

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
École Nationale Polytechnique



Département Hydraulique  
Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau

Mémoire de projet de fin études  
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

---

Elaboration d'un SIG dans le cadre de la cartographie des zones  
sensibles aux inondations -cas du BV Macta-

---

Mme AHOUAOU Nesrine et Mme KOLLA Amira Raounak

Présenté et soutenu publiquement le 03 juillet 2022

**Composition du Jury :**

Présidente	Mme BENMAMAR Saâdia	Professeur	ENP Alger
Promotrice	Mme CHETIBI Meriem	MCB	ENP Alger
Co-promoteur	Mr TACHI Salah Eddine	MCA	ENP Alger
Co-promoteur	Mr ALLICHE Abd Malek	Doctorant	ENP Alger
Examinatrice	Mme CHARIFI Salima	MCB	ENSH Blida
Examineur	Mr BENZIADA Salim	MAA	ENP Alger



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
École Nationale Polytechnique



**Département Hydraulique**  
**Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau**

**Mémoire de projet de fin études**  
**Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique**

---

**Elaboration d'un SIG dans le cadre de la cartographie des zones sensibles aux inondations -cas du BV Macta-**

---

Mme AHOUAOU Nesrine et Mme KOLLA Amira Raounak

Présenté et soutenu publiquement le 03 juillet 2022

**Composition du Jury :**

Présidente	Mme BENMAMAR Saâdia	Professeur	ENP Alger
Promotrice	Mme CHETIBI Meriem	MCB	ENP Alger
Co-promoteur	Mr TACHI Salah Eddine	MCA	ENP Alger
Co-promoteur	Mr ALLICHE Abd Malek	Doctorant	ENP Alger
Examinatrice	Mme CHARIFI Salima	MCB	ENSH Blida
Examineur	Mr BENZIADA Salim	MAA	ENP Alger

# Remerciement

Tout un travail réussi dans la vie nécessite d'abord la bénédiction d'ALLAH, et ensuite l'aide et le support de plusieurs personnes. Nous tenons donc à le remercier en premier degré ensuite à adresser notre reconnaissance à toute personne qui nous a aidé de loin ou de près afin de réaliser ce travail.

Tout d'abord, nous tenons à remercier la directrice du laboratoire de recherche de science de l'eau « LRSE », Mme BENMAMAR Saâdia, pour son soutien, son accompagnement et sa patience.

Ensuite, nous tenons à remercier très vivement nos encadrants de mémoire, Monsieur TACHI Salah Eddine, Madame CHETIBI Meriem et Monsieur ALLICHE Abdelmalek, pour leurs qualités humaines et scientifiques, les conseils qu'ils nous ont prodigués, la patience et la confiance qu'ils nous ont accordées durant la réalisation de notre travail de recherche.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger et d'évaluer notre travail.

Nous tenons également à remercier nos enseignants de l'École Nationale Polytechnique pour leurs conseils avisés tout au long de notre formation.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études. Merci à chaque enseignant qui nous a aidé avec ses connaissances depuis les premières étapes de l'école jusqu'à ce moment.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à tous ceux et celles qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, nous remercions tous nos collègues de la promotion hydraulique 2022.

## ملخص

تعتبر الفيضانات من أكثر الظواهر الكارثية تدميراً. يتم تعريف التعرض للفيضانات على أنها التعرض للضرر الناجم عن هذه الظاهرة. ومع ذلك ، لا يزال التنبؤ الدقيق بالفيضانات السريعة أمراً صعباً بسبب تعقيد هذه الظاهرة. لذلك ، فإن رسم خرائط المناطق المعرضة للفيضانات يمثل أهمية كبيرة للعلماء وصانعي السياسات للحد من الآثار السلبية لمخاطر الفيضانات. في العمل الحالي ، تم استخدام خوارزمية LightGBM مع هذه التعزيزات الثلاثة: DART و GOSS و GBDT لرسم خرائط لحساسية الفيضانات في مستجمعات المياه في مكا ، شمال غرب الجزائر. المنحدر ، والجانب المنحدر ، كثافة الدفق ، وهطول الأمطار ، ومؤشر الرطوبة الطبوغرافية (TWI) ، ومؤشر قوة التدفق (SPI) ، والغطاء النباتي (NDVI) ، والارتفاع ، والانحناء والتظليل ( التلال ) هي العوامل المؤثرة في الفيضانات في منطقة الدراسة. تم تطويرها باستخدام أنظمة المعلومات الجغرافية. تم استخدام المنطقة الواقعة تحت المنحنى (AUC) لتقييم صحة النماذج المقترحة. أظهرت النتائج أن خوارزميات التعلم الآلي المستخدمة أعطت أداءً جيداً للغاية ، وكانت خوارزمية LightGBM جنباً إلى جنب مع GBDT Booster هي النموذج الأمثل بقيمة AUC بقيمة 0.95 ، تليها LightGBM جنباً إلى جنب مع DART Booster 0.94 وأخيراً ، LightGBM مجتمعة مع معزز goss بقيمة AUC تبلغ 0.88 .

## الكلمات الدالة

التعرض للفيضانات ، التعلم الآلي ، LightGBM ، الداعم ، المنطقة الواقعة تحت المنحنى (AUC).

## Abstract

Flooding is considered one of the most destructive catastrophic events. Flood susceptibility is defined as the susceptibility to flood damage. However, accurate prediction of flash floods remains difficult due to the complexity of the phenomenon. Therefore, mapping of flood-prone areas is of great interest to scientists and policy makers to reduce the negative effects of flood risk. In the present work, the LightGBM algorithm with its three boosters : DART, GOSS and GBDT was used to map the flood susceptibility in the Macta watershed, northwest Algeria. Slope, slope aspect, precipitation, topographic moisture index (TWI), stream power index (SPI), stream density, vegetation cover (NDVI), elevation, curvature and shading (hillshade) are the factors influencing flooding in the study area. They were developed using geographic information systems. The area under the curve (AUC) was used to evaluate the validity of the proposed models. The results show that the used machine learning algorithms performed very well, the LightGBM algorithm combined with the GBDT booster was the most optimal model with an AUC value of 0.95, followed by LightGBM combined with the DART booster with 0.94 and finally, LightGBM combined with the goss booster with an AUC value of 0.88.

## Key words

Flood susceptibility, Machine Learning, LighGBM, Booster, Area Under the Curve (AUC) .

## Résumé

Les inondations sont considérées comme l'un des phénomènes catastrophiques les plus destructeurs. La susceptibilité aux inondations est définie comme la susceptibilité aux dommages causés par ce phénomène. Cependant, la prédiction précise des crues éclair reste difficile en raison de la complexité du phénomène. Par conséquent, la cartographie des zones sujettes aux inondations est d'un grand intