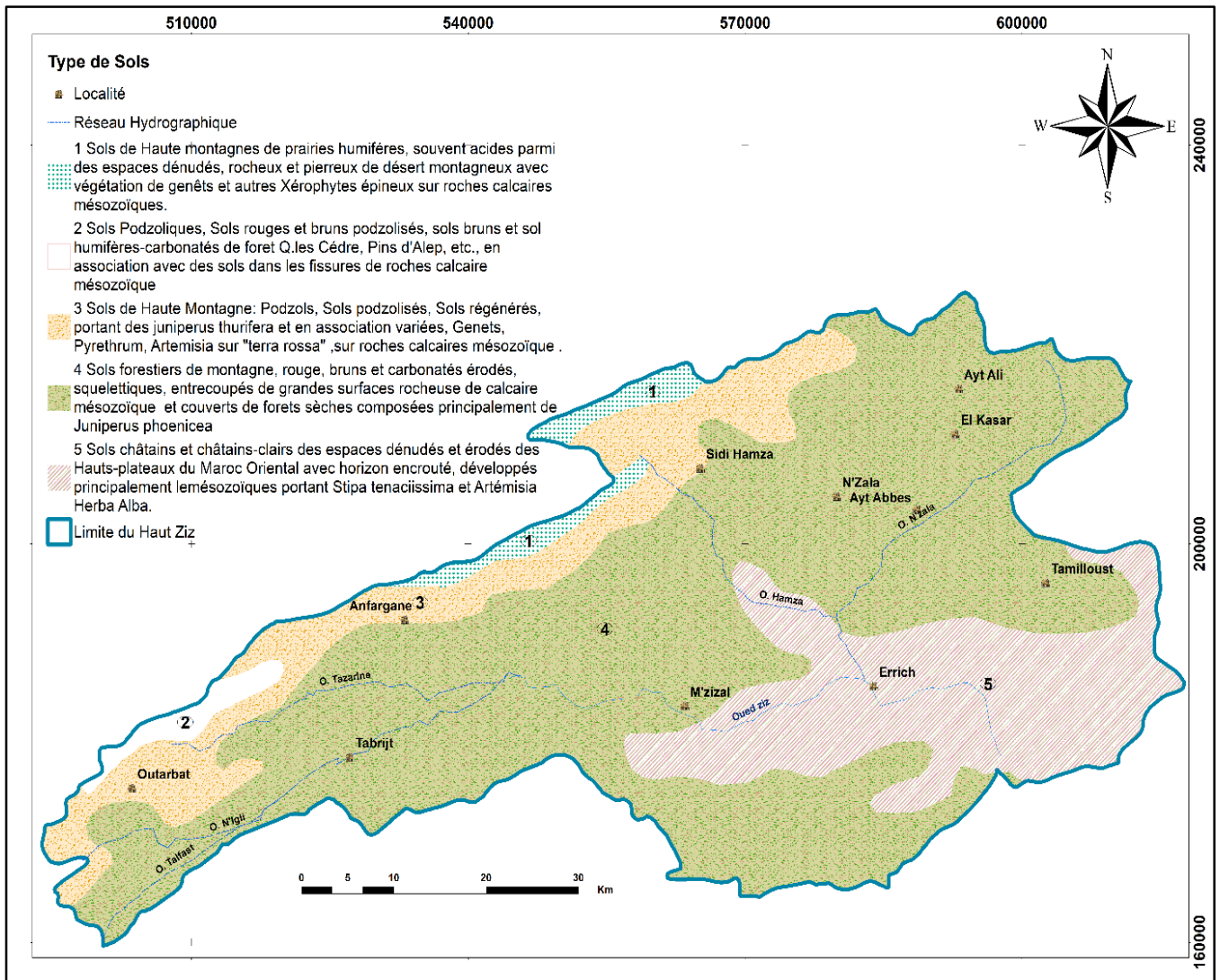


Figure 10 : Carte montrant les différents types de sols existant dans le bassin versant du Haut Ziz (ORMVAT, 2011)

La carte d'occupation des sols (Fig.11) adaptée des travaux de (ABH-GZR, 2011), les formations arbustives constituent une superficie très importante presque 38 %. Les principales formations forestières par ordre d'importance sont par le genévrier rouge, les genévriers Thurifère et oxycèdre, le chêne vert, le frêne, le cèdre et le pistachier de l'Atlas, représentant environ 27.58 % de la superficie totale du bassin. Concernant le matorral arboré qui résulte de la dégradation des formations forestières couvrent une faible superficie. Les reboisements couvrent moins de 1.51 %. Finalement, les vallées d'oueds dans lesquelles est pratiquée une agriculture en irrigué et où se situe les agglomérations humaines constituent un peu plus de 5 %, soit une superficie cartographiable de l'ordre de 200 km<sup>2</sup>.

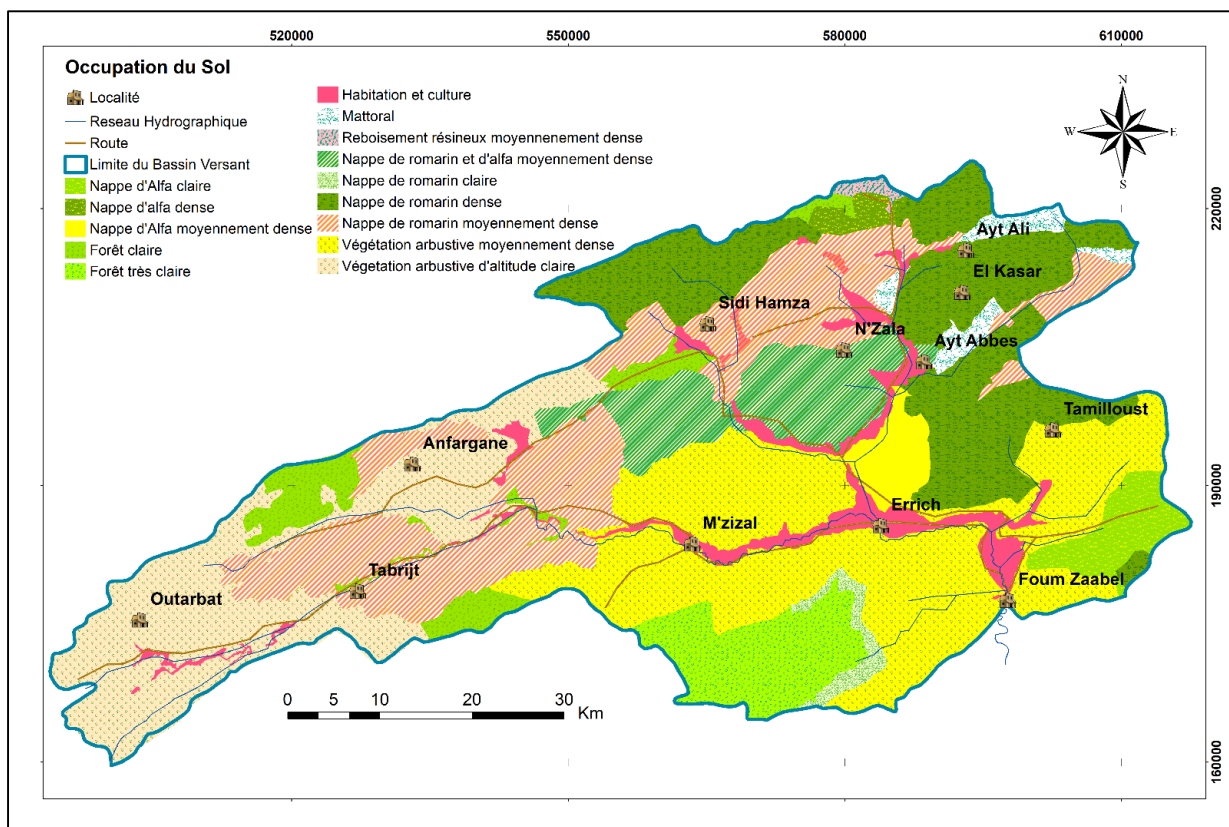


Figure 11: Carte d'occupation du sol dans le bassin versant du Haut Ziz (ORMVAT, 2011)

## VII. Cadre climatique

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques est basée sur les données enregistrées dans quatre stations situées au centre du bassin du Haut Zizi : M'ZIZEL, FOUM TILLICHT, FOUM ZAABEL et station SIDI HAMZA. **Le figure 12** illustre la position de ces stations et **le tableau 7** donne plus de détails sur leurs caractéristiques.

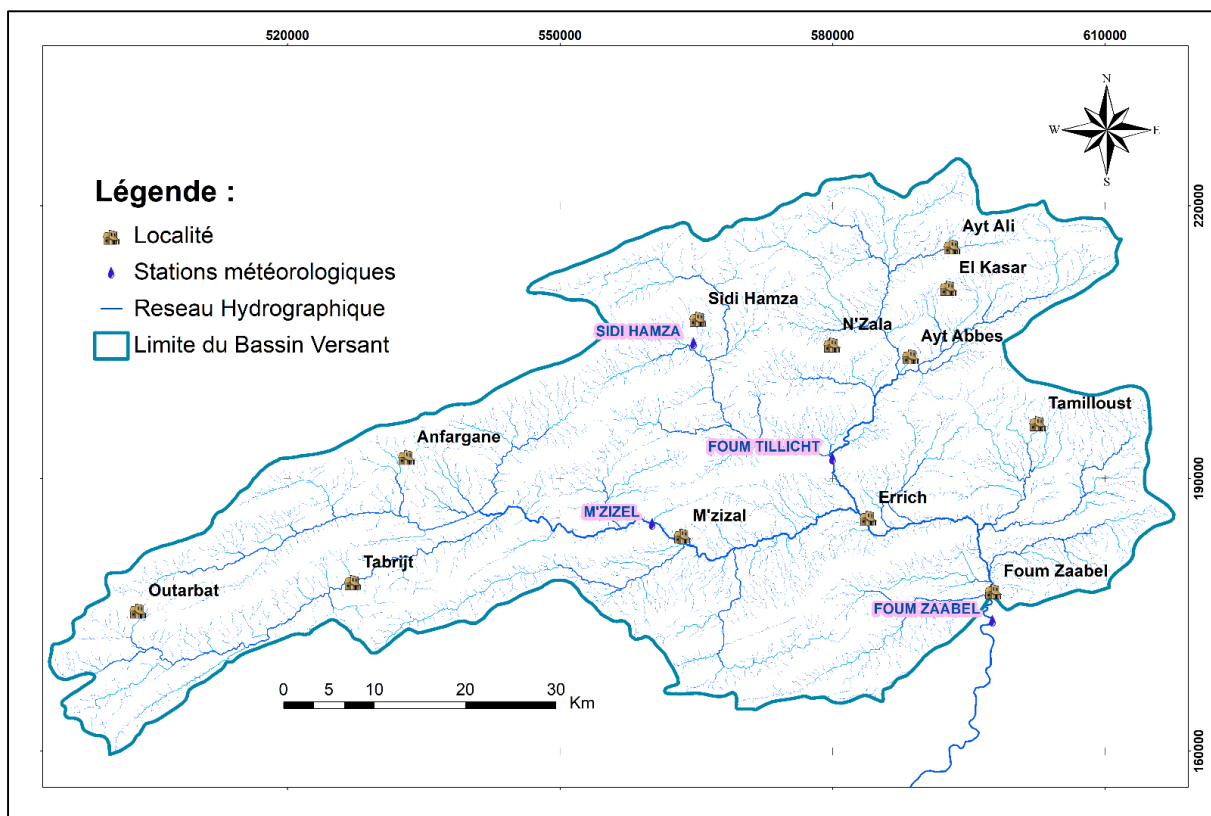


Figure 12: Situation géographique des stations météorologiques dans le bassin versant du Haut Ziz

Tableau 7: Les caractéristiques géographiques ,météorologiques et climatiques de stations.

Paramètres	Stations			
	Zaouiate Sidi Hamza	M'Zizel	Foum Tillicht	Foum Zaabel
NtIRE	31/38	1585/38	1508/38	867/48
Type station	S. P	S. P	S. P	S. P
Rivière	SIDI HAMZA	Ziz	Ziz	Ziz
Localité	Amont Ziz	Errich	Amont Ziz	Amont Ziz
Longitude X	564215	560000	579850	597450
Latitude Y	204361	185300	192500	174650
Altitude	1738	1600	1627	1253
Période	48 (1971-2017)	48(1971-2017)	43 (1976-2017)	46 (1971-2016)
Moyenne (mm)	264.80	184.34	197.61	183.44
Médiane (mm)	241.85	162.05	167.4	171.8
Minimum (mm)	42.7	65.8	25.6	68.4
Maximum (mm)	575.1	404.8	471.6	406.7
S.D.	98.95	84.53	95.91	82.15
C.V. (%)	37.36	45.85	48.53	44.78

Les stations météorologiques possèdent des séries d'observations plus longues (entre 43 et 48 ans, de 1971 à 2017) avec peu de lacunes. Il est donc essentiel, avant de traiter ces données, de se préoccuper de leur qualité et de leur fiabilité au moyen des méthodes appropriées. Une vérification systématique sur les fichiers de valeurs a été effectuée. Le travail consiste à combler les lacunes contenues dans les séries de mesures. En effet, des lacunes et discontinuités dans les séries chronologiques des pluies et



des températures ont été remarquées pendant certaines années ou mois. La méthode des doubles masses (doubles cumuls) a été utilisée afin d'évaluer l'homogénéité des séries de mesures des stations météorologiques. L'ensemble des données climatiques a été mis à notre disposition par l'Agence de Bassin Hydraulique du Guir Ziz Rhéris et Maider.

## **1. Estimation des données manquantes**

On peut estimer les données manquantes ou erronées à une station à partir des valeurs provenant des stations voisines soumises aux mêmes conditions climatiques et situées dans la même zone géographique. Des méthodes sont proposées pour la restitution des données pluviométriques (remplacer la valeur manquante par celle de la station la plus proche, ou par la moyenne des stations voisines...). Cette méthode est utilisée lorsque les précipitations moyennes annuelles de la station à compléter ne diffèrent pas de plus de 10% des précipitations moyennes annuelles aux stations de référence.

### **a. Méthode du double cumul**

Le principe consiste à cumuler les valeurs annuelles observées de chaque paramètre à traiter. Une fois que les valeurs sont cumulées, la droite des cumuls est obtenue en fonction de la station à tester et d'une deuxième station de la même région, qu'on appellera station référence. La similitude de comportement des deux stations se traduit par un quasi alignement des points représentatifs. Une déviation de comportement d'une des deux séries (stations) va se traduire par un nouvel alignement le long d'une droite différente de la première. Cette méthode est particulièrement utilisée pour tester l'homogénéité et détecter la tendance des stations.

**La figure 13** montre qu'il n'y a aucun changement de l'exploitation des quatre stations. En termes de fiabilité de données, la plupart des stations pluviométriques ont présenté une bonne homogénéité. Les coefficients de détermination montrent une bonne corrélation entre les séries pluviométriques. Les résultats obtenus (tendance linéaire) montrent que les précipitations mesurées au niveau des stations choisies sont homogènes.

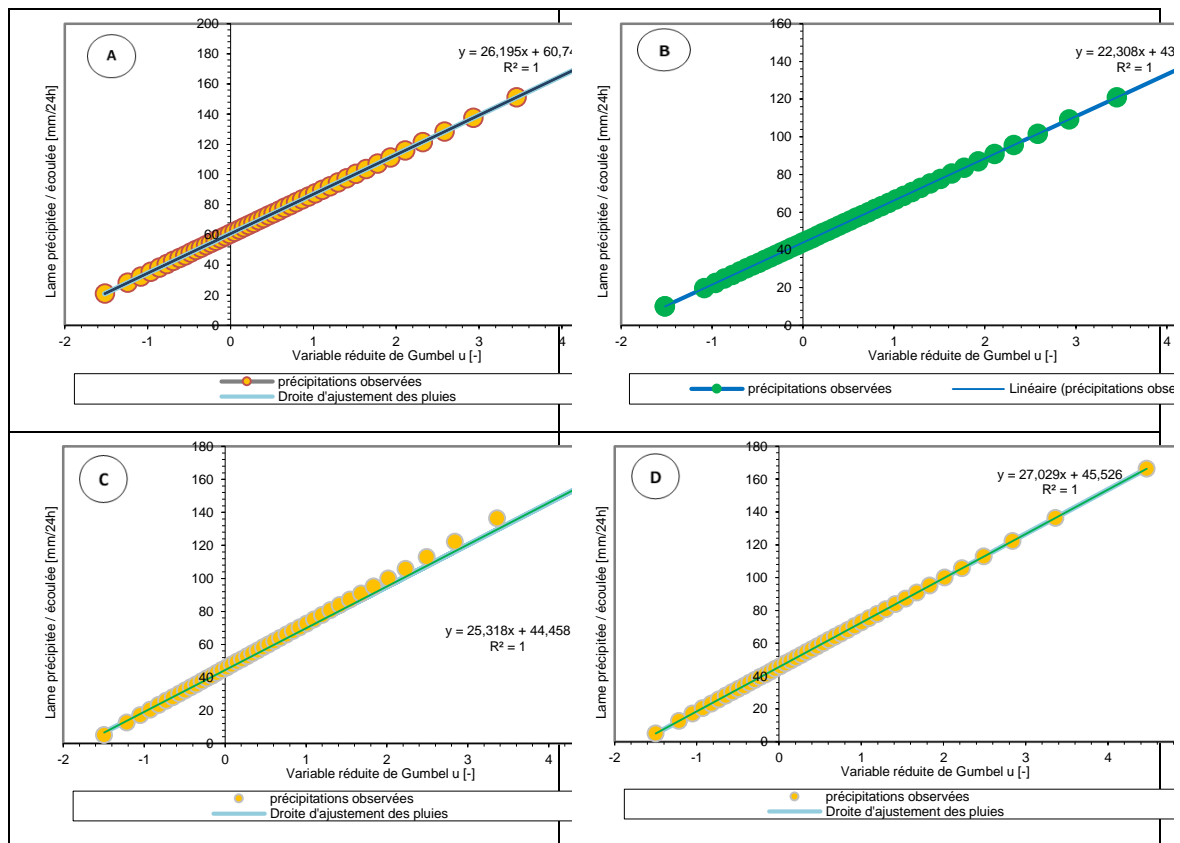


Figure 13: Homogénéité des séries de mesures de : (A) Station Zaouiate Sidi Hamza, (B) Station M'Zizel, (C) Station Foug Tillichet et (D) Station de Foug Zaabel.

## 2. Etude des paramètres climatiques

### a. Pluviométrie

L'étude pluviométrique et son évolution spatio-temporelle présentent un intérêt considérable en hydroclimatologie, aussi bien pour décrire le régime d'écoulement superficiel que pour comprendre l'hydrodynamisme de la nappe de la zone d'étude. La zone d'étude appartient au bassin de Ziz. Les précipitations se caractérisent par trois épisodes pluvieux : le premier, le plus important, s'étale de Septembre à Novembre avec un maximum en Octobre ; le second, de moyenne importance, s'étale entre Avril et Mai avec un maximum en Avril et le troisième épisode pluvieux, de faible importance, s'étale entre Janvier et Mars avec un maximum en Février.

Le climat, étant généralement semi-aride très froid à forte influence continentale, reste aride malgré la présence de montagnes, et très variable dans le temps et dans l'espace.

- Analyse des précipitations mensuelles et annuelles

D'après l'histogramme des précipitations annuelles pour la période 1971-2018, (**Fig. 14 à 21**), on peut conclure les résultats suivants pour chaque station :

#### **Pour la station Foug Zaabel (Figs. 14 et 15)**

- **La Figure 14** montre que le mois d'Octobre est le mois le plus humide avec 27 mm notant également une précipitation importante du mois de Novembre et Avril, et le mois de juillet est le mois le plus sec avec 3.2 mm.

- Les années qui se caractérisent par une pluviométrie très forte sont les années 1976, 1996 et 2015 où la pluie en moyenne a atteint une valeur qui varie entre 406.7 et 575.1.
- Pour les années de pluviométrie faibles sont multiples, et sont marquées en générale, par des précipitations faibles et irrégulières. Parmi ces années on trouve 1982, 1984, 1993, 2001, 2005 et 2014.
- L'année 2009 /10 est la plus arrosée avec 407mm et l'année 1996/97, mais pour l'année la plus sèche est 1984/85 avec 68.4 mm (**Fig. 15**)

Selon les deux courbes de tendance, on observe qu'il y a une augmentation de l'ampleur des précipitations avec le temps.

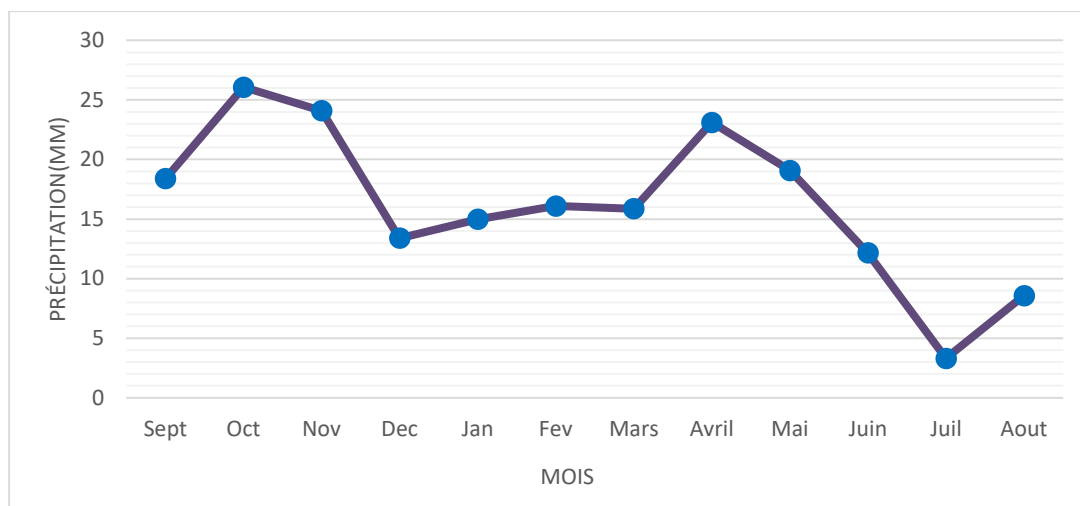


Figure 14: Précipitations moyennes mensuelles de la station Foug Zaabel

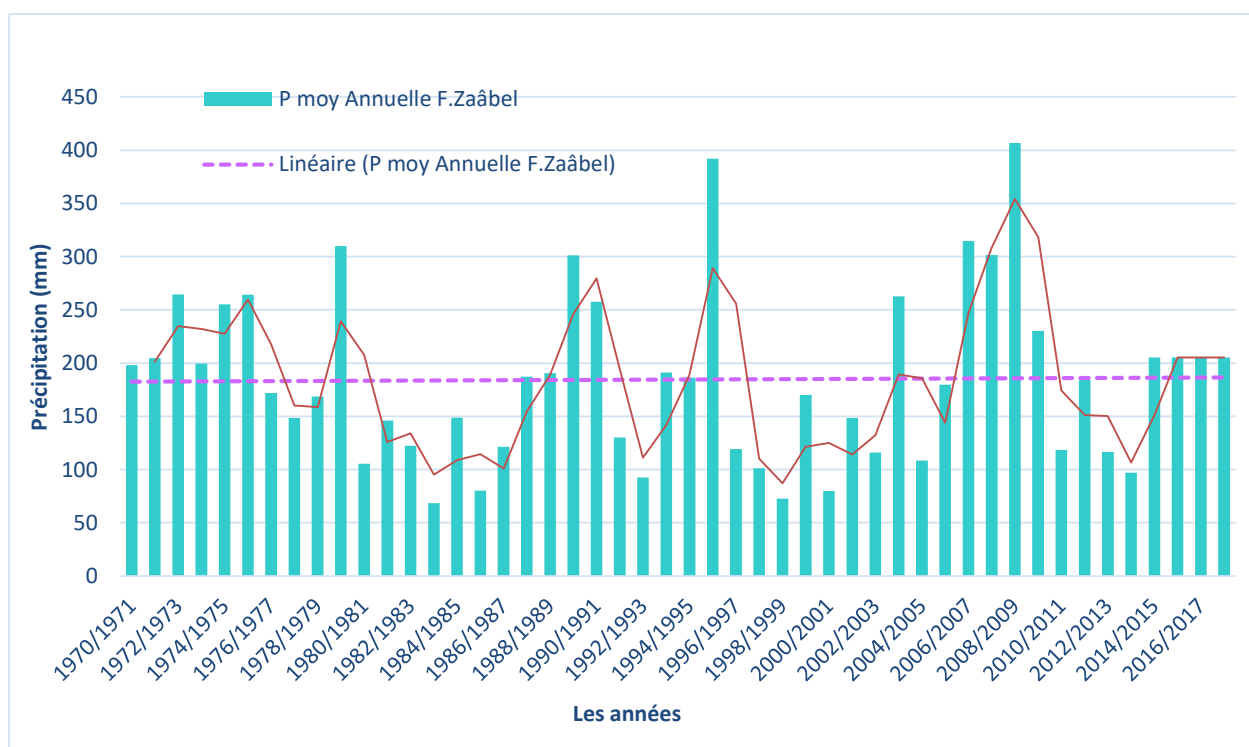


Figure 15: Précipitations moyennes annuelles de la station Foug Zaabel



**Pour la station Foug Tillich (Figs. 16 et 17)**

Pour cette station, le mois d'octobre est le mois le plus arrosé avec 32 mm et le mois de juillet est le mois le plus sec avec 7 mm (Fig.16).

L'historique pluviométrique disponible correspond à la période 1971/2018, il montre que les précipitations interannuelles moyennes obtenues pour cette période sont de l'ordre de 470.3mm. L'analyse de la courbe ci-dessus, montre que l'année 1996/97 est la plus humide avec 466 mm et l'année 1984/85 est la plus sèche avec 82 mm (Fig.17).

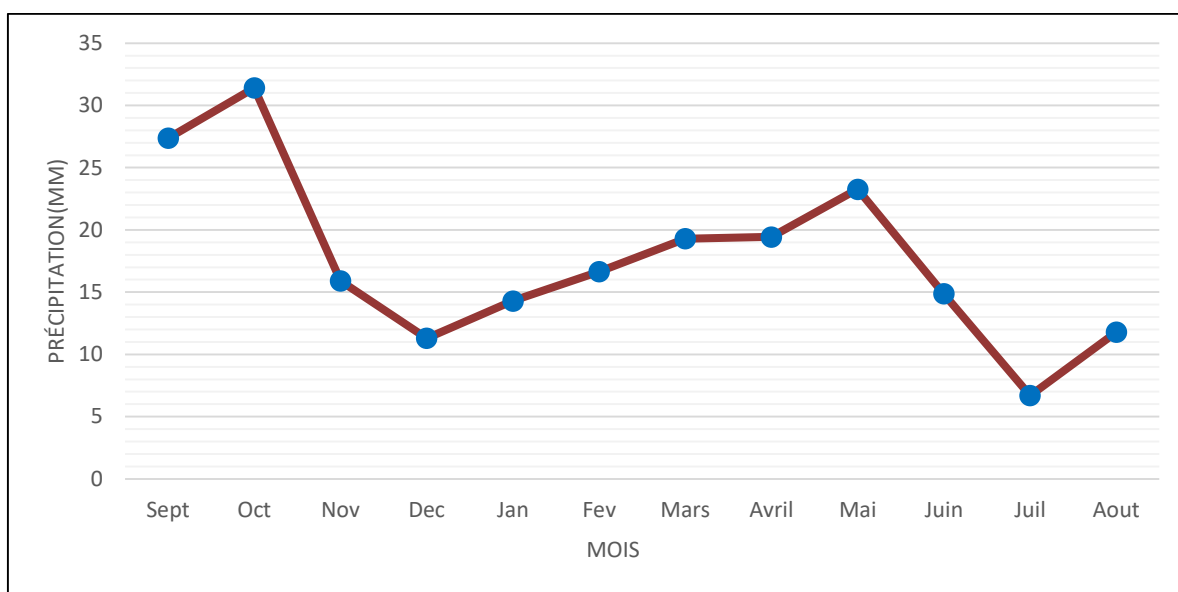


Figure 16 : Précipitations moyennes mensuelles de la station Foug Tillich

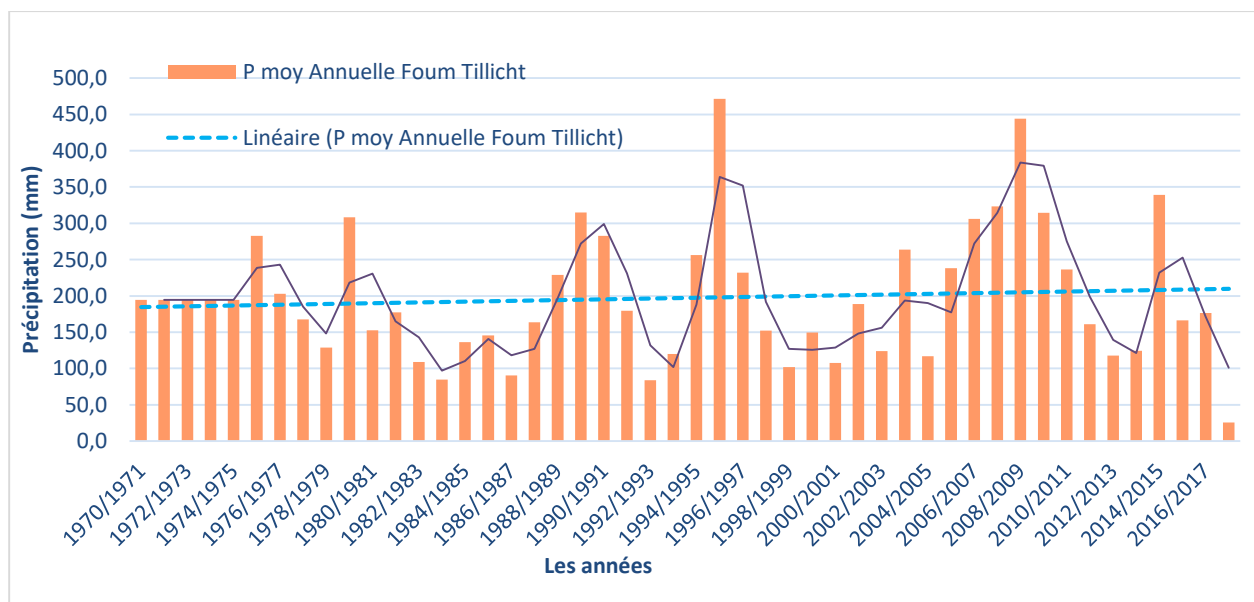


Figure 17 : Précipitations moyennes annuelles de la station Foug Tillich

**Pour la station de M'Zizel (Figs. 18 et 19)**

L'analyse montre que Le mois d'octobre est le mois le plus arrosé avec 28 mm et le mois de juillet est le mois le plus sec avec 4 mm (Fig.18). L'année 2007/08 est la plus humide avec 416 mm et 394 mm pour l'année 2014/2015. L'année la plus sèche est 1984/85 avec 72 mm (Fig.19).

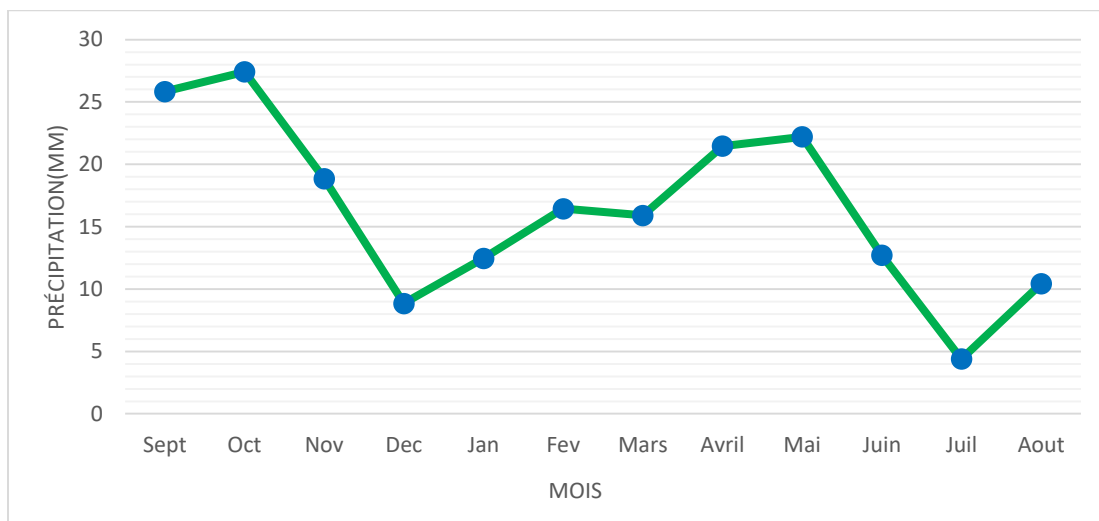


Figure 18 : Précipitations moyennes mensuelles de la station M'Zizel

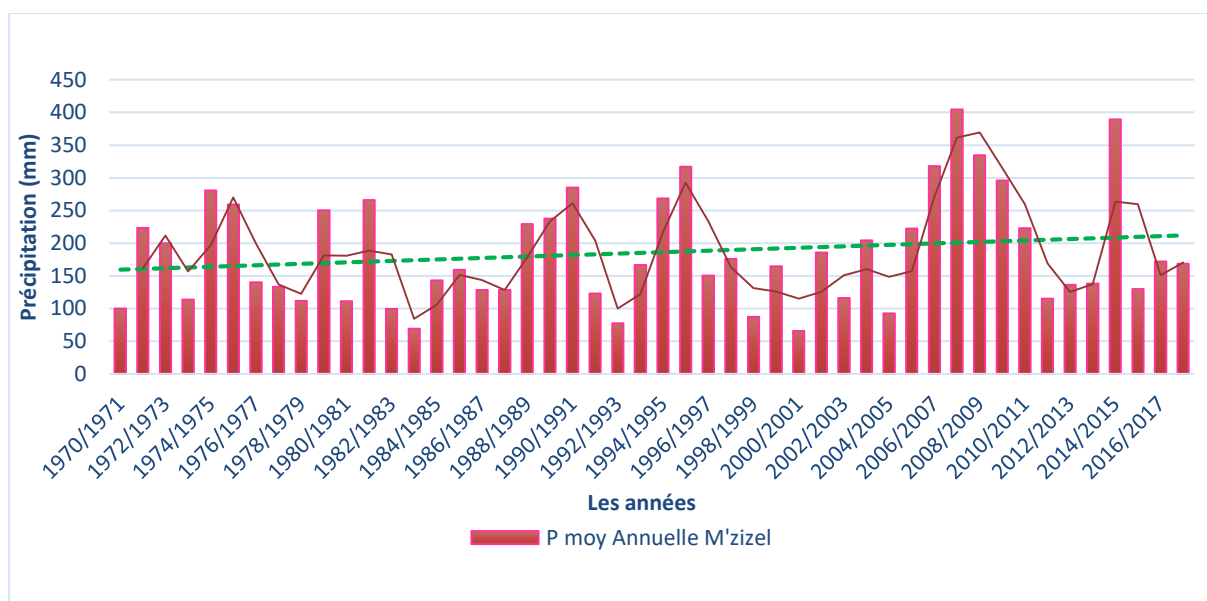


Figure 19 : Précipitations moyennes annuelles de la station M'Zizel

**Pour la station Zaouiate Sidi Hamza (Figs. 20 et 21)**

Pour les précipitations mensuelles, on constate que, le mois d'Octobre est le mois le plus humide avec 37 mm notant également une précipitation importante du mois de, Février, Avril et Mai, le mois de juillet est le mois le plus sec avec 7 mm (Fig.20).

La pluviométrie interannuelle moyenne est de 406.7 mm au niveau de la station Climatique de Zaouiate Sidi Hamza(Fig.21). Mais on note une répartition intra-annuelle des pluies très irrégulière d'une année à l'autre de cette station et de toutes les autres stations.

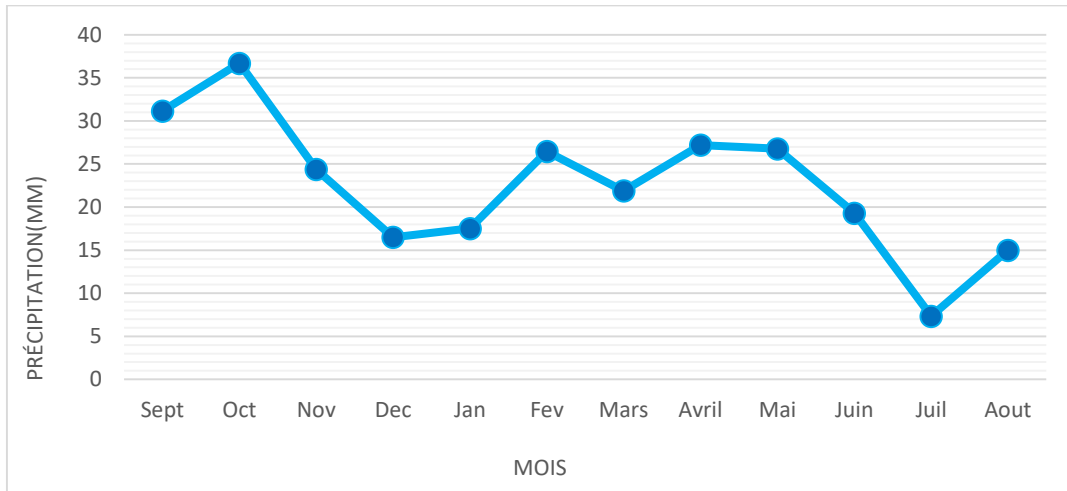


Figure 20 : Précipitations moyennes mensuelles de la station Zaouiate Sidi Hamza

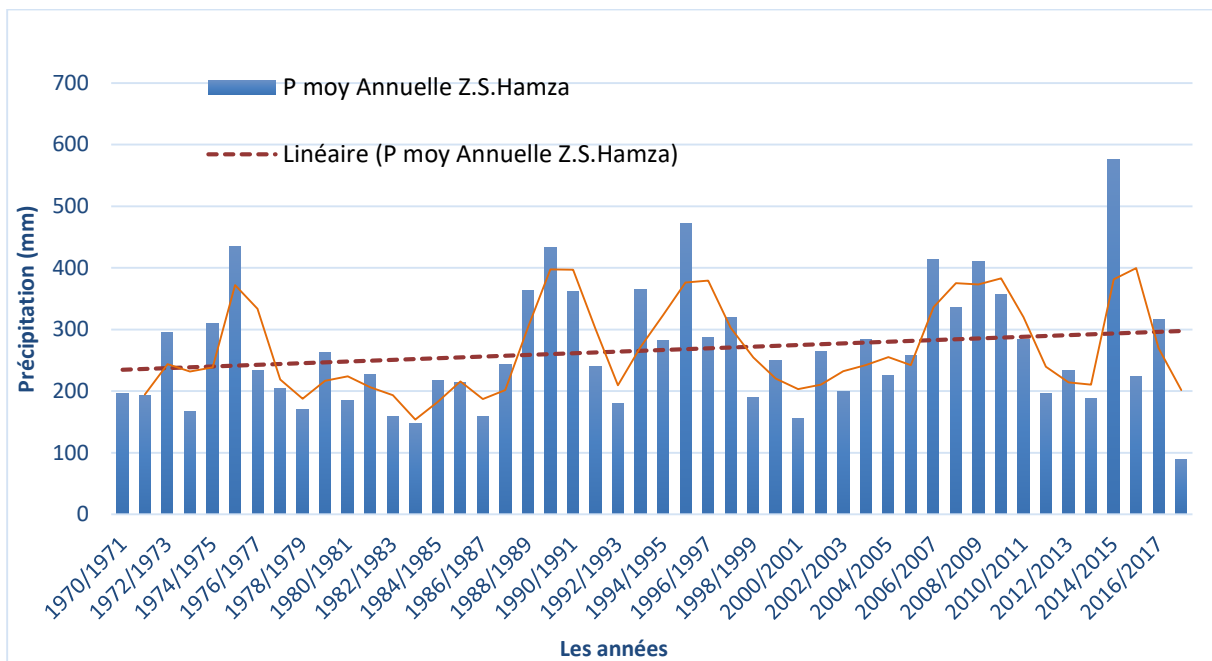


Figure 21 : Précipitations moyennes annuelles de la station Zaouiate Sidi Hamza

## b. Température

La température est considérée comme un élément fondamental dans le processus du cycle de l'eau, vu qu'elle intervient dans l'estimation des potentialités hydrologiques d'une région donnée. Elle contrôle l'intensité de l'évaporation et l'évapotranspiration. Concernant les données collectées de la température, on a trouvé seulement les données de la station de Foum Zaabel.

- La température moyenne annuelle

D'après les données collectées au niveau de la station de Foum Zaabel, la température moyenne annuelle maximale est de 20°C et est enregistrée en 1990, 1999 et 2003 (**Fig.22**). La température moyenne annuelle minimale est de 17°C et est enregistrée en 1989, 1992 et 2008.

Concernant les températures, la zone d'étude est caractérisée par des hivers froids (T min : de 0° à 5°C) en janvier et des étés chauds (T max : de 31° à 38.3°) C° en Juillet.

Les températures moyennes annuelles sont relativement élevées et présentent de très importantes variations saisonnières avec un été très chaud et un hiver très froid. Elles varient de 18 à 25 °C (moyenne des maxima : 35 °C en juillet/Août ; Celle des minima : -3°C en Janvier). Étant une zone montagneuse, la grêle, la gelée et la neige sont fréquentes occasionnant souvent des pertes importantes de production, en arboriculture notamment.

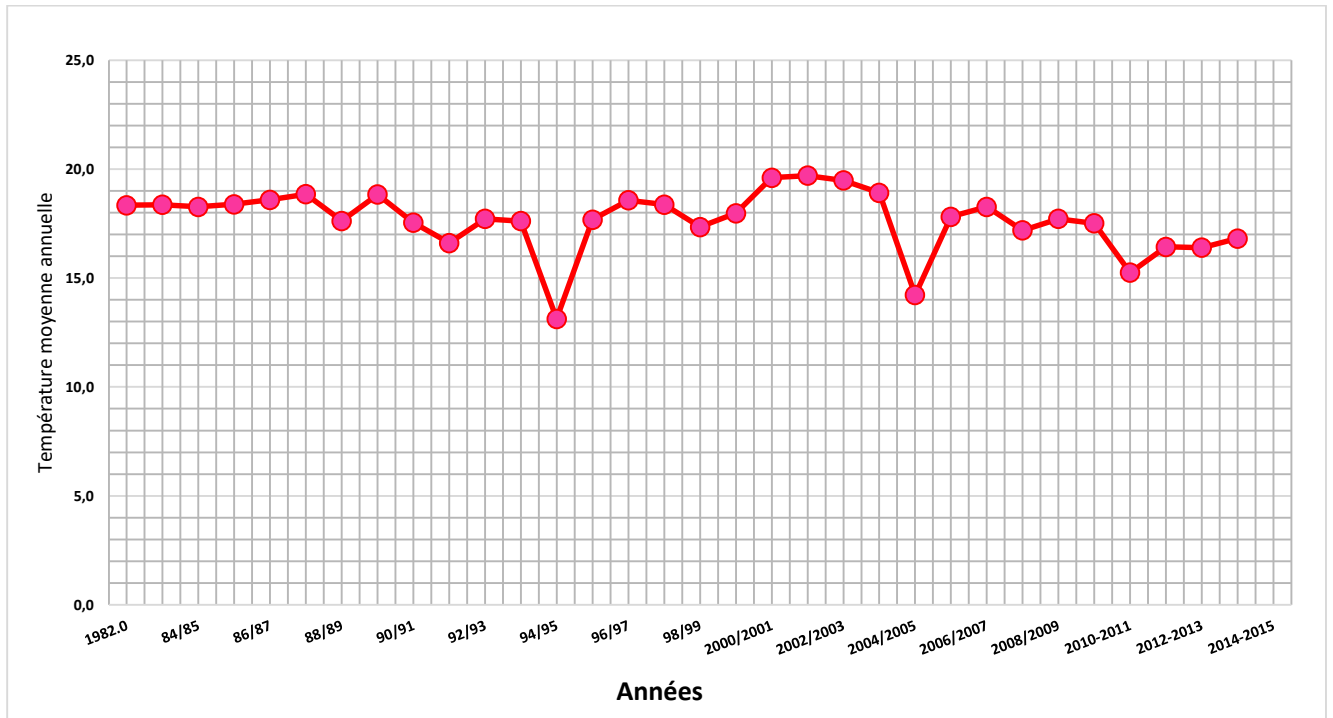


Figure 22 : Températures moyennes annuelles de la station Fom Zaabel (1983-2013)

- La température moyenne mensuelle

Le diagramme ci-dessous (Fig. 23) illustre que les mois les plus froids sont les mois de Décembre, Janvier, Février et Mars où la température atteint une moyenne minimum de 10.6°C. Tandis que les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre forment la période sèche où la température moyenne maximale peut atteindre 27°C.

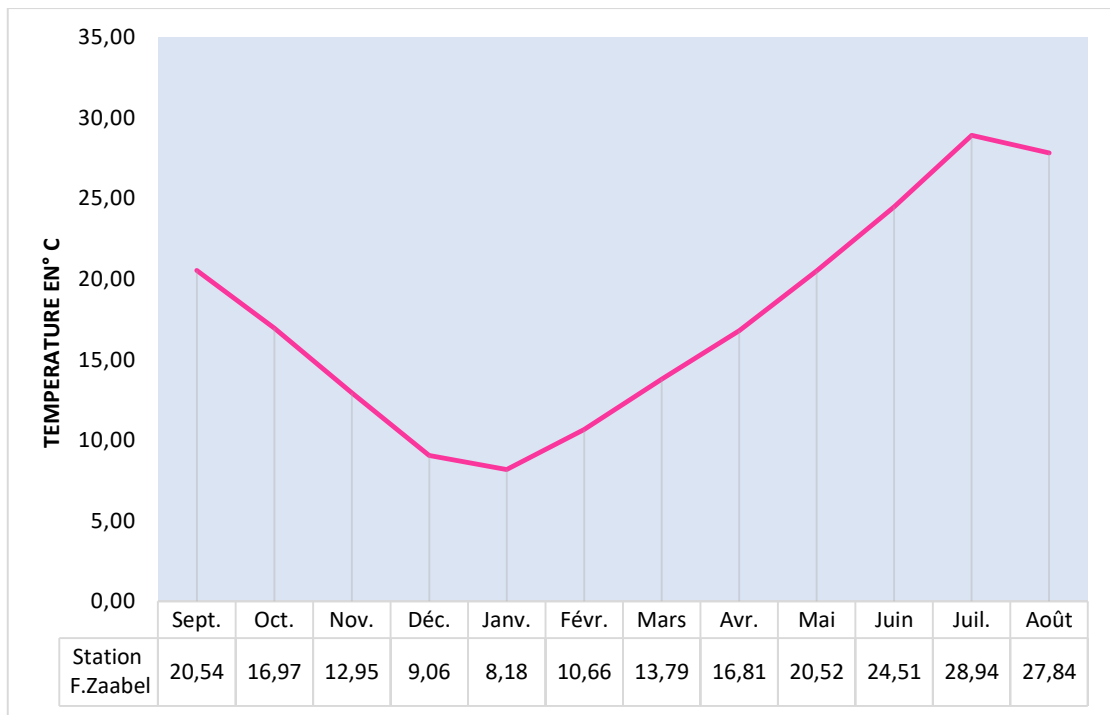


Figure 23 : Température moyenne Mensuelle de la station Fom Zaabel (1983-2013)

### c. Diagramme Ombrothermique

Le diagramme Ombrothermique de Gausson a pour objet de déterminer les mois secs et les mois humides de l'année. Il définit la période humide comme étant celle où les précipitations mensuelles dépassent le double des températures mensuelles, tandis que la période sèche est celle où le double des températures mensuelles dépasse les précipitations mensuelles.

Au niveau de la station Fom Zaabel, le diagramme de Gausson (**Fig. 24**) montre que la période humide débute en fin de Septembre et finit en Janvier, alors que la saison sèche commence en Février et termine en Septembre.

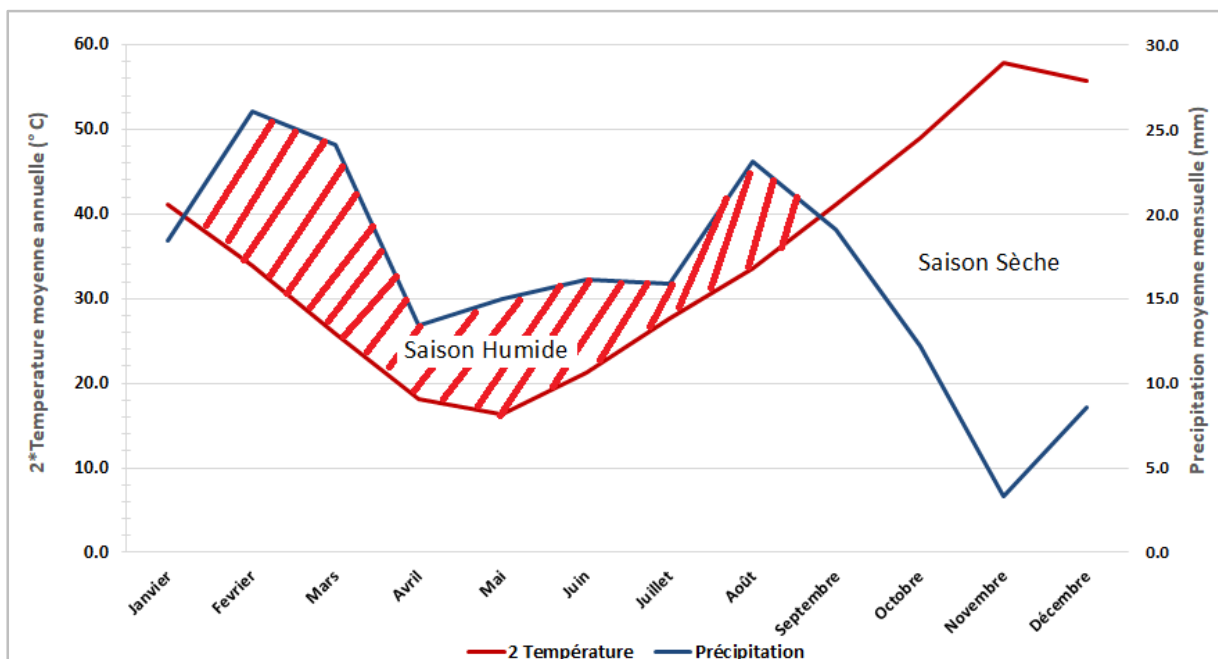


Figure 24 : Diagramme ombrothermique de Gausson de la station Fom Zaabel

## d. Estimation de l'évaporation

L'évaporation est un élément contrôlant le processus de cycle hydrologique. Son étude permet de savoir le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin donné. L'eau s'évapore de toutes les étendues d'eau depuis la simple flaque jusqu'aux océans. On parle alors du phénomène d'évaporation. Cependant l'eau peut aussi s'évaporer de la végétation, c'est l'évapotranspiration.

Cette dernière regroupe deux types d'évapotranspiration qui est réelle le (ETR) et potentiel le (ETP).

- **Evapotranspiration potentielle ETP (Fig.25)**

L'Evapotranspiration potentielle, est définie comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau. Pour calculer ETP et la mettre en valeur, Thornthwaite (1948) (Thornthwaite, 1948) a pu établir une équation qui se base sur la température moyenne mensuelle :

$$ETP = 16 * \left( \frac{10+T}{I} \right)^\alpha$$

Avec,

ETP : L'évapotranspiration de référence ou évapotranspiration potentielle (mm).

T : La température moyenne mensuelle (°C).

I : La somme des indices mensuels (i) de l'année,  $i = (T/5)1.514$ ,  $i = 88.58^\circ\text{C}$

$\alpha : \alpha = (1.6 I/100) + 0.5$ ,  $\alpha = 1.917$

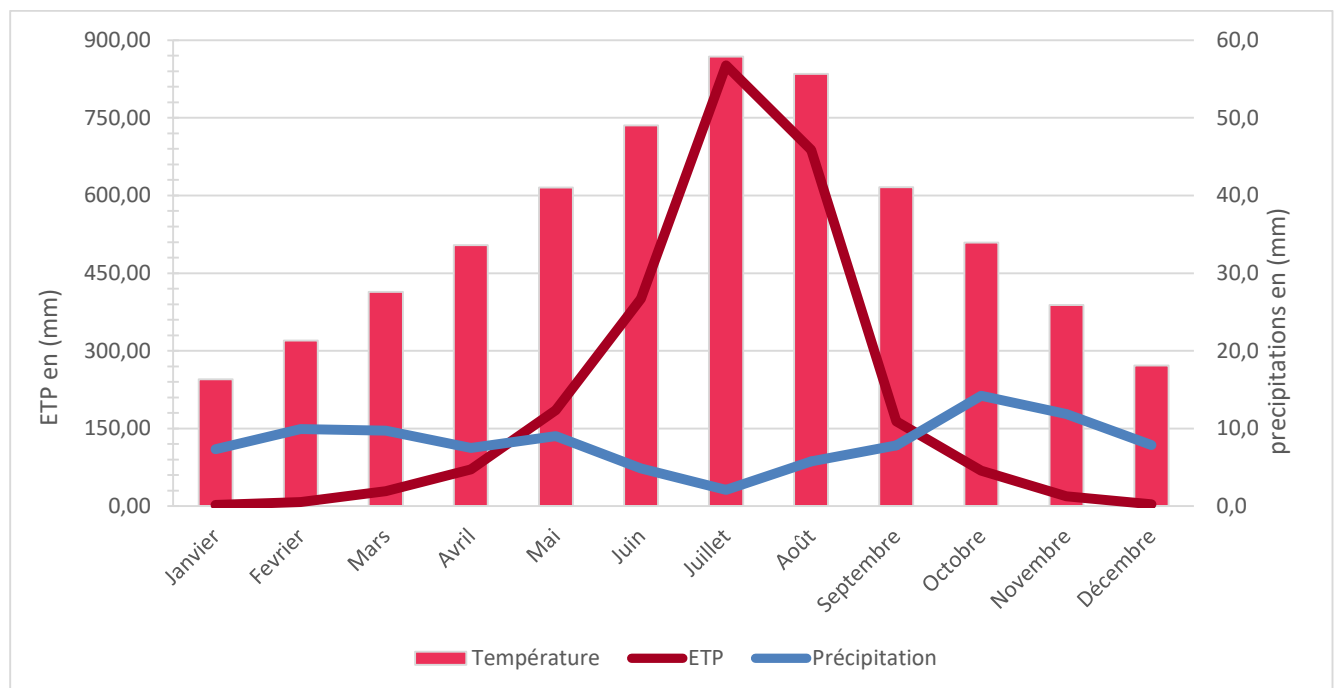


Figure 25 : Variation de l'ETP en fonction de la T° et P (Foum Zaabel)

Tableau 8 : Variation de l'ETP en fonction de la T° et P (Foum Zaabel)

Mois	Jan	Fév	Ma	Av	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
T°	16,4	21,3	27,6	33,6	41,0	49,0	57,9	55,7	41,1	33,9	25,9	18,1
k	0,92	0,88	1,03	1,07	1,16	1,15	1,18	1,13	1,02	0,99	0,90	0,90
i	6,02	8,98	13,27	17,91	24,22	31,69	40,75	38,43	24,25	18,17	12,06	7,02
ETP	2,61	7,96	28,84	71,38	185,47	400,48	851,44	687,95	163,71	68,88	19,11	3,99
P	7,3	9,9	9,7	7,5	9,0	4,9	2,1	5,8	7,8	14,2	11,9	7,9

- Evapotranspiration réelle ETR

L'ETR est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour calculer l'ETR, parmi lesquelles la formule de Turc et la formule de Coutagne (Coutagne, 1935), ces formules sont basées sur la température et la hauteur des précipitations moyennes annuelles ou mensuelles. Pour notre étude concernant le bassin du Haut Ziz, on va utiliser la méthode de Turc et la méthode de Thornthwaite.

#### Méthode de Turc

La formule est écrite comme la suit :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec,

ETR : évapotranspiration réelle annuelle (mm)

P : hauteur de précipitation annuelle (mm)

$$L=300+25T+0.05T^3$$

Où T Est la température moyenne annuelle (°C).

Pour la station de Zaouiate Sidi Hamza (1983 -2015), la T= 17.3 °C, P=96mm et L=1000.468

Donc ETR =100.22 mm

- L'étude de bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite

Pour la détermination du bilan hydrique du sol, nous avons utilisé la méthode du bilan de Thornthwaite. Cette méthode nous permet d'estimer la réserve en eau facilement utilisable exprimée en millimètre de hauteur d'eau. La quantité d'eau maximum emmagasinée par le sol dépend pour sa saturation, de la nature, de la composition lithologique, de l'épaisseur de la couche superficielle du terrain et du climat. Thornthwaite a admis que le sol est saturé quand il a absorbé une lame d'eau équivalente à une précipitation de 100 mm. Dans les zones arides et semi-arides. Cette valeur maximum peut être ramenée à 50 mm du fait que le sol n'est pas toujours saturé. (Archambaut, 1975).

L'utilisation des différents paramètres hydro-climatiques calculés, auparavant, permet de fournir une base de données nécessaire pour le calcul de l'ETR par la méthode de Thornthwaite. Cette méthode est basée sur la notion RFU qui est définie comme étant la réserve en eau facilement utilisable et qui dépend de la saturation du sol et des précipitations.

La zone en question est considérée comme une région qu'a un climat aride à semi-aride, alors on peut admettre la hauteur d'eau emmagasinée dans le sol du bassin du Haut Ziz est de 50mm au maximum.

Pour calculer l'ETR par cette méthode, on doit prendre en considération les équations suivantes :

- Si  $(P + RFU) \geq ETP$  ----- ETR = ETP
- Si  $(P + RFU) \leq ETP$  ----- ETR = P + RFU

Le tableau suivant (Tab.9) illustre les principaux résultats liés à la station de Zaouiate Sidi Hamza

Tableau 9 : Calcul de l'ETR par la méthode de Thornthwaite (1961-2009)

Mois	Janv	Fév	Mar s	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T°C	16,4	21,3	27,6	33,6	41,0	49,0	57,9	55,7	41,1	33,9	25,9	18,1
ETP (mm)	147,7	61,2	21,9	4,7	3,3	10,4	33,0	75,4	163,1	344,8	649,4	547,9
P (mm)	7,3	9,9	9,7	7,5	9,0	4,9	2,1	5,8	7,8	14,2	11,9	7,9
ETR (mm)	7,3	8,0	9,7	4,7	3,3	4,9	2,1	5,8	7,8	14,2	11,9	7,9
P-ETP	-140,3	-51,3	-12,2	2,8	5,8	-5,5	-30,9	-69,6	-155,3	-330,5	-637,5	-540,1
RFU	0,0	0,0	0,0	2,8	8,5	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Les conditions climatiques du bassin versant influencent directement sur le bilan hydrologique par les changements des paramètres climatiques tels que la précipitation, température et l'évaporation.

L'étude de ces paramètres climatiques a permis de donner des précisions sur les différents processus hydrologiques dans le bassin versant du Haut Ziz. Elle sera d'une grande utilité pour connaître les différents paramètres entrants dans le bilan hydrique du secteur d'étude.

- Calcul de l'ETR moyenne annuelle

Après avoir calculé l'ETR moyenne mensuelle (Fig.26), en utilisant les deux méthodes, on peut évaluer l'ETR moyenne annuelle par la somme des ETR mensuelles, le tableau suivant résume les résultats de l'ETR annuelle (**Tab. 10**).



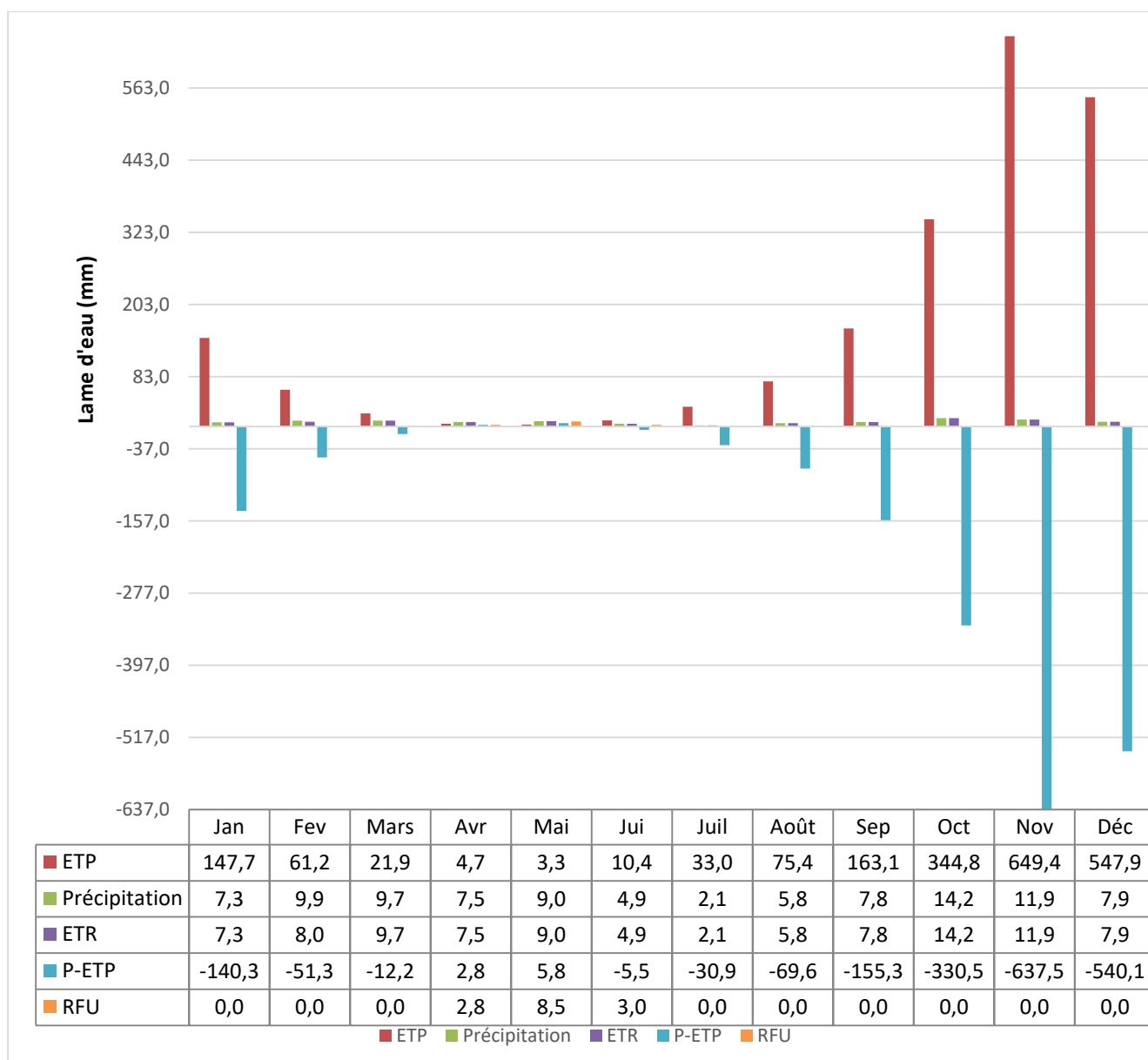


Figure 26 :Variation mensuelle des différents paramètres du bilan hydrique (Station Foug Zaabel)

Tableau 10: Les résultats de l'ETR annuelle (Station Foug Zaabel)

Méthode	Turc	Thornthwaite	Moyenne
ETR (mm)	100.22	96.1	98.16

Le calcul de l'ETR par l'utilisation des deux méthodes de Turc et de Thornthwaite ,a permis d'avoir des données sur les caractéristiques du climat du bassin versant du Haut Ziz, selon les données présentées, on peut classer le climat de la région en question ,en un climat semi-aride à aride, l'ETR calculée a une valeur de 98.16 mm, effectivement qui est une valeur supérieure à celle des précipitations moyennes annuelles qui est de 96 mm. De ca fait, il ne s'agit pas d'une alimentation des nappes souterraines mais plutôt de l'alimentation du ruissellement superficiel, il s'agit donc un déficit.

#### e. L'humidité relative

L'humidité relative affichée au niveau de Sidi Aayad, M'Zizel, Zaouiate Sidi Hamza et Foug Zaabel (ABH-GZR, 2011)varie selon les périodes :

- Période hivernale : HR varie de 30 à 100 %
- Période estivale : HR varie de 0 à 5 %

En général l'humidité relative, la plus élevée, est enregistrée pendant les mois de décembre et janvier, tandis que l'humidité relative, la plus faible, est enregistrée au cours des mois de juin, juillet et août.

#### f. Le vent

Les saisons les plus venteuses de l'année sont le début de l'été et l'automne. Les directions dominantes sont respectivement Sud Est vers le Nord et de Nord-Ouest vers le Sud Est.

Parfois, ces vents occasionnent les pertes énormes sur l'arboriculture en faisant chuter la production.

Les vents violents chauds sud-Est-Ouest, Sud-ouest et Sud-Sud-est. La vitesse moyenne du vent enregistrée au niveau de la station de Fom Zaabel est de l'ordre de 2.42 m/s (ABH-GZR, 2011).

### VIII. Cadre socio-économique

Les statistiques du (HCP, 1994) et (HCP, 2004), donnent un aperçu sur l'évolution de la population dans les principales communes qui constituent le secteur d'étude (**Tab.11**). La taille moyenne des ménages est d'environ 6 personnes. Elle traduit le profil d'une population en transition lente du mode de vie rural vers une structure de ménages citadins. En tenant compte de l'évolution de l'environnement immédiat du centre et des mutations auxquelles il assiste ces dernières années, le centre est appelé à connaître un rythme d'accroissement significatif.

Tableau 11 : La population des communes du bassin versant du Haut Ziz (d'après (HCP, 1994) et (HCP, 2004))

Commune	Pop 1994	Ménages 1994	Pop 2004	Ménages 2004	TAIM (%) (1994-2004)	Taille moyenne des ménages
Errich (Centre)	13952	2577	20155	4002	3,75	5,04
M'Zizel	6309	963	6443	1062	0,21	6,06
Sidi Ayyad	6372	980	7424	1235	1,54	6,01
Zaouiate Sidi Hamza	6624	1024	4595	711	-3,59	6,46
N'Zala	3675	644	5186	869	3,50	5,97
Amougger	4787	741	5119	779	0,67	6,57
Ayt Yahya	4219	672	4455	713	0,55	6,25
Outerbat	993	6137	1041	0,40	5,89	5898

L'activité économique de la zone d'étude repose essentiellement sur l'agriculture, l'élevage et la production de produits laitiers. Les autres activités économiques, comptent quelques implantations reliées au commerce de la route (commerce alimentaire, besoins quotidiens de la population). Le souk s'installe une fois par semaine.

Malgré les rendements faibles et la pratique de certaines cultures peu rentables (céréales), les populations considèrent que l'agriculture est la première activité en termes de temps investi.

## **Chapitre 2**

# **Analyse par Télédétection de l'impact de la fracturation sur l'architecture du réseau hydrographique dans le bassin versant du Haut Ziz**

## I. Introduction

En hydrologie et en hydrogéologie, la cartographie des structures tectoniques (failles, et contacts géologiques, plis, etc.), a un rôle très important. Ces structures favorisent la circulation des eaux, et attribuent à emmagasiner ou facilite l'écoulement vers l'exutoire. Plusieurs études montrent que les fractures sont à l'origine de la formation des nappes souterraines en milieux de socle fissuré et constituent les zones par excellence de l'écoulement des eaux (Saley, 2003 ;Jourda, 2005 ;Youan, 2008 ; Nouayti, 2017).

Elles se représentent sous forme des traits linéaires simples ou composés, décelés en surface, nommées des linéaments, ils s'associent à des éléments structuraux comme les failles, les fractures, les axes de plis et les contacts lithologiques. Ils se traduisent par des dépressions topographiques, par le réseau hydrographique et par des limites de végétation. (Yatabe, 1984 ;Soesilo, 1986 ;Oubbih, 2015).

Les linéaments et les fractures sont parmi les paramètres déterminants qui guident la circulation des eaux par l'accélération de l'érosion et l'altération. En effet, le réseau hydrographique emprunte souvent les zones de faiblesses afin de minimiser l'énergie nécessaire à son écoulement (Deffontaines, 1990).

La cartographie des linéaments et des fractures est notamment très importante dans le domaine de l'hydrologie surtout pour la gestion des eaux souterraines et superficielles et l'orientation de la circulation de ces dernières. L'avènement des satellites d'observation a grandement facilité le travail des cartographes qui disposent maintenant d'une vue très globale de la surface de la terre. La détection et l'extraction des linéaments par télédétection sur des images satellitaires peuvent être divisées en trois catégories (Katsuaki, 1995 ;Walsh, 2000) :

- Le rehaussement de la qualité de l'image et l'extraction des linéaments après caractérisation de la structure géologique.
- La cartographie géologique basée sur la classification d'image et la détection, par utilisation de la signature spectrale, des anomalies attribuables à la minéralisation ;
- L'utilisation d'un système d'information géographique pour superposer les résultats des traitements des images satellitaires à des bases de données géologiques, géophysiques et géochimiques.

## II. Exploitation des images de télédétection

La cartographie des linéaments et des fractures au niveau du bassin versant du Haut Ziz est réalisée à partir d'images Landsat 8 OLI. Cette image est acquise le 8 juillet 2018 en saison sèche sans couverture nuageuse. Ceci est réalisé dans l'objectif de quantifier l'influence directionnelle de ces linéaments sur l'écoulement du réseau hydrographique, sur l'orientation de la circulation des eaux de surface et sur le stockage des eaux souterraines.

Les différents prétraitements et traitements ont été exécutés au moyen du logiciel ENVI 5.3. L'extraction automatique des linéaments est réalisée à travers le module LINE du logiciel PCI Geomatica. Enfin, le logiciel ArcGIS a servi à extraire les paramètres statistiques des linéaments (nombre et longueur). Les rosaces directionnelles ont été extraites par le logiciel RockWorks 2016.

Une phase préliminaire au traitement des images Landsat 8 OLI a consisté en la création d'une mosaïque des trois scènes préalablement corrigées radiométriquement et géométriquement (points de calage relevés sur les bandes OLI) (**Fig. 27**). Cette étape est suivie par des traitements spécifiques (amélioration des contrastes, Analyse en Composantes Principales) et des combinaisons de bandes et filtres directionnels favorisant l'identification des linéaments.

La méthode que nous avons adoptée, pour extraire les linéaments, est basée dans un premier temps sur le rehaussement de la qualité de l'image, par application de l'Analyse en Composante Principale (ACP) (**Fig.28**). Ensuite, nous avons appliqué les filtres directionnels de Sobel sur l'image traitée par la méthode ACP.

L'ACP est une technique efficace basée sur des analyses statistiques et changement de référentiel, qui permet d'accentuer une image multi-spectrale pour des interprétations fines (Biémi, 1992) . Elle permet de réduire l'information contenue dans plusieurs bandes, parfois hautement corrélées en un nombre plus restreint de composantes. Les traitements et filtrages ont eu pour effet d'accentuer et de faciliter la détection des discontinuités-images, permettant ainsi leur levé par simple observation visuelle. Seuls les linéaments d'origine structurale ont un intérêt dans cette étude.

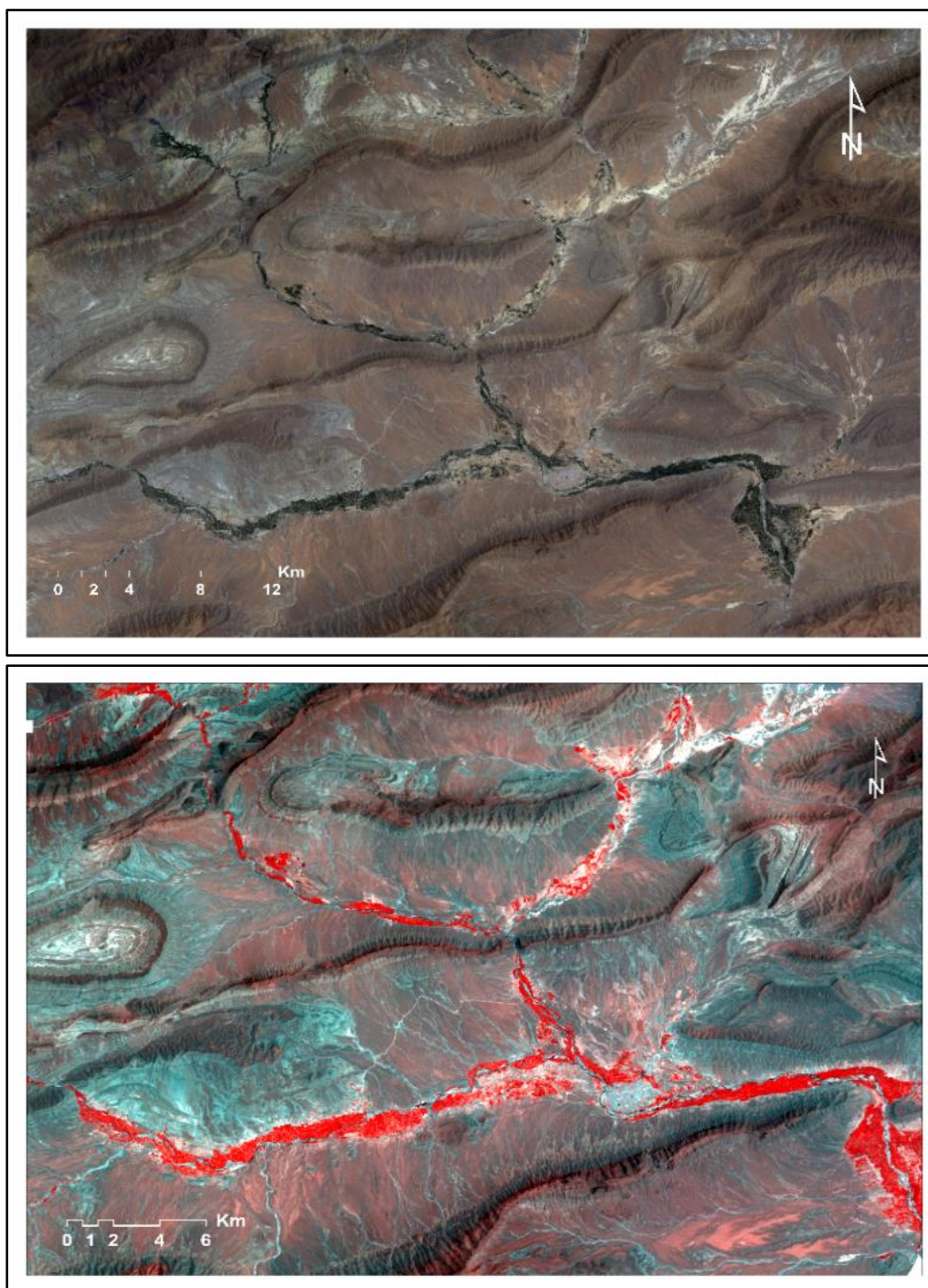


Figure 27 : Résultats après la correction radiométrique et la réflectance atmosphérique de l'image Landsat 8 OLI centrée sur la région d'Erich



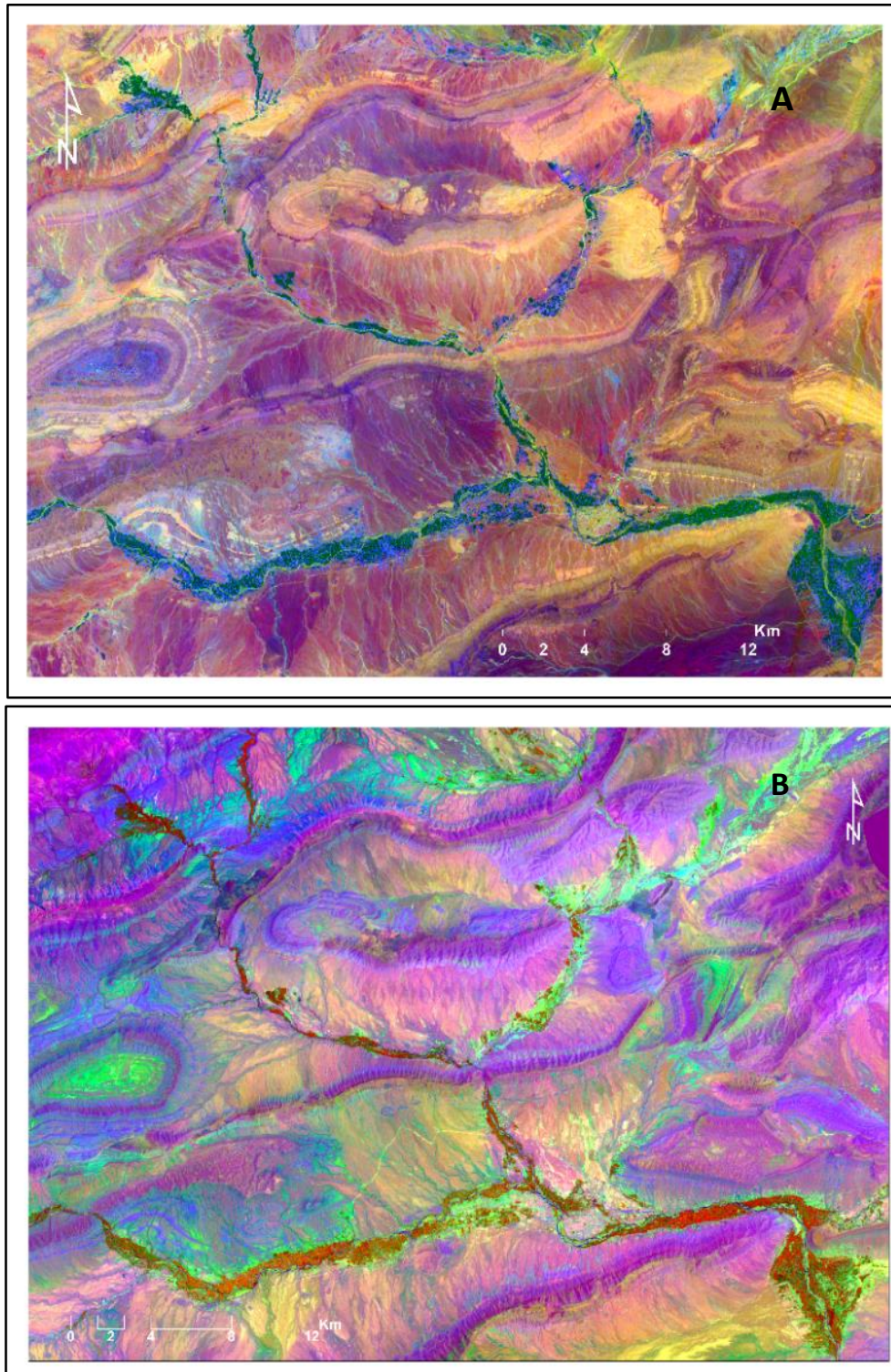


Figure 28: (A) Compositions colorées à partir des trois premières bandes de l'ACP : CP1, CP2, et CP3 (B) La composition fausse colorée de l'image Landsat 8 OLI

### III. Extraction des linéaments

L'extraction des linéaments à l'aide de l'algorithme LINE du logiciel PCI Geomatica s'effectue sur une seule bande spectrale et génère des polygones et segments. Ces derniers peuvent correspondre à des lignes de cours ou de partage des eaux, des routes, pistes, des limites de forêt et de surfaces cultivées ou des structures tectoniques. La validation de ces structures à partir de cartes géologiques ou sur le terrain nous conduit ensuite par extrapolation à accorder une valeur structurale à l'ensemble de nos

linéaments et à passer de l'usage du terme de linéament à celui de fractures et de failles. **La figure 29** est une carte de synthèse des linéaments obtenus à partir des traitements sur les images Landsat.

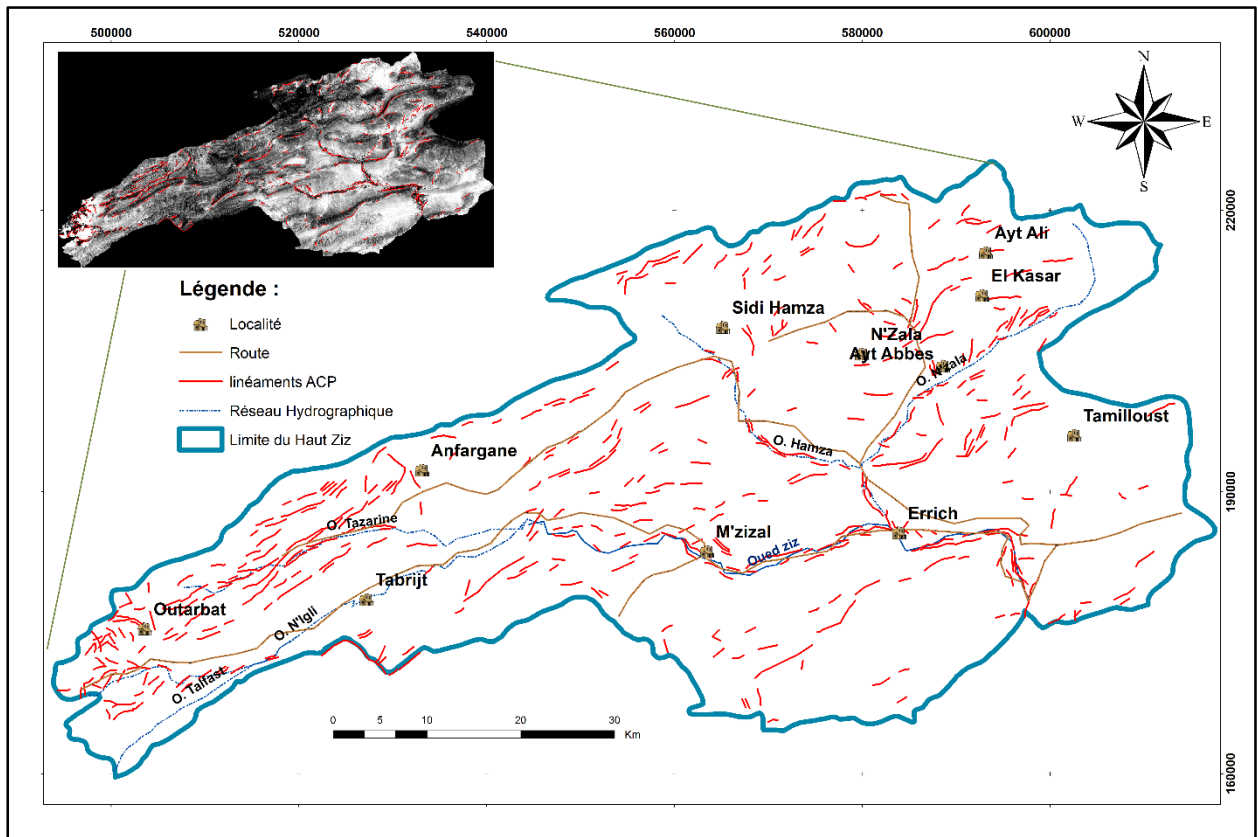


Figure 29: Résultats de l'extraction des linéaments à partir d'image Landsat 8 OLI

### 1. Rehaussement des linéaments par filtrage

Le rehaussement de ces linéaments par filtrage consiste à mettre en évidence ces deux caractéristiques dans l'image. Pour ce faire, on utilise des techniques dites de filtrage qui permettent d'éliminer toutes les données non utiles (bruit) qui masquent l'information recherchée contenue dans l'image.

Les techniques de filtrage utilisées en télédétection, il s'agit deux types : le filtrage spatial et le filtrage directionnel (Tassine, 2014).

- le filtrage spatial par convolution permet d'attribuer à chacun d'eux une valeur numérique différente de la valeur originale tout en tenant compte des valeurs des pixels voisins. Ce changement de valeur du pixel central est égal à la somme des produits de la valeur du pixel multiplié par la valeur de l'élément correspondant dans la matrice, divisé par le nombre d'éléments ;
- le filtrage directionnel fait en sorte que l'image est éclairée par une source de lumière rasante et provoque un effet optique d'ombre sur elle (Marrion, 1987), ce qui permet la mise en relief des structures linéaires.

Les linéaments mis en évidence par ces techniques de filtrages sont perpendiculaires à la direction du filtre donné. Ainsi, les filtres de direction N-S, par exemple, permettent le rehaussement des linéaments E-W.

Dans notre étude, nous avons adopté des filtres directionnels dans le but de détecter et cartographier le maximum de structures linéaires, il s'agit des filtres selon les directions N-S, NE-SW, E-W et NW-SE.

## **2. Analyse des directions préférentielles et validation des linéaments :**

Le traitement et l'interprétation des images satellitaires ont une grande importance dans l'établissement des cartes structurales pour vérifier la qualité de ces résultats, nous avons confronté les linéaments obtenus par traitement d'image avec les failles de la carte géologique (**Fig.30**). On y voit que les principaux réseaux de fractures représentés sur cette carte ont été détectés, surtout le long des Oueds et leurs affluents.

On constate que les linéaments détectés par chaque filtre sont dominés majoritairement par sa direction principale. La somme de tous les linéaments obtenus selon ces directions est représentée sur **la figure 29** qui montre la dominance de la direction NE-SW. Les linéaments totaux étant la somme des linéaments obtenus par les deux techniques LINE et PCI. On y voit la dominance de la direction NE-SW.

C'est dans ce cadre que nous avons effectué une tentative d'élaboration d'une carte des linéaments du bassin versant du Haut Ziz. La corrélation des résultats avec les différents ordres du réseau hydrographique nous a permis de dégager les effets potentiels de chaque famille de failles sur les orientations de la circulation des eaux de surface.



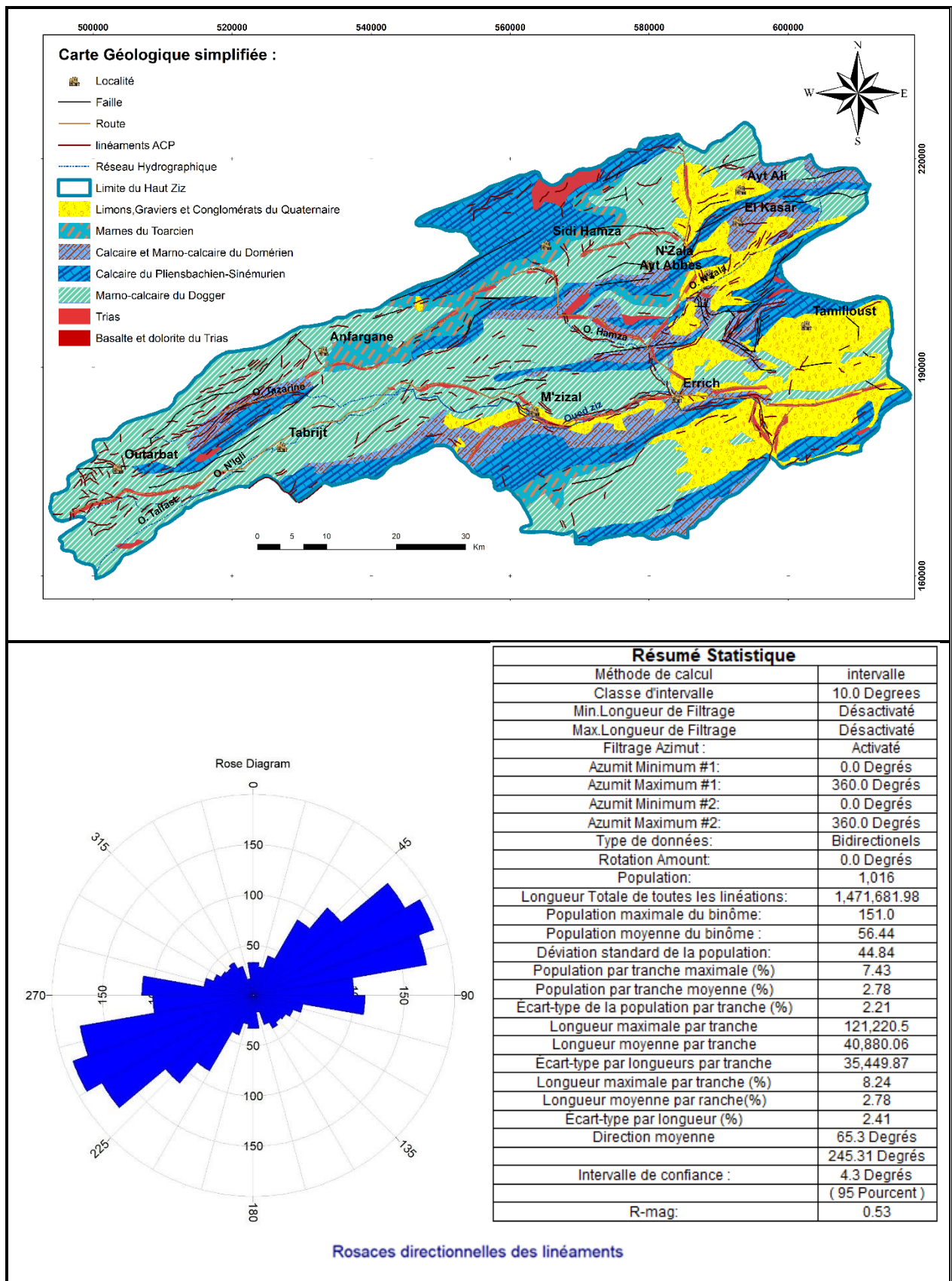


Figure 30: Carte de synthèse des linéaments au niveau du bassin versant du Haut Ziz

L'analyse de l'orientation des fractures a montré que les rosaces directionnelles des longueurs cumulées des linéaments illustrés à la figure 31 B indiquent une certaine homogénéité des directions des linéaments et une prépondérance de 90% des fractures de direction NE-SW. Pour les directions N45 à N0 qui ont des fréquences inférieures à 10 % sont moins significatives. Ces orientations semblent

traduire un bruit de fond qui résulte de la variabilité de chaque famille mais aussi des contacts géologiques qui peuvent être confondus avec des fractures.

La superposition du réseau hydrographique et une comparaison des résultats aux travaux antérieurs, ont permis la validation des fractures obtenues.

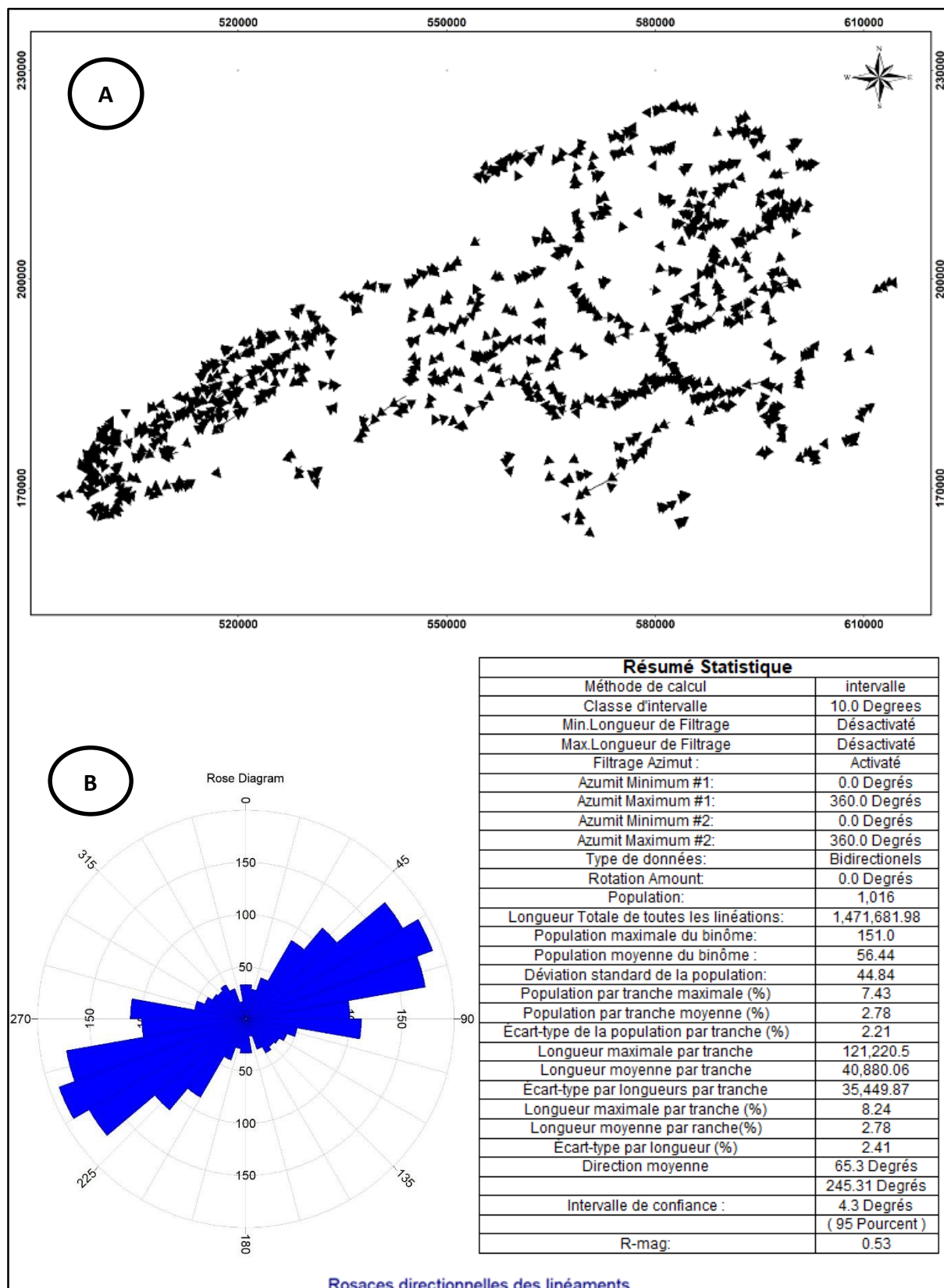


Figure 31: (A) Flèches des longueurs cumulées des linéaments. (B) Les rosaces directionnelles des longueurs cumulées des linéaments

### 3. Analyse et interprétation des Linéaments

Lors de l'extraction des linéaments on constate l'existence de discontinuités qui correspondent soit à des fractures montrant un décalage entre les formations géologiques ou des prolongements des failles représentées sur la carte existante, soit à un contact anormal entre deux formations géologiques différentes sans décalage. La figure 30 représente la carte structurale regroupant tout le réseau de fractures nouvelles, cartographiées de la région. Pour faire cette analyse spatiale, on a découpé l'image en une grille constituée de cellules de 8 km par 8 km de côté. Ce qui nous permettra d'apprécier à un niveau plus petit la variation du nombre des linéaments d'une part, et la variation de leur densité d'entrecroisements d'autre part.

#### a. Variation du nombre de linéaments

Nous avons analysé la variation du nombre de linéaments sur l'image entière. Les résultats obtenus donnent une moyenne de 1072 linéaments. On constate que cette variation du nombre d'éléments augmente au fur et à mesure que l'on passe de l'Ouest et du Nord vers le Sud et Sud-Est du bassin versant (vers l'exutoire du bassin versant du Haut Ziz (**Fig. 31**), dû à la topographie qui se caractérise par une pente généralement orientée vers le NE et qui a un impact sur la direction des flux, ainsi que la géologie ou bien la structure géologique de la zone d'étude.

#### b. Variation de la densité d'entrecroisements

La variation de la densité d'entrecroisements prend presque la même variation du nombre de linéaments. Il devient de plus en plus important quand on passe de la partie Ouest-Sud-Ouest et du Centre du bassin Versant vers le Sud (**Fig.32**), Les très faibles densités occupent Nord-Ouest et le Nord du bassin versant, En raison des structures géologiques, la topographie ainsi que la présence de pentes généralement dirigées vers le SW et du Nord vers le Sud du bassin versant du Haut Ziz. Ce qui favorise l'écoulement d'eau vers l'exutoire.

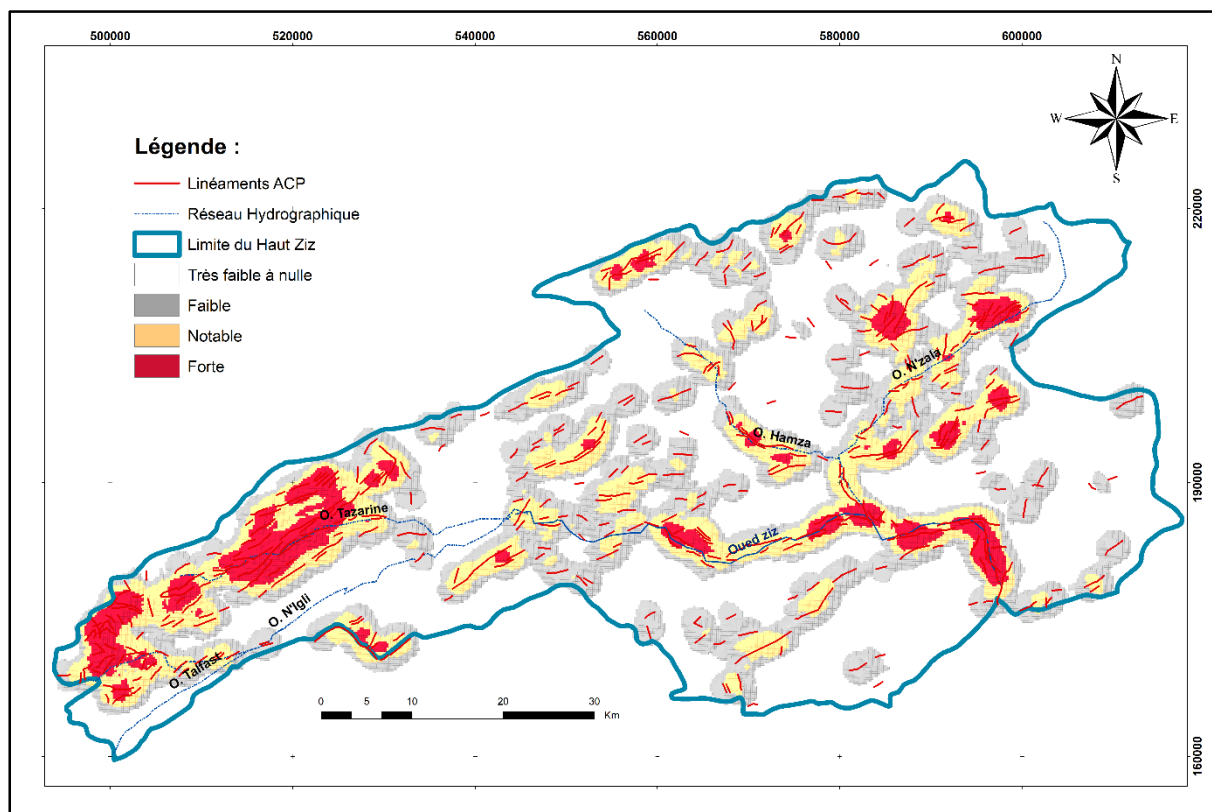


Figure 32: Carte de la densité d'entrecroisements des linéaments du bassin versant du Haut Ziz

#### 4. Confrontation du réseau hydrographique avec les linéaments

La confrontation du réseau hydrographique avec des linéaments a permis d'établir des liens génétiques entre les orientations des failles et les principales directions de circulation des eaux de surface (**Fig. 30 et 31**). L'analyse de l'image satellitaire a montré la dominance de la direction NE-SW avec 90% de linéaments recensés, a permis aussi d'illustrer les relations spatiales et directionnelles qui existent entre ces différents éléments et d'évaluer l'impact ou l'influence de ces linéaments sur l'écoulement et le stockage des eaux superficielles. Cette étude vise également de réaliser une carte de la géométrie des structures qui complète les travaux anciens réalisés dans la zone.

Dans le cas de notre bassin, la longueur totale des cours d'eau est de 190.9 km. Ces cours d'eau drainent des sous-bassins versants de 4001.3 km<sup>2</sup> de superficie. Il est classé selon la classification de (Strahler, 1952) en Sept grand ordre (de l'ordre 1 jusqu'à 7) auxquels se réunissent tous les affluents (Oued Ziz) selon les différentes directions. Les ordres 5, 6 et 7 présentent une nette dominance des directions NE-SW, alors que les autres ordres apparaissent. Ceci a un impact sur la répartition du réseau hydrographique total qui est dominé par les directions NE-SW et N-S.

Cette orientation est celle des principaux ensembles lithologiques (Cailleux, 1978; Tahiri, 1991 ; Oubbih, 2015). Son influence est perceptible sur l'ensemble du réseau hydrographique notamment sur les affluents d'ordres 5, 6 et 7 illustrés à la figure 33. Presque tous ces cours d'eau d'ordre 5, 6 et 7 suivent les linéaments, en raison de la topographie de la région et en raison aussi de la présence de pentes généralement dirigées vers le SW et du Nord vers le Sud du bassin versant du Haut Ziz. Ceci favorise l'écoulement d'eau vers l'exutoire.

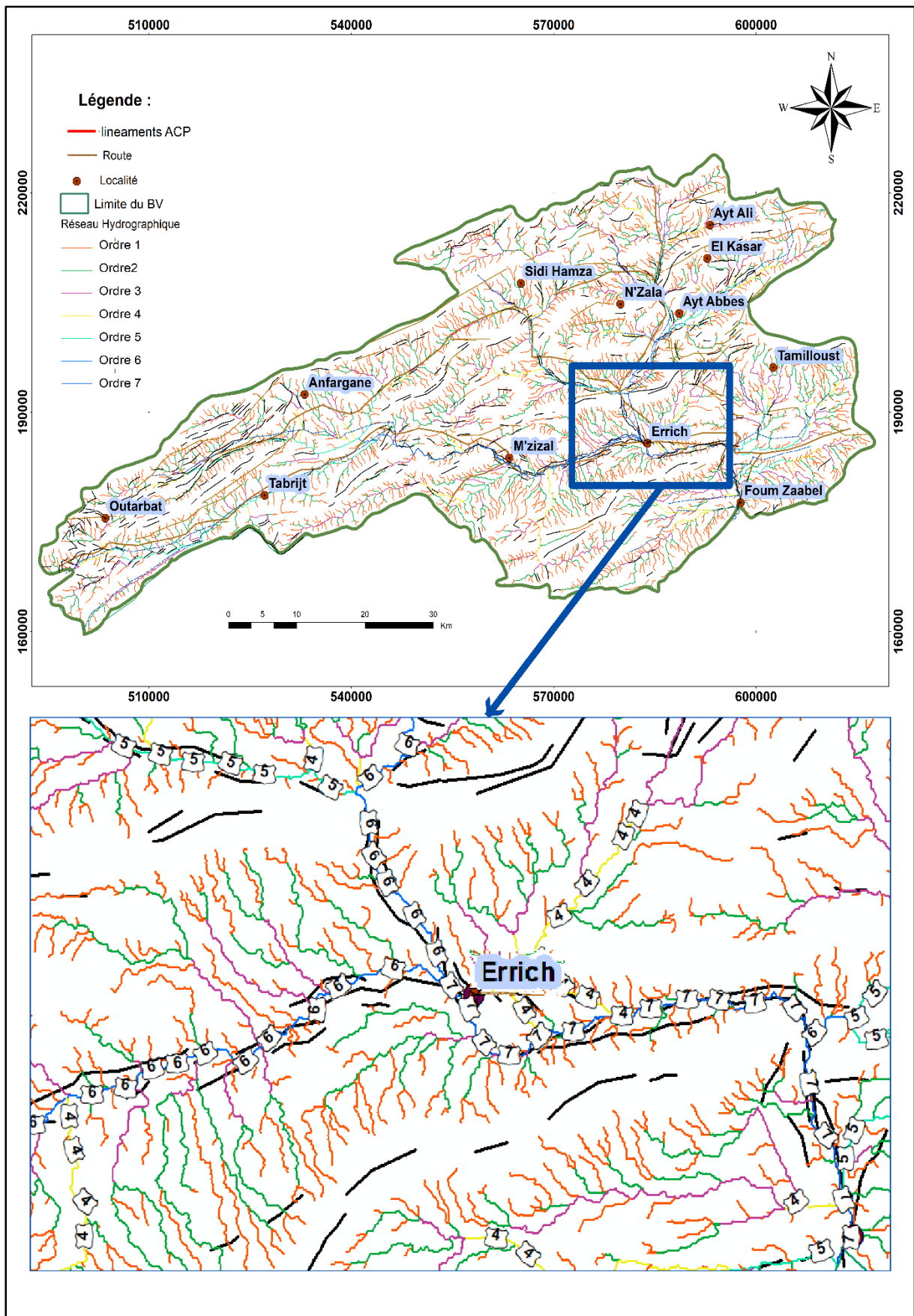


Figure 33: Confrontation du réseau hydrographique avec les linéaments du bassin versant du Haut Ziz.



#### IV. Conclusion :

Après l'analyse de l'image satellitaire Landast 8 Oli, et l'extraction de réseau de linéaments, sa superposition et sa confrontation avec le réseau hydrographique du bassin versant du Haut Ziz a été cartographié. Elle permet d'illustrer les relations spatiales et directionnelles qui existent entre ces différents éléments et d'évaluer l'impact ou l'influence de ces linéaments sur l'écoulement et le stockage des eaux superficielles.

Cette étude a visé également à produire une carte géométrique des structures qui complète les anciens travaux effectués sur la région, par des analyses statistiques des linéaments à l'aide de la rose directionnelle. Celle-ci montre une répartition particulière de l'orientation des linéaments selon la direction NE-SW. Avec une fréquence de 90%, concernant la densité, le nombre et la continuité de ces linéaments obtenus ont montré leur influence sur la direction des écoulements des eaux de surface par deux paramètres principaux :

- La topographie qui se caractérise par une pente généralement orientée vers le NE et qui a un impact sur la direction des flux.
- Et la géologie ou bien la structure géologique de notre zone d'étude.

On ne constate que certains linéaments coïncidents avec des fractures géologiques (failles). Leur comparaison avec le réseau hydrographique montre que la majorité des rivières suivent les directions NE-SW (celle des linéaments) ce qui explique qu'elles sont influencées par ces structures géologiques. D'autres linéaments coïncident avec les fractures géologiques existant sur le terrain (failles).

L'analyse statistique des linéaments à l'aide des rosaces directionnelles a démontré une répartition particulière de l'orientation de ces derniers selon la direction préférentielle NE-SW avec 90 % de fréquence. La densité, le nombre et la continuité de ces linéaments obtenu dans notre cas, montre leur influence sur le sens d'écoulement des eaux superficielles vers l'exutoire par deux paramètres essentiels qui sont d'une part les structures géologiques, en particulier la fracturation, et d'autre part, la topographie caractérisée par des pentes généralement dirigées vers le NE. Leur confrontation avec le réseau hydrographique montre que la majorité des cours d'eau emprunte les directions NE-SW et sont influencés par les structures géologiques, notamment la fracturation. La topographie de la région possède aussi un impact sur les écoulements.

La fracturation paraît comme un bon indicateur de la répartition des ressources en eaux. Elle pourrait contribuer aux études de prospection des réserves en eau dans la région étudiée.

## **Chapitre 3**

# **Modélisation hydraulique et simulation des Crues de l'oued Zaouiate Sidi Hamza**

Ce chapitre a pour objectif la modélisation de crue d'un des sous-bassins du Haut Ziz. Il détaille les étapes de la modélisation hydraulique, la simulation des crues et se termine par une cartographie de l'aléa d'inondation dans le sous bassin de Zaouiate Sidi Hamza.

## I. Généralités

Les inondations sont des catastrophes naturelles : une inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau. Le risque inondation est la conséquence de deux composantes : l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement ou apparaître et l'homme qui s'installe dans la zone inondable pour y implanter toutes sortes de constructions, d'équipements et d'activités.

La crue est un terme hydrologique, désigne le dépassement d'un certain débit ou d'une certaine hauteur par un cours d'eau. C'est une phase du régime hydrologique d'un cours d'eau caractérisé par l'augmentation plus ou moins brutale du débit sous l'effet de facteurs extérieurs et maintenant ce débit au-dessus d'un seuil donné. L'élévation rapide du niveau d'eau peut produire non seulement le remplissage du lit mineur mais aussi la submersion du lit majeur (Guerbil, 2017). Cette hauteur d'eau peut être qualifiée en fonction de sa durée de retour : crue décennale pour une hauteur d'eau ou un débit qui a une chance sur dix de se produire chaque année.

Le terme inondation est d'acceptation plutôt topographique ou géomorphologique. Il désigne le débordement d'un cours d'eau de son lit mineur, mais aussi le remplissage d'une cuvette topographique par les eaux de ruissellement local. Ce type d'inondations pluviales se distingue par la vitesse de l'eau, le volume d'eau écoulé et la hauteur d'eau. Ces paramètres sont essentiels pour comprendre les dommages et instaurer des politiques de prévention efficaces.

Le phénomène des inondations au Maroc a commencé à être ressenti d'une façon plus accrue lors des deux dernières décennies (Memee, 2016 ; Memee, 2008), principalement en raison de l'occupation croissante des zones vulnérables d'une part et de l'aggravation des phénomènes extrêmes (sécheresse et crues) suite aux changements climatiques d'autre part engendrant de forts orages localisés à l'origine de crues rapides et violentes. Pour mémoire citons les événements marquants de :

- 1995 dans la vallée de l'Ourika,
- 1997 dans la région d'El Hajeb,
- 2002 dans les villes de Mohammédia et de Settat,
- 2003 dans les régions de Tan Tan, Nador, Al Hoceima et Khénifra,
- 2008 dans plusieurs régions du Maroc (Rif, oriental, région d'Er-Rachidia, Haouz, ...)
- 28 et 29 octobre 2019 la crue d'Oued Sakia El Hamra. Le volume des eaux stockées au niveau du barrage de Sakia El Hamra (d'une capacité de stockage de 110 Mm<sup>3</sup>) est passé de 7 Mm<sup>3</sup> à 203 Mm<sup>3</sup>, alors que le débit de pointe de la crue s'est établi à plus de 3.000 m<sup>3</sup>/s), largement au-dessus du seuil du "dimensionnement de l'ouvrage de l'Evacuateur des crues (410 m<sup>3</sup>/s).

## II. Etude hydrologique

L'objet de l'étude hydrologique est de définir les débits de pointe des crues de projet et vise principalement l'estimation des débits de pointe ( $Q_p$ ) à l'exutoire du bassin versant, pour des périodes de retour de 5, 10, 20, 50, 100 et de 500 ans et pour définir les crues de projet sous le double aspect du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue. Cette étude comprend principalement deux axes :

- Estimation des débits de pointe ( $Q_p$ ) à l'entrée des tronçons des cours d'eau étudiés, pour des périodes de retour allant de 5 à 500 ans.



- Détermination de la forme de l'hydrogramme des crues et par la même occasion, estimation des volumes de crues.

### 1. Analyse des données pluviométriques

Une analyse des pluies est réalisée à partir des données aux stations pluviométriques (**Tab. 12 et figure 12**), collectées au niveau de (ABH-GZR, 2011) et les services de la DPA et la DRE et Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification. Cette analyse permet de proposer des hiétoigrammes de projet pour le modèle pluie-débit sur chacun des sites étudiés et les pluies de référence.

Tableau 12: stations pluviométriques du Bassin versant du Haut Ziz (ABH-GZR, 2011)

Zone d'action	Station	NtIRE	Type_stati	Bassin	River	Coordonnées		
						X(m)	Y(m)	Z(m)
Haut Ziz	M'ZIZEL	1585/38	S. P	Ziz	Ziz	560000	185300	1441
	FOUM TILLICHT	1508/38	S. P	Ziz	Ziz	579850	192500	1400
	FOUM ZAABEL	867/48	S. P	Ziz	Ziz	597450	174650	1210
	Z. SIDI HAMZA	31/38	S. P	Ziz	SIDI HAMZA	564215	204361	3480

De l'examen des séries de la pluie journalière maximale (Tableau 13 et analyse au chapitre 1), on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les données de la station Zaouit Sidi Hamza sont parfois plus proches de celles enregistrées à la station de Foum Tillicht.
- La majorité des précipitations journalières maximales annuelles observées au niveau de la station de Zaouit Sidi Hamza sont enregistrés en Décembre -Janvier, puis Mars – Avril, et leur maximum sur une période de 48 années est de l'ordre de 575.1 mm (observé en novembre 2015) ;
- Les précipitations journalières maximales annuelles observées au niveau de la station Foum Zaabel sont enregistrées en octobre -Novembre, puis en février, et leur maximum sur une période de 45 années est de l'ordre de 406.7 mm (observé en novembre 2009).
- La plupart des précipitations journalières maximales annuelles observées au niveau de la station de Foum Tillicht sont enregistrées en Octobre, puis de Janvier jusqu'à Mai, et leur maximum sur une période de 43 années est de l'ordre de 471.6 mm (observé en avril 1994).
- La plupart des précipitations journalières maximales annuelles observées au niveau de la station de M'Zizel sont enregistrées en Octobre, puis de Janvier jusqu'à Mai, et leur maximum sur une période de 48 années est de l'ordre de 404.8mm (observé en avril 2008).

Tableau 13: Données des précipitations journalières maximum (mm) des quatre stations du bassin versant du Haut Ziz depuis 1970 à 2018 d'après l'ABH-GZR.

Année	Stations			
Année	Zaouiate Sidi Hamza	M'Zizel	Foum Tillicht	Foum Zaabel
1970/1971	196	100,2	-	198
1971/1972	192,4	223,2	-	204,8
1972/1973	295,5	200,1	-	264,6
1973/1974	167,6	113,7	-	199,7
1974/1975	309,3	280,5	-	255,3
1975/1976	435	259,1	282,8	264,3
1976/1977	232,6	140,2	203,1	171,8
1977/1978	205	133,5	167,4	148,4
1978/1979	170,4	111,9	128,6	168,7
1979/1980	262,9	250,6	308,5	310
1980/1981	169,7	111,3	152,8	105,5
1981/1982	227,6	266	177,1	146
1982/1983	159,5	99,7	109,1	122,3
1983/1984	148,1	69	84,6	68,4
1984/1985	217,1	143,3	136,1	148,8
1985/1986	214	159,3	145,7	80,2
1986/1987	159,7	128,4	90,6	121,5
1987/1988	243,9	128,5	163,7	187,4
1988/1989	363	229,2	228,9	190,6
1989/1990	432,1	237,6	315,1	301,3
1990/1991	362,1	284,9	282,6	257,6
1991/1992	239,8	123	179,7	130,1
1992/1993	179,3	77,5	84	92,4
1993/1994	364,4	166,4	119,8	191,2
1994/1995	281,5	268,4	256,2	186,4
1995/1996	471,2	316,9	471,6	392,2
1996/1997	287,4	150,7	232	119,2
1997/1998	318,9	175,8	152,1	101,2
1998/1999	190,4	87,4	101,8	72,7
1999/2000	250,6	164,8	149,5	170,1
2000/2001	155,7	65,8	107,8	79,9
2001/2002	265,2	185,5	188,7	148,3
2002/2003	199,9	116,3	124	115,9
2003/2004	284,1	204,2	263,7	262,8
2004/2005	226,2	92,5	116,7	108,4
2005/2006	258,5	222,4	238	179,6
2006/2007	413,8	318	306	314,7
2007/2008	336,1	404,8	323,2	301,4
2008/2009	410,1	334,4	444	406,7
2009/2010	356,2	296,1	314,3	230,3
2010/2011	284	223,1	236,5	118,4
2011/2012	195,6	115,2	161,1	184,1
2012/2013	232,9	136,1	117,8	116,6
2013/2014	188	138	124,6	96,9
2014/2015	575,1	389,6	339,3	220
2015/2016	223,9	129,7	166,1	
2016/2017	315,2	172,1	176,3	
2017/2018	42,7	103,4	25,6	

## 2. Ajustement des données pluviométriques à la loi de Gumbel

2-1- Ajustement à la loi de Gumbel :

### a. Description théorique

La loi de Gumbel est un modèle fréquentiel très souvent utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes. La fonction de répartition  $F(Q_p)$  s'exprime de la manière suivante :

$$F(Q_p) = e^{-e^{-\alpha(Q_p - u)}}$$

Les données des pluies journalières maximales ont été ajustées par la loi de Gumbel : cette étape consiste à analyser les résultats afin de leur adapter le modèle probabiliste le plus adéquat qui décrit la probabilité d'apparition d'un débit de pointe de valeur donnée. Et c'est du choix du modèle fréquentiel que dépendra la validité des résultats de l'analyse fréquentielle. Diverses lois de distribution statistiques sont utilisées pour l'ajustement fréquentiel, parmi lesquelles on mentionnera la loi de Gumbel.

La distribution statistique de Gumbel est une loi double exponentielle qui dépend de 2 paramètres  $\alpha$  et  $u$  peuvent être estimés à partir de la moyenne et de l'écart type de l'échantillon par les relations suivantes :

- $u$  (paramètre de position)

$$u = \bar{Q}_p + 0.45\delta_{Q_p} \quad (1)$$

- $\alpha$  (paramètre de distribution) :

$$\alpha = \frac{1.2825}{\delta_{Q_p}} \quad (2)$$

$$u = \bar{Q}_p + 0.45\delta_{Q_p} \quad (3)$$

Pour une période de retour donnée, le débit extrême maximal correspondant peut être estimé à partir de la relation :

$$Q_{p_i} = \bar{Q}_p + K\delta_{Q_p} \quad (4)$$

Avec  $K$  est la variable réduite de Gumbel :

$$K = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[ 0.5772 + \ln \left( \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right) \right] \quad (5)$$

Et  $T = \frac{1}{1-F} \quad (6)$

Soient :  $u = 38.3782$  et  $\alpha = 11.5913$

La démarche suivie est organisée comme suite :

- Utiliser les statistiques descriptives pour estimer les paramètres de la loi (moyenne, Ecart Type ...)
- Trie r les valeurs dans l'ordre décroissant et attribuer un rang à chaque valeur.
- Calculer la probabilité expérimentale de dépassement pour chaque rang (d'après l'équation de Weibull :  $P(Q > Q_i) = (R / (N+1))$ ).
- Calculer la probabilité expérimentale de non dépassement pour chaque rang :  $(P(Q < Q_i) = 1 - P(Q > Q_i))$
- Calculer la période de retour expérimentale :  $(T = 1 / P(Q > Q_i))$ .
- Calculer la variable réduite expérimentale de Gumbel pour chaque rang ; équation (5).
- Calculer la probabilité théorique de non dépassement pour chaque rang ; équations (1), (2) et (3)
- Calculer la probabilité théorique de dépassement pour chaque rang  $(P(Q > Q_i) = 1 - P(Q < Q_i))$ .
- Calculer la période de retour théorique  $(T = 1 / P(Q > Q_i))$ .
- Calculer la variable réduite théorique de Gumbel pour chaque rang ; équation (5).
- Comme un test graphique d'adéquation, trace r les deux courbes des débits de pointes observés en fonction de la variable réduite théorique et expérimentale de Gumbel et voir est ce que la série suit la droite théorique d'Henry.

### **b. Résultats et interprétation des ajustements aux lois statistiques**

La station de Sidi Hamza dont l'altitude est de 3499 m possède un échantillon de 48 années de données. (1971/2018). Les caractéristiques statistiques de l'échantillon de données sont représentées dans le tableau suivant (**Tab.14**). Les résultats des ajustements pour la loi qui vérifie les critères d'adéquation sont donnés dans les tableaux suivants (**Tab.14 et 15**), ainsi que les pluies de référence retenues :

Tableau 14 : Caractéristiques statistiques de résultats des ajustements pour la loi de Gumbel

Coefficients a et b - PLUIE Méthode des Moments		Moyenne =	262,6	[mm]
b	a	Ecart Type =	86,3	[mm]
67,3	223,8	Gamma =	0,57721	[mm]

Tableau 15 : Résultat de l'ajustement à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) pour Station Zaouiate Sidi Hamza

Période de retour T (an)	10	20	50	100	500
probabilité de non dépassement de P	0,9	0,95	0,98	0,99	0,998
variable réduite de Gumbel	2,25	2,97	3,90	4,60	6,21
Pmoy pour période de retour T (mm)	375,1	423,5	486,2	533,1	641,7

L'ajustement statistique à la station de Zaouiate Sidi Hamza selon une loi de Gumbel pour T= 100 ans, est donné dans le graphe suivant (**Fig.34**) :

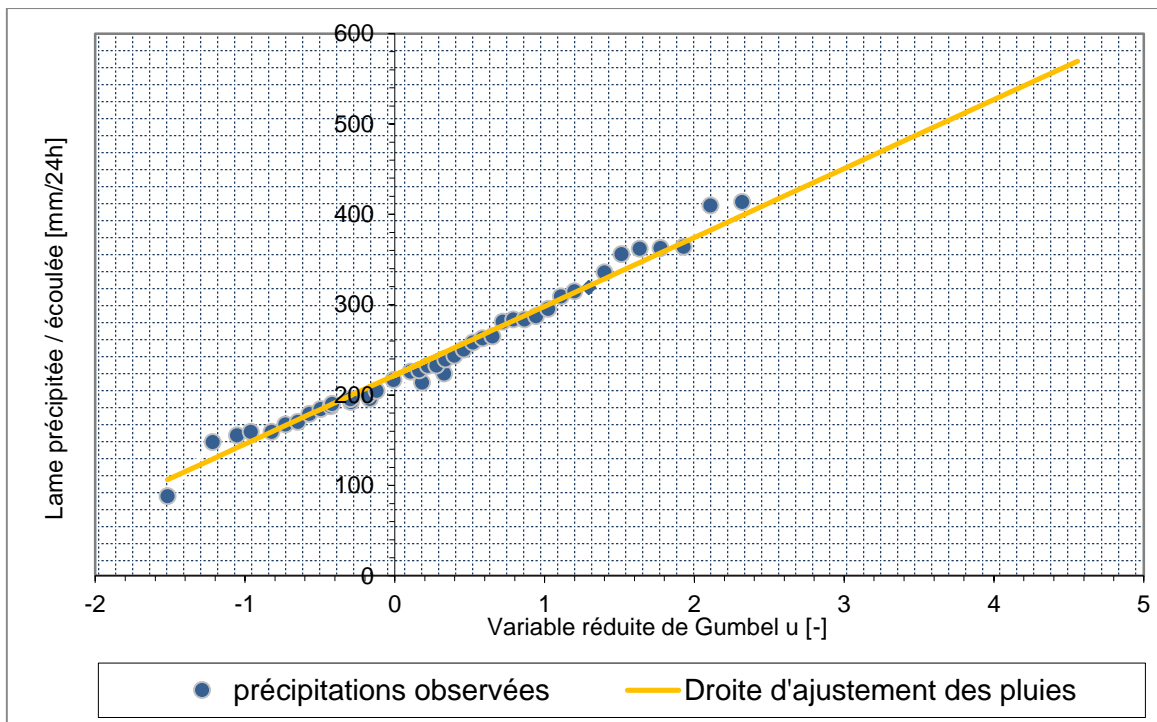


Figure 34 : Ajustement graphique de la série des débits maximums annuels à la loi de Gumbel pour la station de Zaouiate Sidi Hamza

### c. Résultats de comparaison des ajustements aux lois statistiques

Après avoir ajusté les données des débits maximums annuels par l'utilisation de la loi statistique de Gumbel, afin d'arriver à extrapoler les quantiles pour modéliser la zone en question, selon le graphe ci-dessus on peut conclure que cette loi est plus adaptée aux données et le plus fiable pour l'ajustement de variable débits et particulièrement à des fines extrapolations.

Graphiquement, on peut dire que la loi de Gumbel s'ajuste mieux qu'avec les petites valeurs de cette série des débits.

### 3. Le temps de concentration

Pour la réalisation de l'étude des crues, on a suivi les étapes suivantes :

- Délimitation des bassins versants de la zone d'étude sur une carte topographique et détermination des caractéristiques géométriques de ces derniers (superficie, longueur du talweg, dénivelée maximale...) ; elles sont déjà calculées dans le chapitre précédent (**Tab.16**).
- Calcul du temps de concentration  $T_c$  (ou temps de pointe), l'évaluation du temps de concentration  $t_c$  (temps nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis le point le plus éloigné du bassin jusqu'à son exutoire ou jusqu'au point de calcul) est basée sur l'hypothèse que les gouttes de pluie se déplacent perpendiculairement aux lignes de niveau.

**Tableau 16: Caractéristiques physiques du bassin versant du Haut Ziz**

BV	Oued	Superficie en Km <sup>2</sup>	Z max (m)	z Min(m)	Longueur en Km	Pente	Périmètre
Zaouit Sidi Hamza	Zaouit Sidi Hamza	1298,5	3499	1314	36,9	0.0592	204,3
Bas Ziz	ZIZ	1802	3379	1313	49,7	0.0416	278,1
Foum Zaabel	ZIZ	900,8	2.365,0	1.149,0	25,6	0.0476	176,8
Haut Ziz	ZIZ	4.001,3	3.499,0	1.149,0	78,7	0.0298	390,6

### 3-1- Le temps de concentration

Le temps de concentration est le temps que prend le ruissellement pour parcourir la distance entre le point le plus éloigné hydrauliquement du bassin versant pour rejoindre l'exutoire de celui-ci. Le sol est alors considéré saturé et les micro-dépressions comblées. Ce point est le départ du plus long temps de parcours jusqu'à l'exutoire et pas nécessairement la plus longue distance de parcours de l'eau (USDA-NRCS, 2010). Ce paramètre est utilisé par la plupart des méthodes de détermination des débits de pointe.

Le temps de montée et le temps de concentration sont intimement reliés au même concept hydrologique de base. Les hydrologues utilisent le terme « temps de montée » alors que les ingénieurs utilisent principalement le terme « temps de concentration » (Bennis, 2004). Différentes méthodes sont proposées pour estimer le temps de concentration, certaines plus complexes que d'autres mais, toutes reliées à l'hydrogramme et/ou au temps de montée.

A chacune de ces formules sont applicables un domaine de validité, que ce soit pour la taille des bassins versants étudiés ou pour les résultats obtenus. Sachant qu'il n'existe pas une seule formule qui aurait été construite pour le bassin versant de Haut Ziz, nous avons confronté 5 formules différentes de temps de concentration qui sont les suivantes :

#### a) Formule de Van Te Chow

$$Tc = 60 \times 0.123 \times \left( \frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0.64}$$

Tc : Temps de concentration en mn

L : Longueur du BV en m

I : Pente en m/m

Les bassins versant agricoles de 1 à 2 hectares et de pentes moyennes comprises entre 0.0051 et 0.09, sont le domaine de validité de cette formule.

#### b) Formule de Kirpich :

La formule de Kirpich a été développée en 1940, à partir de données de six bassins versants du Tennessee de moins de 45 ha, pentes (3 % à 12 %), dont le couvert forestier variait entre 0 et 56%. La formule de Kirpich a été développée sur des sols nus et peut être utilisée sur des bassins versant de 0,4 à 80 ha.

$$T_c = \frac{1}{52} \times \left( \frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0.77}$$

**c)** Formule de Giandotti

$$T_c = 60 \times \left( \frac{4 \times \sqrt{A} + (1.5 \times L)}{0.8 \times \sqrt{H}} \right)$$

S : Surface du bassin versant en [Km<sup>2</sup>] ;

L : longueur du talweg principale en [Km] ;

H= Hmoy, - Hmin : respectivement la hauteur moyenne et minimale du B.V en [m] (Bennis, 2004)

**d)** Formule de Ventura :

$$T_c = 7.62 \times \sqrt{\left( \frac{S_{bv}}{C} \right)}$$

**e)** Formule de Turazza :

$$T_c = 0.01947 * S_{bv}^{0.77}$$

Avec :

Tc : Temps de concentration en mm ;

L : Longueur du plus long talweg en Km ;

I : Pente en m/m ;

Sbv : Superficie du bassin en Km<sup>2</sup> ;

H : Dénivelée totale en m.

Nom de la Formule	Equation	Unité de paramètres
Ventura	$T_c = 7.62 * \sqrt{\frac{S_{bv}}{I}}$	Tc : en min, S <sub>bv</sub> en km <sup>2</sup> , I : Pente moyenne.
Kirpich	$T_c = \frac{1}{52} * L^{1.15} * H^{-0.385}$	Tc : en min, L : en m, H : en m.
Turazza	$T_c = \frac{0.108 * (S_{bv} * L)^{1/3}}{\sqrt{I}}$	Tc : en min, S <sub>bv</sub> : en km <sup>2</sup> , L : en Km. I : Pente en m/m,
USSCS	$T_c = \frac{(0.87 * L^3)^{0.385}}{H}$	Tc : en min, L : en m, H : en m.
Van Te Chow	$T_c = 60 * 0.123 * \left(\frac{L}{\sqrt{I}}\right)^{0.64}$	Tc : en min, L : en km, I : en m/m.
Bransby	$T_c = 14.56 * L * S_{bv}^{-0.01} * I^{-0.2}$	Tc : en min, S <sub>bv</sub> : en km <sup>2</sup> , L : en Km. I : Pente en m/m,
Californienne	$T_c = 0.1452 * \left(\frac{L}{\sqrt{I}}\right)^{0.77} * 60$	Tc : en min, L : en km, I : en m/m.
Espagnole	$T_c = 0.3 * \left(\frac{L}{I^{0.25}}\right)^{0.77} * 60$	Tc : en min, L : en km, I : en m/m.

Remarquons que la formule californienne est une méthode utilisée pour les bassins qui se trouvent dans un milieu saharien, de ce fait des valeurs obtenues qui sont très faibles.

### 3-2-Calcul de temps de concentration

Les temps de concentrations calculés par les différentes formules empiriques, ainsi que la valeur retenue de ce paramètre qui est donnée par la moyenne des valeurs qui sont comparables et en rejetant celles qui s'écartent de l'ensemble des autres, sont représentées dans le tableau suivant (Tab.17).

Tableau 17: Récapitulatif des Temps de concentration calculés pour les sous bassins versants de la zone d'étude.

BV	Kirpich	Turraza	Van Te Chaw	Californienne	Ventura	Espagnole	Moyenne
Zaouit Sidi Hamza	189,93	967,21	183,6	416,2	1125,4	478.0	478
Bas Ziz	273,74	1421,97	248,7	599,9	1582,4	641.1	641.1
Foum Zaabel	155,67	844,91	155,6	341,2	1045,6	376.8	376.8
Haut Ziz	443,15	2552,06	371,2	971,2	2782,6	968.5	968.5

Le temps de concentration retenu est la moyenne des temps de concentrations des valeurs comparables et assez voisines. Une comparaison des valeurs calculées du temps de concentration par les différentes méthodes permet de conclure que les formules qui donnent des valeurs incluses dans



l'intervalle formé par les temps de concentration minimal et maximal calculés par la méthode des vitesses moyennes sont en général les formules de Kirpich, California, Turraza et Espagnole. Tandis que les autres formules donnent une sous-estimation du temps de concentration.

#### 4. Calcul des crues :

Les valeurs du temps de concentration calculées dépendent de la taille du bassin et de sa pente. Ainsi on trouve que le sous bassin, contrôlé par la station de Zaouiate Sidi Hamza, qui a la plus grande surface (1802 Km) par rapport aux autres sous bassin possède le temps de concentration le plus grand (180 min).

Ajustement par la loi de Gumbel des pluies journalières maximales annuelles et détermination des P(T) de référence pour les périodes de retour T allant de 5 à 500 ans ; Calcul des crues en utilisant les différentes méthodes suivantes :

❖ Pour les bassins versants de superficie inférieure à 20 Km<sup>2</sup> :

- ✓ Formules empiriques de Mac Math et de Caquot.
- ✓ Méthode rationnelle.
- ✓ Méthode du Gradex.

❖ Pour le bassin versant de superficie supérieure à 20 Km<sup>2</sup> :

- ✓ Formules empiriques : Mallet Gautier, Fuller II.
- ✓ Méthode du Gradex.

Ces méthodes sont présentées dans les paragraphes suivants.

##### 4.1 La méthode Rationnelle

C'est la méthode la plus ancienne, elle est considérée valide pour les superficies de moins de 800 ha, elle utilise un modèle simple de transformation de la pluie de projet (décrite par son intensité Ip), Elle suppose que le débit maximum est obtenu lorsque toute la superficie du bassin versant contribue au ruissellement à l'exutoire avec la plus grande intensité moyenne de précipitation. Cette plus grande intensité correspond à la plus grande précipitation pour la durée du temps de concentration.

Le débit s'exprime :

$$Q = \frac{C * I * A}{360}$$

C : est le coefficient de ruissellement de pointe, on le prend ici égal à 0.22

I : est l'intensité de pluie de période de retour T

A = superficie du bassin versant (ha)

La méthode a besoin de l'IDF " I (tc, T) " pour le temps de concentration "tc" et la récurrence "T", du coefficient de ruissellement "C" et de la superficie "A" du bassin versant. C'est la façon la plus usuelle de l'utiliser. Comme l'intensité de la précipitation est connue et le ruissellement est exprimé en fonction de la précipitation :

$$I = P (tc, T)/tc = P/tc$$

P = hauteur de la précipitation (mm)

$$C I = C P / Tc = Hru / tc$$

Hru = hauteur ou lame de ruissellement (mm)

L'équation du Débit de la crue peut être réécrite en fonction des paramètres qui ont été étudiés précédemment :

$$Q = \frac{1 * Hru * A}{360 * tc}$$

A = superficie du bassin versant (ha) Cette façon de l'utiliser, permet d'estimer le débit de crue à partir de la hauteur de ruissellement produit par l'HDF pour le temps de concentration "tc" et la récurrence "T" désirée.

#### 4.2 Formules empiriques

Il existe des formules empiriques, pour le calcul des débits de pointe pour différentes fréquences. De manière générale, les formules de Mallet Gauthier, Hazan-Lazarevic et Fuller II sont mieux adaptées pour les bassins de grande superficie (> 20 Km<sup>2</sup>) et les formules de Mac Math, et de Caquot pour les petits bassins versants (<20 Km<sup>2</sup>).

Ces méthodes sont des excellents outils pour la détermination d'un hydrogramme. En effet, elles permettent toute au long du développement du calcul, de rationaliser les résultats et de dégager ainsi les meilleures caractéristiques du projet. (Boudjerda, 2005).

Ces formules sont présentées ci-après :

##### ➤ Formule de Mac-Math :

$$Q(T) = K.P_{24}(T). A^{0.58} I^{0.42}$$

Q(T) = débit de pointe de période de retour T (en m<sup>3</sup>/s),

K = Coefficient dépendant de la topographie du bassin versant :

K = 0.11 : Bassins versants de grandes dimensions

K = 0.22 : Superficies cultivées et terrains vagues des zones suburbaines

K = 0.32 : Terrains non aménagés, non rocheux de pente moyenne (valeur retenue)

K = 0.43 : Terrains non aménagés rocheux de pente forte

P<sub>24</sub>(T) = Précipitation maximale en 24H (mm) pour la période de retour T,

A = Surface du BV en ha

I = Pente moyenne du bassin versant.

##### ➤ Formule de Mallet-Gauthier

Cette formule s'écrit sous la forme suivante (Manel, 2015):

$$Q(T) = 2k \log (1 + aH(T)) A \sqrt{(1 + 4 \log T - \log A)} / \sqrt{L}$$

Q(T) = débit de pointe pour la période de retour T (m<sup>3</sup>/s).

H(T) = pluviométrie moyenne annuelle en m.

T = période de retour.

L = longueur du drain principal en km.

A = superficie du BV en km<sup>2</sup>.

a = coefficient égal à 20 pour le Maroc.

K = coefficient égal à 2 pour le Maroc.

➤ Formule de Turraza

Cette formule utilise l'intensité moyenne maximale de précipitations déterminées sur un intervalle de référence égal au temps de concentration du bassin versant.

$$Q_{max,p\%} = \frac{C \cdot i_{tc} \cdot S}{3.6}$$

Avec : S : Surface du sous bassin.

i<sub>tc</sub> : Intensité moyenne maximale des précipitations pendant une durée égale au temps de concentration en mm/h.

C : coefficient de ruissellement de la crue considérée pour une probabilité P%.

Cette formule est bien adaptée pour les cas d'études sur les petits bassins (de même que pour des réseaux d'assainissement urbains ou ruraux). (Taha, 2001)

### **4.3 La méthode du Gradex**

La méthode du GRADEX est une approche hydro-pluviométrique probabiliste du calcul des débits de crues. La méthode se base sur l'information apportée par la loi de probabilité de la pluie spatiale pour les valeurs fortes. En effet, on suppose que la loi de distribution de la rétention du bassin ne change pas pour les pluies intenses, d'où on déduit le comportement asymptotique des volumes des crues extrêmes à partir de la distribution de la pluie moyenne maximale annuelle (pour un pas de temps adéquat). La distribution des débits instantanés maxima est déduite des volumes, par un coefficient de forme moyenne des hydrogrammes de ruissellement direct, rapport moyen de la pointe d'une crue par le volume moyen sur le pas de temps considéré. La méthode s'applique à des bassins de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés, qui sont homogènes pluviométriquement.

Pour l'application de cette méthode on procède aux étapes suivantes :

- Ajustement par la loi de Gumbel des pluies max journalières et détermination des PJ max (T) pour T allant de 5 à 500 ans.
- Détermination du Gradex journalier (Gp (24)). Le passage des valeurs journalières aux valeurs en 24h se fait en majorant les valeurs journalières de 15% pour tenir compte de la coulissante de la pluie.
- Déterminer la forme de l'hydrogramme des crues et estimer les volumes de crues.
- Calcul du Gradex des pluies sur le temps de concentration Gp(Tc) à partir du Gradex des pluies en 24heures.
- Calcul du débit de pointe de référence Qp(T\*) (pivot de grade) en utilisant les formules empiriques citées ci-haut, la méthode rationnelle et la méthode de l'USSCS.
- Calcul des débits de pointe et des lames d'eau ruisselées pour chaque période de retour par la méthode de Gradex classique.

En général Le passage des pluies en 24 heures aux pluies sur le temps de concentration pour chaque fréquence se fait en utilisant la formule :

- ✓ Détermination du Gradex des  $P_{jmax}$  :

$$G_p = \alpha = \text{pente de la droite des pluies (droite de Gumbel)}$$

- ✓ Calcul du Gradex des pluies durant  $t_c$  :

$$G_p(t_c) = G_p(24h) * \left(\frac{t_c}{24}\right)^{0.3}$$

- ✓ Calcul du Gradex des débits en  $t_c$  :

$$G_d(t_c) = G_p(t_c) * \frac{S_{Bv}}{3.6 * t_c}$$

- ✓ Calcul des débits moyens des crues rares (à période de retour plus que décennale) :

$$Q_{moy}(T) = G_d(t_c) * [u(T) - u(10)] + Q(10)$$

## 5. Application aux sous-bassins du bassin versant du Haut Ziz

### 5.1 Caractéristiques des sous bassins du bassin versant du Haut Ziz

Les bassins versants des tronçons des cours d'eau objet de cette étude ont été délimités sur des cartes au 1/50000. La délimitation a été effectuée en considérant les bassins actifs des tronçons étudiés. Les caractéristiques géométriques des bassins étudiés sont consignées dans le **(Tab.18)** :

Tableau 18 : Les caractéristiques géométriques des Sous bassins

BV	Oued	Superficie en Km <sup>2</sup>	Z max	Z Min	Longueur en Km	Pente	Périmètre
Zaouit Sidi Hamza	Zaouiate Sidi Hamza	1298,5	3499	1314	36,9	0.0592	204,3
Bas Ziz	ZIZ	1802	3379	1313	49,7	0.0416	278,1
Foum Zaabel	ZIZ	900,8	2.365,0	1.149,0	25,6	0.0476	176,8
Haut Ziz	ZIZ	4.001,3	3.499,0	1.149,0	78,7	0.0298	390,6

### 5.2 Calcul des débits de crue par les différentes méthodes

Les résultats de calcul des débits de crue par application des différentes méthodes pour l'ensemble des bassins sont présentés dans le tableau 19 :

Tableau 19 : Débits de crue retenus pour Zaouiate Sidi Hamza

Sous Bassin	T (ans)	Mac Math	Mallet-Gauthier	Régionale	Rationnelle	Fuller II	Gradex des débits	Q p
ZAOUIT SIDI HAMZA	5	112.4	669.9	593.3	575.5	674.7	596.06	584.4
	10	95.7	1113.8	766.4	575.5	778.9	596.06	554.1
	20	108.7	1425.7	939.4	575.5	883.1	596.06	522.4
	50	116.0	1754.8	1168.1	575.5	1020.8	596.06	768.3
	100	127.9	1967.5	1341.1	550.6	1125.0	596.06	864.7
	500	133.1	2389.5	1742.9	550.6	1367.0	596.06	1081.0

On constate que pour chaque temps de retour, les débits retenus pour Zaouit Sidi Hamza sont assez indifférents pour la méthode Mallet-Guthier, Régionale et Fuller.

### 5.3 Débits retenus

Les débits retenus sont le fruit d'une analyse et une comparaison des débits calculés par les différentes méthodes présentées précédemment. Les débits calculés par les formules empiriques et ceux déterminés par la méthode du Gradex restent comparables. Ainsi, nous proposons de retenir la moyenne des débits calculés par les différentes approches.

### 5.4 Hydrogramme de crue

Après avoir déterminé les débits de la crue, cette partie présente le travail nécessaire à la préparation des données hydrologiques propres à alimenter la modélisation hydraulique en régime transitoire de l'oued Zaouit Sidi Hamza. L'hydrogramme de crue est une représentation de la crue, il nous donne les caractéristiques principales de la crue (Salomon, 1997) :

- La forme de la crue
- Le volume de la crue
- La durée de la crue
- Le débit maximum de la crue (débit de pointe)

Pour définir un hydrogramme type des crues d'un oued, on « adimensionalise » les crues les plus représentatives inventoriées par leurs temps de pointe et débits de pointe et on les superpose aux hydrogrammes type (Bennis, 2004).

On adopte l'hydrogramme de l'USSCS, il s'agit d'un hydrogramme type adimensionnel (**Fig.35**) avec comme données en entrée le temps de base et le débit de pointe.

Le temps de montée égale à 5h et le temps de base égal à 3 fois le temps de montée. L'hydrogramme est la représentation graphique du débit instantané d'un cours d'eau en fonction du temps à l'exutoire d'un bassin versant. Il comprend trois phases :

- La première correspond à la concentration de la crue (courbe de concentration) ;
- Une seconde zone entourant le maximum (la pointe)
- La troisième afférente à la diminution progressive du débit (décru)

Plusieurs types d'hydrogramme sont adoptés lors de l'élaboration de l'hydrogramme type pour les crues. Pour cette étude, on a adopté l'hydrogramme de type exponentiel et seuls les bassins dont la superficie est supérieure à 5 km<sup>2</sup> feront l'objet de détermination de l'hydrogramme. L'hydrogramme de forme exponentielle est représenté par la relation (Bennis, 2004):

$$Q/Q_p = (t/t_p)^4 e^{(4-4(t/t_p))}$$

Avec :

$Q_p$  : Débit de pointe déterminé par l'étude hydrologique pour une fréquence donnée

$t_p$  : Temps correspondant à la pointe

Le temps de montée de l'hydrogramme de crue est pris égal au temps de concentration

Les hydrogrammes de crue ainsi que les volumes correspondants seront ainsi déterminés pour l'oued Zaouiate Sidi Hamza pour les périodes de retour 5, 10, 20, 50, 100 et 500 ans (Fig. 35).

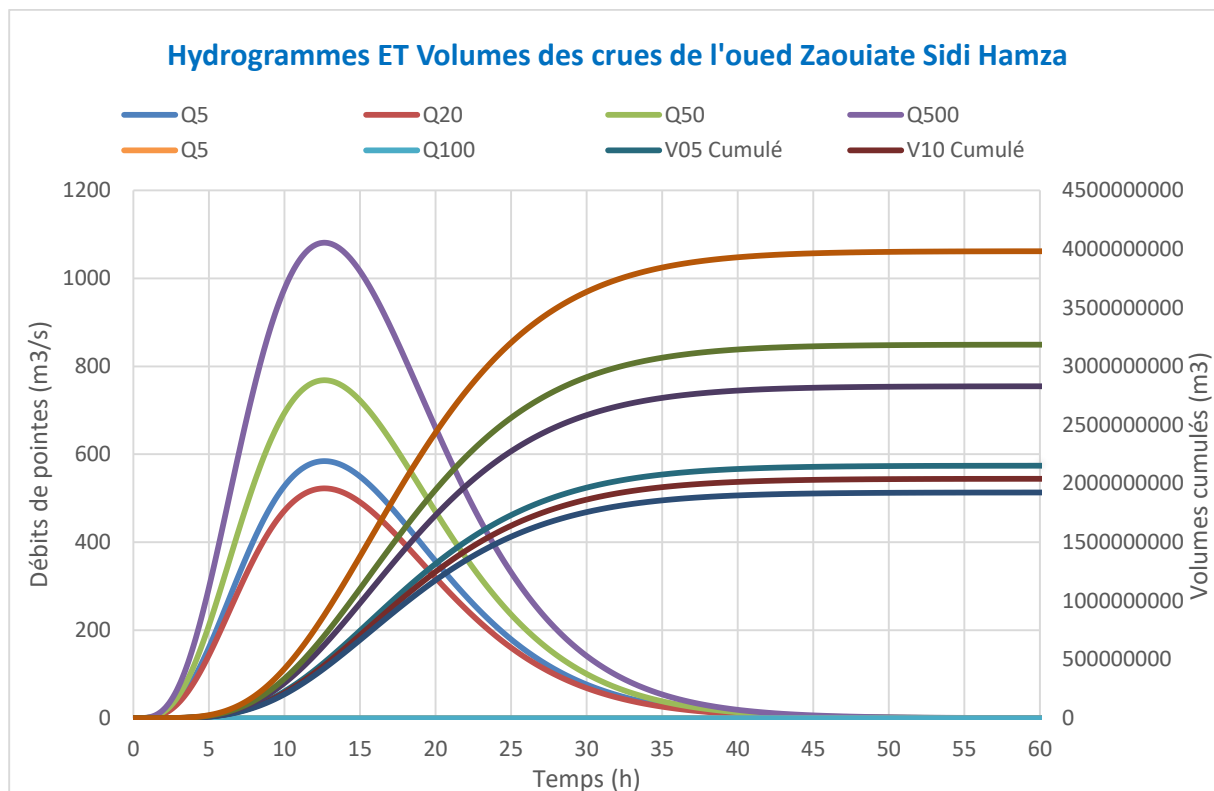


Figure 35 : L'hydrogramme et Volume des crues

Les quelques pages qui précèdent, sont l'œuvre d'une étude hydrologique réalisée pour le sous bassin versant de Zaouiate Sidi Hamza. Une étude qui vise à décélérer le comportement hydrologique du centre.

En effet, les évaluations hydrologiques accomplies, s'est fondées sur une procédure complète qui examine les caractéristiques géomorphologiques du bassin, ainsi que les données météorologiques locales et régionales.

L'étude hydrologique réalisée au niveau des bassin du haut Ziz a permis de déterminer les débits de pointe desdits bassin pour chaque période de retour. Les débits de pointe calculés allant de 584.4 m<sup>3</sup>/s pour 5 ans à 1081 m<sup>3</sup>/s pour 500 ans avec un volume d'eau de 23,50 Mm<sup>3</sup> pour 10 ans. Débit représentant un éventuel risque d'inondation menaçant Zaouiate Sidi Hamza, dû principalement au relief fort, et le sous dimensionnement des ouvrages existant, ainsi qu'une pluviométrie mensuelle de

la région. L'étude hydrologique est l'étape la plus importante pour une étude de protection contre les inondations. Le choix et la validation des débits de pointe déterminent le type d'aménagement pour la protection et leurs coûts de réalisation. Le bassin du haut Ziz est caractérisé par des orages et des crues torrentielles ce qui mettent en danger les touristes et la population de zone. L'objectif de notre travail est de réaliser l'étude hydrologique pour la protection contre les inondations au niveau des tronçons de cours d'eau traversant les localités situées dans le centre de Zaouiate Sidi Hamza. Ladite étude a déterminé les débits de pointe pour chaque fréquence. De ce fait, il y a lieu de proposer les solutions d'aménagement pour la protection de la population contre les inondations en se basant sur les débits retenus au niveau de notre étude hydrologique.

### **III. Modélisation Hydraulique de l'Oued Sidi Hamza sur le tronçon passant par le centre de Zaouiate Sidi Hamza**

#### **1. Introduction**

La modélisation hydrologique représente une étape essentielle pour l'estimation des dangers d'inondation, car elle permet d'appréhender le comportement hydrologique d'un bassin versant lors de crues de référence. La modélisation doit respecter le principe de parcimonie qui statue que la complexité du modèle doit s'adapter aux données disponibles et aux besoins du projet. En milieu de montagne et semi-aride, la modélisation hydrologique se heurte à des défis liés à :

- La rareté et la qualité des données mesurées ;
- La grande variabilité spatio-temporelle des précipitations ;
- La complexité des bassins versants (différentes lithologies, présence de karst, etc.).

Cette étude hydraulique vise la vérification de la capacité hydraulique des oueds, traversant le secteur d'étude, pour les crues de période de retour de 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans et 500 ans.

Le comportement hydraulique de chaque oued est déterminé par les facteurs suivants :

- Les apports générés par le bassin versant ;
- La morphologie du lit,

L'étude hydraulique est réalisée par la construction d'un modèle hydraulique du tronçon de chaque oued en se basant sur les paramètres qui déterminent le comportement hydraulique du cours d'eau. Ce modèle est construit sur la base des levés topographiques réalisés sur site.

Les modélisations hydrauliques effectuées ont permis de délimiter les zones inondables au passage des crues.

#### **2. Outil de modélisation et de simulation**

Pour faire la simulation hydraulique d'un écoulement que soit permanent ou non, en utilisant le modèle HEC-RAS (**Fig.36**), on doit procéder les étapes d'élaboration du modèle qu'elles commencent par :

- Création du projet HEC RAS,
- Préparation des données topographiques (création de la géométrie de l'Oued),
- Choix des paramètres hydrométriques et conditions aux limites,
- Simulation hydraulique.

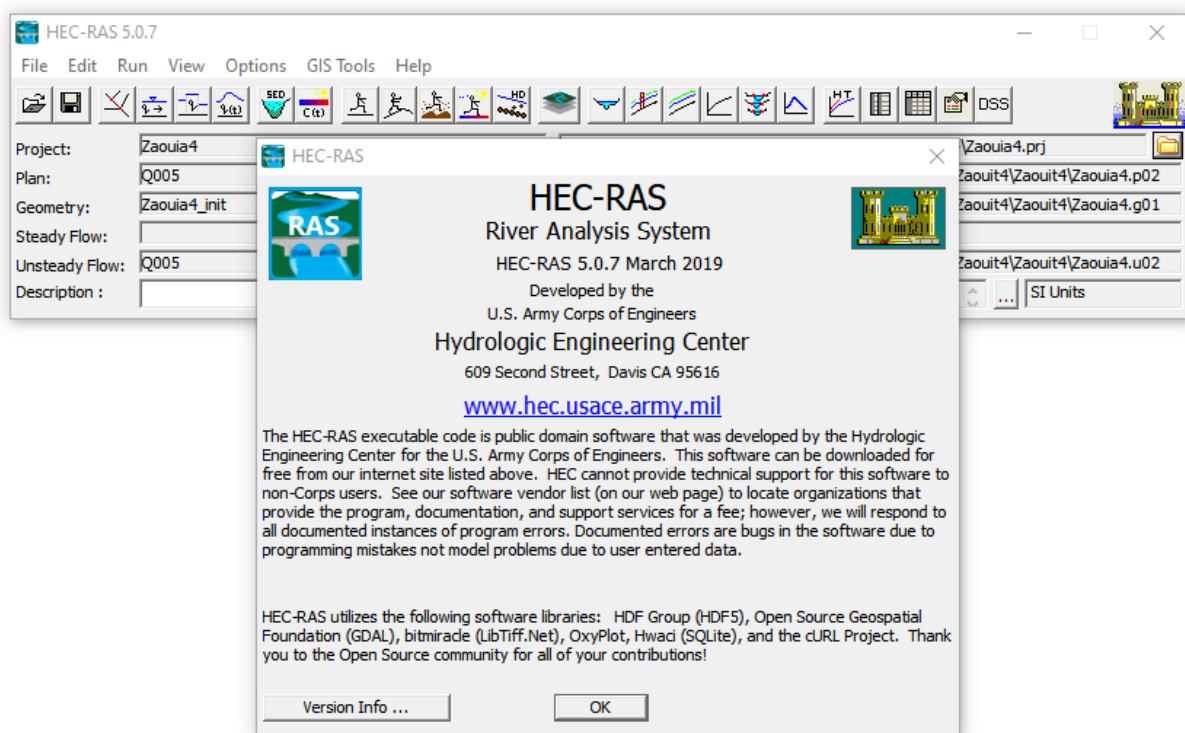


Figure 36 : Logiciel HEC-RAS de Hydrologic Engineering Center.

○ HEC-RAS 5.07 :(Hydrologic Engineering Center, River Analysis System) élaboré par le centre d'Ingénierie hydraulique des corps des ingénieurs de l'armée Américaine pour la modélisation d'un réseau fluvial monodimensionnelle et Mike Basin pour la modélisation bidimensionnelle. HEC-RAS est un progiciel d'analyses hydrauliques désigné à modéliser les écoulements à surface libre dans les canaux naturels et artificiels avec la prise en compte des ouvrages de franchissement. Il permet de simuler les écoulements graduellement variés en régime transitoire et d'effectuer les calculs de lignes d'eau en régime dynamique en simulant les différents obstacles le long du cours d'eau. La modélisation des oueds se base sur les profils en travers des Oueds, tient compte de tous les ouvrages de franchissement existant, et permet de définir différents coefficients de rugosité pour chaque section. Chaque ouvrage de franchissement est matérialisé par un profil à l'amont et un autre à l'aval, intégrant les dimensions des ouvertures ainsi que leurs différentes cotes (Chachoua, 2009 ;US, 2002 ;US, 2010).

HEC-RAS résout les problèmes des écoulements à surface libre permanent ou non-permanent de calcul de ligne d'eau en graduellement varié. Il résout l'équation de l'énergie unidimensionnelle, les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement. Pour les situations rapidement variées telles que les ressauts hydrauliques, les écoulements à proximité des ponts, et les confluences de rivière, l'équation de l'énergie est remplacée par l'équation de quantité de mouvement. Pour les écoulements débordants, la section totale est divisée en sous-sections homogènes en terme de forme et de rugosité, et chaque débit partiel  $Q_i$  est calculé selon la "Divided Channel Method" à l'aide de la formule de Manning-Strickler. Pour plus de détails le lecteur est invité à consulter le Guide du Logiciel (Debiane, 2000).

#### a) Principaux éléments topographiques pour Manipuler HEC RAS

Les principaux éléments sont les profils en travers perpendiculaires au sens d'écoulement, les lignes de berges, les digues et levées, etc... Le profil en travers est l'élément géométrique primordial, il est tracé sur le MNT et doit respecter certaines règles pour qu'il soit représentatif. Il y a six règles principales, elles ont été annotées des difficultés rencontrées lors de l'étude :



- Les profils doivent être perpendiculaires à la direction d'écoulement des eaux : dans le lit majeur, les directions des flux dans le lit majeur ne sont pas toujours bien connues ;
- Ils ne doivent pas se croiser ;
- Ils doivent recouper toute la plaine d'inondation ;
- Ils doivent décrire le profil en long du cours d'eau : cela n'est pas toujours facile à réaliser dans le cas d'un cours méandriforme avec une large plaine d'inondation ;
- Ils doivent encadrer les ouvrages structurants du cours d'eau (ponts, culées, seuils...),
- Ils doivent prendre en compte les modifications géomorphologiques des lits mineur et majeur (élargissement, méandres, contraction, diffluence...) : des problèmes se font jour lorsque les méandres sont très resserrés ou que les angles de diffluence sont fermés, il devient alors compliqué de tracer des profils sans que les tracés se recourent.

#### b) **Modèle topographique pour HEC RAS**

Afin de produire une carte de zone inondable, l'information topographique précise est exigée. En SIG, le modèle TIN est le meilleur modèle de données pour la représentation du terrain à grande échelle. C'est à partir de ce modèle que sont extraites les données topographiques nécessaires au fonctionnement de HEC RAS. La création de ces données se fera grâce à l'interface HEC Géo-RAS (le 3D Analyst est l'interface qui permet de prendre en charge les MNT TIN sous Arcview) (US, 2002).

Afin de créer un MNT TIN, on a adopté une méthode qui intègre les données topographiques de provenances différentes à savoir :

- Des courbes de niveaux digitalisés à partir d'une carte topographique Du centre d'Errich au 1/50000 ;
- Des points cotés digitalisés de la même carte ;
- Topographie (pente).

La topographie constitue un support indispensable à la réalisation de la présente étude, c'est grâce à la topographie qu'il est possible de représenter l'architecture de l'oued dans le modèle.

Un suivi topographique a été effectué par une notre équipe mars 2018 afin de répondre exactement aux besoins du modèle hydraulique, il s'agit :

- Des profils en long et profils en travers de cours d'eau étudiés (**Fig.37**) ;
- Des profils en travers des ouvrages hydrauliques ;
- Une bande cotée le long des berges de l'oued.

C'est un levé topographique du lit mineur d'Oued Zaouiate Sidi Hamza et ses affluents dans sa traversé du centre de Zaouiate Sidi Hamza ;

#### c) Paramètres du modèle

- Coefficient de frottement K

Dans le logiciel HEC RAS, la modélisation du frottement des oueds s'effectue de façon classique à l'aide du coefficient de frottement K (Strickler) (ABH-GZR, 2011).

Nous avons appliqué la méthode de Cowan pour calculer le coefficient de Strickler au niveau du tronçon étudié et pour chaque zone considérée homogène. On donne ci-dessous un rappel succinct de cette méthode.

Le coefficient de rugosité  $n$  dépend de plusieurs facteurs, il est calculé par la formule (Cowan, 1956) :

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m_5$$

Avec :

$n_0$  : dépend du type de matériaux qui constitue le lit de l'oued

$n_1$  : Degré d'érosion de la surface du canal.

$n_2$  : Variation des sections du canal.

$n_3$  : Degré d'obstruction à l'écoulement, dû au dépôt de débris et de roches.

$n_4$  : Présence de végétation.

$m_5$  : Coefficient qui dépend du ratio entre les longueurs curviligne et droite du lit de l'oued.

Le choix des coefficients de rugosité s'est effectué sur la base des observations de la mission de terrain, en se reportant aux tableaux de référence donnés dans la littérature et également en se basant sur l'expérience de l'Ingénieur Conseil. Le tableau ci-dessous (**Tab.20**) donne des valeurs du coefficient de Manning pour différents types de couvertures et de terrains.

Le coefficient de Manning a été évalué à partir de la carte d'occupation des sols validée antérieurement sur le terrain, les valeurs du coefficient sont affichées sur le **Tableau 20** (ABH-GZR, 2011).

Au niveau des ouvrages de franchissement, lorsque le radier est en béton le coefficient de frottement a été pris égal à 0.06.

Le coefficient de rugosité du lit permet d'avoir une modélisation plus proche de la réalité en prenant en compte la vitesse de l'eau sur le fond de l'Oued et sur les rives. Sur chaque profil en travers (Fig.37) le coefficient de Manning sera fixé à 0,033 pour les rives de l'oued. Ce qui correspond à la valeur normale pour une rivière de largeur moyenne de 10 mètres, composée d'une granulométrie grossière (galets) avec présence d'une végétation rivulaire (ABH-GZR, 2011). Les autres valeurs indicatives du coefficient de Manning, pour les portions de l'Oued Sidi Hamza sont présentées sur le (**Tab. 20**).

Tableau 20 : Les valeurs du coefficient de Manning pour différents types de terrains (ABH-GZR, 2011)

Nature des parois	Coefficient de frottement	Coefficient de Rugosité
Béton lisse	75	0.013
Canal en terre, non enherbé	60	0.017
Canal en terre enherbé	50	0.02
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35 - 40	0.025 – 0.029
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30	0.03
Rivière à berges étroites, très végétalisées	10 – 15	0.067 – 0.1
Lit majeur en prairie	20 – 30	0.03 – 0.05
Lit majeur en vigne ou taillis	10 – 15	0.067 – 0.1
Lit majeur urbanisé	10 – 15	0.067 – 0.1
Lit majeur en forêt	< 10	< 0.1

Donc pour chaque type de terrain occupant notre tronçon étudié, on a choisi le  $k$  et le  $n$  convenable, écrits en gras dans le tableau ci-dessus.

### **3. Modélisation hydraulique par HEC-RAS**

#### **3-1- Utilisation pratique de HEC-RAS.**

La détermination des caractéristiques hydrauliques d'un écoulement à surface le long d'un cours d'eau, nécessite des conditions aux limites amont et aval, des données topographiques du cours d'eau et la définition précise des ouvrages tels que les ponts, des vannes et tout ouvrage susceptible d'influencer l'écoulement.

L'utilisation du modèle hydraulique de HEC-RAS, impose de préciser les conditions aux limites amont et aval. Les conditions aux limites amont sont, en général, données par un débit entrant  $Q(t)$  aux différents points amont du réseau hydrographique modélisé. Ces hydrogrammes résultent de l'étude hydrologique. Par contre les conditions aux limites aval prennent en général la forme d'une loi de tarage, donnant la loi du débit en fonction de la hauteur d'eau, mais il est très important de prendre garde à l'influence de ce type de conditions sur les résultats de calcul, en particulier dans les zones à faible pente où elle peut se reporter assez loin vers l'amont. En première approximation, la distance de l'influence aval est de l'ordre de grandeur de la hauteur d'eau maximale divisée par la pente.

Pour le cas de l'oued Zaouiate Sidi Hamza, les conditions aux limites sont considérées à l'amont du tronçon pertinent du cours d'eau principal qui traverse le centre de Zaouiate Sidi Hamza sous forme d'hydrogrammes synthétiques mono fréquences.

Pour cette étude, on a travaillé par la nouvelle version du Logiciel HEC-RAS 5.07, qui représente la mise à jour la plus importante dans HEC-RAS depuis plus d'une décennie et est un véritable changeur de jeu dans l'industrie. Cette mise à jour nous offre la possibilité de manière efficace et rentable d'analyser de beaucoup plus complexes les problèmes.

Il est absolument essentiel d'avoir un modèle de terrain détaillé et précis afin de créer un modèle hydraulique détaillé et précis. Ainsi, la qualité de nos données de terrain peut être un facteur limitant dans la qualité d'un modèle hydraulique, on peut créer les données de relief provient de nombreuses sources différentes, les formats et niveaux de détail (Debiane, 2010). Actuellement HEC-RAS utilise des données maillées pour la modélisation du terrain. Il appartient donc à l'utilisateur de recueillir des données provenant de sources multiples, créer un bon modèle de terrain, puis convertir / exporter dans un format de données maillées qui peuvent être lues par HEC-RAS.

Il est nécessaire de créer un modèle de terrain dans RAS Mapper avant de pouvoir effectuer des calculs de modèles qui contiennent une zone de flux 2D, ou avant que l'utilisateur peut visualiser tout 1D, 2D, ou combiner 1D résultats de la cartographie / 2D. Cette section du document décrit comment créer un modèle de terrain dans RAS Mapper. L'utilisateur peut développer un ou plusieurs modèles de terrain, qui peuvent ensuite être associés à un fichier d'entrée de géométrie spécifique, ou un fichier de sortie des résultats spécifiques. Dans notre cas on dispose d'un MNT de la zone du nord de résolution 13 m sur laquelle on va travailler notre simulation.

La première étape dans l'élaboration d'un ensemble de données de terrain est d'ouvrir RAS Mapper. Ceci est accompli en appuyant sur le bouton RAS Mapper dans la fenêtre principale HEC-RAS.

L'étape suivante consiste à charger les données de terrain qui seront utilisées pour créer le modèle de terrain. Pour développer un nouvel ensemble de données de terrain (de modèle de terrain), sélectionnez Outils puis, Nouvel élément de menu Terrain dans la barre de menu principal RAS Mapper. La boîte de dialogue Nouveau calque relief apparaît. Cette boîte de dialogue permet à l'utilisateur de fournir un nom pour la nouvelle couche de terrain (champ Nom du relief, le nom par

défaut est "Terrain") ; sélectionner un répertoire pour stocker le terrain (champ Dossier de terrain) ; définir la précision d'élévation de la nouvelle couche de données de terrain (Arrondi (Précision) champ, 1/32 est la valeur par défaut pour les unités anglaises).

Une fois le modèle de terrain est créé, l'utilisateur peut améliorer l'apparence des données de terrain par un clic droit sur la couche de terrain et la sélection des propriétés des calques. La fenêtre Propriétés de la couche vous permet de : sélectionner et contrôler le style de couleur de la surface ; Créer et tracer les lignes de contour ; et l'ombre du terrain...

La meilleure façon de le faire dans HEC-RAS est d'apporter dans une image de fond une image aérienne. En outre, nous pouvons apporter dans un Shape file qui représente la zone protégée, si on travaille avec un système nivelé. Les images de fond aideront l'utilisateur à déterminer où tracer les limites 2D de la région de flux afin de capturer les sommets des digues, endiguement, et de tout motif élevé qui va agir comme un obstacle à l'écoulement. RAS-Mapper peut être utilisé pour exporter la couche de données de terrain sous forme de fichier image (\*.JPG), qui peut ensuite être introduit dans l'éditeur de géométrie HEC-RAS avec le bouton de cartographie de fond (Debiane, 2010).

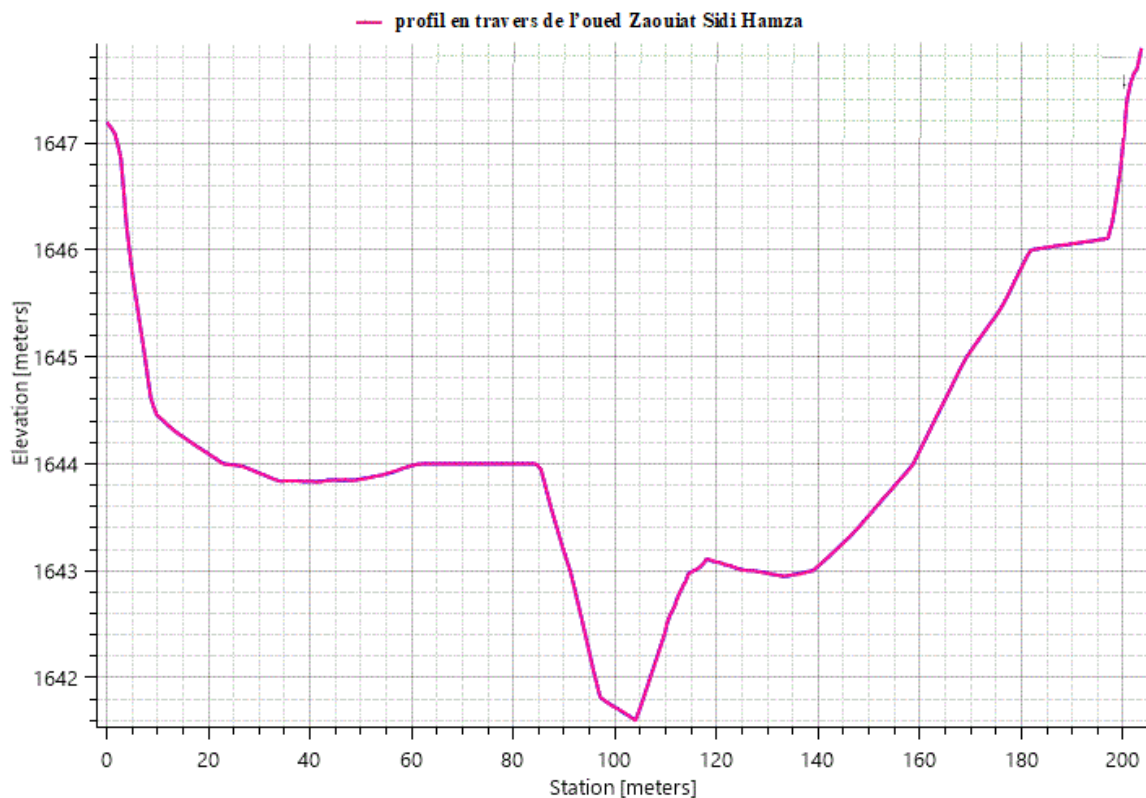


Figure 37 : profil en travers de l'oued Zaouiate Sidi Hamza

Maintenant pour éditer la grille sous laquelle on va travailler on accède au menu 2D flow area editor (**Figure 38**) et on choisit les dimensions des cellules qui vont servir pour la discrétisation.

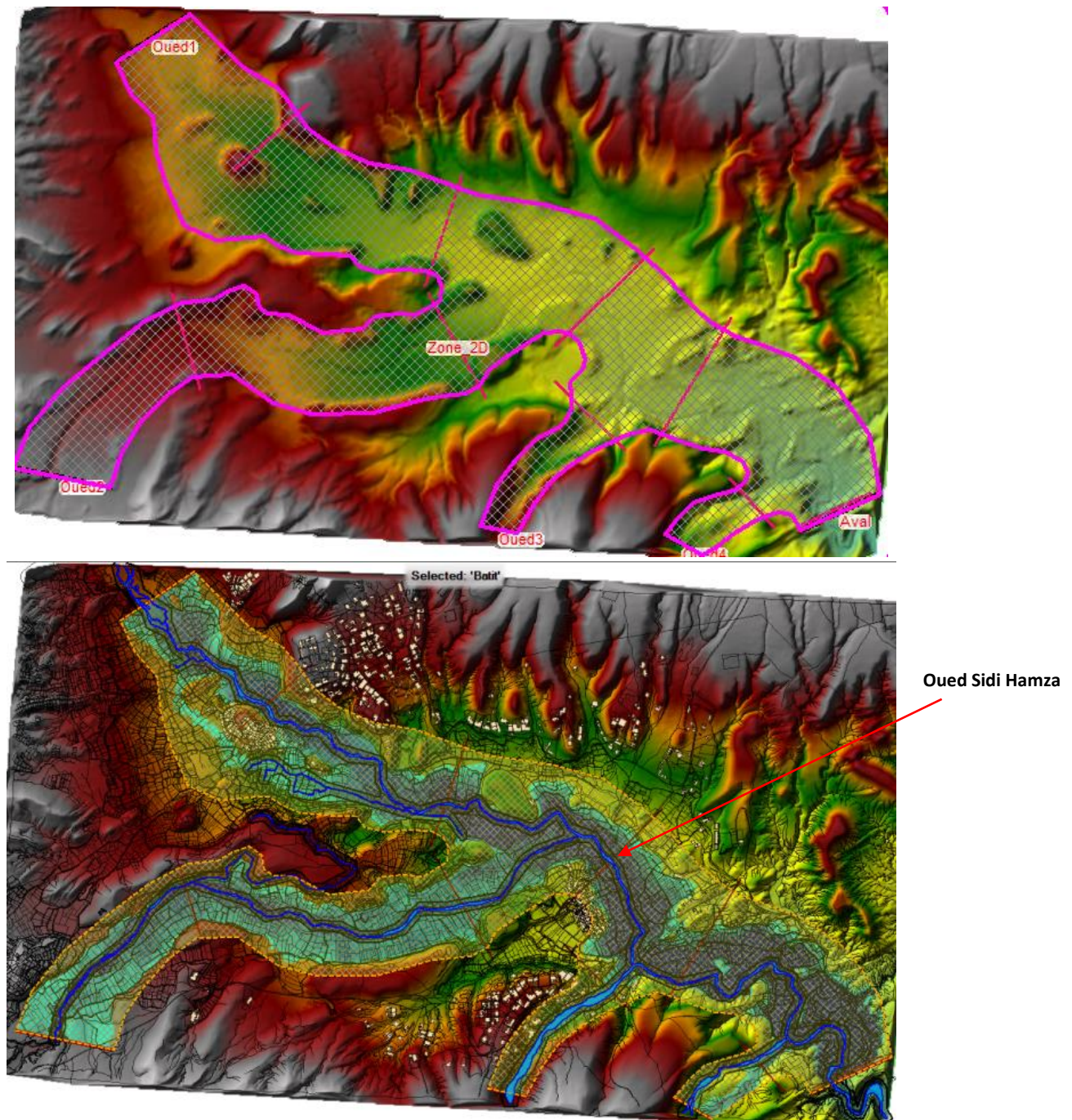


Figure 38: 2D flow area editor de sous bassin versant de l'oued zaouia Sidi Hamza

Dans la version actuelle de HEC-RAS, l'utilisateur doit créer une couche de fichier de forme polygonale à l'extérieur de HEC-RAS (à savoir, par exemple, dans ArcGIS), puis l'importer dans RAS-Mapper. RAS-Mapper va convertir le Shapefile dans un fichier Geotiff, ce qui est la façon dont il peut utiliser les données. Le Shapefile doit contenir des polygones caractéristiques. Les polygones doivent également avoir une classification des terres dans le tableau de données.

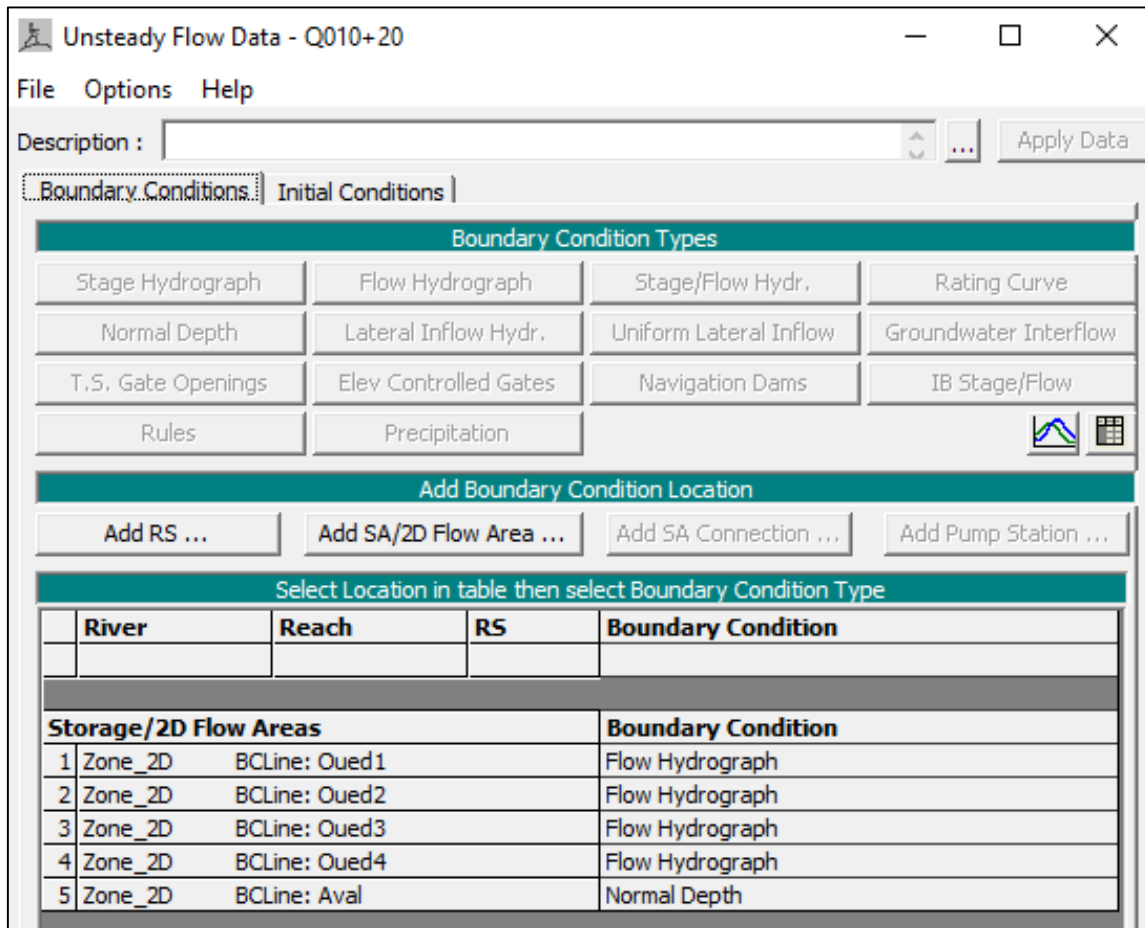
Passant maintenant à l'étape suivante qui consiste à Entrer les limites hydrauliques : Cette étape concerne la digitalisation des limites amont/aval d'un bassin et les limites latérales. Pour ce faire on choisit l'outil 2D Area BC Lines et on délimite manuellement les lignes selon notre bassin.

Et pour les précipitations on active dans Unsteady Flow Data la zone SA/2D Flow Area.

Flow area 2D a une option supplémentaire appelée "Condition initiale de Temps de montée". Si une zone 2D a des conditions externes aux limites (hydrogrammes) ou des liens vers des éléments 1D, dans



lequel le flux sera entré dans ou hors de la zone 2D dès le début de la simulation, on peut activer la Condition initiale « Ramp up Time » pour obtenir l'écoulement à travers la zone 2D afin d'établir ses conditions initiales avant le début de la simulation (on peut dire que c'est un temps de préchauffage). Maintenant que les données géométriques sont créées, on passe à définir les conditions aux limites (Fig.39), en basant sur ces dernières Hec-Ras peut calculer les caractéristiques de l'écoulement dans chaque cellule.



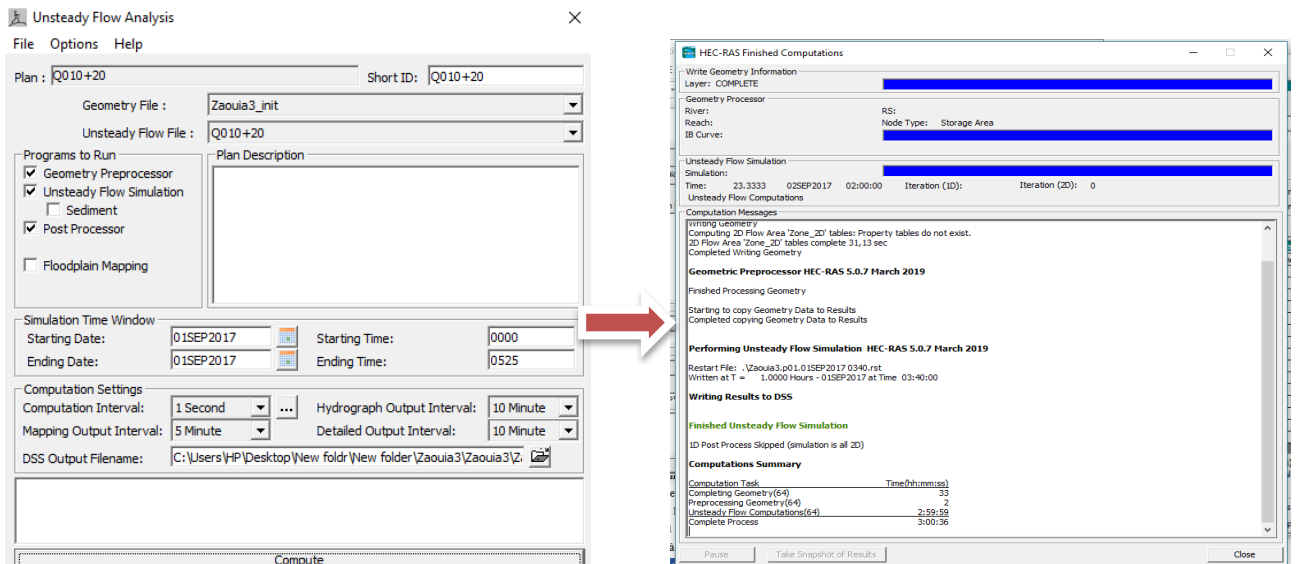


Figure 40 : Simulation des crues pour l'oued Zaouia Sidi Hamza

Maintenant on peut animer l'écoulement et extraire les données de la profondeur des eaux et de la vitesse et bien d'autres informations dans chaque cellule.

## V. Résultats de la simulation de la crue

Après la simulation, les résultats obtenus peuvent être affichés sous formes des graphes (forme de niveau d'eau de chaque période de retour sur les profils, une vue de 3D et la courbe de tarage) ou des tableaux, la (Fig. 41) illustre les résultats obtenues :

Les résultats de simulations hydrauliques pour les périodes de retour 5, 10, 20, ,50 ,100 et 500 ans sont données en annexes.

Les tableaux de résultats récapitulent quelques facteurs caractérisant les régimes d'écoulement. Ainsi, pour chaque section de calcul sont donnés les paramètres suivants (Fig.41 A, B et C) :

- Le débit maximum transitant par la section.
- La cote minimale de la section qui renseigne sur la pente naturelle du lit de l'oued.
- La cote maximale atteinte par l'eau au passage de la crue. Ces cotes permettent de cartographier les zones inondées et d'identifier les ouvrages qui présentent des débordements.
- La cote critique de la ligne d'eau à l'amont des ouvrages de franchissement.
- La pente moyenne de la ligne d'eau.
- La Vitesse maximum de l'écoulement.
- Les sections mouillées et la largeur au miroir.

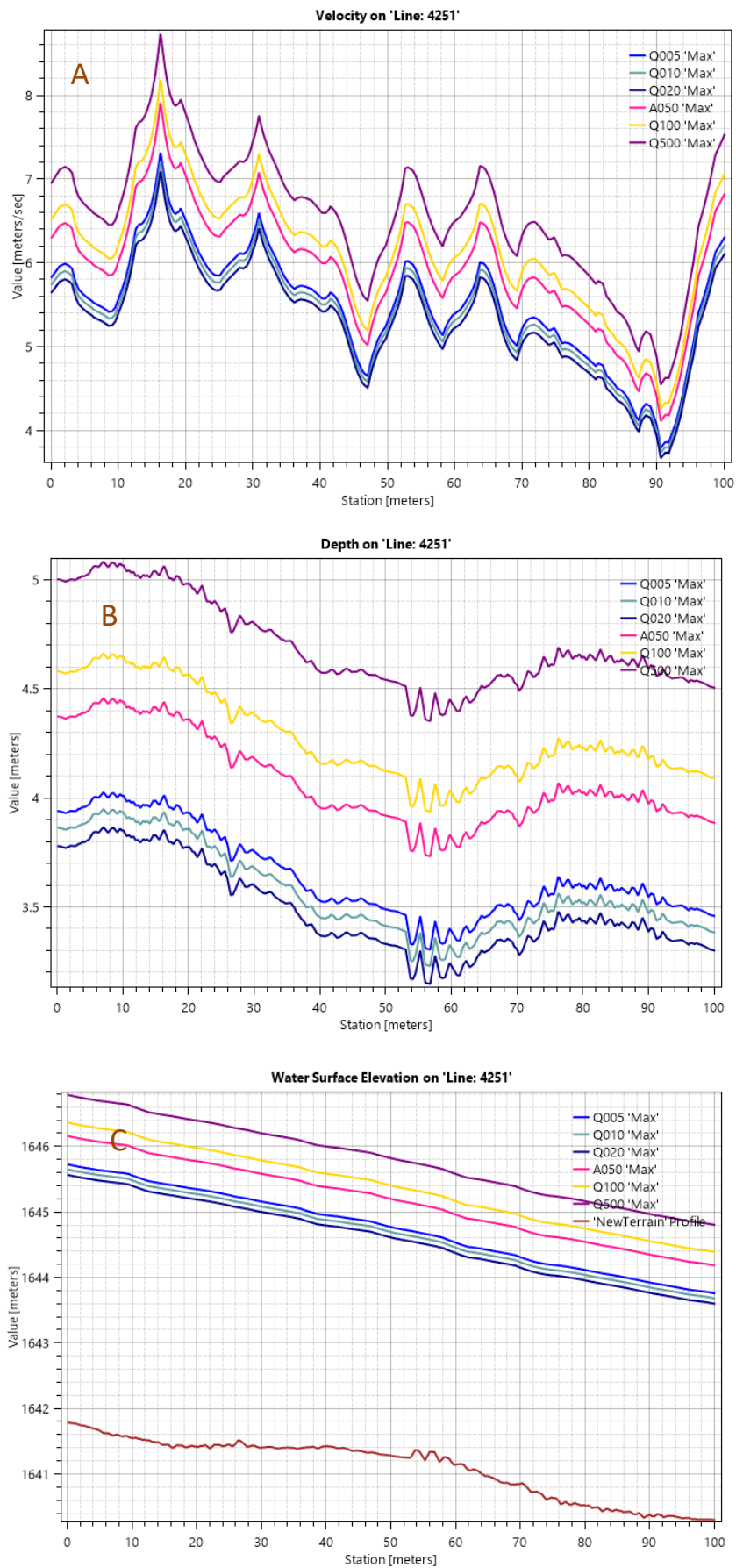


Figure 41 : (A, B et C) : Résultats récapitulant quelques facteurs caractérisant les régimes d'écoulement



## 1. Résultats de la simulation de la crue décennale

### 1-1- Calage du modèle hydraulique HEC RAS

Le modèle HEC-RAS 2D réalisé en 2015 a pu être calé sur la crue de septembre 2017. Des hauteurs d'eau observées pendant cette crue et même les vitesses d'écoulement ont été précisées.

Les coefficients de Strickler utilisés habituellement en fonction de la végétation et de la granulométrie du lit mineur ont été validés sur ce tronçon et appliqués sur l'ensemble de l'oued de Zaouiate Sidi Hamza. Le débit pour lequel les laisses de crues sont comprises entre la ligne d'eau et la ligne de charge est de  $480 \text{ m}^3/\text{s}$  à plus ou moins  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  près. Ces éléments ont permis de valider le calage du modèle HEC RAS 2D.

L'objectif des simulations hydrauliques est de retracer l'effet des crues de 5,10, 20, 50, 100 et 500 ans sur le centre de Zaouiate Sidi Hamza et l'oued traversant ce centre. Ceci permettra de connaître l'étendue des zones d'inondations, la capacité d'écrêtement du débit au niveau de la zone d'étude et d'évaluer le risque lié à chaque période de retour, mais aussi de dégager les principales défaillances de ces systèmes d'écoulement : sections d'écoulement insuffisantes, obstacles à l'écoulement, dimensions des ouvrages de franchissement insuffisantes, etc.

### 1-2- Hauteur d'eau :

La ligne d'eau représente une vue en profile de tronçon d'étude avec le niveau et la surface d'eau de l'oued et le niveau d'eau de chaque période de retour. Dans notre cas la figure suivante montre l'absence de grande différence entre les niveaux de périodes de retour, la (Fig.42) illustre les résultats obtenus concernant la ligne d'eau.

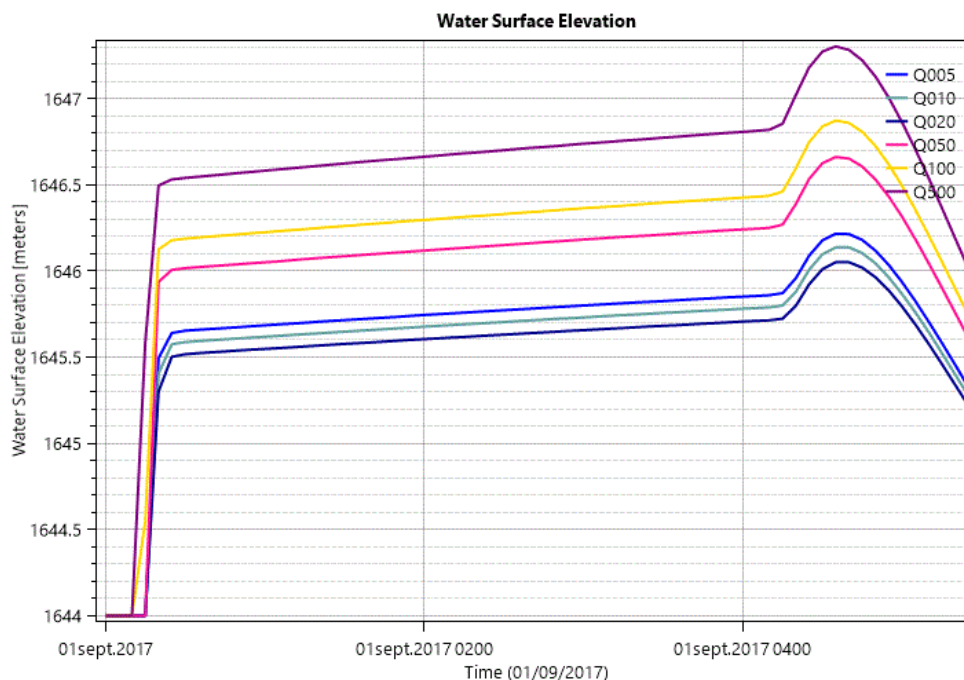


Figure 42 : Vue en profile de tronçon d'étude avec le niveau et la surface d'eau de l'oued et le niveau d'eau de chaque période de retour

On observe presque la même allure pour tous les niveaux d'eau, au début il y a une augmentation accentuée de la vitesse d'écoulement, puis une augmentation légèrement stable ; et une diminution finale après un pic très élevée de la hauteur d'eau.

### 1-3- Vitesse d'écoulement :

La Figure 43 représente la variation de la vitesse d'écoulement d'eaux pour chaque période de retour en fonction de la distance à partir de l'exutoire sur la bordure gauche, au centre et la bordure droite de la rivière. D'après le graphe (**Fig. 43**) on observe presque la même allure pour tous les niveaux d'eau, au début il y a une augmentation accentuée de la vitesse d'écoulement, puis une augmentation légèrement stable ; et une diminution finale après une pic très élevée de la vitesse.

On se déplaçant de l'amont vers l'aval du tronçon, on observe que la vitesse devient plus importante au centre et à l'exutoire, en raison de la variation de la topographie de la zone étudiée. On observe aussi que la vitesse varie entre la rive droite et la rive gauche de tronçon ; elle est plus importante au niveau de la rive droite toute en long de la rivière. En général, La vitesse d'écoulement influence directement sur l'importance de l'érosion et la quantité du volume transporté par les eaux de crue.

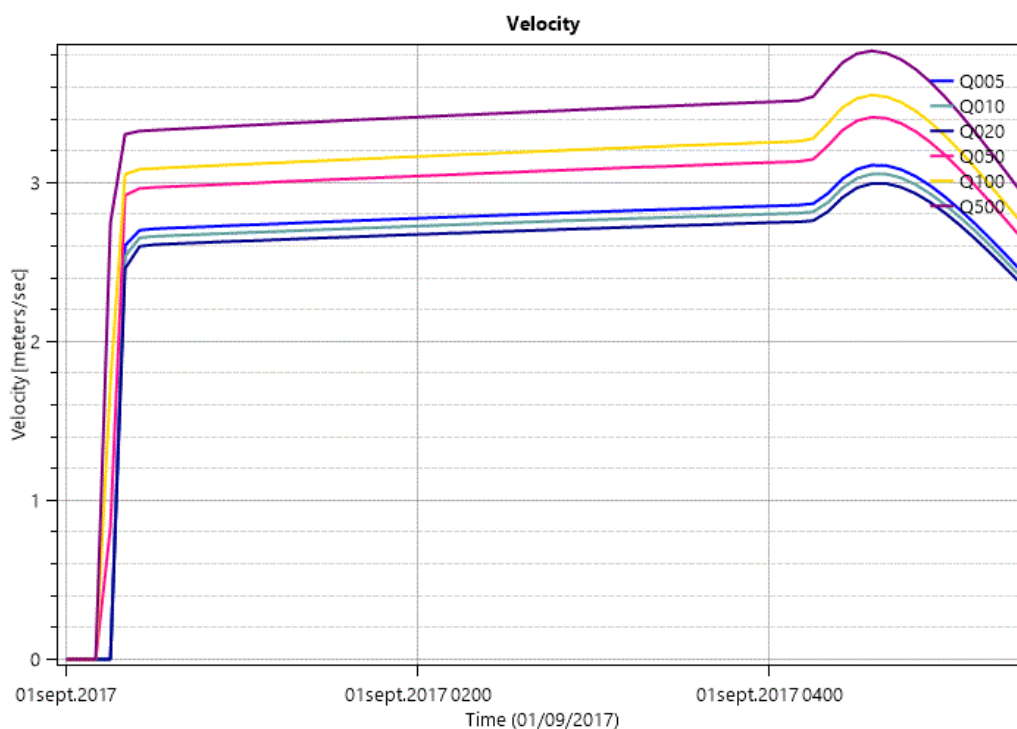


Figure 43 : la variation de la vitesse d'écoulement d'eau pour chaque période de retour

Le passage de la crue centennale engendre des débordements au niveau des constructions situées sur la berge droite le long de l'oued. Les terrains agricoles situés le long de l'oued sont contournés.

## 2. Cartographie des zones inondables dans le tronçon modélisé, analyse de l'aléa, vulnérabilité et synthèse du risque

### 2-1- Risque

Les risques sont des événements physiques potentiellement dommageables, des phénomènes ou des activités humaines qui causent des pertes en vies humaines, des blessures, des dommages matériels, des perturbations sociales et économiques ou la dégradation de l'environnement (Makoka, 2005).

Et Comme le montre la **Figure 44**, le risque d'inondation est une combinaison de la probabilité d'une inondation (l'aléa) et les conséquences potentielles découlant (la vulnérabilité) (Faugères, 1992 ;Morin, 2008).



Figure 44: Définition de Risques selon (Somot, 2005)

Le risque naturel en général est défini par le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité L'aléa est la manifestation d'un phénomène naturel (inondation, séisme, avalanche...etc.) et la vulnérabilité caractérise la capacité d'un enjeu à résister à un aléa donné. Ainsi la vulnérabilité traduit un niveau de conséquence prévisible d'un phénomène dangereux sur l'enjeu considéré (Somot, 2005).

### 2-1-1- Définition du concept du risque.

Le concept de risque (Fig.45) est en soi assez complexe puisque qu'il ne peut se définir qu'en considérant simultanément, et sur une même parcelle d'espace, un phénomène physique (en l'occurrence, la présence d'eau), et une utilisation sociale de ce même espace qui souffre de cette présence d'eau.

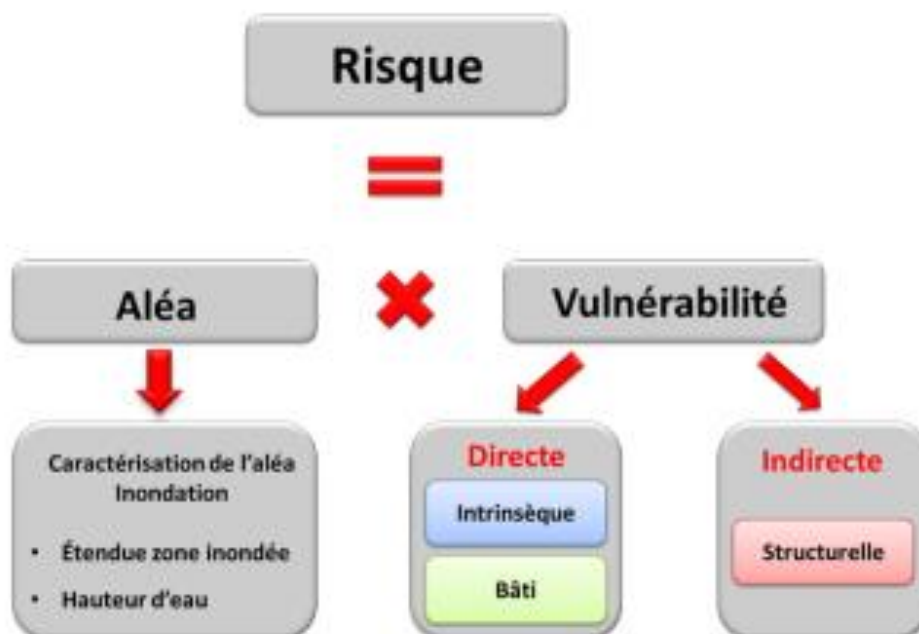


Figure 45 : Définition du risque et Caractéristiques de l'aléa et de la vulnérabilité.

Le risque est défini comme résultant de deux facteurs réputés indépendants que sont (**Fig. 44 et 45**) :

L'aléa et la vulnérabilité (Gilard, 1998) (**Fig.46**), Il doit être bien entendu que cette décomposition du risque est une première modélisation conceptuelle de l'objet étudié qui comporte dans sa part de simplification (Gilard, 1998) .

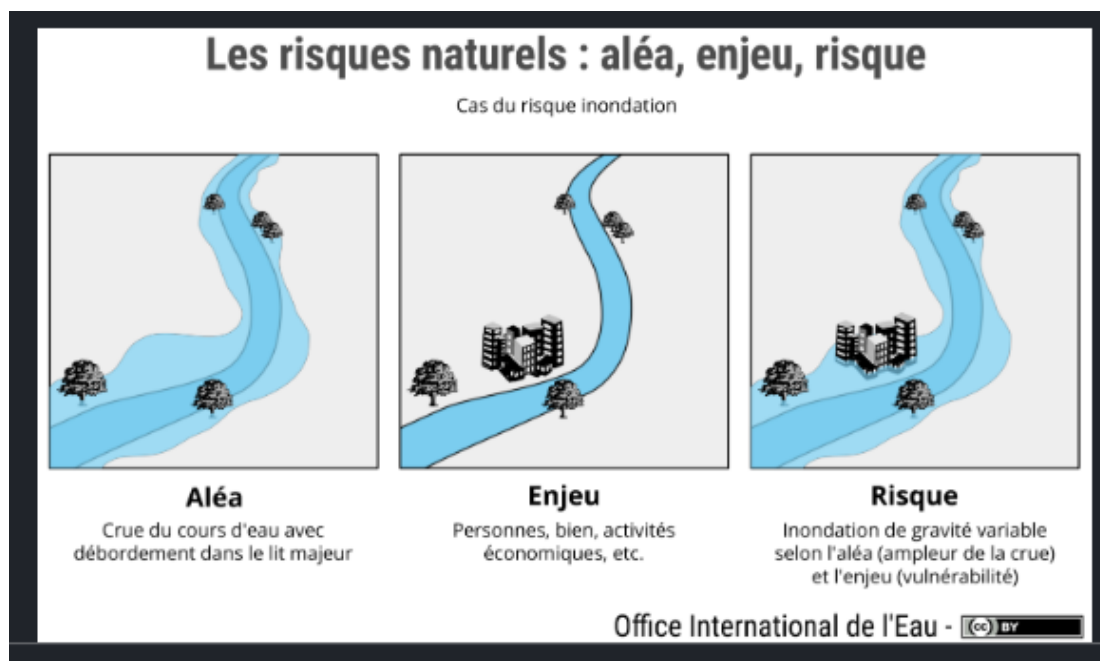


Figure 46 : L'aléa et la vulnérabilité (office international de l'eau)

## 2-2- L'aléa

En générale, l'aléa est décrit par la probabilité d'occurrence et l'intensité du phénomène en un lieu et à un instant donné (Dauphine, 2001 ; Linsley, 1982). Il est défini comme la probabilité que le phénomène d'inondation d'une intensité donnée puisse se produire en un lieu déterminé (**Fig.47**). Quatre paramètres principaux sont nécessaires pour qualifier l'aléa inondation :

- La vitesse du courant,
- La période de retour de crues,
- La hauteur et la durée de submersion,
- Le volume de matière transportée.

### Caractérisation des niveaux d'aléas :

Les niveaux d'aléas sont déterminés en fonction de l'intensité des paramètres physiques de l'inondation de référence qui se traduisent en termes de dommages aux biens et de gravité pour les personnes.

### 2-2-1- L'analyse de l'aléa

L'analyse de l'aléa est la phase classique dans la mesure où la plupart des études en matière de risque d'inondation hydrologique et hydraulique des crues (Gondrand, 1995) . L'analyse spatialisée peut prendre plusieurs formes plus ou moins équivalentes, par exemple, pour une crue historique ou pour une crue de projet, les paramètres caractéristiques de l'aléa ne sont autres que la durée de l'inondation, la profondeur de l'eau et la vitesse du courant qui sont des variables, se rapportant à la parcelle considérée (**Fig. 47**).

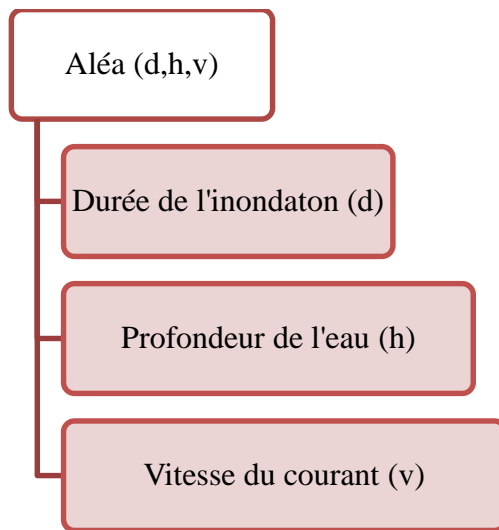


Figure 47 : Aléa (Gondrand, 1995)

### 2-2-2- Cartographie de l'aléa inondation

Après la simulation qu'on a effectuée, on peut, grâce à l'HEC-GeoRas ou RAS MAPPER, exporter les résultats de simulation vers l'Arc Gis afin de délimiter les zones inondables. La figure 48 représente la délimitation finale de la zone inondable avant exportation du dossier de simulation.

Pour les secteurs d'étude l'aléa inondation peut être caractérisé par deux facteurs : la hauteur de submersion et la vitesse d'écoulement. Les valeurs calculées des deux paramètres sur les modèles hydrauliques sont reportées dans des fichiers « Shapfile » sur Arc Gis et peuvent donc être visualisées à l'aide de cet outil (**Fig. 48**).



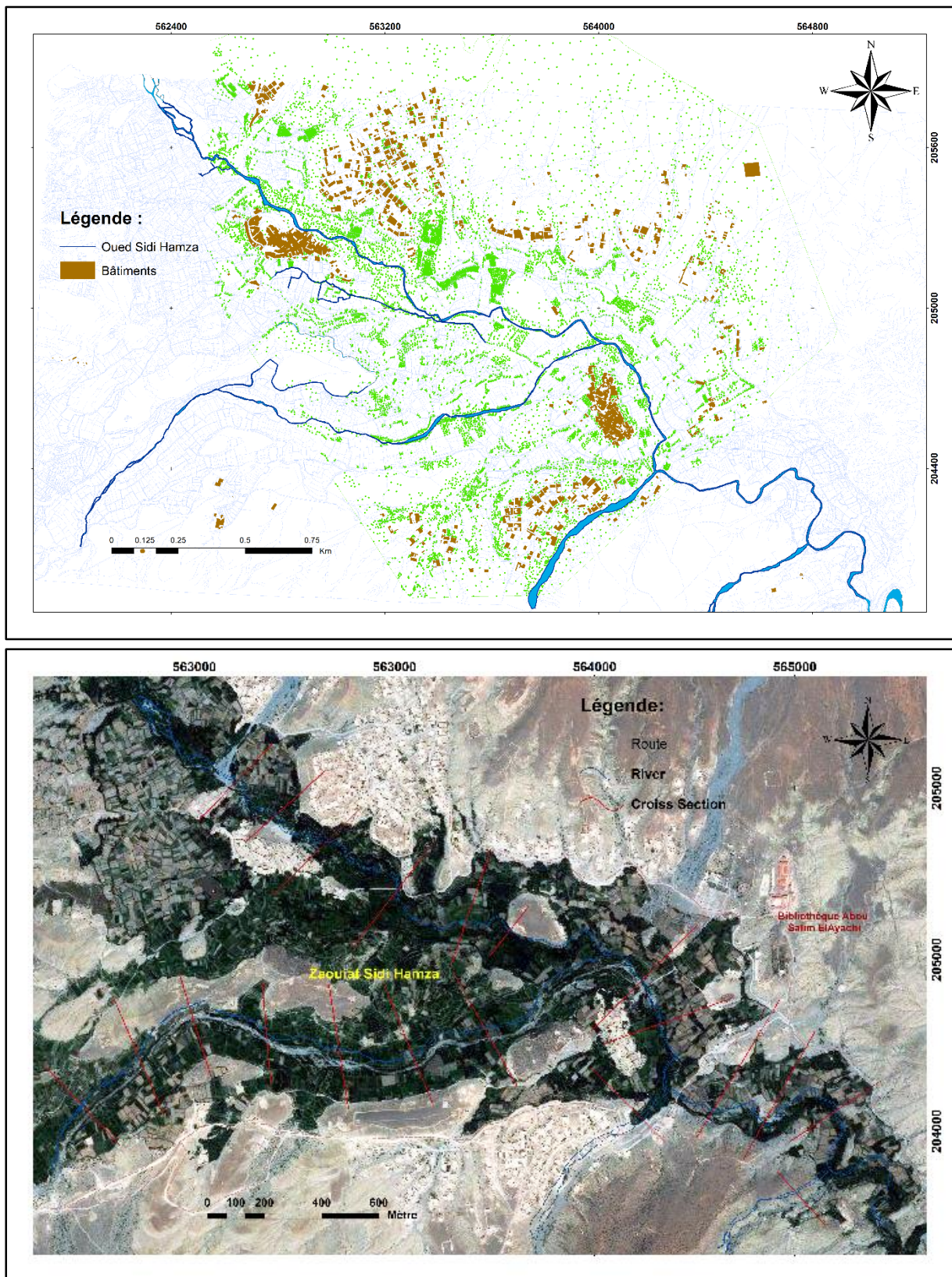


Figure 48 : centre étudié de Zaouia Sidi Hamza

En utilisant Ras Mapper on peut visualiser l'écoulement dans la zone délimitée durant la période et avec le pas du temps choisi. La (Fig.49) représente la délimitation finale après l'exportation du dossier de simulation : Par exemple pour la crue décennale, on remarque un débordement au moins claire en aval de l'oued Zaouiate Sidi Hamza. ec un débordement plus .Les vitesses maximales varient entre 2.0



m/s et 1,7 m/s la lame d'eau maximale a une valeur oscillant entre 2 m et 3.3 m. L'écoulement est partout torrentiel.

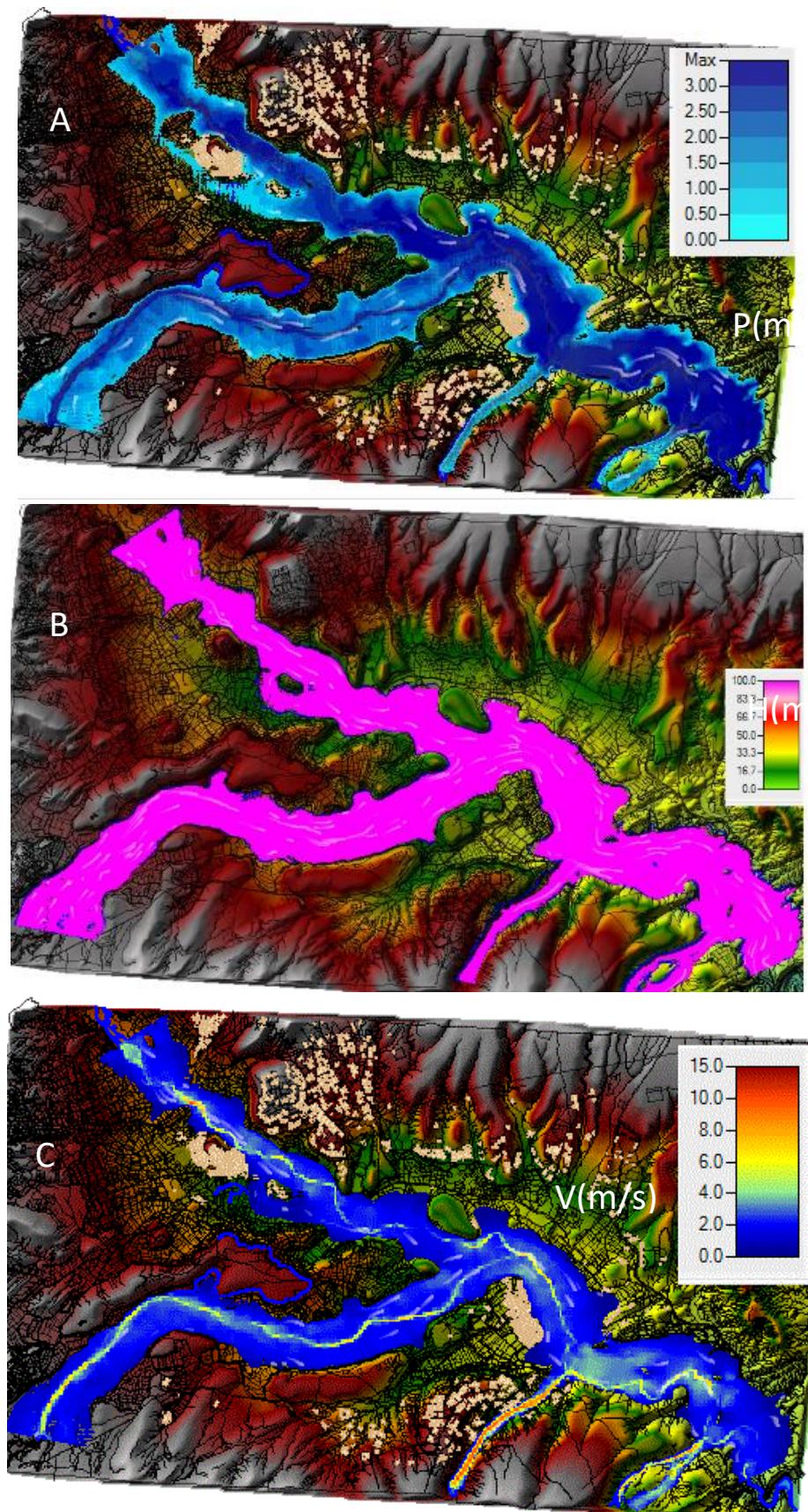


Figure 49 : Résultats de la simulation de la crue décennale (Profondeur(A), Hauteur d'eau (B) et Vitesse(C) d'eau)



Alors que la crue vingtennale (**Fig. 50**) ne provoque pas d'inondations. Seuls quelques débordements s'observent en amont La hauteur maximale de débordement par rapport au bord supérieur de la rive droite est de 0.4m. Pour la rive gauche, il n'y a aucun débordement. Les vitesses maximales varient entre 2.3 m/s et 1.7 m/s. Elle atteint ponctuellement les 2.23 m/s. La lame d'eau maximale a une valeur oscillant de 1.5 m.

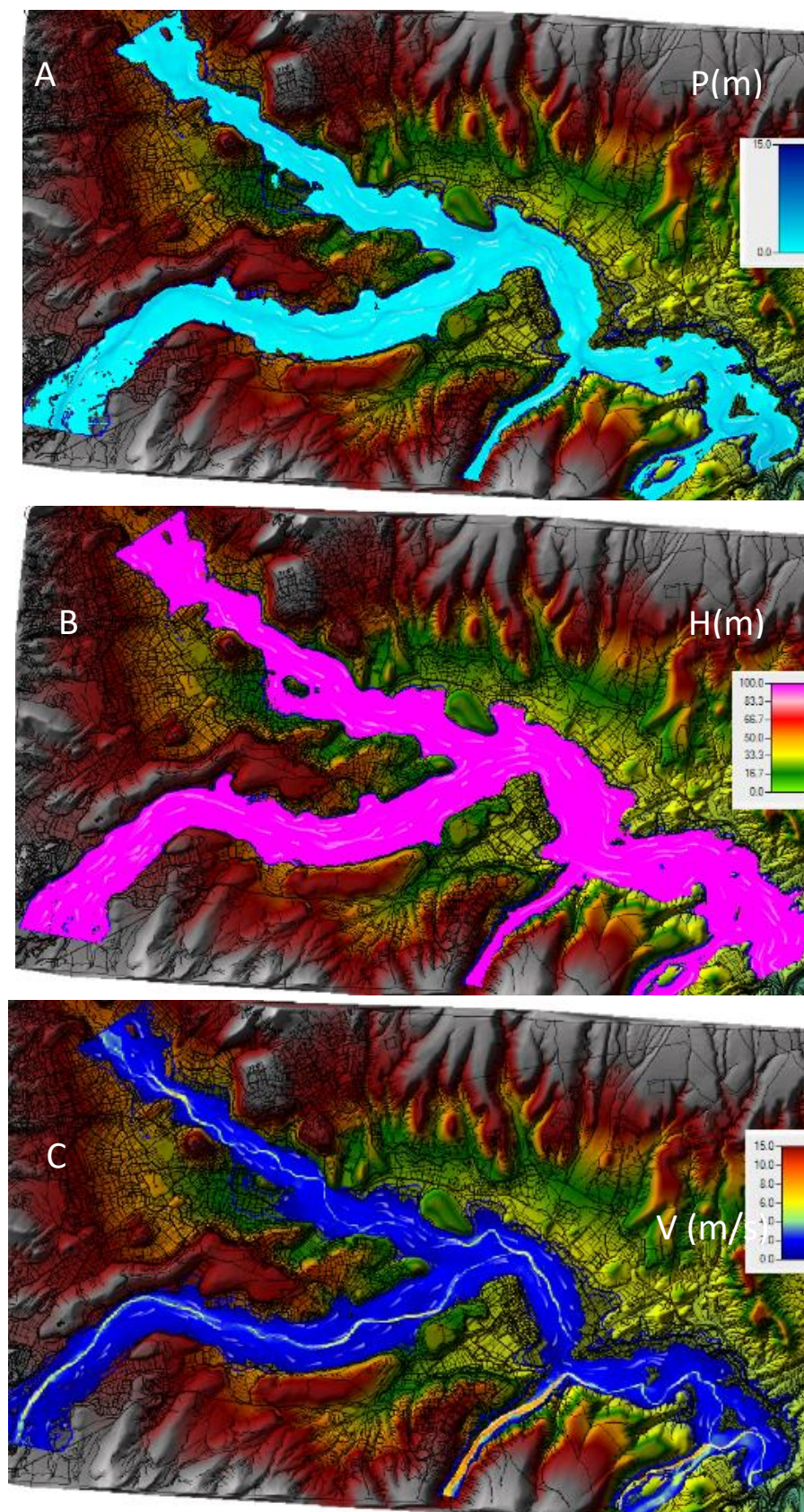


Figure 50 : Résultats de la simulation de la crue vingtennale (Profondeur(A), Hauteur d'eau (B) et Vitesse(C))



### 3. Vulnérabilité

La vulnérabilité est définie par Larousse (2012) comme « le fait qu'une personne ou un bien soit exposé à des atteintes des blessures ». Selon (D'Ercole, 1994), la vulnérabilité est « la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique ». (Aste, 2005) On définit la vulnérabilité comme, « le niveau d'endommagement potentiel (compris entre 1 et 0) d'un élément exposé donné, soumis à l'action d'un phénomène pressenti ou déclaré, d'intensité donnée ».

La vulnérabilité désigne le niveau de perte ou de dommage prévisible, résultant d'un phénomène naturel de magnitude donnée, sur les enjeux ; (UNDRO., 1979) . Les enjeux cités ici sont les personnes, les biens, activités, moyen et patrimoine. (Veyret, 2004).

Elle représente alors l'interaction entre des biens et matériels exposés et un aléa d'intensité variable (Izambart, 2011) Ainsi, la vulnérabilité pourra évoluer dans le temps et dans l'espace. Le premier aspect de la vulnérabilité (Kienberger, 2007) des biens aux inondations est leur potentiel d'être atteint par l'eau de crue, c'est-à-dire l'exposition (**Fig.50**).

Après avoir identifié les zones inondables et la vitesse d'écoulement pour les différents débits prévus, **Figure 51** représente des méthodologies d'évaluation des différents aspects de la vulnérabilité humaine. On a classifié et organisé leurs couches thématiques pour faire extraire à la fin la carte des zones inondables tout au long du tronçon d'oued Zaouiate Sidi Hamza, les figures suivantes représentent les zones inondables pour les six profils (**Figs. 52, 53,63**).

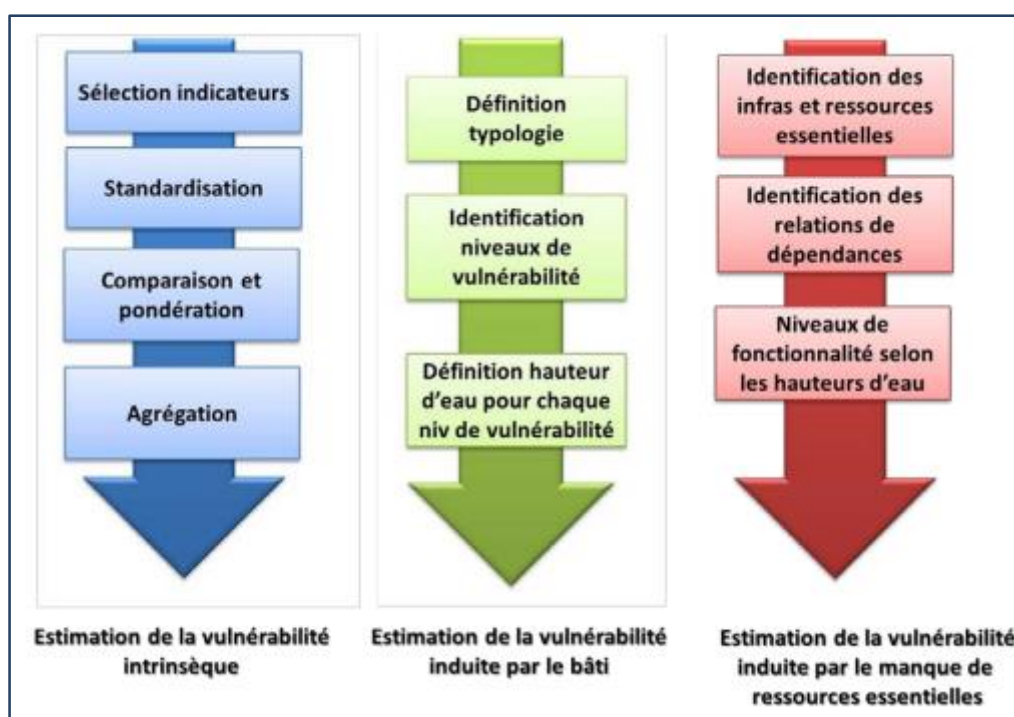


Figure 51: Vue schématique des méthodologies d'évaluation des différents aspects de la vulnérabilité

Donc pour notre cas, la représentation spécialisée pertinente de cette composante du risque a pris en considération la diversité de l'occupation du sol.

a. Hauteurs d'eau de la crue et vitesse maximale d'écoulement lors de la crue quinquennale d'Oued Zaouiate Sidi Hamza (Figs.52 et 53)

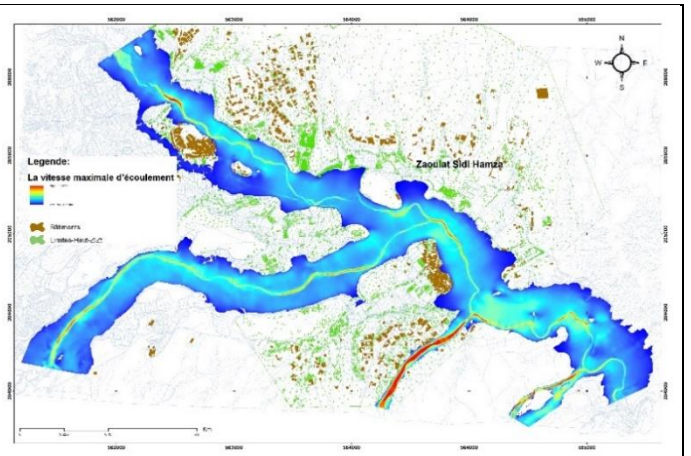
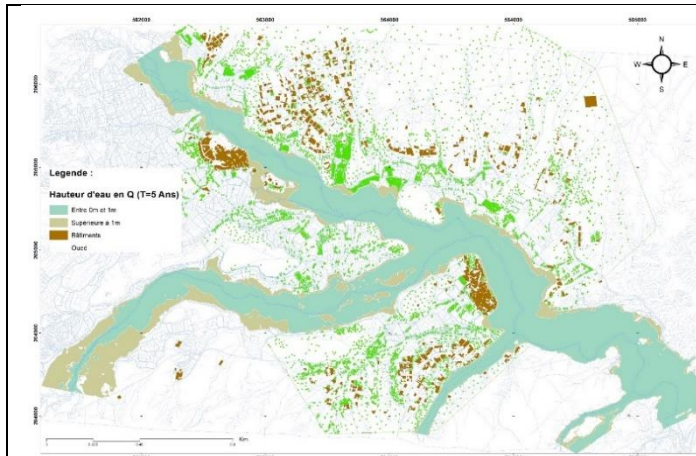


Figure 52 : Hauteur d'eau en Q(T=5 Ans) pour Oued Zaouiate Sidi Hamza

Figure 53 : La vitesse maximale d'écoulement lors de la crue quinquennale d'Oued Zaouiate Sidi Hamza

En crue, l'oued Zaouiate Sidi Hamza traverse le centre avec un débordement plus au moins clair. Des débordements se produisent en aval de l'oued (Fig.52 et 53). Pour les vitesses maximales d'écoulement obtenues lors de la crue, sont très élevée dans le lit mineur mais sont majoritairement inférieures à 1.5 m/s dans les différents lits majeurs.

b. Hauteurs d'eau de la crue et Vitesse d'écoulement de la crue décennale de l'oued Sidi Hamza (Figs.54 et 55)

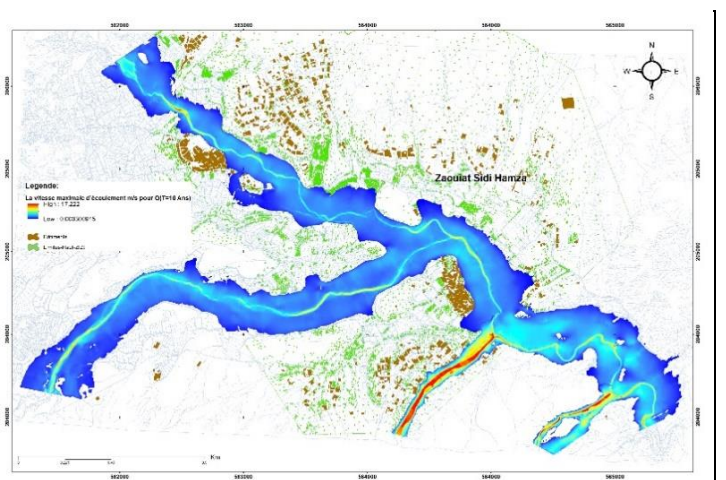
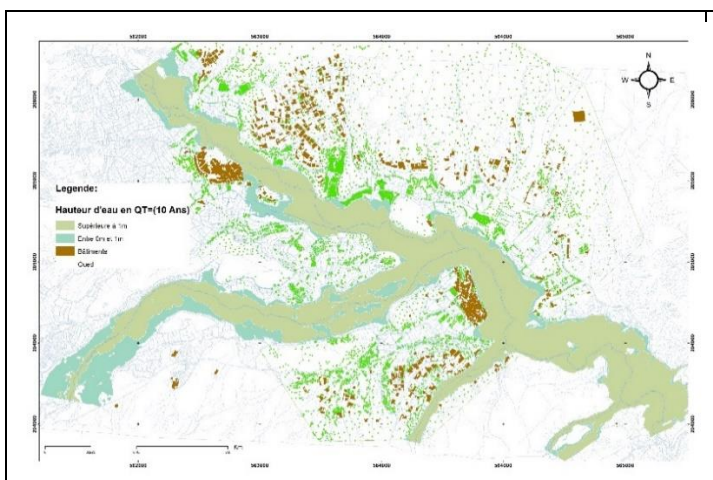


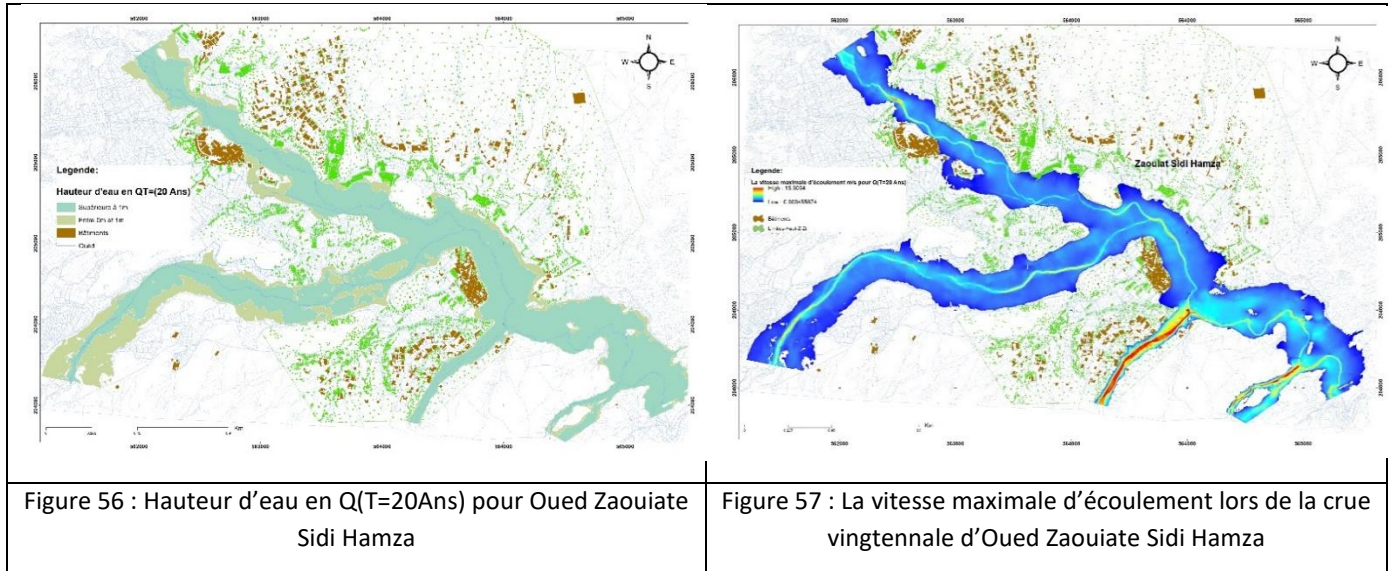
Figure 54 : Hauteur d'eau en Q(T=10Ans) pour Oued Zaouiate Sidi Hamza

Figure 55 : La vitesse maximale d'écoulement lors de la crue décennale d'Oued Zaouiate Sidi Hamza



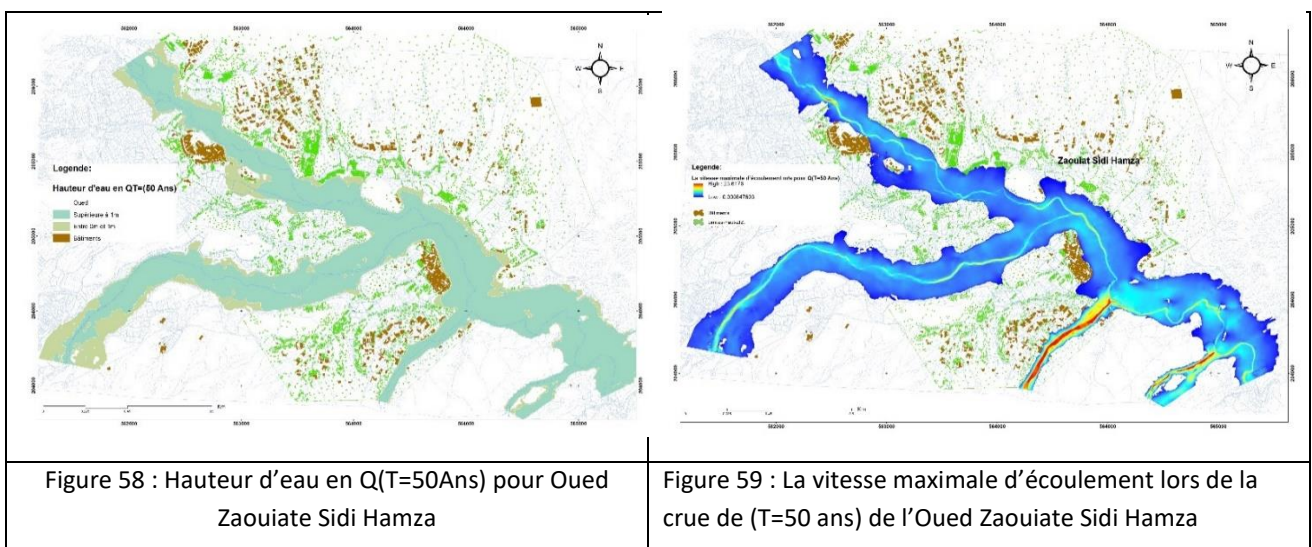
D'après ces résultats obtenus illustrés sur les (Figs. 54-55), on constate que l'oued Zaouiate Sidi Hamza est inondé avec des hauteurs d'eau pouvant dépasser un mètre avec des vitesses d'écoulement qui varie entre 0.003 et 17.22 m/s.

c. Les hauteurs d'eau de la crue et la vitesse d'écoulement de la crue vingtennale de l'oued Sidi Hamza (Figs.56 et 57)



Pour la crue vingtennale, des débordements constatés au centre et en aval rive gauche et des débordements faibles en amont. (Figs. 56, 57), les figures montre aussi les vitesses maximales d'écoulement obtenues qui sont très élevées dans le lit mineur mais sont majoritairement inférieures à 1.5 m/s dans les différents lits majeurs.

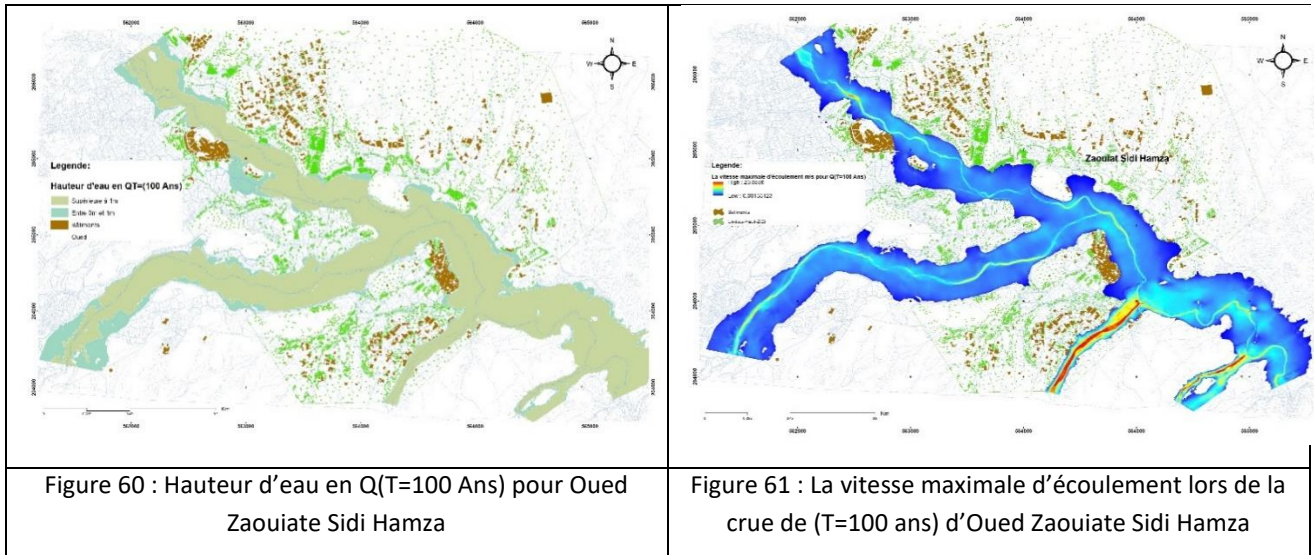
d. Les hauteurs d'eau et la vitesse d'écoulement de la crue cinquantenale de l'oued Sidi Hamza (Figs.58 et 59)



Concernant la crue cinquantenale (Figures 58-59) de l'oued Zaouiate Sidi Hamza est débordée d'une manière légèrement élevée à la crue Q (T=5, 10 ou 20 ans) surtout en amont de la rive droite et au

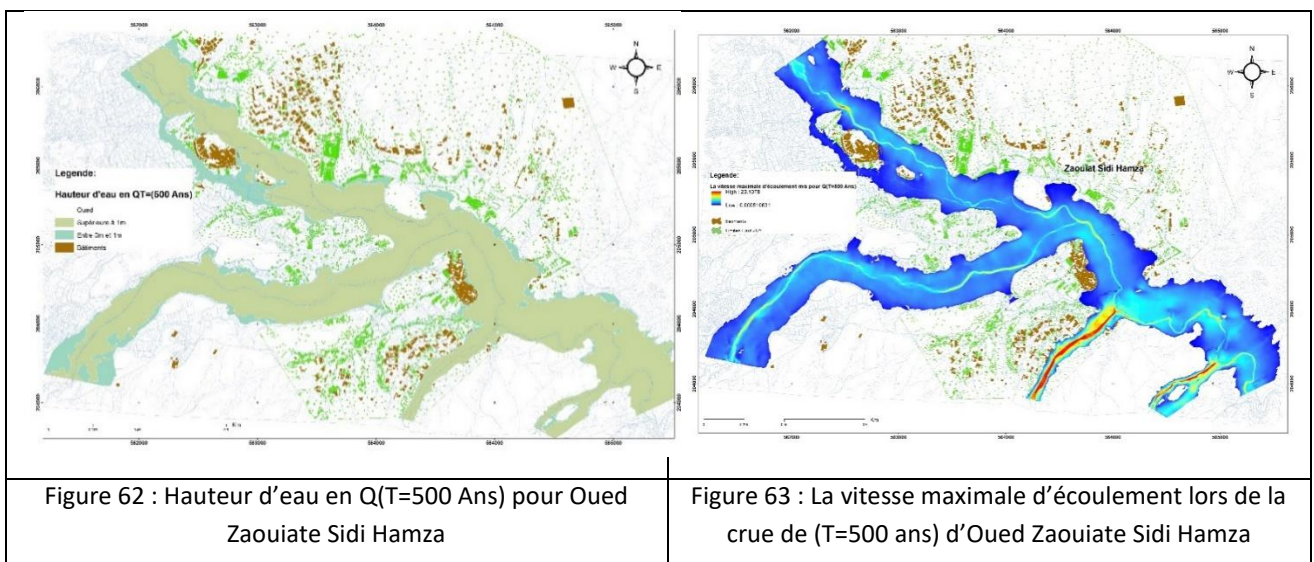
centre de notre zone d'étude l'oued. On constate aussi des faibles débordements en amont rive gauche.

e. Les hauteurs d'eau et la vitesse d'écoulement de la crue de centennale de l'oued Sidi Hamza (Figs.60 et 61)



Pour la crue centennale de de l'oued Zaouiate Sidi Hamza est débordée d'une manière légèrement plus élevée à la crue Q (T=5, 10,20 et 50ans). Le centre Zaouiate sidi Hamza est inondé avec des hauteurs d'eau pouvant dépasser un mètre. Les vitesses maximales sont très élevées dans le lit mineur mais sont majoritairement inférieures à 1 m/s dans les différents lits majeurs. (Figures 60 et 61)

f. Les hauteurs d'eau et la vitesse d'écoulement de la crue de (T=500 ans) de l'oued Sidi Hamza (Figs.62 et 63)



Concernant cette crue Q (T=500 Ans), (Figs.62 et 63) on constate que le centre Zaouiate sidi Hamza est totalement inondé par des hauteurs d'eau supérieures à 1 m. mais pour les vitesses d'écoulement calculées sont presque semblables aux celle calculées en crue centennale, donc il s'agit des vitesses d'écoulement très élevées.

#### 4. Conclusion

Les différentes simulations hydrauliques de l'aménagement contre les inondations au centre de Zaouiate Sidi Hamza montrent que :

- Les impacts sont identifiés principalement en rive droite en aval et au centre de l'oued de Zaouiate Sidi Hamza. Les vitesses d'écoulement en crue centennale et cinquencentennale.
- Pour une crue centennale et cinquencentennale, les habitations (bâtiments) sont contournées. En raison de dépassement de 1 m pour les hauteurs d'eau, et à aussi à cause des vitesses d'écoulement Max les plus élevées.
- Les trois dernières crues reflètent un danger potentiel que constitue Oued Zaouiate Sidi Hamza.
- le passage de la crue centennale engendre des débordements au niveau des constructions situées sur la berge droite de l'oued en amont et en aval. Les débordements concernent également les terrains agricoles, situées en le long de l'oued. **(Fig. 53)**.

Ces résultats obtenus peuvent servir aux décideurs d'élaborer des plans d'aménagement spécifiques à la zone étudiée pour lutter contre les inondations probables et sensibiliser les populations concernées par les zones le plus risquées.

Le but principal de ce chapitre est d'offrir une idée sur le risque de ces différentes composantes, aussi donnée une vision sur la manière d'évaluation du risque d'inondation ainsi que d'avoir une stratégie globale de prévention de ce risque.

- Ce travail nous a permis de constater que les inondations sont devenues également un grand risque dans le centre de Zaouia sidi Hamza , qui doivent être traitées dans les programmes de planification en déterminant les zones à risque et le classer en fonction de la hauteur des eaux de la crue, pour minimiser les dégâts des catastrophes naturelles et de réduire les impacts d'inondation dans la zone d'étude ,afin de protéger le centre et les agglomérations exposées face à ce risque.
- Des aménagements saura hautement recommander pour une gestion des risques d'inondation au niveau du cours d'eau d'Oued Sidi Hamza de proposer un schéma de prévention contre les inondations grâce à ce travail.

## VI. Gestion des inondations

### 1. Introduction

La gravité de ce type de risque naturel « inondation » auront eu le mérite de susciter une prise de conscience préalable à l'élaboration d'une politique de prévention des risques naturels dans plusieurs pays, notamment au Maroc. Tenant comptes à plusieurs mesures qui présentent plusieurs avantages en lieu avec la sécurité des personnes (rehaussement des rues publiques, retrait des résidences qui se situent dans le méandre.) la rentabilité économique (immunisation des résidences) et la résilience contre le risque d'iodation 'système d'alerte précoce, repère de crue.)

### 2. La réglementation :

Celle-ci ancienne, variante, souvent incomplète parfois mal adoptée, elle devrait systématiquement prendre en compte les actions anthropiques aboutissant à une modification substantielle du relief (travaux d'aplanissement, extraction de gravier et carrière etc...) à l'édification de toute construction en zone inondable, mais très souvent la réglementation n'est pas respectée ce qui amené souvent, à des situations très dangereuses. (Benmechernane, 2013) .

### 3. La prévision :

La première démarche à entreprendre est de procéder à un inventaire des observations de terrain, la seconde est de mettre en place un service d'annonce de crue.

*a. Les observations de terrains :*

Il s'agit d'analyser, aux différents endroits des bassins versants susceptibles de subir une crue ou une inondation, les paramètres suivants :

- La délimitation précise des secteurs inondables et ce, pour chaque type de crue ;
- La typologie des inondations (pointe, durée, récurrence, intensité) ;
- L'ampleur de l'inondation possible ;
- La période de retour ;
- L'évaluation des dommages à craindre, sur les plans matériels et humains. (Lobled, 1987).

*b. La mise en place d'un service d'annonce de crues*

La prévision porte sur la collecte et la transmission des données pluviométriques et hydrologiques. Bien entendu, l'efficacité des systèmes d'alerte dépend de leur qualité et donc des moyens mis à la disposition des spécialistes mais aussi de l'ancienneté des chroniques disponibles. Il est très important de multiplier et d'accumuler des données dans la plupart des cas. Les délais, souvent, pour alerter les populations se réduisent à quelques heures voir moins. Cependant l'apparition de capteurs et des systèmes de transmission a permis d'améliorer l'annonce des crues. (Lobled, 1987).

Deux aspects de la prévision peuvent être distingués :

❖ **La prévision immédiate** : Avec l'alerte des populations quelques heures avant que la crue n'intervienne. Ce rôle était joué par des observateurs chargées de suivre la montée des eaux et de transmettre les informations par les moyens de communication. Les mesures sont progressivement automatisées et les services ont même la possibilité d'interroger les stations en cas de besoins que ce soit sur la pluie, les débits, les volumes d'eau des retenues, l'onde de crue, etc... L'implantation d'un réseau de radar météorologique qui mesure la pluie tombée, avant son accumulation au sol, permet d'anticiper au mieux et peut représenter un véritable outil d'aide à la décision. Cependant la prévision notamment pour les phénomènes brutaux, n'est pas facile, car même le recours aux documents, radars et satellitaires, ne permet ni de localiser avec précision les points d'impacts majeurs des phénomènes de grande ampleur, ni d'évaluer leur importance réelle. (Yahiaoui, 2012).

❖ **La prévision à long terme** : Elle peut se faire en utilisant les documents historiques et les cartes à risques. L'analyse sur réseau hydrographique peut être d'un grand intérêt quand la prévention. Un "chevelu" dense concentré, des pentes fortes sur terrain imperméables, une incision importante, l'absence d'une couverture végétale dense, sont autant de facteurs favorables à la production d'une crue importante. Aussi, la cartographie de l'occupation du sol, base d'une analyse de vulnérabilité des biens, obtenus par traitement des données multiples, permet d'évaluer la densité du couvert végétal et d'estimer la proportion du ruissellement des différentes parcelles. La pertinence d'une cartographie géomorphologique spécialisée est largement démontrée (Lambert, 1996). Elle permet de situer les ouvrages et travaux susceptibles de modifier le fonctionnement hydro Morphologique de base (freinage ou d'accélération de l'écoulement des eaux, amplification des crues etc...). A partir des analyses effectuées, l'action devrait se tourner prioritairement vers l'aménagement du bassin versant (Yahiaoui, 2012).

#### **4. L'aménagement du bassin versant.**

Du point de vue de la prévention des crues, l'aménagement du bassin versant apparaît comme fondamental tant au niveau des versants que du lit proprement dit.



- Au niveau des versants. Le reboisement apparaît comme la première solution envisageable pour la protection des versants, car la forêt intercepte la pluie (réduction ou anéantissement de l'effet "Splash"), et retarde la fonte des neiges sous son couvert, accroît l'évapotranspiration (en particulier en été ou la transpiration des arbres contribue à l'assèchement des sols et l'abaissement du niveau des nappes phréatiques, au bénéfice de la rétention). L'humus forestier qui est relativement abondant, est capable d'absorber jusqu'à 10 fois son poids d'eau (**Loup, 1974**).
- Au niveau du lit. La correction des lits est souvent la solution proposée pour accroître la section mouillée en élargissant les lits ou encore à les approfondir par des dérochements ou encore en érigeant des digues, etc...

On peut parler aussi du recalibrage qui consiste à rectifier la section d'écoulement et à augmenter le débit, permet d'évacuer plus rapidement la crue, mais déplace le risque sur le secteur aval, sur des zones intermédiaires ne permettant pas de stocker une partie des eaux.

Mais le mieux est de chercher à étaler la crue que la contenir, un bon aménagement devrait donc examiner avec soin la solution des retenues de ralentissement, dans toutes les variantes axiales ou latérales selon les configurations locales et non pas seulement celle des barrages réservoirs.

### **1. Typologie des aménagements hydrauliques proposés pour la protection du centre de Zaouiate Sidi Hamza contre les inondations**

L'étude hydrologique complétée par l'étude hydraulique constitue une base importante pour anticiper des mesures qui pourront être techniques « structurelles ». Via la réalisation d'ouvrages de protection (barrages, endiguements, évacuation des crues, entretien du lit des rivières, reboisement des massifs dégradés...). Comme elles pourront également faire appel, parallèlement, à d'autres types d'actions dites « non structurelles » telles que l'extension et l'amélioration des réseaux d'annonce de crue, la réglementation et la maîtrise de l'occupation des sols en zones inondables, les cartes d'aléas et l'affichage du risque, la mise en place de plans et de moyens de secours, et le renforcement du cadre institutionnel...

Le choix du type d'aménagement qui s'adapte le mieux possible au contexte de chaque projet stipule la connaissance à la fois de l'ensemble des contraintes à respecter et l'ensemble des types d'aménagement qui peuvent être envisagés.

Au Maroc, le choix d'une solution est conditionné par les contraintes techniques, économiques et esthétiques. Les contraintes techniques se présentent dans les contraintes du site et de l'environnement où l'aménagement va être implanté. Les contraintes économiques résident dans le fait de choisir une variante qui présente un coût raisonnable. Quant au côté esthétique, il faut juste signaler que la variante choisie doit être compatible avec le paysage du site tout en respectant sa faisabilité économique et technique.

La commune de Zaouiate Sidi Hamza a connu une fameuse crue en 2008 qui a causé des dommages matériels, c'est pour cette raison qu'on a fait cette étude de protection contre les inondations du centre pour réduire les impacts des inondations engendré par l'oued Sidi Hamza et ses affluents.

#### **➤ Types d'aménagement Hydraulique proposé au niveau de l'Oued Sidi Hamza pour la protection contre le débordement :**

- Protection des berges de l'oued contre l'érosion.
- Correction torrentielle.
- Recalibrage d'un mètre du lit de l'oued pour faire passer la crue centennale...

- Réalisation des murs (cantilevers en béton armé ou en gabion) de 3 à 4 m sur la rive droite et gauche pour assurer la protection des habitats du centre.
- Protection des berges au niveau de l'oued contre les glissements.
- La Projection d'un canal trapézoïdale en béton armé sur sa partie amont et aval et sur la zone urbanisée.
- Construction d'un ouvrage hydraulique (Pont ou Dalots) à la traversée de la route passant par le centre.
- Diminuer l'imperméabilité des sols, Pour cela il faut implanter un maximum de zones, de construire des obstacles pour dévier l'eau de ruissellements vers barrage le plus proche, (mur en maçonnerie, mur en gabion ...) et en arrêtant d'urbaniser dans les zones inondables.

## **2. De la prévention à la Résilience face aux risques**

Toujours parallèlement avec l'importance grandissante accordée à la vulnérabilité émerge en sécurité civile la notion de résilience. Qui tire son origine du domaine de la métallurgie où elle désigne la capacité d'un métal à résister aux chocs.

Le concept de résilience territoriale se rattache au paradigme du développement durable. La résilience constitue un moyen de penser le maintien ou l'adaptation d'un territoire dont les composantes et le fonctionnement peuvent être analysés selon les principes de durabilité. (Da Cunha, 2017).

La résilience constitue en quelque sorte l'opposé de la vulnérabilité. Par exemple, l'adoption de normes de construction permettant une plus grande résistance des bâtiments aux séismes, aux vents violents ou aux incendies, a pour effet d'accroître la résilience de la collectivité aux effets potentiels de ces aléas et, par le fait même, de réduire sa vulnérabilité à ce genre de phénomène. Tout comme la vulnérabilité, la résilience est complexe et comporte plusieurs facettes associées aux conditions physiques, sociales, économiques et environnementales d'un milieu (Jérôme, 2018).

Elle consiste alors à maintenir une continuité de service, malgré l'endommagement d'une ou de plusieurs composantes du réseau technique. La résilience est donc une propriété réactive du réseau capable de fonctionner en mode dégradé ; on distingue donc le réseau comme forme matérielle, dont on accepte l'inévitable endommagement, du service qu'il fournit, dont on cherche le maintien malgré l'endommagement (notamment grâce à la redondance et au caractère maillé du réseau) (Jérôme, 2018).

- Prévention Elle passe par la prévention des dommages causés par les inondations en évitant la construction d'habitations et d'industries dans les zones inondables que ce soit dans le présent ou dans le futur, par l'adaptation des développements à venir dans ces zones, et par la mise en avant de pratiques appropriées en terme d'utilisation du sol, d'agricultures et de foresterie.
- Protection Il s'agit de mettre en place des mesures à la fois structurelles et non structurelles (ou mesures de résilience) pour réduire la probabilité et/ou l'impact des inondations pour une zone spécifique.
- Préparation Elle passe par l'information des populations vis-à-vis des risques d'inondation et de la conduite à tenir en cas de survenue de celles-ci.
- Réponse en situation d'urgence Cet aspect concerne le développement de plans d'actions en cas d'urgence lors des inondations.



- Restauration et Apprentissage Il s'agit de revenir à des conditions de fonctionnement du système le plus rapidement possible et d'atténuer les impacts socio-économiques sur les populations affectées.
- Recherche Le développement de la recherche est indispensable à une meilleure compréhension des contextes climatique, hydrologique et paysager des inondations.

### **3. Conclusion :**

La connaissance des vulnérabilités d'un territoire est une condition importante de l'évaluation des risques. Face à ceux-ci, la mise au point de formes d'urbanisation adaptées à l'inondation nécessite l'élaboration locale de stratégies de résilience.

Quelques soient les efforts curatifs déployés pour la protection contre les inondations, on ne sera jamais à l'abri des risques et que les actions menées ne permettent que la réduction de la vulnérabilité des zones à ces risques. La sensibilisation et l'information des acteurs et des citoyens sur ces risques demeurent une question essentielle pour limiter les dégâts.

**Chapitre 4**

**Caractérisation de la sécheresse  
hydrologique à l'aide de l'indice SPI dans le  
bassin versant du Haut Ziz**

## I. La sécheresse

Dans ce chapitre, nous allons caractériser la sécheresse climatique au niveau du bassin versant du Haut Ziz (Sud-Est Maroc) pour la période 1985/2013 à travers le calcul de l'indice de précipitation normalisé (SPI) pour les quatre stations étudiées : Zaouiate Sidi Hamza, M'Zizel, Foum Tillich et Foum Zaabel.

### 1. Rappels

La sécheresse est un phénomène naturel caractérisé par un manque d'eau sur une durée suffisamment longue pour affecter les sols et la végétation. Un épisode de sécheresse peut être ponctuel ou cyclique.

Ce fléau affecte de manière récurrente et sévère de vastes zones arides et semi-arides. Avec le réchauffement de la planète et les perturbations climatiques qu'elle génère, la sécheresse est désormais devenue un risque également fréquent dans les pays industrialisés de climat tempéré où des législations spécifiques et des dispositifs techniques sont mis en œuvre pour en prévoir et couvrir les dégâts.

L'état de sécheresse est le produit d'une période prolongée de précipitations insuffisantes durant une ou plusieurs saisons qui cause un déficit d'eau et donc des dégâts dans l'économie d'un pays, en particulier le secteur agricole. Elle se définit du point de vue météorologique, hydrologique, agricole ou socio-économique.

- Canicule : est l'un des principaux paramètres aggravants de la sécheresse. Elle correspond à une élévation de température importante dans une zone plus ou moins localisée de la planète. Elle est considérée comme catastrophe naturelle lorsqu'elle provoque une sécheresse telle que les quantités d'eau disponibles dans les sols et les rivières ne peuvent plus couvrir les besoins des populations environnantes, entraînant des pertes en vies humaines ainsi que des ralentissements ou des arrêts de production de certaines entreprises. Elle s'explique normalement par déficit pluviométrique temporaire, qui n'est pas propre au climat de la zone touchée mais qui dure suffisamment longtemps pour être dommageable (Pinson, 2017).
- L'aridité s'explique par une faiblesse des précipitations moyennes (moins de 250 mm/an) associée à une forte évapotranspiration (plus de 2000 mm). Le manque de pluie est une caractéristique permanente du climat de la zone. Elle concerne les régions où les pluies sont rares et les températures élevées (Cieau, 1995).

Concernant les signes de la sécheresse sont nombreux et les conséquences à court ou long terme peuvent avoir de sérieux impacts sur la population et l'écosystème.

### 2. Les différents types de sécheresse

- La sécheresse météorologique (ou atmosphérique) correspond à une pluviométrie trop faible sur une durée prolongée.
- La sécheresse agricole existe lorsque le taux d'humidité dans les sols (à un mètre de profondeur) est trop faible pour assurer des bonnes conditions de cultivassions. Ce type de sécheresse survient même en cas de précipitations normales, elle dépend de la nature des sols, des pratiques agricoles et du type de plantes cultivées. Par exemple, le riz et le maïs consomment beaucoup d'eau.
- La sécheresse hydrologique se manifeste lorsque le niveau des cours (eaux souterraines dans les nappes phréatiques et eaux de surface dans les rivières, lacs et fleuves) d'eau baisse significativement, on parle alors d'étiage. Un volume trop faible de précipitations est un des facteurs déclenchant ce type de sécheresse, mais également la perméabilité des sols

contenant ces cours d'eau et qui conditionne la capacité d'infiltration et de ruissellement de l'eau (Np, 2001).

### **3. Les différentes causes de sécheresse**

#### **3-1 Les causes naturelles (météorologiques)**

Le déficit d'eau et des températures élevées sont les principales causes de sécheresse. En cas de précipitations insuffisantes durant l'hiver et le printemps (entre septembre et mars), les réserves d'eau ne peuvent pas se recharger comme elles devraient pour maintenir un équilibre hydrologique. Et si ce manque d'eau s'accompagne de températures élevées, cela entraîne une augmentation naturelle de l'évaporation et de l'évapotranspiration des plantes avec pour conséquences un assèchement et une érosion des sols. Et le réchauffement climatique tend à favoriser ces phénomènes (Np, 2001).

La météorologie est un indicateur de risque intéressant : à l'inverse des dépressions qui engendrent des précipitations par déplacement de masses d'air froides et humides ascendantes, les anticyclones empêchent les précipitations car ils forment des masses d'air chauds et secs descendantes. Aussi, en cas de période anticyclonique prolongée, le risque de sécheresse augmente.

#### **3-2 Les causes humaines**

Une consommation d'eau excessive pour les activités humaines peut entraîner une aggravation de la sécheresse. Lorsque les réserves d'eau diminuent en raison d'une météorologie défavorable (anticyclone persistant), elles ne sont pas toujours gérées efficacement par l'homme dans le cadre de ses exploitations agricoles, industrielles et domestiques. Une surexploitation des ressources en eau peut entraîner un assèchement des nappes phréatiques et menacer leur pérennité.

### **4. Les conséquences de la sécheresse**

Ce phénomène de manque de pluie peut être un épisode plus ou moins long, mais suffisant pour produire ses différents effets sur l'homme et sur la nature (Cieau, 1995).

- *Les conséquences sur les sols* : Après une période de sécheresse, les sols asséchés ne sont plus en capacité d'absorber correctement les précipitations et cela peut provoquer des crues, des inondations et des glissements de terrain.
- *Les conséquences sur la flore* : Des arbres secs et déshydratés peuvent finir par mourir et une végétation très sèche peut faciliter des départs de feux, émetteurs de gaz nocifs qui polluent l'atmosphère et accentuent l'effet de serre. Les arbres deviennent beaucoup plus vulnérables au froid jusqu'à dix ans après un épisode de sécheresse.
- *Les conséquences sur la faune* : L'abaissement du niveau des cours d'eau affecte la survie des poissons ainsi que des animaux qui s'abreuvent dans des points d'eau. Ils doivent alors migrer pour trouver de l'eau et cela déséquilibre l'écosystème.
- *Les conséquences pour l'homme* : En cas de sécheresse, les populations les plus fragiles (bébés, enfants et personnes âgées) risquent une déshydratation qui peut leur être fatale car ils n'ont pas le réflexe de boire pour compenser le manque d'eau dans leur organisme. Dans les pays qui n'ont pas facilement accès à l'eau, la sécheresse aggrave le risque de famine et d'épidémies en raison de la malnutrition. La sécheresse augmente les migrations climatiques des populations touchées et peut entraîner des conflits entre peuples.

- *Les impacts sur l'agriculture* : En cas de stress hydrique (disponibilité en eau par an et par habitant < 1700 m<sup>3</sup>/s réserves d'eau sont trop faibles pour irriguer correctement les cultures, la production agricole diminue et l'on observe une baisse voire des pertes de récolte.
- *Les impacts sur l'alimentation en eau potable* : En cas de sécheresse, le niveau des rivières, lacs, fleuves et nappes phréatiques est très bas et cela entraîne des restrictions d'eau pour l'irrigation des cultures, les usages domestiques de l'eau (ex : pour arroser des jardins) ou les usages industriels. En milieu rural, l'eau peut être rationnée, voire coupée.
- *Les impacts sur la qualité de l'eau* : En cas de pénurie d'eau, les polluants se diluent moins bien et cela augmente le risque de contamination des réserves hydriques.
- *Les impacts sur la production d'électricité* : L'eau servant à refroidir les centrales nucléaires est coupée en cas de sécheresse et de canicule. Et cela réduit la production d'électricité alors même que les besoins sont accrus : ventilateurs, climatisation, réfrigérateur... sont très consommateurs d'électricité.

Les conséquences de la sécheresse peuvent s'étendre sur de nombreuses années et sont souvent suivies d'inondations de grande ampleur qui rendent les populations déjà touchées encore plus vulnérables (Cieau, 1995). C'est pourquoi il est important d'anticiper ces phénomènes climatiques par des mesures de préventions et une meilleure gestion de l'eau. La sécheresse reste l'une des catastrophes naturelles les plus difficiles à prévoir, par l'observation des conséquences des hautes températures, qu'il est possible de caractériser le phénomène. Celui-ci dépend de plusieurs facteurs : nombre de jours passés sans précipitation, nature des sols, taux d'évaporation, quantité des dernières précipitations, type de végétation présente.

## II. Les indices de sécheresse

Nombreux indices de sécheresse ont été proposés pour caractériser la sécheresse, le plus largement utilisé : Indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965) , Indice de précipitation normalisé (SPI) (McKee, 1993), Pour la sécheresse hydrologique, indice de ruissellement normalisé (SRI) (Shukla, 2008), ont été mis au point, qui a gagné en popularité dans le monde.

Certains scénarios des changements planétaires indiquent que l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (Watson, 1997). Dans un tel contexte climatique, il est indispensable d'analyser les séquences de sécheresse météorologique en vue de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation au cas échéant.

Les études sur les changements climatique au Maroc montrent que la pluviométrie est beaucoup plus contrastée avec une forte variabilité spatiotemporelle, une augmentation des températures et une fréquence remarquable de la sécheresse dans les dernières décennies (Elbouqdaoui, 2006 ; Driouch, 2010 ; Sebbar, 2013). Le climat s'est réchauffé de façon significative au cours de la période 1961-2008. Une tendance générale vers l'assèchement est constatée. La plupart des tendances annuelles sont comprises entre 0.2°C et 0.4 °C par décennie (Driouch, 2010) et la diminution des précipitations est quasi-générale sur l'ensemble du territoire marocain. D'autres études signalent que durant la phase positive de l'ONA (Oscillation Nord Atlantique) caractérisée par le creusement de la dépression d'Islande et gonflement/intensification de l'anticyclone des Açores (Fig. 64), les précipitations se trouveront réduites sur le Maroc comme sur le sud de l'Europe. A l'inverse, la phase négative engendrera des précipitations sur celui-ci et au Nord-Ouest de l'Afrique (Driouch, 2010).

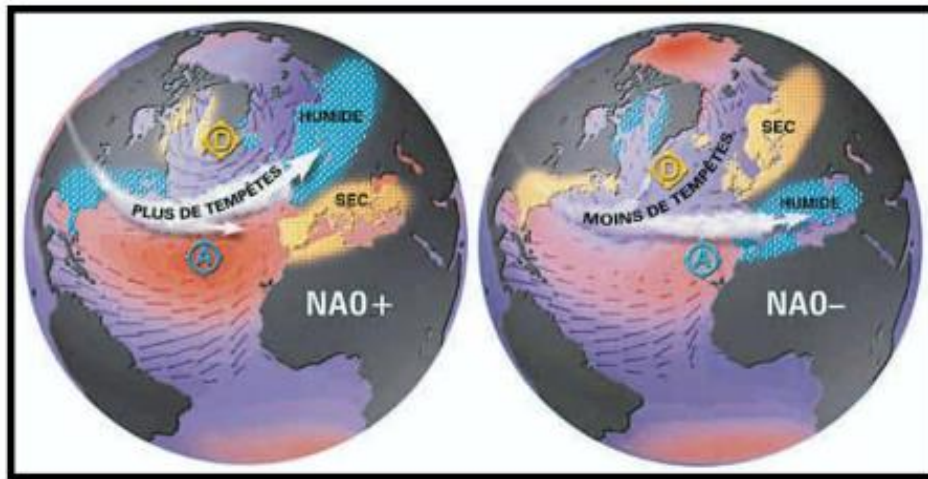


Figure 64 : Les deux phases de la NAO (Cristophe, 2004)

Selon (Sebbar, 2013), la relation entre la NAO et les valeurs de l'indice de précipitation standardisé, a permis d'émettre des hypothèses qui expliquent l'extension spatio-temporelle de la sécheresse climatique au Maroc. En fait, l'excès d'énergie au niveau de la surface du pacifique (ENSO), renforce l'extension de l'anticyclone des Açores à travers la cellule de Hadley et par conséquent, rejette vers le Nord des perturbations liées au front polaire et apparition des phases positives de la NAO, ce qui explique l'installation de la sécheresse au Maroc (Daki, 2016).

### III. Indice normalisé (Standardisé) des précipitations (SPI)

L'indice de précipitation normalisé (SPI) proposé à l'origine par (McKee, 1993) est utilisé comme un indice de suivi de la sécheresse et recommandé par l'organisation météorologique mondiale. Les résultats obtenus après le calcul de cet indice vont nous permettre de localiser des périodes de sécheresses plus remarquables de par leur intensité, leur durée et leur fréquence (Diani, 2019).

L'indice SPI est un indice très simple, à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Il permet de mesurer la sécheresse météorologique. L'organisation météorologique mondiale (OMM) a adopté cet indice en 2009 comme instrument mondial de mesure des sécheresses météorologiques. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs (**Tab.23**). Le programme de calcul de l'indice s'exécute aussi bien dans un environnement Windows que sous UNIX. Pour calculer l'indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés mensuels s'étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voire plus, ce qui constitue la période optimale (Guttman, 1994). Ce qui nous permet de quantifier l'écart des précipitations d'une période par rapport aux précipitations moyennes. Il est calculé ainsi :

$$SPI = (X_i - X_m) / S_i$$

Où :

$X_i$  : est le cumul de la pluie pour une année  $i$ .

$X_m$  : est la moyenne des pluies annuelles observées pour une série donnée.

$S_i$  : est l'écart type des pluies annuelles observées pour une série donnée.

Les valeurs positives de l'indice SPI indiquent des précipitations supérieures à la médiane alors que les valeurs négatives indiquent des précipitations inférieures à la médiane. Étant donné que l'indice est

normalisé, il est possible de représenter de la même manière les climats humides et arides ; ainsi est-il possible aussi, grâce à cet indice SPI, d'assurer une surveillance des périodes humides et leur fréquence de répétition (**Tableau 21**).

Tableau 21 : Classification de sévérité de sécheresse selon (McKee, 1993).

Valeurs de l'indice SPI	Catégorie de sécheresse
2.0 et plus	Extrêmement humide
1 .50 à 1 .99	Très humide
1 .0 à 1.49	Humide
-0.99 à 0.99	Normal
-1 .0 à -1 .49	Modérément sec
-1 .50 à -1 .99	Sévèrement sec
-2.0 et moins	Extrêmement sec

Les données climatologiques du bassin versant du Haut Ziz sont obtenues de (ABH-GZR). Les caractéristiques des différentes stations utilisées dans Un programme sous Matlab pour le calcul du SPI où les données des précipitations sont directement chargées à partir des fichiers Excel a été construit. Cet indice SPI est utilisé pour le suivi de la sécheresse météorologique à différentes échelles de temps (Diani, 2019). Il peut être évalué pour des durées de 1, 3, 6, 12, 24, 36, 48, 120 mois et même plus (Hayes, 1999) . Selon l'échelle de temps choisie, le SPI permet différentes interprétations. Le SPI de 1 mois reflète le court terme et les conditions de son application peuvent être liées étroitement à l'humidité du sol ; le SPI de 3 mois fournit une évaluation saisonnière des précipitations ; les SPI de 6 et 9 mois indiquent la tendance à moyen terme des précipitations. Quant aux SPI de 12 mois et plus, ils reflètent la tendance à long terme. Ils sont généralement liés aux écoulements dans les cours d'eau, aux taux de remplissage des réservoirs et même aux niveaux statiques des nappes souterraines (Khan, 2008).

#### IV. Test de tendance non paramétrique (Mann-Kendall)

Le test de Mann-Kendall (**Gilbert, 1987 ;Mann, 1945 ;Kendall, 1948**) est un test non paramétrique et indépendant de la distribution des données. La statistique calculée est définie comme suit :

$$S = \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

Où n est le nombre d'observations. Pour les données indépendantes et ordonnées au hasard pour les grands n, X<sub>j</sub> et X sont les valeurs annuelles pour les années j et i, respectivement, et j > i.

Les statistiques S se rapprochent d'une distribution normale avec une moyenne E (S) = 0 et une

$$\text{variance égale à : } \mathbf{Var(s) = n(n - 1)(2n + 5)/18}$$

L'importance d'une tendance est testée en comparant les statistiques de test Z normalisées à la distribution cumulative normale standard à un niveau de signification sélectionné. Les valeurs positives des statistiques Z indiquent une tendance positive (une tendance à la hausse), tandis que les valeurs Z négatives indiquent une tendance négative. La tendance est statistiquement significative au niveau  $\alpha = 0,05$  lorsque la valeur absolue de Z est supérieure à 1,96 (**Diani, 2019**).

## V. Analyse du SPI et des caractéristiques de la sécheresse

Afin de réaliser une analyse spécifique au niveau des quatre stations concernées et de mieux évaluer les variations de la pluviométrie annuelle, nous avons calculé les valeurs de l'indice SPI d'une série de 48 années sur les stations Zaouiate Sidi Hamza et M'Zizel, 46 en station de Foug Zaabel et 43 ans à la gare de Foug Tillicht, Les résultats du calcul sont présentés dans les figures (**Fig. 65**).

Les résultats globaux de quatre stations ont révélé un schéma cyclique clair de conditions sèches et humides (**Tab. 22**). La variabilité à long terme de l'SPI sur les régions a montré que, contrairement à la période sèche débutant à la fin des années 70, une période humide a été observée à partir de la fin des années 90 (**Fig. 65 et Tab. 22**) (Diani, 2019).

Pour toutes les stations, la décennie la plus humide et les autres périodes, par ex. Des périodes de 12 mois (annuels), 36 mois (3 ans) et 60 mois (5 ans) ont été observées après 2002. La décennie la plus sèche pour le Zaouiate Sidi Hamza, M'Zizel et Foug Tillicht a débuté à partir des années 1977/02, 1976/10 et 1978/01 (toutes à la fin des années soixante-dix), alors que pour Foug Zaabel, elle a débuté depuis 1996/09 (Diani, 2019).

Les résultats des analyses SPI effectuées à la station Zaouiate Sidi Hamza les plus sèches et les plus humides ont débuté en décembre 1983 (indiquant un indice de sécheresse extrême de -2,0) et de novembre 2014 (indiquant une extrême humidité, +2,74) (**Fig. 65 et Tab. 22**). En outre, toutes les périodes les plus humides à long terme, à savoir trois, cinq et dix ans, ont été commencées à partir de 2006, tandis que les périodes les plus sèches ont été démarrées respectivement en 1981, 1979 et 1977 (**Tab. 23**). Il y a une dominance remarquable de la période sèche (1971-1985) et humide (1998-2015) (Diani, 2019).

Pour la station de M'Zizel, le résultat montre une prédominance d'années sèches entre 1971 et 1985 et une prédominance de périodes humides pendant la période 2002-2015 (**Fig.65**). En outre, les 12 mois les plus humides ont commencé en janvier 2008, tandis que l'année la plus sèche a été observée de mars 1981 à février 1982 (**Fig. 65 et Tab. 22**). En outre, la période la plus humide à long terme a été démarrée en 2006, 2006 et 2005 pour une période de trois, cinq et dix ans, tandis que la période la plus sèche a été démarrée en 1998, 1997 et 1976 respectivement.

À la station de Foug Zaabel, les résultats confirment l'alternance des périodes sèches et humides (**Fig. 65**). Les années les plus humides et les plus sèches ont été démarrées de février 2008 à juin 2000. Les sécheresses à long terme dans cette station ont débuté en 2000, 1996 et 1996 pour des périodes de 3, 5 et 10 ans respectivement (**Tab. 22 et Fig. 65**). À la station de Foug Tillicht, l'analyse de la série d'ISP indique que la période de valeur maximale d'ISP pour conditions humides a débuté à partir de 2007, 2006, 2006 et 2002 pour 1, 3, 5 et 10 ans, tandis que la période de sécheresse a été commencée à partir de 2012. , 1982, 1982 et 1978 respectivement (Diani, 2019).

Généralement les années 2008,2009 et 2010 sont les années les plus humides, au niveau du bassin versant du Haut Ziz .



Tableau 22 : Périodes les plus humides et les plus sèches basées sur la valeur du SPI dans différentes stations

Station	Nombre des mois	Conditions humides			Conditions sèches		
		période	SPI		période	SPI	
			Val.	Cat.		Val.	Cat.
Zaouiate Sidi Hamza	12	2014/11	2.74	EW	1983/12	-2.00	ED
	36	2006/05	2.09	EW	1981/11	-1.85	SD
	60	2006/07	1.70	SW	1979/11	-2.17	ED
	120	2006/04	1.59	SW	1977/02	-2.34	ED
M'Zizel	12	2008/01	3.15	EW	1981/03	-2.18	ED
	36	2006/05	2.95	EW	1998/04	-1.85	SD
	60	2006/07	2.72	EW	1997/02	-1.76	SD
	120	2005/11	2.23	EW	1976/10	-1.46	SD
Foum Zaabel	12	2008/02	3.17	EW	2000/06	-1.87	SD
	36	2006/01	2.66	EW	2000/1	-2.00	ED
	60	2006/01	2.14	EW	1996/08	-1.88	SD
	120	2003/06	1.95	SW	1996/09	-1.60	SD
Foum Tillicht	12	2007/12	2.72	EW	2012/12	-2.32	ED
	36	2006/04	2.30	EW	1982/06	-1.94	SD
	60	2006/01	2.01	EW	1982/06	-2.24	ED
	120	2002/02	1.35	MD	1978/01	-2.05	ED

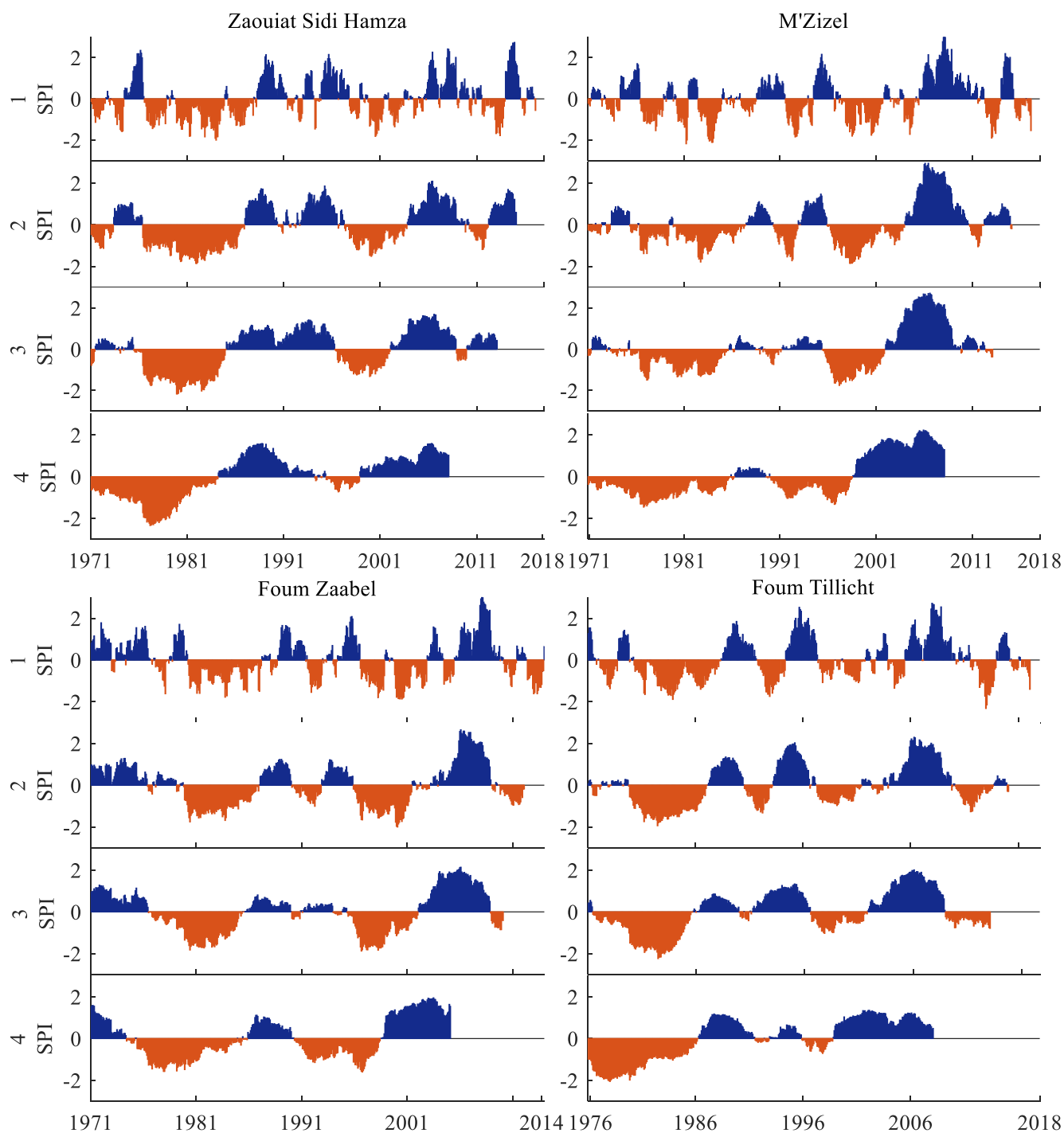


Figure 65 : Variation de l'SPI en différentes périodes pour a) la station Zaouiate Sidi Hamza et b) la station M'Zizel, c) la station Foug Zaabel et d) la station Foug Tillicht. 1, 2, 3 et 4 indiquent respectivement les différentes périodes d'analyse de 12, 36, 60 et 120 mois

## VI. Analyses de tendance

L'analyse de la tendance annuelle des précipitations au niveau des quatre stations indique qu'il n'y a pas de tendance significative positive ou négative. Une tendance négative dans les précipitations à Foug Tillicht, tandis que dans les stations de Foug Zaabel, Zaouiate Sidi Hamza et M'Zizel, ont une tendance positive (**Fig. 66**) (Diani, 2019).

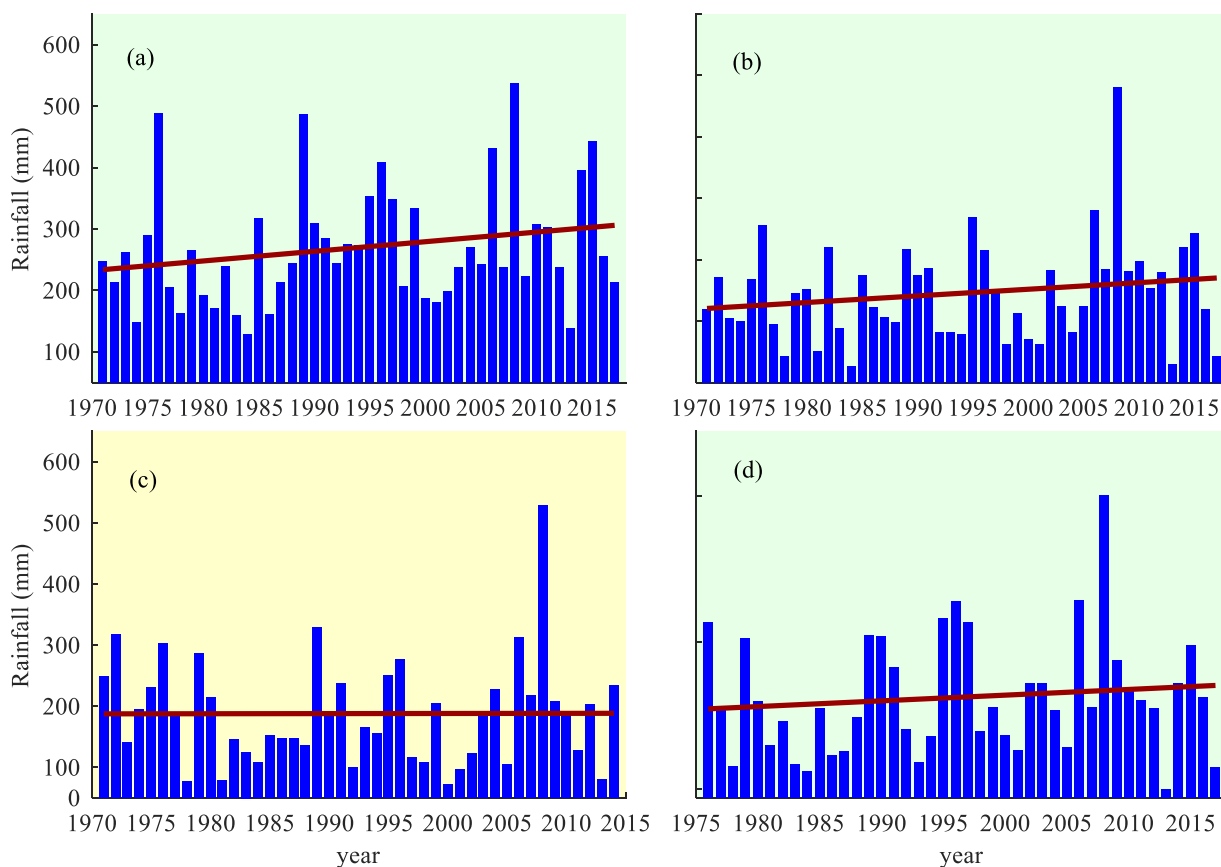


Figure 66 : Tendence annuelle des précipitations en a) Zaouiate Sidi Hamza, b) M'Zizel, c) Forum Tillich, et d) stations de Fom Zaabel, le fond vert clair et jaune indiquant respectivement une tendance positive et négative.

Concernant la tendance globale mensuelle indiquée dans 67% des mois, nous avons observé une tendance significative positive ou une tendance des précipitations (**Fig. 67**). L'analyse de tendance mensuelle a révélé que 17% et 8% des mois montre respectivement une tendance positive et négative significative tandis que 50% et 25% des mois montrent une tendance positive et négative (**Fig. 67**) (Diani, 2019). La Tendance positive significative a été observé en Août (dans toutes les stations), en Juillet (à M'Zizel et Fom Zaabel) et en mars (à Fom Tillich et M'Zizel) tandis qu'une tendance négative significative a été observée en avril dans toutes les stations (**Fig. 67**). Les autres mois, l'analyse des tendances n'a confirmé aucune tendance significative des précipitations mensuelles. Il y a une tendance positive en septembre, octobre et juin (dans toutes les stations), en Février pour les stations (Zaouiate Sidi Hamza, M'Zizel et Fom Zaabel), en novembre pour les trois stations (Zaouiate Sidi Hamza, Fom Tillich et Fom Zaabel).

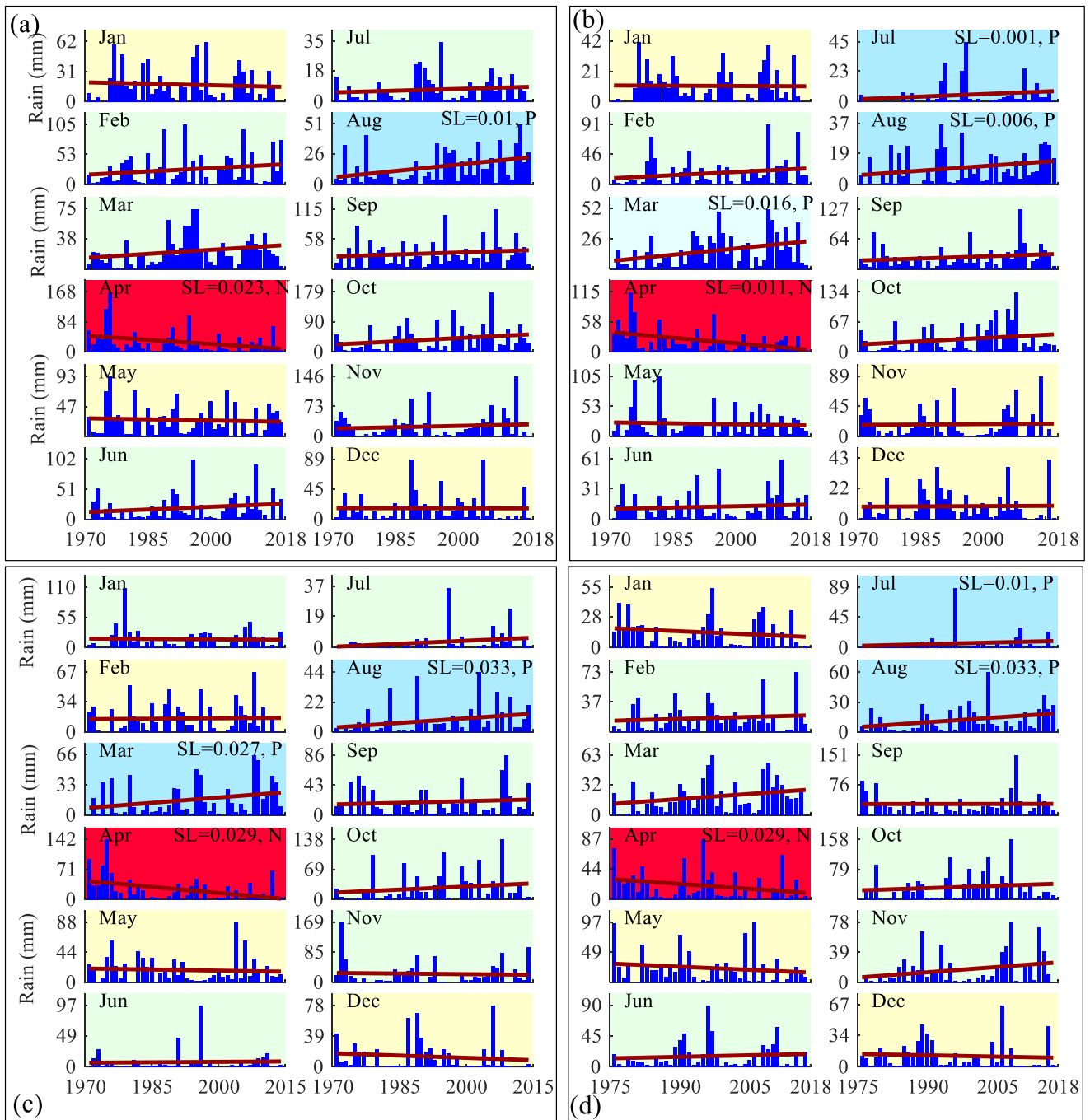


Figure 67 : Tendence mensuelle des précipitations dans a) Zaouiate Sidi Hamza, b) M'Zizel, c) Foug Tillich, et d) Les stations Foug Zaabel, un fond vert clair et jaune sur la figure indiquent une tendance positive et négative. Tendence, SL : niveau significatif.

L'analyse de la tendance trimestrielle des précipitations montre qu'il s'agit d'une tendance positive durant l'été à (juin, juillet et août) pour toutes les stations et à (juillet, août et septembre) et (août, septembre et octobre) pour la station de Zaouiate Sidi Hamza (Fig.68). De plus, seulement à Foug Zaabel, nous avons observé une tendance négative durant avril, mars et juin (Fig. 68). Le reste des données trimestrielles montre 50% des résultats avec une tendance positive et 35 % tendance négative.

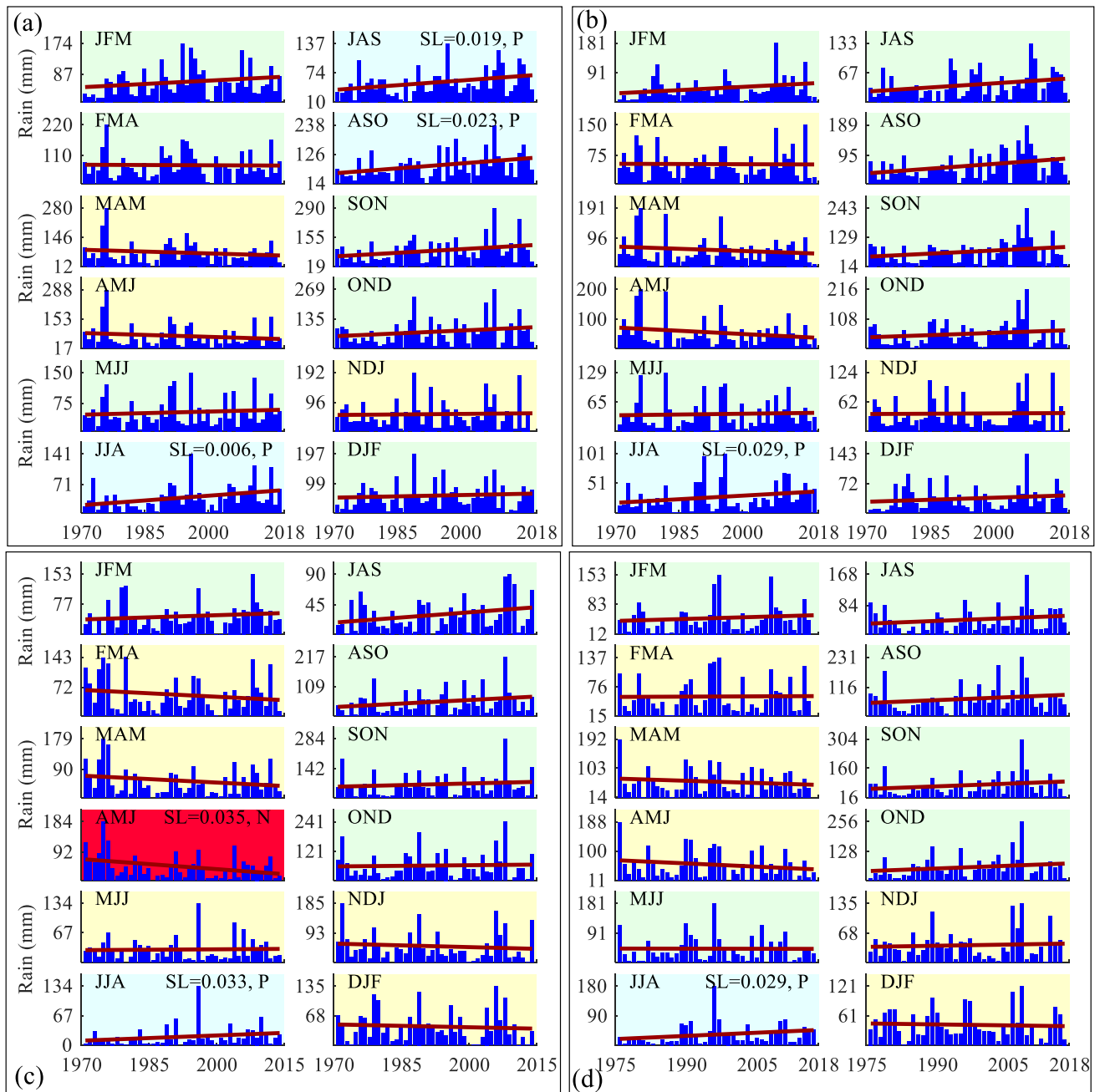


Figure 68 : Tendance trimestrielle des précipitations dans a) Zaouiate Sidi Hamza, b) M'Zizel, c) Foug Tillicht, et d) Les stations Foug Zaabel, un fond vert clair et jaune sur la figure indiquent une tendance positive et négative. Tendence, SL : niveau significatif

En ce qui concerne les précipitations semestrielles, une tendance significative et positive ont été observées dans la période (MJJASO), (JJASON) et dans la période (JASOND) à Zaouiate Sidi Hamza, et sont Observées dans la période(MJJASO) et la période (JJASON) à la station de M'Zizel, et la station de Zaabel durant la période (JJASON) (**Fig. 69**). Dans les autres analyses de tendance pour les six mois, nous avons une tendance positive (62,5%) ou négative (19%).

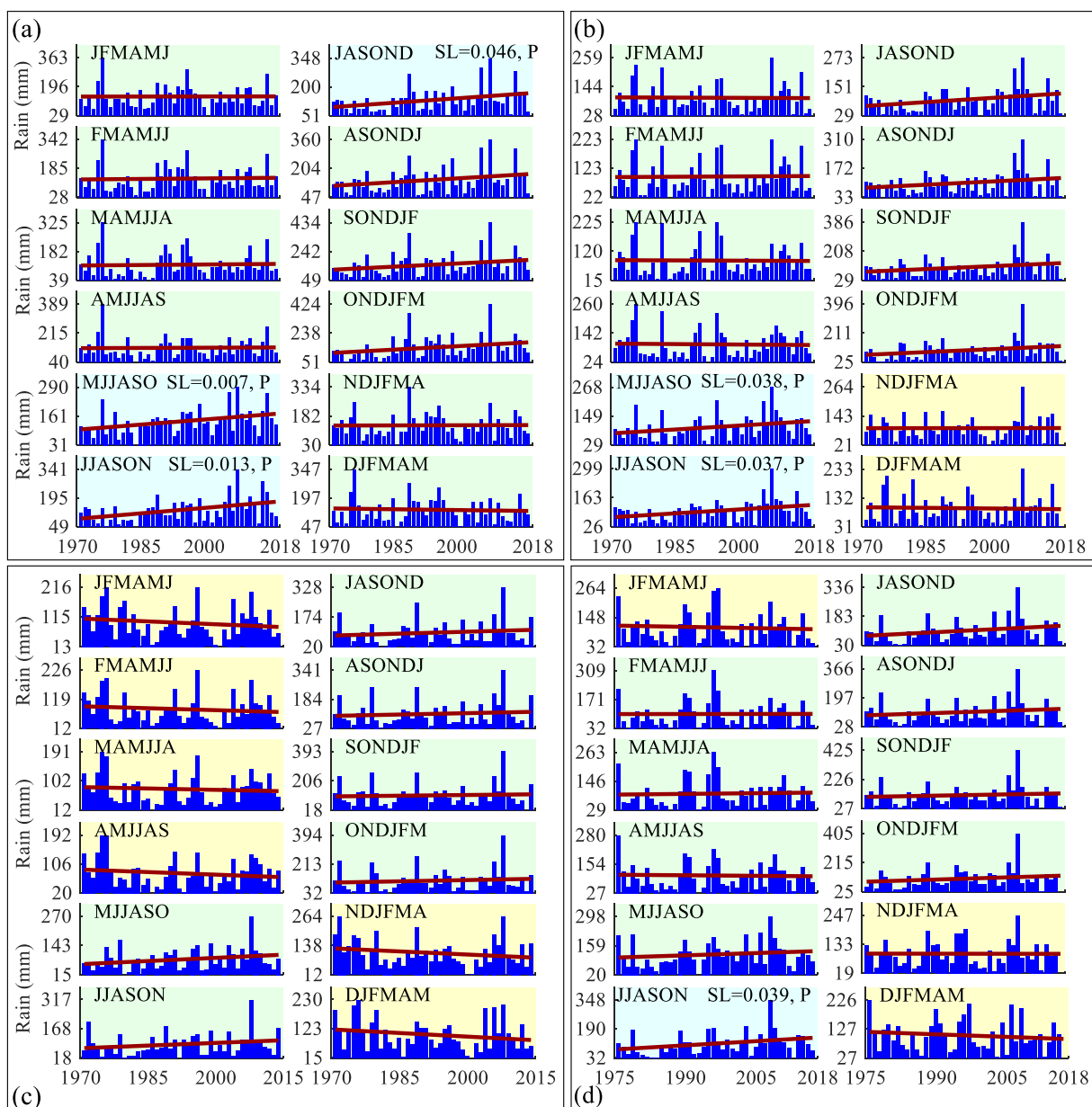


Figure 69 : Analyse des tendances semestrielles des précipitations au niveau des stations de a) Zaouiate Sidi Hamza, b) M'Zizel, c) Foug Tillicht et d) Foug Zaabel. Tendence mensuelle des précipitations dans a) Zaouiate Sidi Hamza, b) M'Zizel, c) Foug Tillicht et d)

## VII. Conclusion :

Le calcul du SPI et les résultats obtenus nous ont permis de traiter des séquences de sécheresse dans les quatre stations du bassin de Ziz. Les résultats ont indiqué une alternance de séquences humides et sèches :

- La variabilité à long terme des précipitations sur les régions a été contrastée avec une période sèche, qui a commencé à la fin des années soixante-dix, une période humide a été observée à partir de la fin des années 90 ;
- Les périodes maximales d'SPI et les plus humides ont été enregistrées après 2002, pour Foug Zaabel, La décennie la plus sèche a débuté en 1996 alors que pour les autres stations, elle était autour de 1977.

Cette irrégularité, qui se caractérise par de faibles précipitations pendant plusieurs années consécutives, endommage gravement la végétation et l'agriculture locales. Expliqué par :

- Une végétation très rare à l'exception des palmeraies localisées autour des points d'eau et de celles situées le long des principales rivières, sous forme d'oasis étroites. (Les palmeraies ont été régulièrement endommagées par la succession d'années de sécheresse).
- Céréales, légumes et plantes fourragères, qui constituent un complément précieux dans une région où l'arboriculture est prédominante (principalement les arbres fruitiers accompagnés de palmiers dattiers) (ABH-GZR, 2011). Ce qui nous permet de dire que :
  - La corrélation explique bien l'interdépendance des sécheresses agricoles et météorologiques.
  - Le haut bassin de Ziz fait partie des zones les plus touchées au Maroc et se caractérise par un climat moins favorable au développement agricole.

Les résultats de notre étude ont révélé que la magnitude annuelle des précipitations dans le Zaouiate Sidi Hamza, M'Zizel et Fom Zaabel ont une tendance positive alors qu'à Fom Tillicht, nous avons observé une tendance négative. En ce qui concerne la tendance annuelle de quatre stations, nous n'avons trouvé aucune tendance significative. En avril et août, les précipitations montrent une tendance négative et positive dans toutes les stations.

Dans l'ensemble, la tendance mensuelle indiquée dans 67% des mois a été marquée par une tendance significative de la sécheresse (17%) et une tendance de précipitations de (50%).

L'analyse trimestrielle de la tendance des précipitations montre une tendance positive durant l'été dans la période d'avril à juin, pour toutes les stations, alors que nous n'avons qu'une tendance négative à Fom Zaabel, AMJ.

La succession des années pluvieuses et sèches a entraîné un déficit de précipitations relativement complet, autour de 1986 et 1996, tandis que, pour les périodes de (1976-1985), les observations de précipitations indiquent un déséquilibre évident provoquant des déficits importants. L'augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse due à la diminution des précipitations et / ou une augmentation des taux d'évapotranspiration a augmenté le risque de mauvaises récoltes en raison de la sécheresse agricole. (Humidité du sol anormale) résultant de la sécheresse météorologique (anomalie anormale des précipitations négatives) peut provoquer une sécheresse hydrologique (débit réduit, bas niveau de la nappe phréatique, etc.) et par la suite une sécheresse socio-économique (incapacité à répondre aux besoins et à la demande économique, tel que (l'eau potable, céréales alimentaires, énergie hydraulique, etc.).

**Chapitre 5**

**Quantification de l'érosion hydrique par  
application des SIG et des directives  
PAP/CAR.**

**Cas du bassin versant du Haut Ziz.**



## I. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de traiter le problème d'érosion hydrique dans le bassin du Haut Ziz, d'étudier la sensibilité de ce bassin à l'érosion à l'aide de la méthode PAP / CAR, basée sur le principe de pondération des principaux facteurs contrôlant le fonctionnement érosif : couvert végétal, pente, occupation d sol et lithologie.

Les résultats obtenus sont des cartes qui spatialisent les zones vulnérables, classent les zones en fonction de leur degré de sensibilité à l'érosion hydrique et prédisent leur comportement futur.

## II. Généralités

L'érosion est un processus de détachement, de transport et de dépôt des particules de la surface du sol. L'irrégularité topographique et versants en fortes pentes, l'irrégularité climatique qui se manifeste dans les fréquentes successions de périodes de sécheresse et de pluies intenses, présence de sols facilement érodables à cause de leur texture, favorisant l'érosion du sol (Giordano, 1994).

Au Maroc, en tant que pays à climat aride et semi-aride, vulnérable au changement climatique, présente de nombreux enjeux quant à l'avenir des ressources hydriques et leurs impacts potentiels sur les équilibres sociaux, économiques et écologiques. L'érosion touche durement ses terres. Effectivement, des études réalisées par la FAO montrent que plus de 40% des terres sont menacées par ce phénomène. Ces pertes de terres ont un impact socioéconomique au niveau régional et national (FAO, 1996 ).

Les principaux facteurs responsables de l'érosion (**Fig.70**) sont :

- L'érosivité du climat : intensité et quantité des précipitations.
- La présence d'une pente, sa longueur et son degré d'inclinaison.
- La capacité d'infiltration de l'eau dans le sol et la stabilité structurale du sol, et donc finalement la nature du sol.

L'érosion est donc le fruit d'un processus commençant par une désagrégation des agrégats à la surface du sol. Elle entraîne la formation d'une croûte structurale puis sédimentaire, communément appelée la battance. Cette croûte réduit l'infiltration de l'eau et conduit à la formation de ruissellement.

Si la lame d'eau est peu épaisse et ruisselle (cas de faible pente et grandes surfaces), l'érosion qui s'en suit est dite diffuse. Si la lame d'eau ruisselle à une forte vitesse, une incision du sol se produit et on assiste à une érosion de type concentrée.

Elle existe trois formes d'érosion : érosion éolienne, érosion hydrique et l'érosion anthropique.

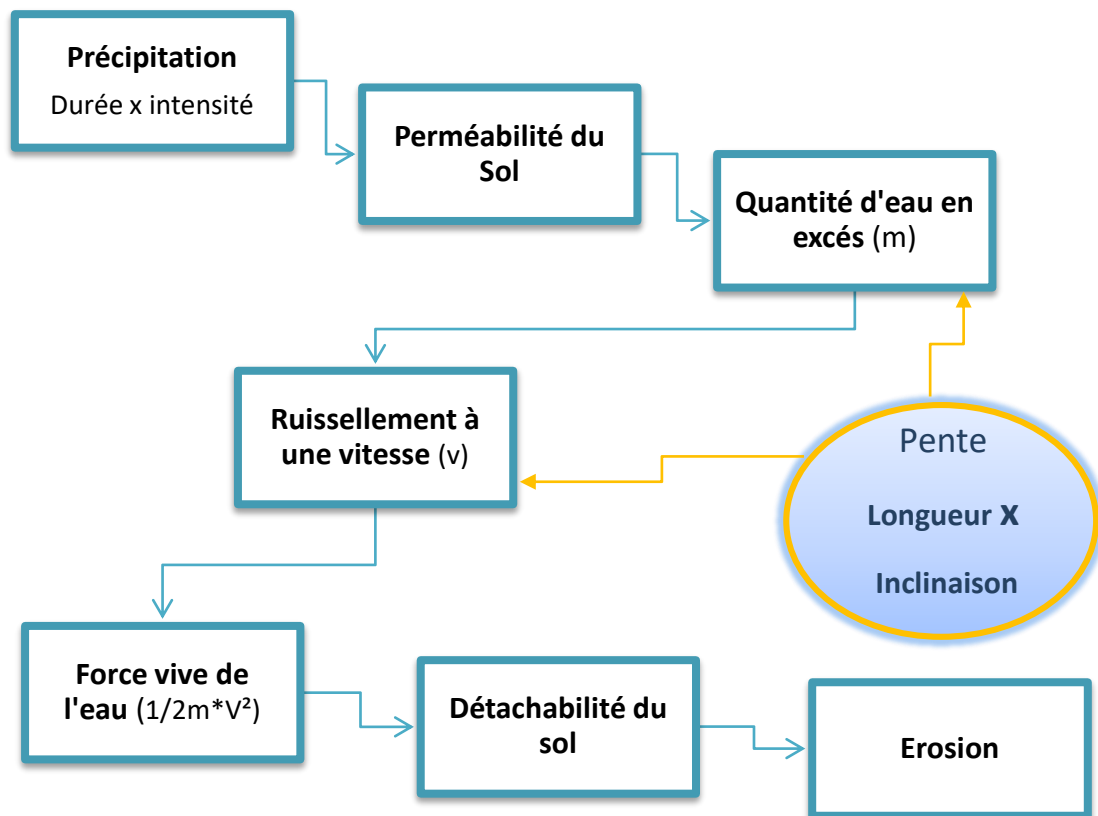


Figure 70: Les principaux facteurs responsables de l'érosion

### 1. L'érosion hydrique :

L'érosion hydrique est la forme d'érosion la plus complexe. Elle agit par l'impact des gouttes de pluie sur le sol, par l'écoulement en nappe continu ou en rigoles, par le déplacement du chenal de rivières ou l'érosion de ravins par les fortes pluies, par l'écoulement des eaux dans les matériaux de surface et par les marées, les courants et les vagues dans les zones peu profondes des lacs et des océans.

Elle a de graves conséquences de points de vue économique, humain et écologique. D'un point de vue économique, par les pertes qui sont dues aux dégradations des infrastructures routières, des ouvrages d'art et de la productivité des terrains agricoles de pâturage ou forestier. D'un point de vue écologique, on assiste à une dégradation des milieux physiques qui s'exprime par la diminution de la diversité biologique et de la productivité forestière.

Au Maroc, l'érosion hydrique constitue le principal facteur de la dégradation des sols. C'est un phénomène dynamique et très complexe, lié à des facteurs naturels et anthropiques difficilement maîtrisables dans le temps et l'espace. La dégradation des sols a des effets visibles sur l'environnement et entrave le développement économique et social. Les conséquences de l'érosion, aussi bien en amont qu'en aval des bassins versants sont coûteuses pour l'économie marocaine.

### 2. Processus de l'érosion hydrique des sols :

Les déplacements des matériaux par érosion hydrique sont subdivisés en trois grands types :

- Ceux qui se produisent sur le sol lui-même, et qui consistent en écoulement de nappes d'eau sans différenciation de réseau d'écoulement ;

- Ceux qui se font dans des réseaux de drainages groupées sous l'appellation d'érosion linéaire (rigoles, ravinements et collecteurs principaux).
- Ceux des mouvements de masse (solifluxion, éboulements, éboulis).

#### a. Mobilisation des particules :

Sur une surface dénudée de végétation, les agrégats des particules du sol sont exposés à l'action des pluies et du ruissèlement et sont soumis à différents mécanismes de désagrégation par l'eau.

- Impact des gouttes de pluie (effet Splash) érosion par rejaillissement :

L'action érosive hydrique débute par l'impact des gouttes de pluies sur la surface du sol, elle est appelée « Effet Splash » (**Fig.71**) (Koudded, 2013). Les pluies provoquent les premiers mouvements des particules du sol, brisent les agrégats et dispersent les particules par le rejaillissement des gouttes en les éjectant sur de courtes distances, les distances d'éjection dépendent de l'énergie d'impact qui est fonction de (Rejeb, 1996):

- Hauteur de la chute des gouttes de pluie ;
- Poids de la goutte de pluie ;
- Diamètre de la goutte de pluie ;
- Vitesse et direction du vent ;
- Érodibilité du sol ;
- Humidité initiale

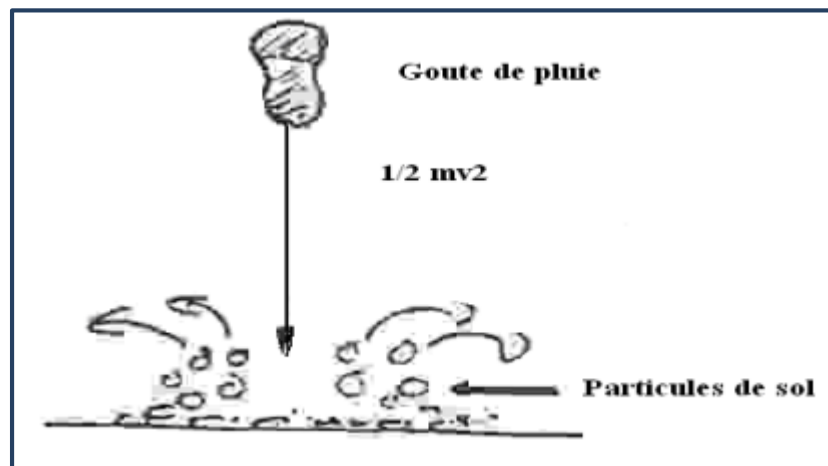
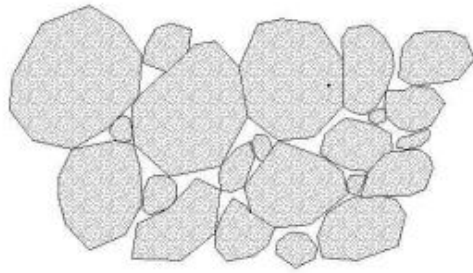


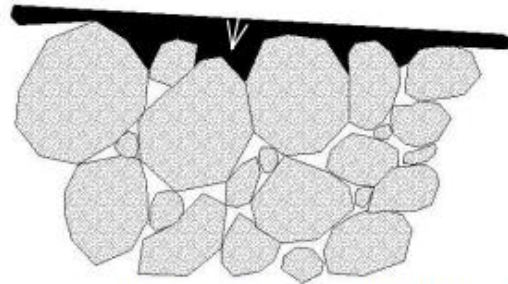
Figure 71 : Effet des gouttes de pluies (effet splash) (Toure, 2001)

- Formation des croutes de battance :

Elle désigne l'ensemble des phénomènes affectant la surface d'un sol dénudé soumis à une pluie. Elle débute par l'augmentation de l'humidification du sol qui rend les particules vulnérable à l'éjection sous l'effet Splash, ensuite on assiste à une dispersion qui provoque une désorganisation, puis une redistribution qui réorganise les particules fines entre celles grossières, et enfin le passage progressif d'une surface rugueuse a la formation d'une croute lisse et régulière appelée croute de battance (**Fig.72**) (Valentin, 1992).



1° Une surface de sol caractérisée par des agrégats bien individualisés et par la présence de très nombreux pores interstitiels.



2° La même surface après formation d'une croûte de battance qui limite très fort l'infiltration des eaux de pluie dans le sol.

Figure 72: Courbe de battance

### b. Érosion et transport des particules :

Dans la nature, l'eau se déplace sous l'effet de la gravité par ruissellement diffus, écoulement subsurfacique, percolation ou écoulement concentré. Ainsi, les matériaux se déplacent selon l'itinéraire que prennent l'eau et l'érosion à lieu en nappe, ravinement ou mouvement de masse (Roose, 2004).

#### ➤ Érosion en nappe ou érosion diffuse :

Après saturation du milieu interstitiel, on remarque que le taux de ruissellement augmente par rapport à l'intensité des précipitations. A ce moment le ruissellement se déclenche et selon la pente on a une agglomération des gouttes en petits filets qui s'écoule d'une façon linéaire, les petits écoulements s'anastomosent, se rejoignent latéralement, fusionnent et forment une pellicule puis une nappe. Le transport dans ce cas est sélectif et dépend de la pente, de l'intensité et de la durée de pluie ainsi que de la stabilité structurale et de la résistance des particules du sol (Fig.73) (Roose, 2004).

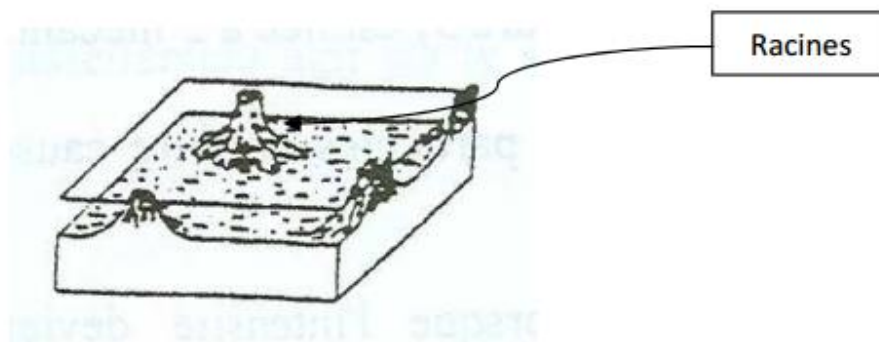


Figure 73: Érosion en nappe

- Influence de la taille des particules :

La mise en suspension des particules dépend de leur taille et de leur cohésion. Ainsi les sables fins et les limons sont les plus facilement érodables car leur résistance dépend de leur cohésion, en ce qui concerne les particules grossières, elles nécessitent un écoulement fort car elles résistent par friction.

- Influence de l'impact des gouttes de pluie :

Les gouttes de pluie contribuent à la mise en mouvement des particules, ce qui implique une augmentation de la charge solide qui peut être multipliée par deux ou trois lorsque la vitesse de ruissellement augmente.

- Influence de la pente et de la longueur de la pente :

La pente joue un rôle important dans l'érosion hydrique, elle peut, selon son inclinaison, accélérer la vitesse du ruissèlement et augmenter la charge solide. Additionner à cela, que plus la longueur de la pente est grande plus la surface touchée par les incisions est grande, car sous l'effet de l'accélération par la gravité le ruissèlement acquière plus d'énergie.

➤ Érosion en sub-surface :

Les mouvements d'eau en sub-surface sont : infiltration, percolation et écoulement hypodermique. Ces mouvements sont contrôlés par l'arrangement géométrique des particules grossières, qui détermine la connectivité porale. L'entraînement des particules fines par l'eau s'effectue verticalement ou d'une façon oblique va constituer un lessivage pédologique. L'eau peut transportée de la matière sous forme de solutés ce qui va contribuer à une dégradation et un appauvrissement des sols. En ce qui concerne l'écoulement hypodermique, il est presque parallèle à la surface du sol. Il a le pouvoir d'entraîner les particules ou les éléments nutritifs à travers les pores, en plus de sa capacité à creuser des tunnels qui peuvent être responsables d'affaissement ou de suffusion.

➤ Érosion par écoulement concentré

- Erosion en rigoles :

Elle est la première forme d'incision linéaire qui affecte les sols. Elle est associée le plus souvent aux terrains de culture, lorsque le ruissèlement s'intensifie on observe une concentration puis un creusement de quelques centimètres de profondeur, la formation des incisions et d'autant plus rapide que la pente est forte, la pluie est intense ou lorsque le cisaillement exercé par l'écoulement dépasse le seuil de résistance (**FAO, 1976**).

- Erosion en ravines :

Ce sont des formes d'érosion linéaire qui naissent soit par évolution des rigoles, soit par une dissection profonde du sol qui crée une rupture de pente brutale. Ces ruptures peuvent favoriser la naissance des ravines (**FAO, 1976**).

- Erosion en ravins :

Les ravines peuvent correspondre à une évolution en profondeur, en longueur et en largeur des ravines, les formes d'évolution sont diverses et sont surtout liées à la lithologie. Lorsque le ravinement affecte littéralement le versant, on parle de ravinement généralisé ou « Bad Lands ».

➤ Mouvement en masse : solifluxion

C'est un ensemble de mouvement de terrain allant de petits arrachements pelliculaires aux grands glissements rotationnels profonds. Ces mouvements sont liés à la perte de cohésion entre les particules du sol quand il est riche en argile. En revanche, les glissements se manifestent lorsque le sol devient plastique ou liquide, et on assiste soit à un glissement superficiel ou rotationnel.

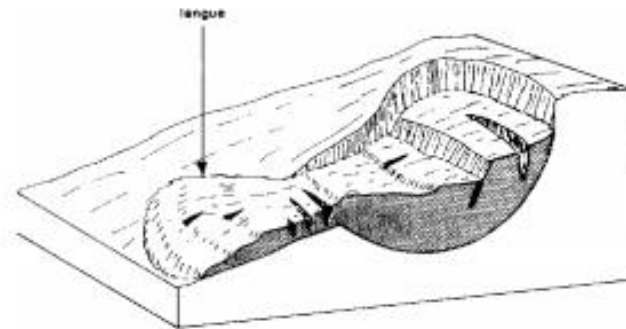
- Glissement superficiel ou pelliculaire :

Correspond à un mouvement d'une masse limitée par deux plans parallèles lorsque la limite de plasticité des minéraux est atteinte, suivi d'une désolidarisation du reste du versant puis glissement sous l'effet de la gravité. Le plan inférieur correspond généralement à la surface de labour ou la base du manteau d'altération. Sur ce plan l'eau coule et constitue un lubrifiant qui fait glisser la masse au-dessous.

- Glissement rotationnel :

C'est un mouvement spectaculaire qui affecte des quantités considérables de matériaux. L'eau est l'agent principal dans le déclenchement des glissements rotationnels en plus de la pente, la tectonique et l'action humaine.

On distingue deux facteurs qui contribuent au déclenchement des glissements rotationnels : Passifs : liés à la nature du substrat et produit dérivés tels la lithologie, la fracturation, le pendage, disposition structurale et exposition ; Actifs : liés aux agents de l'érosion tels le climat, la végétation et les activités humaines (**Fig. 74**).

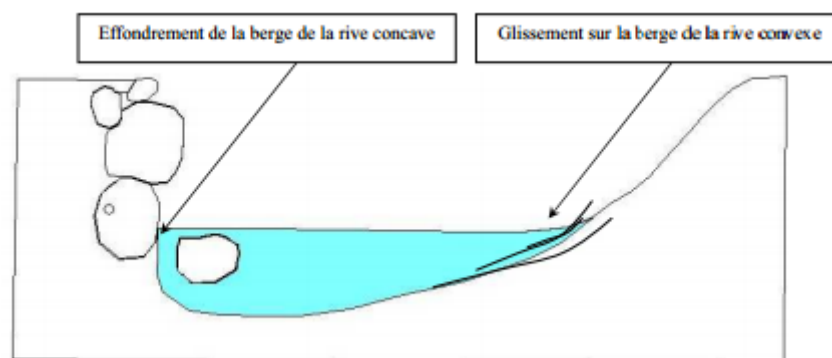


**Figure 74: Glissement rotationnel**

- Erosion par les cours d'eau :

Cette érosion résulte de la turbulence des eaux courantes lors des crues. Elle se manifeste par le sapement des berges ou l'ablation des fonds des chenaux.

La capacité de transport est fonction de l'énergie et la vitesse des cours d'eau ce qui implique qu'un chenal est en équilibre quand toute l'énergie est dépensée dans le transport des sédiments, ce qui veut dire : que si la charge en sédiment est faible, l'énergie disponible est utilisée pour l'érosion des berges (**Fig.75**).



**Figure 75: Erosion par les cours d'eau**

### III. Modélisation de l'érosion hydrique par PAP/CAR

Les fonctionnalités de l'érosion et de l'utilisation des sols sont très diversifiées en raison de leurs conditions essentiellement topographiques, lithologiques, morphologiques et climatiques. La dégradation des sols pose d'énormes problèmes aux conséquences socio-économiques et environnementales très négatives. A cet égard, on a choisi d'appliquer le model PAP/CAR pour qualifier

l'érosion hydrique dans le bassin du Haut Ziz, ce choix a été basé sur les avantages de ce modèle et sur son adaptation avec les conditions du bassin. La situation de la zone étudiée dans une région méditerranéenne constitue la première preuve qui encourage la validation de l'utilité du PAP/CAR dans ce dernier, la deuxième preuve c'est le fait que l'érosion hydrique dans ce bassin n'a jamais été traitée avec le PAP/CAR.

### 1. Présentation du modèle PAP/CAR :

Pendant les années 90, la FAO (Food And Agriculture Organization), le DGCONA (Direction Générale de la Conservation de la Nature Madrid) et le PAP/PAM (plan d'action prioritaire du plan d'action pour la Méditerranée) ont collaboré pour mettre au point une méthodologie simple et flexible pouvant s'adapter aux conditions spécifiques de chaque région de la Méditerranée (Osmana, 2017).

Ce modèle qualitatif d'étude de l'érosion hydrique des sols, associé aux systèmes d'information géographique (SIG), et à la télédétection, présente plusieurs avantages en tant qu'outil efficace de prévision de l'érosion spatiale sur de grandes surfaces, de suivi de l'évolution spatio-temporelle et des tendances futures de ce phénomène et une aide à la prise de décision (Tribak, 2012).

### 2. Application des directives PAP/CAR au niveau du bassin du Haut Ziz :

Grâce au système d'information géographique SIG, de multiples méthodes ont été développées à travers le monde pour décrire le milieu et pour étudier le phénomène de l'érosion. Ces méthodes, souvent basées sur l'analyse des photographies aériennes et des images satellites, permettent de mieux comprendre et évaluer cette problématique environnementale. En fonction des risques.

La méthode qualitative (PAP/CAR, 1998) est une méthode d'étude qualitative de l'érosion hydrique permettant d'hiérarchiser la surface d'un bassin versant en unités distinctes selon la vulnérabilité à l'érosion, repose sur trois approches (ou phases) : la phase prédictive, la phase descriptive et la phase d'intégration. Il est basé sur une cartographie thématique des facteurs d'érosion, notamment l'érodibilité du sol, la pente, l'utilisation des sols et la densité de la couverture végétale. Pour chaque carte, le facteur est présenté en 4 à 5 classes ; une valeur est attribuée pour chaque classe et correspond aux degrés d'influence du facteur sur l'érosion dans le bassin versant du Haut Ziz.

Son application nécessite une démarche de plusieurs opérations de croisements cartographiques et d'analyse de base de données selon l'organigramme suivant (Fig. 76) (Osmana, 2017). L'utilisation des outils de télédétection et du SIG nous a permis la réalisation et la superposition des cartes thématiques, la rapidité d'exécution des travaux cartographiques et, le traitement des bases de données.

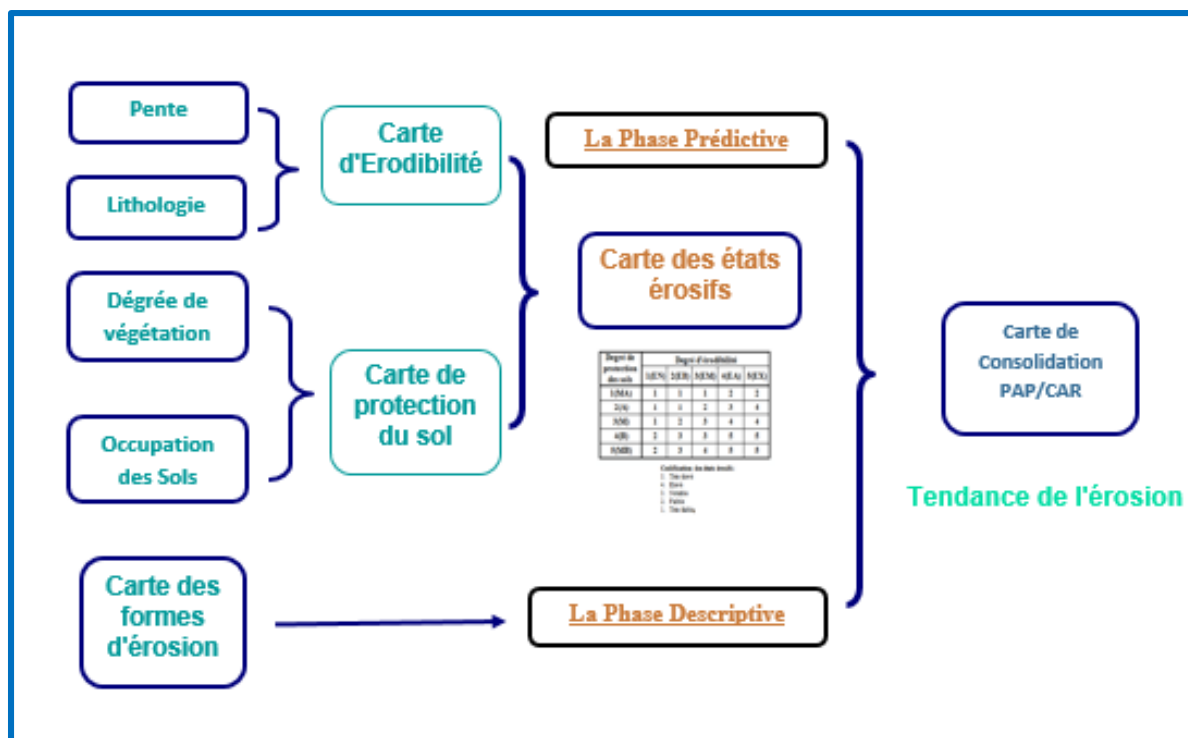


Figure 76: Méthodologie adoptée pour l'estimation de l'érosion potentielle par la méthode PAP/CAR (Osmana, 2017)

L'approche méthodologique de la méthode (PAP/CAR, 1998) repose sur 3 phases bien définies :

- **L'approche prédictive** qui contrôle l'érosion à partir de la cartographie thématique des facteurs (pente, lithologie, occupation des sols et degré de couvert végétal). Cette approche finie par la déduction de la carte d'état érosif qui donne une idée sur le degré d'érosion dans toute la zone.

Elle consiste à identifier, évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux pour déterminer des hypothèses préliminaires, ainsi que d'obtenir des informations sur l'état actuel de dégradation des terres sur la base de degré d'influence de différents facteurs qui contrôlent l'érosion (Lithologie, pente, utilisation des terres, protection des sols...).

Elle aboutit à la cartographie des unités homogènes des états érosifs, fournissant le canevas pour la cartographie du potentiel et des tendances générales.

- **L'approche descriptive** : Elle consiste à décrire et à évaluer qualitativement les processus actuels et actifs, elle est réalisée par l'observation directe et le contrôle sur le terrain, en utilisant la carte prédictive des états érosifs comme canevas cartographique et thématique de référence, afin de mettre en valeur les contraintes spécifiques et représentatives de l'érosion. Elle donne une image réelle sur les différentes formes d'érosion situées sur la zone d'étude ainsi que leurs degrés d'exposition à la dégradation.

- **L'approche d'intégration** : C'est la superposition des cartes des états érosifs obtenues par la cartographie thématique et la carte des formes d'érosion obtenue par la cartographie descriptive directe des formes d'érosion sur le terrain ou par les images satellites.



Elle est obtenue par la superposition et l'intégration des informations qualitatives issues des phases prédictives et descriptive.

### 3. Résultats de l'Approche prédictive

Pour cette approche, il consiste à cartographier, évaluer et intégrer les 7 cartes thématiques :

#### 3-1- Carte d'érodibilité

La première carte de la phase prédictive dite d'Erodibilité, réalisée en tenant compte de la pente et de la lithologie pour fournir des informations sur l'état actuel de la dégradation des sols.

- **Carte de pente : (Fig. 77)** la pente est un facteur principal pour l'évaluation de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. La carte des pentes a été synthétisée à partir du modèle numérique du terrain issue d'une image satellitaire ASTER Global Digital Elévation Model (GDEM), et à l'aide de l'outil SIG. L'image satellitaire utilisée a été mise en ligne le 08 juillet 2018 par la NASA. Elle a une résolution de 30 m, et elle a été téléchargée depuis le site de la NASA. Sa classification est résumée dans le **tableau 23**.

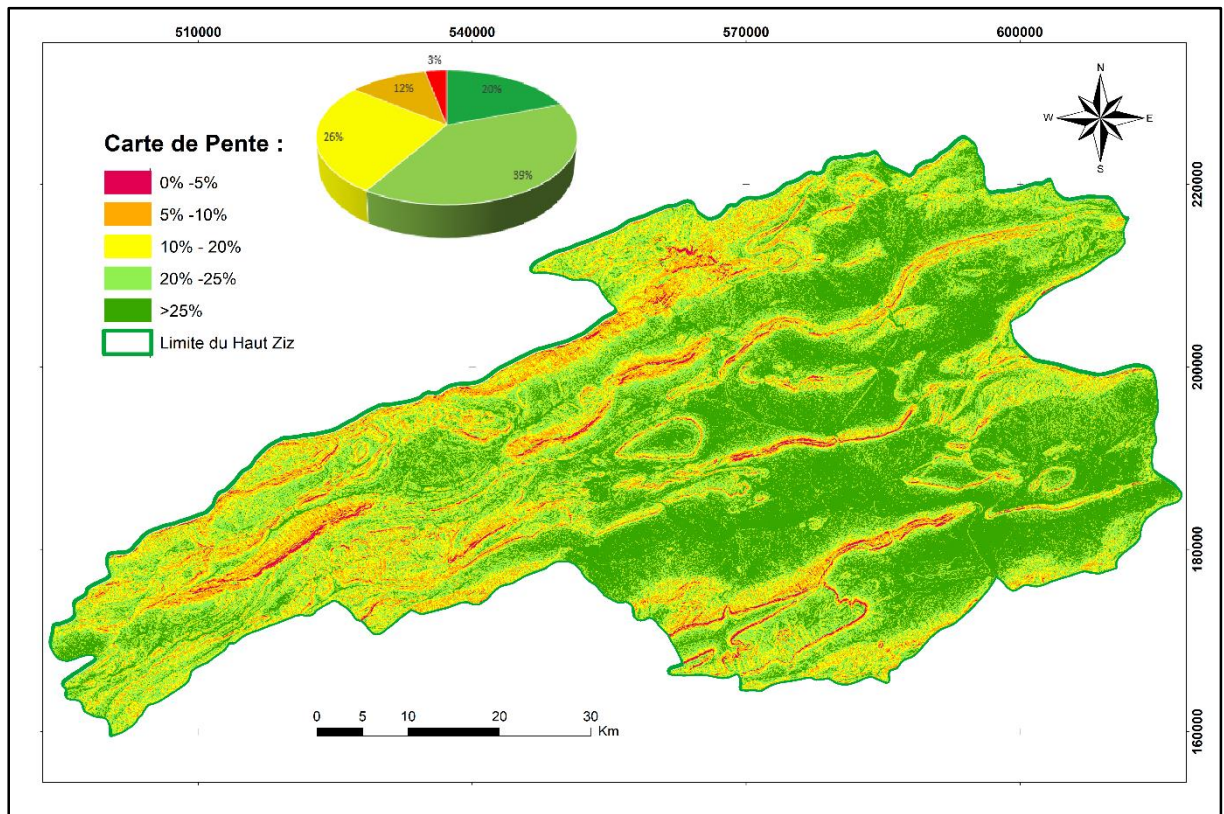


Figure 77: carte de pente du bassin versant du Haut Ziz

Tableau 23 : Les classes de risque lié à la valeur de pente

La pente			
Classe	Inclinaison	Degré	%
1	Nulle à faible	(0-5%)	20
2	Modérée	(5%-10%)	39
3	Abrupte	(10%-20%)	26
4	Très abrupte	(20%-25%)	12
5	Extrême	(>25%)	3

La répartition des pentes au niveau du bassin versant est variable, marquée par :

La dominance des pentes modérée présentant 39 % de la classe total des pentes.

Les pentes extrême (>25%), présentant 3%. Alors que les pentes abruptes et très abrupte représentent 38 %. Les pentes nulles à faible, présentant 20 % avec faible pourcentage des pentes avec inclinaison extrême.

- Carte lithologique et carte des degrés de résistance du sol ont été élaborées à partir des cartes géologiques de Midelt, d'Errich et de Boudnib au 1/200000 (Diani, 2019) à partir de la carte géologique du Maroc au 1/2000000. Les substrats obtenus dans la carte des lithofaciès, ont été classé selon leur degré de résistance du sol en cinq classes. A chacune de ces classes on a affecté un code (a), (b), (c), (d) ou (e) selon le degré de friabilité comme préconisé dans les directives PAP/CAR (Fig.78) (Tab.24).

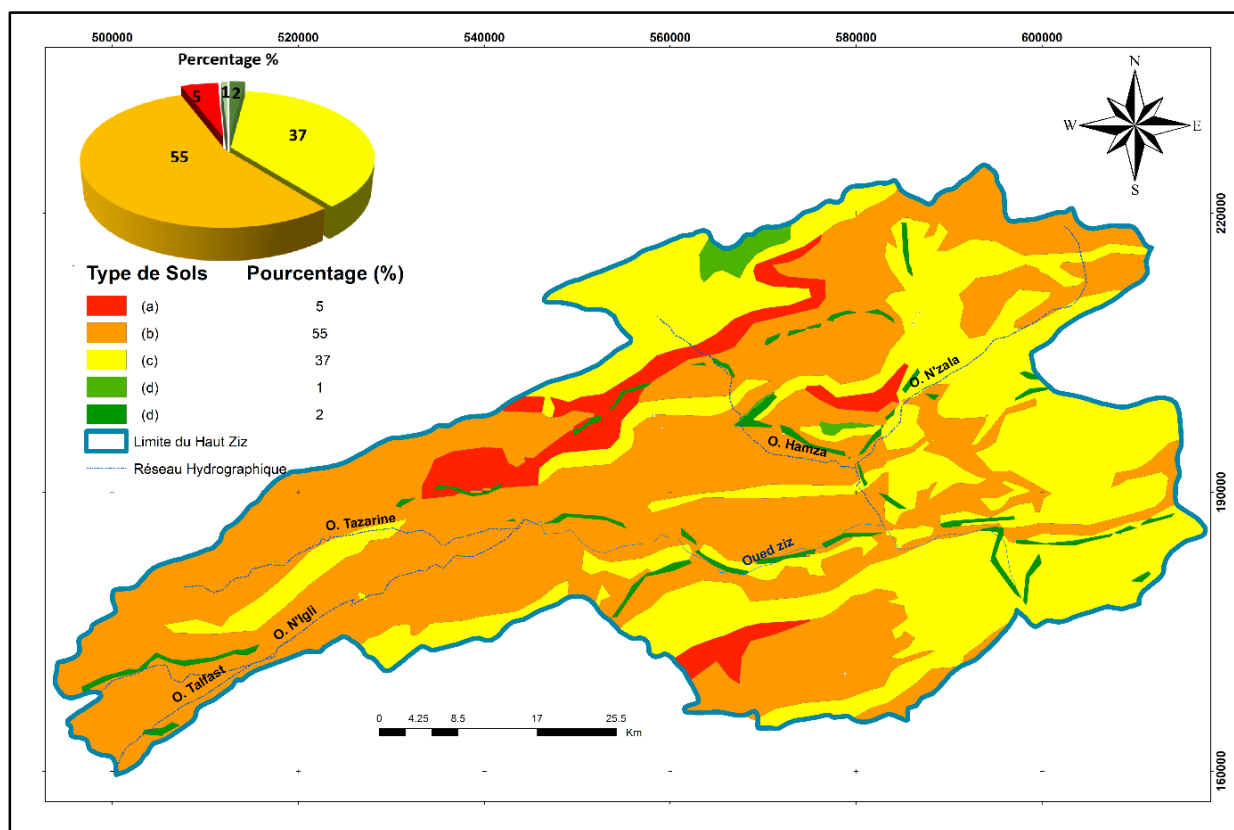


Figure 78 : Carte de Résistance du lithofaciès selon le type du sol occupé par le bassin versant du Haut Ziz

Tableau 24 : Classes des lithofaciès et leurs degrés de résistance

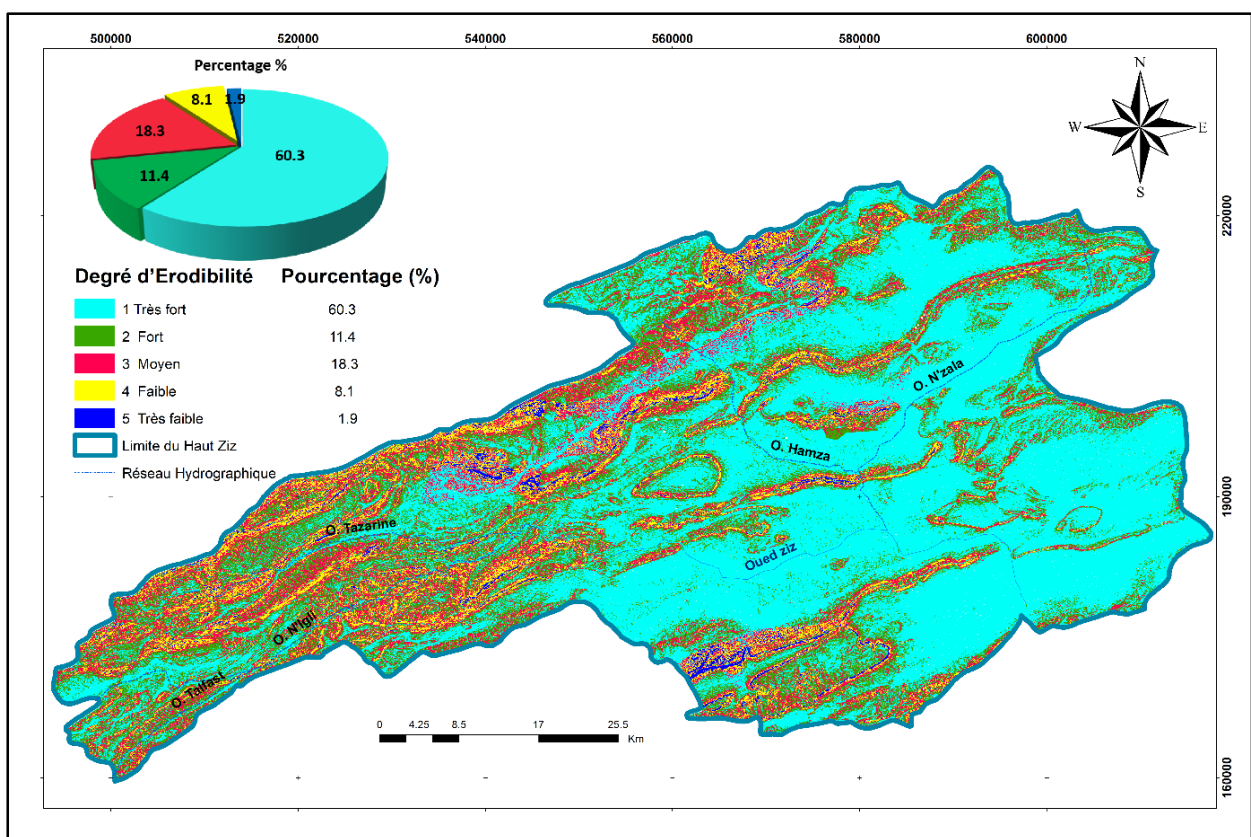
Lithofaciès		
Classe	résistance	Type de matériel
(a)	Très forte	Roches compactes non altérées, conglomérats fortement cimentés, etc.
(b)	forte	Roche ou sol cohésif fracturé ou modérément altéré
(c)	moyenne	Roche ou sol sédimentaire faiblement ou modérément compacté (ardoise, schiste, marne, etc.)
(d)	faible	Roche et/ou sols peu résistants ou fortement/profondément altérés (marne, gypse, ardoise argileuse, etc.)
(e)	Très faible	Sédiments ou sols meubles, non cohésifs et matériels détritiques

La classification est faite en fonction de leur degré de résistance des matériaux. Marquée par :

Une prédominance des sols cohésifs fracturé ou modérément altérée, présentant 55 % de la classe totale des sols.

Les sols peu résistantes (exemple marne au niveau du toarcien) est fortement érodés, présentant 3 %, Les sols très résistantes (est fortement érodés, et les sols meuble non cohésif à matériel détritique, présentant 42 % de la classe totale des sols.

La carte d'Erodibilité est le résultat de la superposition de la carte des pentes et de la carte de résistance des matériaux à l'érosion. Les polygones résultant du produit croisé des deux tables sont classés selon une matrice pour hiérarchiser le terrain en fonction du degré d'Erodibilité (**Fig. 79**).



**Figure 79 : Carte résultante d'érodibilité**

La combinaison des deux cartes a été effectuée selon la matrice (**Tab.25**), qui permet de combiner les valeurs de la carte des pentes et de la carte des lithofaciès pour faire sortir le degré d'Erodibilité suivant les classes propres aux directives PAP\CAR. L'Erodibilité est toujours extrême lorsque la pente est forte et/ou le terrain est de faible résistance.

Le traitement et l'analyse de la carte d'érodibilité montre que la répartition d'érodibilité au niveau du bassin, est fonction des pentes et de degré de cohésion des sols.

Marquée par une prédominance des érodibilité Faible présentant 60.3%, de la totalité de notre zone d'étude.

L'érodibilité modérée, présente 18.3% de la classe totale du degré d'érodibilité. Tandis que le degré Fort et extrême d'érodibilité, présente que 10 % de la classe totale du degré d'érodibilité.

**Tableau 25 : Matrice des pentes Vs lithofaciès**

Classe des pentes	Classe des lithofaciès				
	1(a)	2(b)	3(c)	4(d)	5(e)
<b>1</b>	1(EN)	1(EN)	1(EN)	1(EN)	2(EB)
<b>2</b>	1(EN)	1(EN)	2(EB)	3(EM)	3(EM)
<b>3</b>	2(EB)	2(EB)	3(EM)	4(EA)	4(EA)
<b>4</b>	3(EM)	3(EM)	4(EA)	5(EX)	5(EX)
<b>5</b>	4(EA)	4(EA)	5(EX)	5(EX)	5(EX)

Avec : EN (très faible à nulle)-EB (Faible)-EM (modéré)-EA (forte)-EX (extrême).

### 3-2- La carte d'occupation du sol :

Cette carte a été élaborée à partir de l'image satellitaire (Google Earth) de cette région téléchargée par le logiciel (Terra Incognita), digitalisée par ArcGIS, et classifiée par les directives PAP/CAR en se basant sur le tableau 26 et (**Fig. 11**) selon le type de couvert végétal (matorral claire ou dense, forêt, reboisement ...) ou de culture (arboriculture, culture sèche, culture intensive maraîchage ...). (ORMVAT, 2011)

Tableau 26 : Classification de la carte d'occupation des sols

Classes	Occupation des sols
<b>1</b>	Culture en sec ou terrain nu
<b>2</b>	Arboriculture et Reboisement
<b>3</b>	Culture intensive à proximité d'habitation
<b>4</b>	Forêt naturelle
<b>5</b>	Matorral à couvert dense
<b>6</b>	Matorral à couvert claire

Plusieurs occupations des sols coexistent dans le bassin versant du Haut Ziz

➤ Estimation de la densité du couvert végétal :

L'élaboration de sa carte a été effectuée à partir d'une image Landsat 8 Oli prise le 08/7/2017(**Fig.7**) (Diani, 2019), qui a subi des traitements préalables ce qui a permis de synthétiser le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Le couvert végétal dépend de la croissance et du développement de la végétation en relation avec la variation de l'érosivité du climat (Mesrar, 2012). Ce facteur joue un rôle clé dans le maintien de la résistance des sols, car quel que soit le sol, la pente et le climat, un couvert végétal complet permet une meilleure conservation du sol et de l'eau.

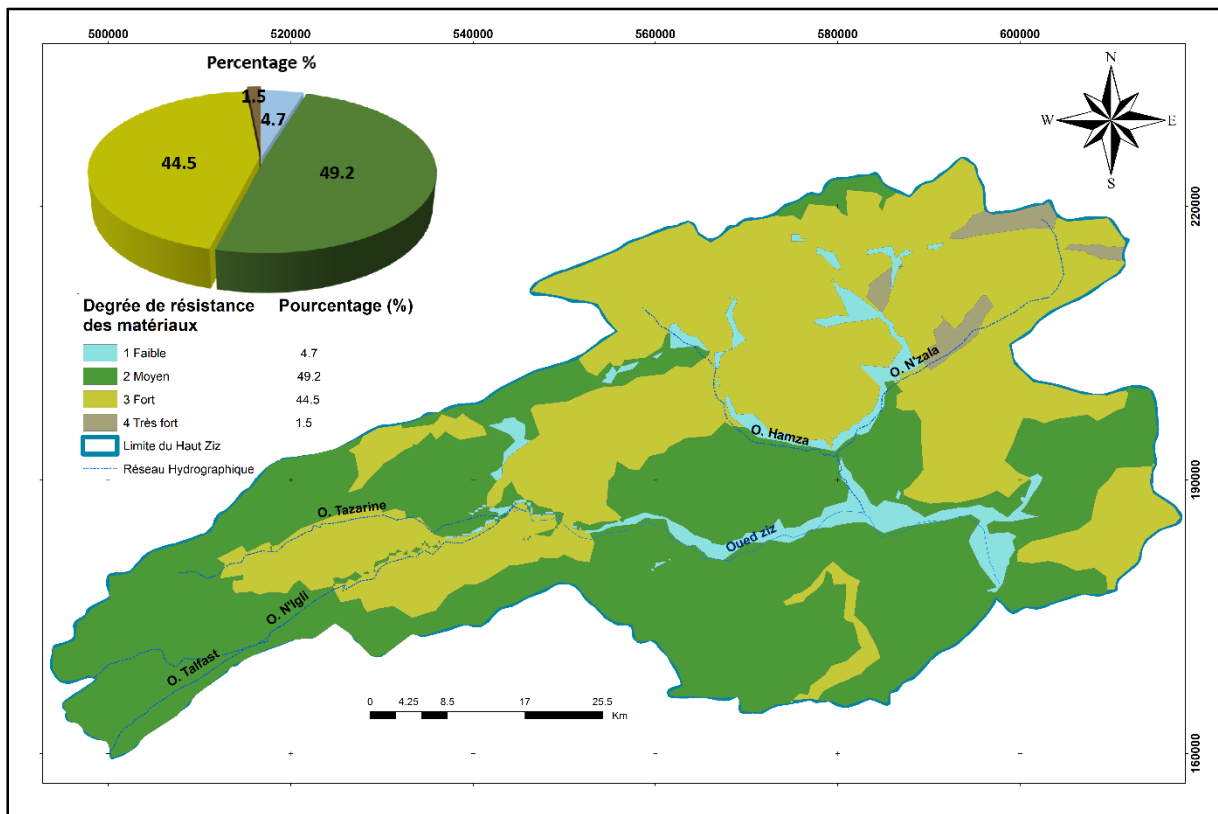


Figure 80 : Carte de résistance des matériaux à l'érosion dans le bassin versant du Haut Ziz

Au niveau de la figure 81, on constate que la carte de résistance des matériaux à l'érosion dans le bassin versant du Haut Ziz, contient 4 classes, la classe la plus dominante montre des valeurs plus élevées qui tendent vers 1, entre (0,247- 1), correspondent aux zones de forêt où la végétation est très dense. Tandis que les valeurs élevées (0,175- 0,247) représentent la végétation dense, la végétation de densité moyenne est représentée par des valeurs comprises entre (0,058- 0,175) et les faibles valeurs (-0,103- 0,058) correspondent aux zones de végétation éparse et des terrains de culture (Fig. 80).



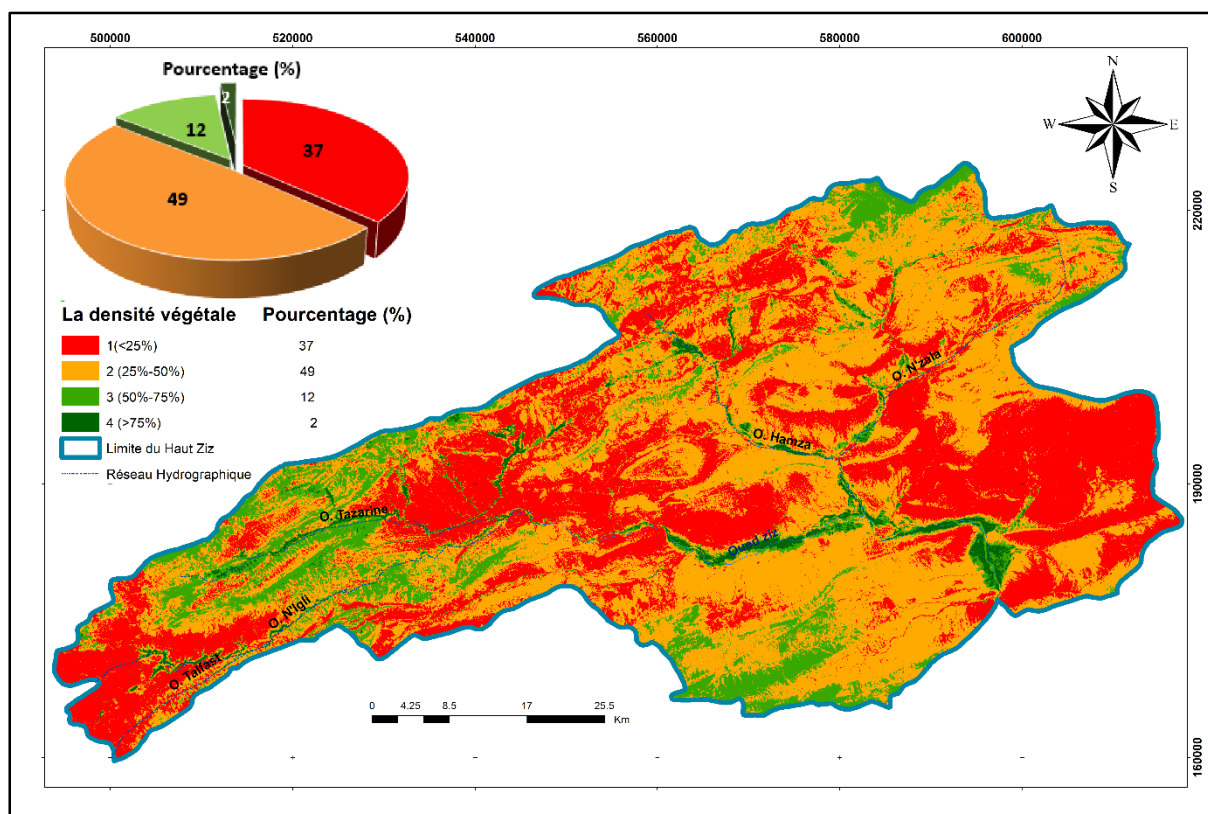


Figure 81 : Carte de la densité végétale du bassin versant du Haut Ziz

La carte du degré de couvert végétal (**Fig.81**), permet de détecter les zones à couvert clair, et celles à couvert dense. Par rapport aux autres classes, Une prédominance de la végétation dense (>75%) et moyennement dense (50%-75 %), présentant 24 % de la classe totale du degré de recouvrement.

- Une moyenne présence de végétation de densité épars (25%-50) et <25% présentant 76%.

### 3-3- La carte de protection des sols

L'application de cette étape s'avère nécessaire, car il permet de cerner le rôle du couvert végétal.

La protection des sols est définie comme la résistance qu'offre la nature du couvert végétal au substrat, elle dépend de l'occupation du sol et de leur degré de protection.

Cette carte est produite par la superposition de la carte d'occupation du sol et de la carte de densité du couvert végétal. La carte de protection des sols a été produite par la superposition de la carte d'occupation du sol et de la carte de densité du couvert végétal. La carte résultante a été classée selon la matrice des directives PAP/CAR (**Tab. 27, Fig. 82**).

L'objectif de la réalisation de cette carte, est **d'hiérarchiser** la surface du bassin versant du Haut Ziz, selon le **degré de protection** que peut conférer le couvert végétal.

Tableau 27 : Matrice d'occupation du sol Vs couvert végétal

Occupation du sol	Degré de couvert végétal			
	1	2	3	4
1	5(MB)	5(MB)	4(B)	4(B)
2	5(MB)	5(MB)	4(B)	3(A)
3	3(M)	2(A)	1(MA)	1(MA)
4	4 (B)	3(M)	2(A)	1(MA)

Avec : A (forte)-B (Faible)- M (modéré)- MA (très forte) - MB (moyennement forte).

Les différentes classes de la protection des sols selon les directives du PAP/CAR sont résumées dans le tableau suivant :

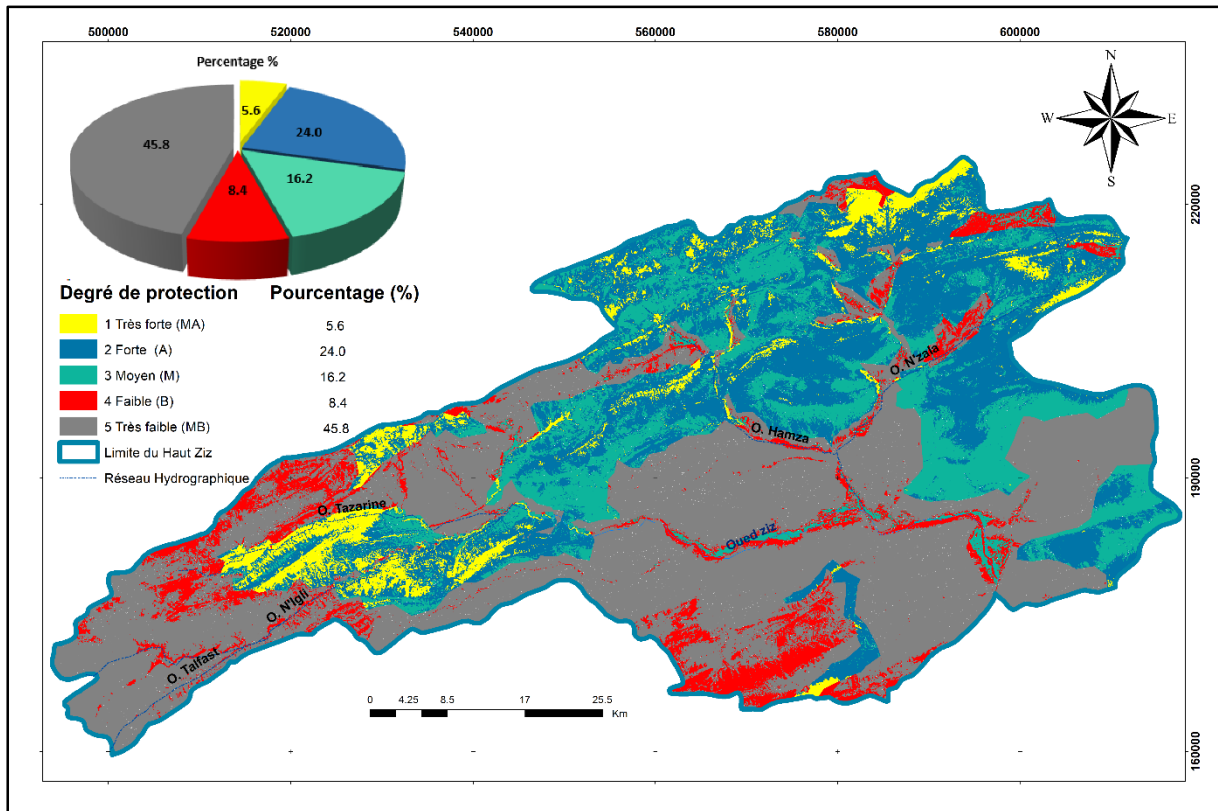


Figure 82 : Carte degré de protection des sols selon PAP/CAR

Tableau 28 : Classes du degré de protection des sols selon PAP/CAR

Classes	Degrés de protection des sols
1	Très élevé (MA)
2	Elevé (A)
3	Moyen (M)
4	Faible (B)
5	Très faible (MB)

La répartition des classes de protection du sol (**Fig. 82**) indique que les zones de très faible protection se trouvent au niveau du Sud et sud-ouest du bassin, surtout la partie aval d'oued Ziz, les zones de protection élevée se localisent en amont du bassin.

La carte de protection des sols représente le résultat de superposition de la carte d'occupation des sols et celle de la carte densité du couvert végétal, selon le type et le degré de répartition de la végétation.

L'objectif de la réalisation de cette carte, est d'hierarchiser la surface du bassin versant du Haut Ziz, selon le degré de protection que peut conférer le couvert végétal.

L'application de cette étape s'avère nécessaire, car il permet de cerner le rôle du couvert végétal.

### 3-4- La carte des états érosifs (fig.83)



La carte des états érosifs est le produit final de la phase prédictive, résultant de la superposition de la carte d'érodibilité et de la carte de degré de protection des sols. Elle constitue la 7ème et la dernière étape de la phase prédictive et donne une idée géo-localisée sur le potentiel et les tendances générales de l'érosion.

- La superposition se fait en appliquant la matrice (**Tab.28**) présentée par la matrice suivante :

Degré de protection des sols	Degré d'érodibilité				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	2	2
2	1	1	2	3	4
3	1	2	3	4	4
4	2	3	3	5	5
5	2	3	4	5	5

Tableau 29: Matrice des états érosifs des sols

La légende codifiante est signalée par la carte des états érosifs, suivant la **figure 83** :

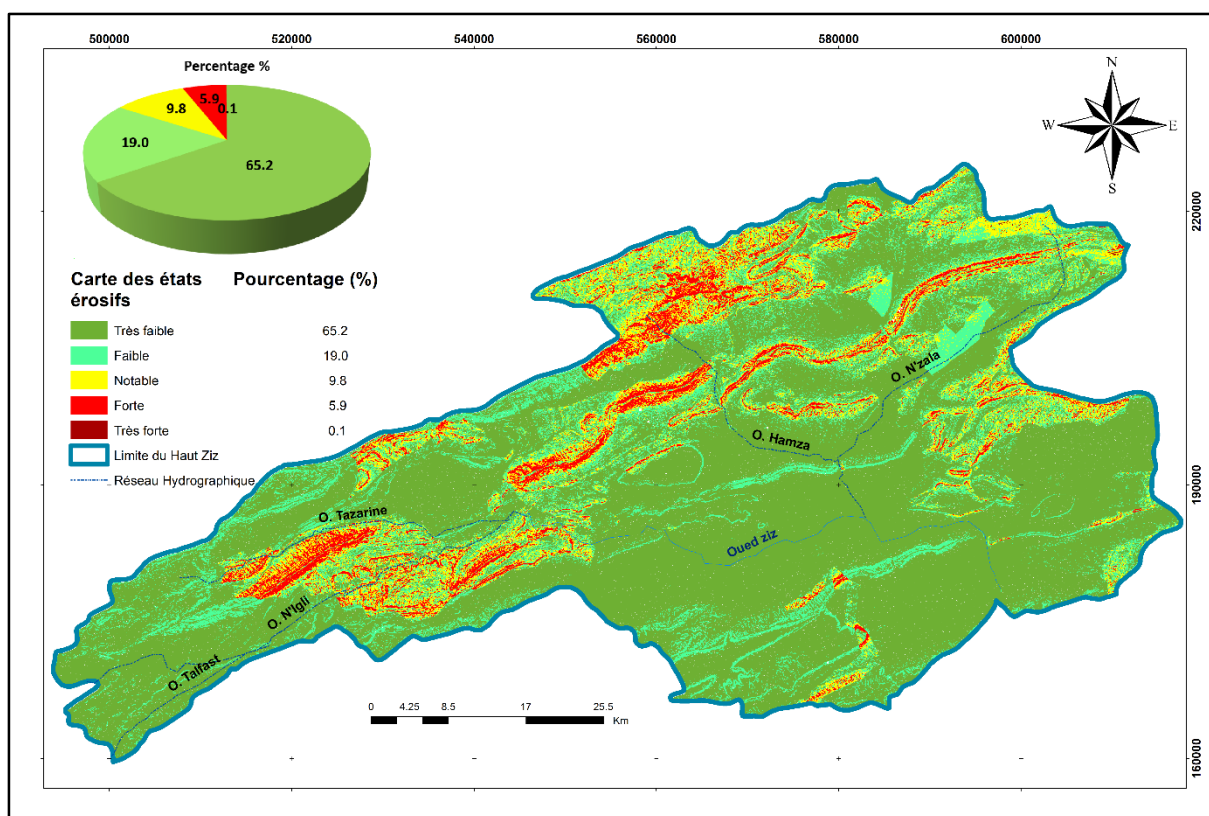


Figure 83 : Carte des états érosifs du bassin versant de Haut Ziz

La carte résultante des états érosifs (**Fig.83**) a pour but de :

- Ressortir les différentes combinaisons des degrés d'influence des facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : Pente, type de sols, densité de couvert, type d'occupation.
- D'hiérarchiser la surface du bassin versant du Haut Ziz, en unité selon le degré de l'état érosif.

Le traitement analytique de la carte des états érosifs contribue aux résultats suivants :

Une prédominance de l'érosion très faible, présentant 66% de la classe totale du degré d'états érosifs.

L'érosion notable, présentant 9.8% de la classe totale du degré d'états érosifs.

L'érosion élevée, présentant 6 % de la classe totale du degré d'états érosifs.

L'érosion faible, présentant 19% de la classe totale du degré d'états érosifs.

L'érosion très élevée, présentant 0.1 % de la classe totale du degré d'états érosifs.

En Tenant compte des facteurs de l'érosion qui règne, le bassin versant du Haut Ziz est moyennement vulnérable à l'érosion, cela est due en fait que tous les facteurs agissent par leurs degrés les moyens, que ce soit pour l'érodibilité ou pour la protection des sols.

#### 4. Résultats de l'approche descriptive :

L'approche descriptive se fait en une seule étape. Elle consiste à faire une évaluation qualitative en décrivant les formes et les processus d'érosion réellement existant dans la zone d'étude. Dans cette phase on distingue d'abord deux grandes catégories de milieux géographiques : les milieux stables, non affectés par l'érosion et les milieux instables, affectés par divers processus d'érosion en indiquant leur indice de dominance. La carte suivante (**fig. 84**) a été réalisée par des observations sur le terrain, par exploitation des données existantes (documents d'aménagement des bassins versant et d'aménagement forestier, études relatives à l'érosion et autres) et par exploitation des images « Google Earth », tout en se référant à la carte prédictive des états érosifs comme canevas cartographique et thématique.

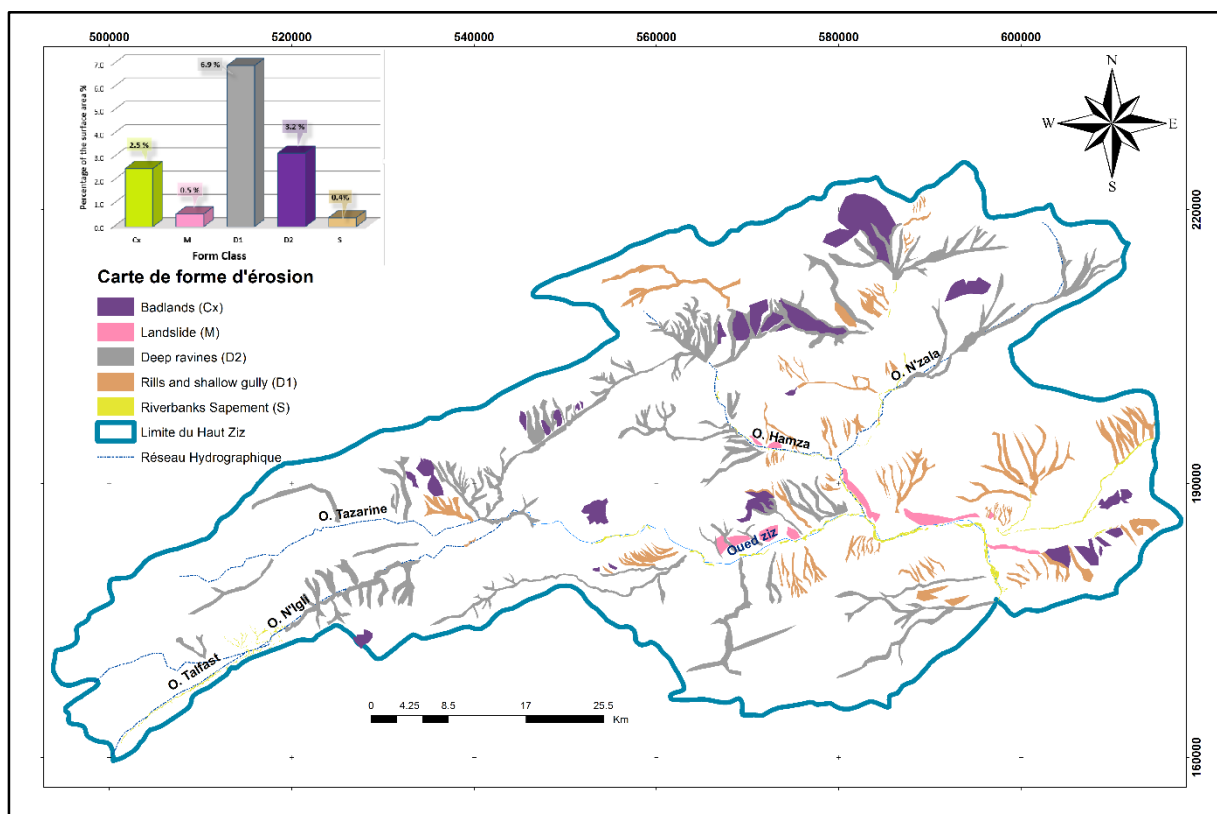


Figure 84 : Carte de forme d'érosion

Cette carte a montré la distribution des formes d'érosion dans le bassin versant du Haut Ziz : Cette distribution montre que Les ravins sont les plus apparents avec un pourcentage significatif de 7% de l'ensemble du bassin versant du Haut Ziz, tandis que toutes les autres formes, et représentent le même pourcentage que les ravins. La présence de ces deux formes d'érosion qui prennent leur source dans la rivière la plus proche, s'explique par la vulnérabilité des terres, les processus hydrologiques et les actions anthropiques. Nous avons constaté que les ravins et les rivières commencent à s'individualiser à partir d'une valeur de pente supérieure à 20. De plus, les problèmes d'érosion des berges observés sur les principaux fleuves, les grands torrents provenant des montagnes et donnant directement sur les terres cultivées, créent un danger évident et une bombe qui explose à l'occasion de chaque inondation ; nous avons également trouvé une forte concentration de ravins, localisés dans les zones culturelles ou sur un sol nu en pente très raide, avec peu ou pas de couverture végétale avec une lithologie friable. Ce type d'érosion est observé même dans les zones à pente relativement faible, étant donné la nature lithologique friable des zones touchées (limons Quaternaires dans quelque part et d'autre part des marnes du Toarcien).

L'analyse de cette carte montre aussi que les formes d'érosion liées aux crues sont évoluées car dans le majeur des cas, les formes initiales ont pris de l'ampleur, et les nouvelles formes ont pris naissance.

## 5. Approche de l'intégration

Cette approche est connue sous le nom de phase d'intégration et de consolidation, qui constitue les 9 étapes du modèle PAP/CAR, comme son nom l'indique, il intègre les résultats des huit étapes précédentes obtenus dans les deux premières phases (prédictive et descriptive). La carte d'érosion consolidée qui en résulte est une carte quantitative obtenue en superposant les informations qualitatives issues des phases prédictive et descriptive. Les formes d'érosion ont été détectées à partir d'images satellites (OLI 8) (**Fig.7**) et validées sur le terrain. Le site de la carte des formes d'érosion dirigée par le PAP/CAR, représente cinq formes d'érosion qui couvrent 14% du bassin de la région. L'analyse des résultats montre le graphique de fréquence de chaque formulaire. Le graphique (tab.30) et (**Fig .85**) montre : Les formes linéaires telles que les ravins profonds (D1), ainsi que les rigoles et les ravins peu profonds (D2) qui sont les plus détectés dans la zone de chalandise avec 276,67 Km<sup>2</sup> et 126,47 Km<sup>2</sup>. La zone occupée par les Bad Lands (Cx) occupe 22 km<sup>2</sup> (0,6%). Le sillage des berges (S) occupe la plus petite surface avec 0,4 % (15 Km<sup>2</sup>) de la totalité du bassin.

Concernant la forme du Mouvement de masse (M), occupe une superficie de 21 km<sup>2</sup> (0.5%), qui se caractérise par un faciès marneux et schisteux, et par une pente moyenne ce qui favorise le glissement et le déplacement des matériaux sous l'effet de la gravité.

On peut dire aussi que les formes d'érosion les plus évoluées se localisent aux endroits qui présentent les classes des états érosifs les plus élevés. Il y'a donc une corrélation positive entre les formes d'érosions et les états érosifs

Tableau 30 : Superficies relatives des formes d'érosion

Légende	Formes d'érosion	Superficie (Km <sup>2</sup> )
Cx	Badlands-Solifluxion	22
D1	les ravins profonds (Erosion importante,	276.67
D2	Les rigoles et les ravins peu profonds	126.47
S	Sapement de berges	15
M	Glissement des terrains	21

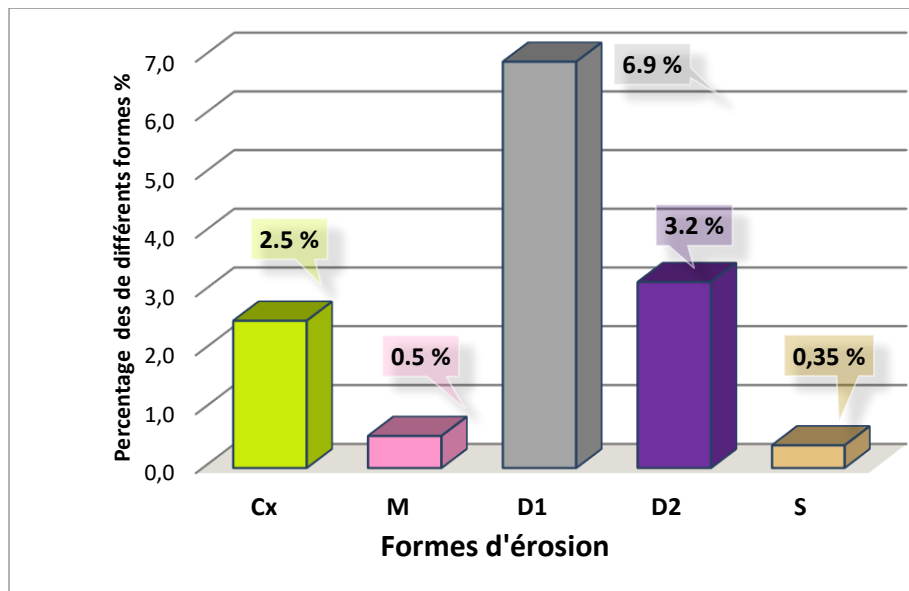


Figure 85 : Histogramme de fréquence des formes d'érosion en fonction de pourcentage des différentes formes

On constate aussi que la majorité des ravins peu profonds coïncident avec des zones où le degré d'état érosif est faible à moyen. Ces zones s'étalent sur une surface de 335 Km<sup>2</sup> (l'expansion spatiale du processus d'érosion ne dépassent pas 13.45 % du bassin versant), la présence de ces formes peut être liée à la pente forte et l'agressivité des pluies. Malgré ces conditions cette partie n'atteint pas un degré extrême d'érosion. Cela peut être expliqué par la moyenne superficielle occupée par ces zones (chaînes montagneuses (des calcaires dolomitiques Jurassiques)). **(Fig.86)**

**La carte consolidée du PAP/CAR (Fig.86) :**

Produite de l'intégration de toutes les données prédictives et descriptives, a permis l'identification des degrés de stabilité, des processus érosifs dominants et des tendances évolutives **(Fig.87)**. À l'intérieur des différentes unités d'érosion.

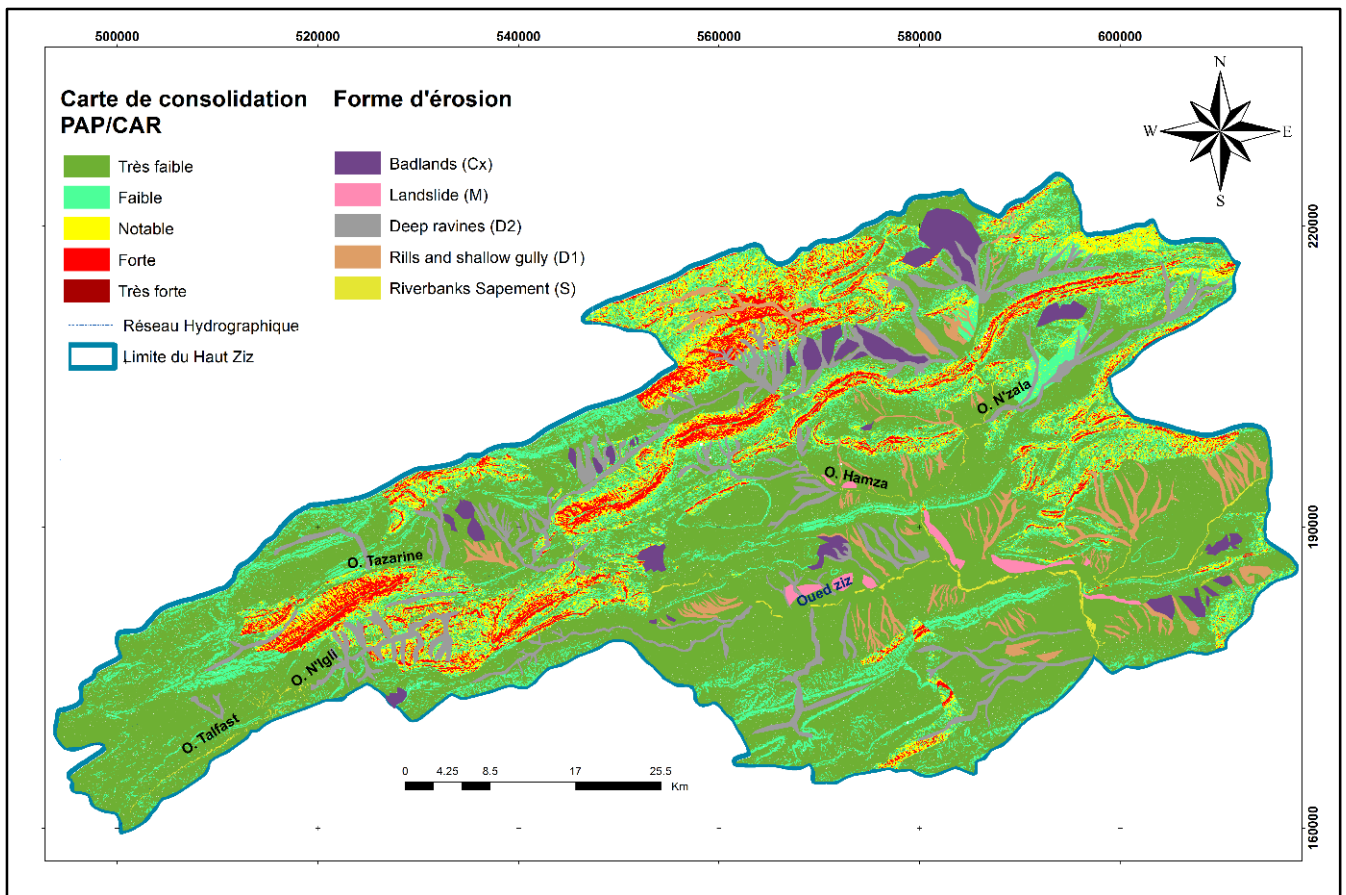


Figure 86 : Carte de consolidation PAP/CAR

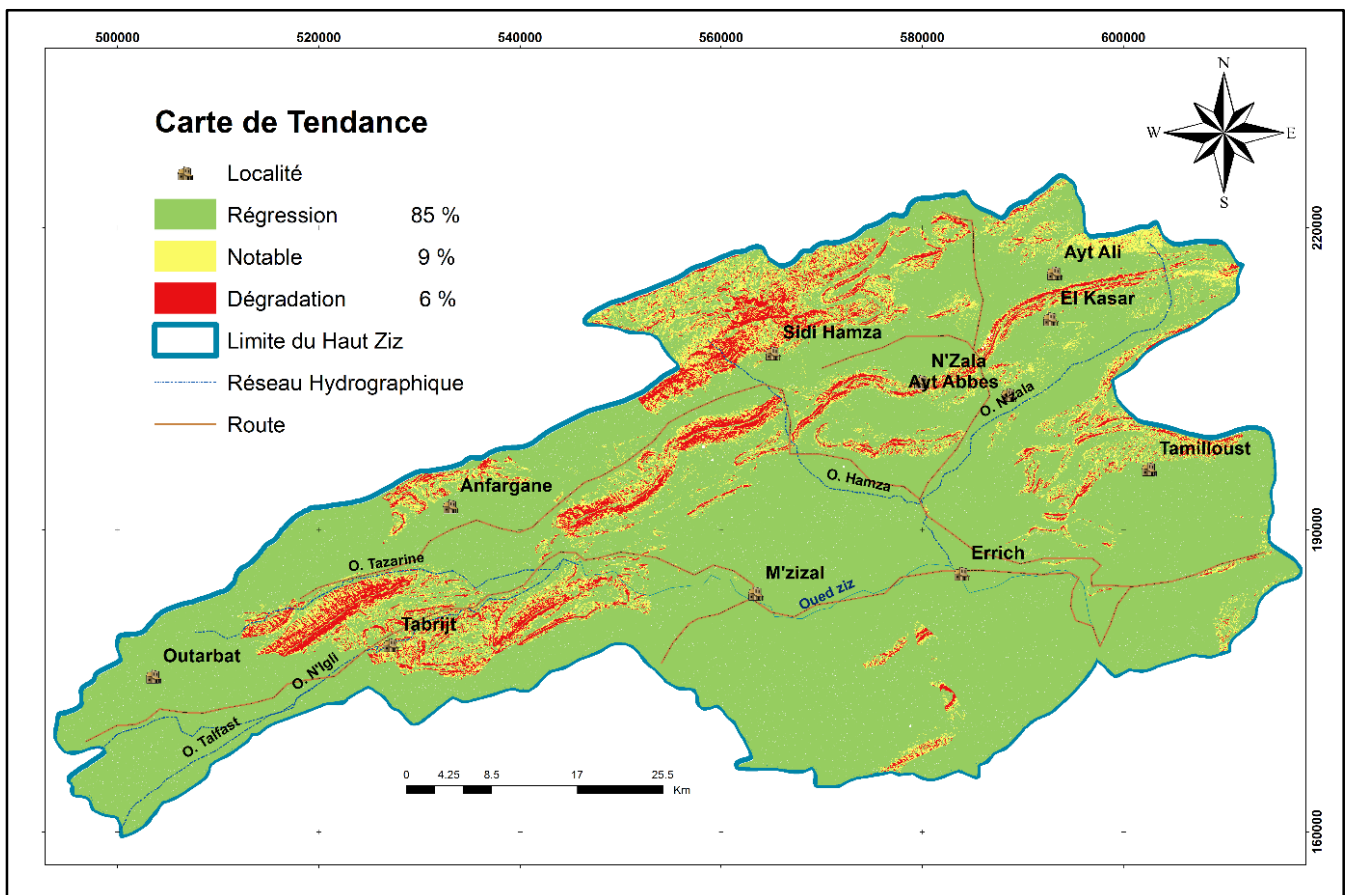


Figure 87: la Carte de la tendance à l'érosion hydrique dans le Bassin Versant du Haut Ziz

Le traitement analytique de la Carte de la tendance/ Carte de consolidation PAP/CAR à l'érosion hydrique amène aux résultats suivants :

Prédominance des tendances localisées à l'expansion ou à l'intensification du processus d'érosion, présentant 65.2 % de la classe totale des tendances : quand il y a un état érosif prédit qui est élevé alors que les formes d'érosion sont minimales, cela veut dire qu'il y a d'autres facteurs en plus de ceux étudiés qui freinent et s'opposent à l'érosion (anthropique).

Les tendances à la dégradation généralisée vers une situation irréversible, présentent 6 % de la classe totale des tendances : lorsqu'on assiste à une coïncidence d'un état érosif prédisant et une érosion potentiellement élevée avec des formes d'érosions majeures (D1, D2 et Cx).

Les tendances à la stabilisation, à la régression ou à la limitation de l'expansion spatiale du processus d'érosion, présentant 65.2 % de la classe totale des tendances : lorsque les états érosifs faibles ou très faibles coïncident avec des formes d'érosions réelles mineures comme (S, M.) et (Antripique)

#### **IV. Conclusion :**

Dans cette étude, le risque d'érosion a été mis en évidence dans le bassin du Haut Ziz. Elle a été orientée par différentes approches de la méthode PAP/CAR, en utilisant les facteurs naturels (pente, couverture végétale et lithologie). La méthode prédictive a permis de montrer l'état actuel de la dégradation des sols par le biais d'une carte du degré d'érosion, basée sur divers facteurs contrôlant le débit de l'eau. En moyenne, 20 % du bassin est extrêmement érodé.

L'approche descriptive a indiqué que la dégradation des sols s'exprime par différentes formes d'érosion hydrique, innées des pentes abruptes (ravins), ou d'événements pluvieux exceptionnels provoquant des glissements de terrain. La méthodologie proposée par le PAP/CAR peut être utilisée pour argumenter la prise de décision, pour minimiser le coût et le temps de développement des territoires de gestion. L'intervention dans le bassin du Haut Ziz doit être orientée vers l'amélioration de la couverture terrestre, puis vers une bonne gestion du bassin versant du Haut Ziz. Il a été constaté que pour le modèle PAP/CAR, la classe moyenne d'érodabilité dans ce bassin est représentée par la moyenne significative de 14 %, lorsque l'on tient compte de la couverture terrestre dans le bassin versant.

- L'approche Prédictive montre que 60.3 % des terrains présentent une très faible prédisposition à l'érosion hydrique. Une érosion notable touche 10 % de la surface, 1.4 % sont des terrains à faible érosion et 18.3 % correspond aux terrains à états érosifs élevés.
- Pour conclure Les états d'érosion est moyenne concernent pour la totalité du bassin.
- L'approche Intégration montre que les tendances à la stabilisation, à la régression ou à la délimitation de l'expansion spatiale du processus d'érosion ne dépassent pas 13.45 % du bassin versant. En contrepartie, les tendances généralisées à l'expansion et l'intensification du processus de l'érosion sont les plus apparentes.
- La cartographie et l'estimation de l'érosion hydrique au moyen de la méthode consolidée PAP/CAR basée sur les facteurs naturels (pente, couvert végétal, lithologie, occupation) a permis d'hierarchiser le bassin versant du Haut Ziz en parcelles en fonction du degré du risque érosif.
- En Tenant compte des facteurs régnant, le bassin versant du Haut Ziz est moyennement vulnérable à l'érosion, cela est dû au fait que tous les facteurs agissent par leurs degrés les plus élevés, que ce soit pour l'érodibilité ou pour la protection des sols.

On peut dire que la méthode PAP/CAR est bien adaptée aux conditions locales car elle tient compte même des petites parcelles et permet de gagner du temps et d'argent par la souplesse de ses directives.

Dans le but de lutter contre l'érosion hydrique, de stabiliser les ravins et les berges des rivières et de conserver les sols, il faut élaborer un plan d'action pour la protection des sols, et pour protéger les terres cultivées, les infrastructures collectives et bien évidemment les populations de la région en se basant sur :

- des Techniques de correction mécanique : qui visent à réduire la force érosive de l'eau lors de l'interception d'une partie des sédiments transportés. comme les petits seuils de pierre, les digues de Séguis et la protection des berges des digues.
- des techniques biologiques qui consistent à planter le long des berges d'un cours d'eau une espèce adaptée souvent indigènes tels que le peuplier, le laurier-rose, le roseau et les saules.



# **Conclusion Générale et Perspectives**

## Conclusion Générale

Le bassin versant du Haut Ziz s'étend de l'extrême Est du Haut Atlas central jusqu'à la partie Ouest du Haut Atlas Oriental. Il traverse plusieurs formations géologiques dont la colonne comprend les terrains paléozoïques et mésozoïque dont la structuration enregistre les phases hercyniennes à l'actuel. Sa morphologie influence sur le processus de ruissèlement et le régime d'écoulement en période de crue ou d'étiage. Les conditions climatiques influencent directement sur le bilan hydrologique par les changements des paramètres climatiques tels que la précipitation, température et l'évaporation.

- ❑ L'augmentation de l'intensité et de la variabilité des précipitations augmenterait les risques de crues et de sécheresses dans le futur. Une partie de la population ne serait plus à l'abri des inondations et les infrastructures deviendraient plus vulnérables.
- ❑ Les pénuries d'eau pourraient s'accroître et les ressources en eau souterraine seront de plus en plus sollicitées.
- ❑ Ces risques liés aux eaux (les inondations, l'érosion hydrique et la sécheresse), se sont des sujets d'actualité au Maroc et dans le monde entier, donc leur gestion devient de plus en plus une nécessité qui doit impliquer tous les acteurs concernés (décideurs, techniciens et population) afin d'identifier les enjeux à protéger, les moyens disponibles et alternatives possibles pour atténuer les dégâts humains et matériels provoqués par ces phénomènes.

La cartographie des linéaments et des fractures à partir d'images Landsat 8 OLI a démontré une répartition particulière des directions NE-SW. Ces directions influencent l'écoulement de surface et le stockage des eaux superficielles.

Dans l'objectif d'évaluer le risque inondation en conséquence au débordement des lits habituels des cours d'eau liés surtout à l'installation d'infrastructure humaines sur ces lits (constructions, d'équipements et d'activités) pendant des périodes de sécheresse, nous avons mené une analyse de risque et de l'aléa des inondations en particulier dans le sous-bassin de Zaouiate Sidi Hamza. Le choix de ce secteur du bassin est lié à la fameuse crue qu'a connue la région en 2008 et qui a causé des dommages importants.

L'étude hydrologique a permis de définir les débits de pointe des crues l'entrée des tronçons des cours d'eau pour des périodes de retour de 5, 10, 20, 50, 100 et de 500 ans et de déterminer la forme de l'hydrogramme des crues et par la même occasion, estimer les volumes de crues. Les débits de pointe calculés sont de 584.4 m<sup>3</sup>/s pour 5 ans à 1081 m<sup>3</sup>/s pour 500 ans avec un volume d'eau de 23,50 Mm<sup>3</sup> pour 10 ans. Ces débits constituent un éventuel risque d'inondation menaçant Zaouiate Sidi Hamza et sont dû principalement au relief à pente forte, et au sous dimensionnement des ouvrages existants, ainsi qu'une pluviométrie mensuelle de la région fluctuante.

L'étude hydraulique a permis de vérifier la capacité des oueds, traversant le secteur d'étude, pour les crues de période de retour de 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans et 500 ans. Le logiciel HEC-RAS a été choisi pour effectuer cette simulation en raison de la nature des données topographiques existante. Cette composante sert en entrée du modèle hydraulique comme condition à la limite, et comme une composante cartographique nécessaire à la représentation spatiale de l'aléa.

Les différentes simulations hydrauliques de l'aménagement contre les inondations au centre de Zaouiate Sidi Hamza montrent que :

- Les impacts sont identifiés principalement en rive droite en aval et au centre de l'oued de Zaouiate Sidi Hamza. Les vitesses d'écoulement en crue sont centennales et cinq-centennales.

- Pour une crue centennale et cinq-centennale, les habitations (bâtiments) sont contournées en raison du dépassement de 1 m des hauteurs d'eau, et à aussi à cause des vitesses d'écoulement maximums les plus élevées.
- Les trois dernières crues reflètent un danger potentiel que constitue l'Oued Zaouiate Sidi Hamza.
- le passage de la crue centennale engendre des débordements au niveau des constructions situées sur la berge gauche de l'oued en amont et en aval. Les débordements concernent également les terrains agricoles, situées le long de l'oued.

Ces résultats peuvent servir aux décideurs d'élaborer des plans d'aménagement spécifiques à la zone étudiée pour lutter contre les inondations probables et sensibiliser les populations concernées par les zones à risque. Ils sont accompagné dans cette étude par une typologie des aménagements hydrauliques possibles pour la protection ces centres urbains et ruraux du bassin versant du Haut Ziz contre les inondations.

Ces inondations viennent à la suite de périodes de sécheresses climatiques. Ces périodes ont été caractérisées dans cette étude suite au calcul de l'indice de précipitation normalisé ou standardisé (SPI) dans le bassin versant du Haut Ziz. Les résultats ont indiqué une alternance de séquences humides et sèches :

- La variabilité à long terme des précipitations sur les régions a été contrastée avec une période sèche, qui ont commencé à la fin des années soixante-dix, une période humide a été observée à partir de la fin des années 90 ;
- Les périodes les plus humides (maximum de SPI) ont été enregistrées après 2002 pour Fom Zaabel. La décennie la plus sèche a débuté en 1996 à Fom Zaabel et autour de 1977 dans les autres stations du bassin du Haut Ziz.

Cette irrégularité, qui se caractérise par de faibles précipitations pendant plusieurs années consécutives et est expliquée par :

- Une végétation très rare à l'exception des palmeraies localisées autour des points d'eau et de celles situées le long des principales rivières, sous forme d'oasis étroites. Les palmeraies ont été régulièrement endommagées par la succession d'années de sécheresse.
- Des céréales, légumes et plantes fourragères, qui constituent un complément précieux dans une région où l'arboriculture est prédominante (principalement les arbres fruitiers accompagnés de palmiers dattiers).

Ces résultats montrent une bonne corrélation entre les sécheresses agricoles et météorologiques et que le bassin du Haut Ziz fait partie des zones les plus touchées au Maroc et se caractérise par un climat moins favorable au développement agricole. Ils révèlent que la magnitude annuelle des précipitations dans la Zaouiate Sidi Hamza, M'Zizel et Fom Zaabel ont une tendance positive alors qu'à Fom Tillicht, nous avons observé une tendance négative. En ce qui concerne la tendance annuelle de quatre stations, nous n'avons trouvé aucune tendance significative. En avril et août, les précipitations montrent une tendance négative et positive dans toutes les stations.

La succession des années pluvieuses et sèches a entraîné un déficit de précipitations relativement complet, autour de 1986 et 1996, tandis que, pour les périodes de 1976-1985, les observations de précipitations indiquent un déséquilibre évident provoquant des déficits importants. L'augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse due à la diminution des précipitations et / ou une augmentation des taux d'évapotranspiration a augmenté le risque de mauvaises récoltes en raison de la sécheresse agricole. L'humidité anormale du sol résultant de la sécheresse météorologique (anomalie anormale des précipitations négatives) peut provoquer une sécheresse hydrologique (débit

réduit, bas niveau de la nappe phréatique, etc.) et par la suite une sécheresse socio-économique (incapacité à répondre aux besoins et à la demande économique en eau potable, céréales alimentaires, énergie hydraulique, etc.).

Dans ces conditions de déficit, les terres subissent une érosion importante, la cartographie et l'estimation de cette érosion hydrique dans le bassin versant du Haut Ziz a été réalisée au moyen de la méthode PAP/CAR. Cette méthode basée sur des facteurs naturels uniquement (pente, couvert végétal, lithologie) a permis d'analyser et de comprendre la problématique de la zone d'étude sur le plan risques érosifs, usage des terres et l'interaction des facteurs naturels et humains.

La méthode prédictive a permis de montrer l'état actuel de la dégradation des sols. La carte du degré d'érosion, basée sur divers facteurs contrôlant le débit de l'eau montre qu'en moyen, 20 % du bassin est extrêmement érodé. La perte de sol est liée à la quasi-absence de sites protégés par un couvert végétal légèrement dense et stable.

L'approche descriptive a indiqué que la dégradation des sols s'exprime par différentes formes d'érosion hydrique, innées des pentes abruptes (ravins), ou d'événements pluvieux exceptionnels tels que des glissements de terrain.

La carte des états érosifs potentiels montre que 25 % des terrains présentent une très forte prédisposition à l'érosion hydrique. La carte de protection montre que 30% de la superficie totale du bassin est mal protégée, cela est dû aux faibles densités de la végétation (céréales, olivier, cultures en lignes). Finalement, la carte des tendances de l'évolution de l'érosion dans les différentes parties du bassin du Haut Ziz, montre les zones à fort risque d'érosion. Ce document est d'une grande utilité pour les décisions en matière d'aménagement du territoire et du travail du sol.

Devant les menaces de dégradation qui pèsent sur les ressources naturelles et l'infrastructure du bassin versant et par conséquent sur la qualité de vie des habitants de point de vue économique et social, il s'avère nécessaire d'intervenir pour lutter contre l'érosion selon une approche globale et novatrice qui permettra de concilier entre les besoins importants d'une population, qui ne cesse de s'accroître et les potentialités limitées des ressources naturelles qui s'appauvrissent du fait de leur surexploitation combinée à un mauvais usage.

Donc on peut dire que :

- Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau du bassin du Haut Ziz sont marqués par une diminution des ressources en eau, et accentuation des risques de crue.
- Cette problématique impose une participation effective de tous les acteurs, notamment les usagers et les décideurs, pour une meilleure gestion intégrée des ressources en eau.
- Les résultats de ces études pourront aider à augmenter la résilience face aux changements climatiques de certaines activités humaines telles que l'agriculture qui est une source très importante pour la population de la zone étudiée.
- En définitif, il est nécessaire d'approfondir ce travail dans le but d'améliorer les études d'impact du changement climatique sur l'écosystème naturel et sur certaines activités humaines telles que l'agriculture au Maroc.

## Recommandations et perspectives

Devant les menaces de dégradation qui pèsent sur les ressources naturelles et les infrastructures du bassin versant du Haut Ziz et par conséquent sur la qualité de vie, économique et sociale, des habitants, il s'avère nécessaire d'intervenir pour lutter contre les risques hydriques selon une approche globale et novatrice. Cette intervention permettra de concilier entre les besoins importants de la population, qui ne cesse de s'accroître et les potentialités limitées des ressources naturelles de la région qui s'appauvrissent du fait de leur surexploitation et du mauvais usage.

Pour une utilisation adéquate des ressources en eau dans la région d'étude et dans l'optique de fixer des objectifs et des orientations pour l'exploitation rationnelle et la gestion de cette ressource, plusieurs mesures et études s'avèrent très importantes. Ces dernières visent la préservation de la ressource, de la qualité des eaux, de l'évaluation des modalités techniques de réalisation de projets de restauration et de développement des ressources en eau. On propose ainsi les recommandations suivantes :

L'approfondissant dans le futur ce travail de thèse, dans le but d'améliorer les études d'impact du changement climatique sur les ressources en eaux, sur l'écosystème naturel et sur certains activités économique telles que l'agriculture dans la région ; région connue pour sa faible capacité d'adaptation. Le bassin versant du Haut Ziz avec son climat semi-aride, sera pris comme cible d'étude future pour étudier et évaluer l'impact potentiels de changements climatiques sur les ressources en eaux et sur l'agriculture, par l'analyse de modèles climatiques sur le bassin versant, en utilisant les scénarios simulés RCP 4.5 ET 8.5 par le modèles climatique HadGM2-ES et CNRM-CM5.

Dans l'objectif d'utiliser la pluie simulée par ces deux modèles climatiques du projet CMIP5 (HadGM2-ES et CNRM-CM5), pour caractériser les événements extrêmes de pluie au Maroc, et particulièrement au niveau du BV du Haut Ziz, sous les scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP8.5 et RCP4.5 pour le futur lointain (2100). Deux périodes seront considérées dans cette étude : la période de référence (1971-2018) et le futur lointain (2021-2100) afin d'évaluer les performances intrinsèque de chaque modèle climatique utilisé en comparaison des données d'observations des précipitations.

L'étude des événements pluviométriques extrêmes est cruciales pour la compréhension des effets des changements climatiques sur les ressources en eaux et sur certains secteurs économiques notamment l'agriculture au Maroc, particulièrement au bassin versant du Haut Ziz. Pour caractériser ces événements extrêmes pluvieux, il faut faire une analyse des indices climatiques, basés sur des données journalières de précipitation qui vont permettre de caractériser les événements pluvieux dans notre zone d'étude en s'attaquant aux différents paramètres à savoir :

- Le nombre de jours de pluies très intenses
- La durée maximale du nombre de jours consécutifs pluvieux
- La durée maximale du nombre de jours consécutifs secs.

Ces indices climatiques basés sur des données journalières de précipitation permettent de caractériser les événements pluvieux au Maroc et particulièrement au bassin versant du Haut Ziz pouvant potentiellement impacter sur la disponibilité des ressources en eau et la productivité agricole dans notre zone d'étude.

Les résultats de cet axe de recherche pourront aider à augmenter la résilience face aux changements climatiques de certaines activités humaines telles que l'agriculture qui est une source de nourriture, de revenue très importante et d'enracinement de la population dans cette zone à climat très rude.

## **Références Bibliographiques**

## Références

- ABH-GZR Elaboration des monographies des ressources en eau des provinces et des communes relevant de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéis – Ville de Rich, Mission II [Rapport]. - 2011.
- ABH-GZR Elaboration des monographies des ressources en eau des provinces et des communes relevant de la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Guir-Ziz-Rhéis Mission II [Rapport]. - 2011.
- ABH-GZR Etude d'aménagement des bassins versants du Ziz et Gheriss –Etude du milieu physique [Rapport]. - Provinces d'Errachidia, Midelt et Tinghir.- 2011.
- ABH-GZR Etude de protection contre les inondations des centres de Rich et Gourrama situés dans la province de Midelt [Rapport]. - Centre Rich : Marché N°07/2011/ABH-GZR.-2011.
- Agard J Découverte de béryllium dans la minéralisation de gîte de wolfram molybdène et cuivre d'Azgour(Haut Atlas, Maroc) et dans celle du gîte du manganèse de Guettara (Sudalgérien) : [Revue].-Notes et Mem. Serv. Geol Maroc, Rabat 181. Acad.Sci.Paris. C.R.t.260 no 20. - pp. 135–166.-1965.
- Agoumi A Changements climatiques et ressources en eaux dans les pays Maghreb [Revue] .-Projet RAB/G31 PNUD/FEM. - 1998.
- Agoumi A Variabilités climatiques et ressources en eau [Revue].- Colloque International sur le Theme: Eau Gestion de la Rarete. Rabat (Maroc).- pp. 19-20. - 1995.
- Archambaut C, Combe M, Michard J.P Le Plateau des phosphates. [Revue].- Note et mém.Serv.Géol.Maroc. - Maroc : Note et mém.Serv.Géo., 1975. - Vol. n°231. - pp. 229-259.
- Aste G, Boari A, Guglielmini C What is your diagnosis ? Pneumatisis coli. [Revue] .- Journal of the American Veterinary Medical Association 227.- pp. 1407-1408 .- 2005.
- Baidder L Structuration de la bordure septentrionale du Craton Ouest Africain du Cambrien à l'actuel : Cas de l'Anti Atlas oriental du Maroc. Thèse de doctorat d'Etat Es-Sciences [Rapport]. - Faculté des Sciences, Casablanca.- p. 215.-2007.
- Bazin D Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat [Revue] .-Serv. Géol. Maroc, Rabat 206 37–114.- pp. 37–114.- 1968.
- Beauchamps W., Barazani M., Demnati A, Et Alji , M Intracontinental rifting and inversion : Missouri basin Atlas mountains Morocco. [Revue].-AAPG Bulletin. 80 n°9.- pp. 1459-1482 .- 1996.
- Benmecherrane N Etude de protection de la ville de Bensekrane (w. Tlemcen) contre les inondations, [Revue] .-Master en hydraulique, Université de Tlemcen. - 2013.
- Bennis S Hydraulique et hydrologie 2eme édition. [Revue]. Canada.- 2004
- Bernascouni Géologie du Haut Atlas de Rich [Revue].- Thèse Doctorat, Université Neuchâtel. - Maroc . - p. 107.- 1983.



Biémi J Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires [Revue].- granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'ivoire). Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan.- pp. 480. - 1992.

Boudjerda M Protection contre les inondations de la région de Fouka (W.Tipaza), [Revue].- Mémoire de magister, Ecole nationale supérieure d'hydraulique.- 2005.

Cailleux Y Géologie de la région des Smaâla (Massif central marocain). Stratigraphie du Paléozoïque. Tectonique hercynienne. [Revue].- Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc., n° 275, t. 40.- p. 106.- 1978.

Chachoua A Gestion de crue dans un bassin versant ; Etude Hydrologique, Hydraulique et Aménagement , [Revue]. Mémoire de Magister-Université de Tlemcen.-2009.

Chafiki D, Canérot J, Souhel A et Taj Eddine K Les monticules micritiques sinémuriens sur la transversale de Midelt-Errachidia (Haut Atlas central, Maroc). Estudios Geol, 60, [Rapport]- 139-152.- 2007.

Chèvremont P. (dissertation) Université Claude Bernard, Lyon (French) [Revue]. - 1975.

Choubert G, Dubar G, Hindermeyer J Carte géologique du Haut Atlas au nord Ksares Souk et de Boudnib: Feuilles Riche et Boudnib au 1/200 000. [Revue] .-Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc, n°81. - 1956.

Choubert F Muret Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques In livre Mém.P.Fallot Mém.h [Revue] .-Sér.Soc.Géol.Fr.tl - pp. 447-527. - 1962

Cieau Centre d'Information sur l'Eau informe un large public sur la ressource, l'eau du robinet et l'assainissement en France. [En ligne].-<https://www.cieau.com/>. - 1995.

Coutagne A Le déficit d'écoulement et l'évaporation dans la région lyonnaise. In: Les Études Rhodaniennes, [Rapport]. - pp. 359-366.-1935.

Cowan W.L Estimating hydraulic roughness coefficients: Agricultural Engineering, [Revue]: 473-475, - 7 : Vol. 37.-1956.

Cristophe C Du changement climatique aux régions de temps : l'Oscillation Nord Atlantique [Rapport] / La Météorologie : n°45, - pp. 21-32.-2004.

Da Cunha A, Thomas I Introduction à La ville résiliente, comment la construire Collectif, [Revue].- Isabelle Thomas, Antonio Da Cunha, Collection PUM,. - Montréal. - p. 322.-2017.

Daki Y, Ghalem Z Caractérisation De La Sécheresse Climatique Du Bassin Versant D'oum Er Rbia (Maroc) Par Le Biais De L'indice De Précipitation Standardisé (SPI) [Revue].- Maroc .- Vol. European Scientific Journal May 2016 edition vol.12, No.14 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.-2016.

Dauphine A Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer, Armand Colin, coll. «U » [Revue]. - p. 288.- 2001.

Debiane K "Hydraulique des Ecoulements Laminaires à Surface Libre dans un Canal pour des Milieux Visqueux ou Viscoplastiques: Régimes Uniformes, Graduellement Varié, et Rupture de Barrage". Ph.D. thesis, University of Grenoble I, Rheology Laboratory INPG-UJF-CNRS, [Rapport]. - France .- 2000.

Debiane K Hydraulique fluviale et torrentielle avec présentation et prise en mains des logiciels Hec-Ras, Arc-Gis et Hec-Geo-Ras [Rapport].- Rhéhydro, 2010.

Deffontaines B Développement d'une méthodologie morpho-néotectonique et morphostructurale. Analyse des surfaces enveloppes, du réseau hydrographique et des modèles numériques de terrain; application au Nord-Est de la France. [Revue] // Thèse nouveau doctorat, Paris VI, n 90 PA06 6740.- pp 260. - 1990.

D'Ercole R Les Vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés :Concepts , Typologie , Modes d'analyses [Revue]. - 1994.

Diani K, Kacimi I, Elbelrhiti H, Zenzami M, Tabyaoui H, Masmoudi L Remote sensing and sig contribution for the identification of the fracturation influence on the drainage network architecture in the High Ziz River basin, Central High Atlas, Morocco [Revue] .- Limnol. Rev. / éd. Diani et al.- pp. 149–158. - 2019.

Diani K, Kacimi I, Zenzami M, Tabyaoui H, Haghighi AT Evaluation of meteorological drought using the Standardized Precipitation Index (SPI) in the High Ziz River basin [Revue]. - Morocco : Limnol. Rev. 19, 3: 125–135, 2019.

Dresnay R Extension et développement des phénomènes récifaux jurassiques dans le domaine atlasique, particulièrement au Lias moyen. [Revue].- Bull. Soc. Géol. France,. - France : atlasique, particulièrement au Lias moyen. Bull. Soc. Géol. France, 12 : 46-56, - pp. 46-56.-1971.

Sadki D ,Khadija El Hariri K ,Igmoullan B et Mouterde R Précisions stratigraphiques et évolution sédimentaire de la bordure nord du Haut Atlas central (Maroc) au cours du Lias - Dogger [Revue] .-Sciences Géologiques, bulletins et mémoires 83.-pp. 133-142.-1989

Driouch F Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique. [Revue] .- Thèse de Doctorat de l'Institut national polytechnique de Toulouse.- p. 163. - 2010.

Driouech F., Déqué M et Sánchez-Gómez,E. Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. [Revue] .-Glob Planet Change. - 2010.

Elbouqdaoui K, Haida S, Aboulabbes O, Benaabidat,L,Zahraoui,M., Ozer,A Evolution du régime pluviométrique et hydrométrique du bassin versant du Srou (Moyen Atlas, Maroc). [Revue].- Revue, Géo-EcoTrop, 30.2.- pp. 41-56. - 2006.

Emberger A Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc [Rapport] / Service géologique du Maroc, Rabat. - 1969.

Ettaki M Etude sédimentologique et stratigraphique du Lias-début du Dogger de la région de TodrhaDadès (versant sud du Haut Atlas central, Maroc) -Implications géodynamiques. [Rapport].- Université Cadi Ayyad, Marrakech, : Thèse de Doctorat. - p. 429. 2003.

FAO La conservation des sols dans les pays en voie de développement. Bulletin pédologique [Revue].- pp. 30-92.- 1976.

FAO Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface. [Revue]. Bulletin Bulletin , 1996 .

Faugères L,Noyelle J Risques naturels,paysages et environnement en France [Revue]// Information Géographique. - pp. 194-209.- 1992.

GIEC Bilan des changements Climatique,Rapport de synthèse [Revue].- 2007.

Gilard O, Gendreau N « Inondabilité : Une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants », [Revue] // Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science,vol. 11, n° 3. - pp. 429-444.- 1998.

Gilbert RO Statistical methods for environmental pollution monitoring. John Wiley & Sons, [Revue].- 1987.

Giordano A L'érosion et la lutte contre l'érosion en forêt méditerranéenne. Forêt méditerranéenne 15. [Revue].- pp. 12–21.- 1994.

Gondrand P Typologie des cartographies dédiée à la gestion du risque d'inondation. Mémoire de maîtrise DU d'ingénierie de l'Espace Rural (IER). Université Jean Moulin Lyon III. Cemagref Lyon [Revue].- pp. 110 .- 1995.

Gravelius H Grundrifi dergesamten Gewässerkunde, Band 1: h'lufikunde (Compendium of Hydrology, vol. 1: Rivers, in German). Goschen, [Article]. - Berlin, Germany.- 1914.

Guerbil MA ,Abdelkaber B Protection contre les inondations par l'utilisation d'ARC GIS, HEC GEO RAS et HEC RAS. la ville d'El-Kseur W. Bejaia , 2017.

Guttman N.B On the sensitivity of sample L moments to sample size. Journal of Climatology 7: [Revue].-Journal of Climat 7. - pp. 1026–1029. - 1994.

Hayes M.J, Svoboda M.D Wilhite, D.A Vanyarkho, O.V Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. [Revue] .- Bull. Am. Meteorol.Soc. 80 (3). - pp. 429–438. 1999.

HCEFLCD Etude d'aménagement des bassins versants du ziz et Gheriss –Etude du milieu physique [Rapport].Provine d'Errachidia, Midelt et Tinghir .- 2011.

HCP Recensement Général de la Population et de l'Habitat [Rapport]. - Maroc .- 1994.

HCP Recensement Général de la Population et de l'Habitat [Rapport]. - Maroc .- 2004.

Horton R.R Drainage basins characteristics. Trans. Am. Geophys.Union13 [Article].- pp. 350-361.- 1932.

Izambart G Retour d'expérience et vulnérabilité, l'apport de la pratique de retour d'expérience pour comprendre la vulnérabilité face aux inondations [Revue] // Mémoire de master Université de Toulouse, France. - 2011.

Jenny J, LE Marrec A., Monbaron M Les Couches rouges du Jurassique moyen du Haut Atlas central (Maroc) : corrélations lithostratigraphiques, éléments de datations et cadre tectono-sédimentaire.- [Article]. Bulletin de la Société géologique de France, Paris, (7<sup>ème</sup> série), t. XXIII, n° 6, - pp. 627-639. 1981.

Jérôme Dutozia, Christine, Vouron-Canicio La résilience urbaine face aux risques, en contexte de changement climatique [Revue]. - 2018.

Jourda J P Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte-d'Ivoire, [Revue]. - 2005.

Katsuaki Shuichi N, Ohmi M Lineament analysis of satellite images using a segment tracing algorithm (STA) [Revue] .-Comput. Geosci.- pp. 1091-1104.- 1995.

Kendall MG Rank Correlation methods [Revue]. - 1948.

Khan S, Gabriel H. F, Rana T Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. [Revue] .- Irrig Drainage Syst, 22.- pp. 159 – 177.- 2008.

Kienberger S Assessing the vulnerability to natural hazards on the provincial/community level in Mozambique: The contribution of GIScience and Remote Sensing [Revue].- Joint CIG/ISPRS Conference on Geomatics for Disaster and Risk Management., Toronto, Canada. - 2007.

Koudded M Cartographie des risques d'érosion hydrique des sols au moyen du Système d'Information Géographique [Revue] .-UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS.- Mostaganem : du Système d'Information Géographique, 2013.

Lambert R Géographie du Cycle de l'Eau. [Revue].- P.U.M. Toulouse. - 1996.

Linsley R.K, KOHLER M.A, PAULHUS J.L.H Hydrology for Engineers [Revue].- 3 Edition, McGraw-Hill.- p. 508.- 1982.

Lobled C, Leousof J L'aléa aux crues : Réseau de mesures et traitements informatiques : l'exemple du Gard [Revue].-Actes du Colloque "Crues et Inondations" Strasbourg University.- pp. 115 - 129. - 1987.

Loup J Les Eaux Terrestre. Edition Masson, [Revue]. - p. 172.- 1974.

Lyazidi M, Eyssautier L, Marçais J, Choubert G, Faillot P Carte géologique de Rich et Boudnib au 1/200 000 . le service géologique du Maroc. [Revue]. - 1956.

Makoka D, Kaplan M Poverty and Vulnerability-An interdisciplinary Approach [Revue]. - 2005.

Manel Hachemi Soumia Protection des agglomérations contre les inondations cas du centre d'el gouassir [Rapport]. - w. tlemcen : Mémire , 2015.

Mann HB Nonparametric tests against trend *Econometrica* [Revue].-*Journal of the Econometric Society*. - 1945.- pp. 245-259.

Marrion A., Introduction aux techniques de traitement d'image. Paris,. [Journal].- Éditions Eyrolles. - p. 278.- 1987

McKee TB,Doesken,.NJ,. Kleist ,J The relationship of drought frequency and duration to time scales. [Revue].- In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. vol 22. American Meteorological Society Boston, MA,. - Anaheim, California, - pp. 179-183.- 1993.

MEHDI M, NEUWEILER F et WILMSEN M Les formations du Lias inférieur du Haut Atlas central de Rich (Maroc) :précisions lithostratigraphiques et étapes de l'évolution du bassin Bull. Soc. géol. Fr.-, t. 174, no 3.-pp. 227-242.-2003

Memee Base de donnees SIG du Plan National de Protection contre les inondations et impacts des ouvrages de protection sur l'environnement.- 2016.

Memee Risque d'inondation, étude pour la réalisation d'une cartographie et d'un systeme d'information géographique sur les risques majeurs au maroc.- 2008.

Mesrar H, Sadik A,NavasA,Faleh A,Quijano L,Chaouaan J Modélisation de l'érosion hydrique et des facteurs causaux, Cas de l'oued Sahla, Rif Central, Maroc. *Zeitschrift für [Revue]*. - *Geomorphologie* (59). - pp. 495–514. - 2012.

Michard A Eléments de géologie marocaine. [Revue] .-Notes et Mém. Serv. Carte géol. Maroc. - pp. 252-408 .- 1976.

Michard Elément de géologie marocaine.Notes et Mém. Ser. Géol.Maroc [Revue].- Maroc : .- 1976.

Morin M Concepts de base en sécurité civile [Rapport].- p. 60.- 2008.

Mouguin E Université de Tunis .- Thèse .- 1992.

Nouayti N,Khattach D, Hilali M Cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines dans le haut bassin du Ziz (Maroc) : Apport de la télédétection et du système d'information géographique [Revue] .- *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 2017, n° 39, 45-57. - 2017. - pp. 2458-7184.

Nouayti N,Khattach D, Hilali M Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas [Revue] .- CODEN: JMESC.N.- pp. 1068-1081.- 2015.

Nouayti N, Khattach D, Hilali M, Brahimi A, Baki S Evaluation de la contamination métallique des eaux des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) [Revue].- 2016.

Nouayti N, Khattach, D, Hilali M Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc ) Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atla [Revue].- J. Mater. Environ. Sci.- pp. 1068-1081.- 2017.

Np Site Web : Notre-planet.info [En ligne].- [https://www.notre-planete.info/terre/risques\\_naturels/secheresse.php](https://www.notre-planete.info/terre/risques_naturels/secheresse.php). - 2001.

ONHYM Office National des Hydrocarbures et Mines, rapport annuel [Rapport]. - 2002.

ORMVAT Etude d'aménagement des bassins versants du Ziz et Gheriss – provinces d'Errachidia, Midelt et Tineghir – Analyse des problèmes de l'érosion et identification des zones prioritaires, -2011.

Osmana H, El Hamidi A, Essahlaoui A, Bekri H, El Ouali A Modélisation et cartographie du risque de l'érosion hydrique par l'application des SIG et des directives PAP/CAR. Cas du bassin versant de l'Oued Zgane (Moyen Atlas tabulaire, Maroc), Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, [Revue]. - Rabat Section Sciences de la Terre (39) . - pp. 103-119. - 2017.

Oubbih J, El Mansouri , Chakiri S, El Hadi H, et Elbelrhiti H Impact de la fracturation sur l'architecture du réseau hydrographique (cas de la région de Smaal, Maroc central Hercynien) Apport du SIG et de la télédétection [Revue]. - 2015.

Palmer W C. "Meteorological drought. " Research Paper No. 45, [Revue].- U.S. Weather Bureau, Washington, DC. - 1965.

PAP/CAR Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP8/PP/GL.1, Split, Centre d'Activités Régionales pour le programme d'Actions Prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec la FAO, R [Revue].- 1998.

Perennes J J L'eau et les hommes au Maghreb [Revue].- Collection "Hommes et Sociétés"- Editions Karthala. - 1993.

Pinson L Analyse et représentation des épisodes de caniculaires en zones urbaines denses : de la durée à la conception d'un indice de dangerosité [Revue]. - 2017.

Rejeb M Contribution à l'étude de l'érosion et de l'envasement de la retenue collinaire dans le bassin versant de Saadine 1 (Tunisie) à l'aide du système d'information géographique (SIG) .Louvain : Fac. Sci. Agro [Revue] .- Mémoire d'ingénieur master.- p. 173. - 1996.

Roose E Exemple de GCES en moyenne montagne méditerranéenne d'Algérie. [Revue]. Synthèse Sécheresse V (15) N° 1,9,18 - pp. 54-66.- 2004.

Sadki D, Elmi S. et Amhoud H. Les formations jurassiques du Haut Atlas central marocain : corrélation et évolution géodynamique. [Revue] .- Le 1er Coll. Nat. Sur le Jur. Marocain.- pp. 122-123. -1999.

Saley M. B Cartographie thématique des aquifères de fissures pour l'évaluation des ressources en eau. Mise en place d'une nouvelle méthode d'extraction des discontinuités images et d'un SIHRS pour la région semi-montagneuse de Man Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), [Revue] .- Thèse unique Université de Cocody-Abidjan. - p. 209 .- 2003.

Salomon Jean Noël L'homme face aux crues et aux inondations », Presses Universitaire de Bordeaux, Université Michel de Montaigne - [Rapport]. - Bordeaux.- 1997.

Sebbar A Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935-2005) : Réactualisation de la carte des précipitations. Thèse de [Revue].-Doctorat en Bioclimatologie, Univ. Hassan II, Fac. Sci. Ben M'sik, Casablanca. - p. 186. - 2013.

Sebbar A ,Faugrath H,Hsaine M,Salaoui A,Badri W Etude des variations climatiques de la régime pluviométrique au Maroc septentrional oncentrale du Maroc (1935-2004) [Revue] .- Séchresse,22. - pp. 139-48.- 2011.

Shukla S, Wood A.W Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. [Revue] .-Geophys. Res. Lett. 35, L02405. - 2008.

Soesilo H Evaluation of digitally processed Landsat imagery and SIR-A imagery for geological analysis of West Java région, Indonesia. Symopisum on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management [Revue]. - Indonesia .-1986.

Somot S Modélisation climatique du Bassin Méditerranéen: Variabilité et scénarios du Changement Climatiques. Doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III [Revue].- 2005.

Strahler A.N Hypsometric (area-attitude) analysis of erosion topology, [Revue] // Geological society of America Bulletin, 63(11). - pp. 1117-1142. - 1952.

Taha B.t,Hugo G , Bobée B ,Lemonier M Synthèse des méthodes simples de régionalisation, [Revue]. - p. Québec.- 2001.

Tahiri A Le Maroc central septentrional: stratigraphie, sédimentologie et tectonique du Paléozoïque ; un exemple de passage des zones internes aux zones externes de la chaîne hercynienne du Maroc. [Revue] -. Thèse ès-Sciences, Brest, 216. - p. 216. - 1991.

Thornthwaite C.W An approach toward a rational classification of climate. [Article]. - [s.l.] : Geogr. Rev - 38. - pp. 55-94. -1948.

Toure M Cours de CES pour les ingénieurs de l'équipement rural et de l'agronomie Ouagadougou Burkina Fasso. [Revue]. - 2001.

Tribak A. EL GAROUANI A. and ABAHBOUR M. L'érosion hydrique dans les séries manuses tertiaires du préif oriental: agents, processus et évaluation quantitative [Revue] .-revue Mar. Sci. Agrom. Vét. - 2012.

UNDRO. Natural Disasters and Vulnerability Analysis. . [Rapport]. - Report of Expert Group Meeting, 1979.

US Army Corps of Engineers « HEC-RAS River Analysis System : User's Manual », Manuel d'Utilisation de HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center. [Revue]. - 2010.



US Army Corps of Engineers « HEC-GeoRAS Extension for support of HEC-RAS using ArcView :User's Manual », [Revue] .- Manuel d'Utilisation de HEC-GeoRAS, Hydrologic Engineering Center.- 2002.

USDA-NRCS Time of concentration [Revue].-National Engineering Handbook,Part 630 Hydrology.- Vol. chapitre15.- 2010.

Valentin C, Bresson L.M Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils [Revue] .- Geoderma, 5.- pp. 225–245.- 1992.

Veyret Y, Meschinet De RICHEMOND N. Géographie des risques naturels en France : de l'aléa à la gestion. [Revue] // Hatier - p. 254.- 2004.

Walsh Clark Jr. Contrasting methods of fracture trend characterization in crystalline metamorphic and igneous rocks of the Windham quadrangle, New Hampshire.Northeast [Revue] .-Northeastern Geol Environ. Sci., 22(2). - pp. 109-120. - 2000.

Watson R.T., Zinyowera M.C., Moss, R.H The Regional Impacts of ClimateChange,An Assessment of Vulnerability, [Revue] .-IPCC Special Report, Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel of Climate Change, ISBN:92-9169-110-0. - 1997.

Yahiaoui A. M Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérables en Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, [Revue]. - Wilaya de Sidi Bel Abbès).-2012.

Yahiaoui A M Inondations Torrentielles Cartographie des Zones Vulnérables en Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès) [Revue]. - 2012.

Yatabe S,Howarth P.H. Linéament enhancement and interprétation in northem Ontario from airborne, multispectral scanner data. Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing [Revue]. - 1984.

Youan T.M Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiquesà la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Cas de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte-d'Ivoire) [Revue] // Thèse de doctorat unique, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire).- p. 236.- 2008.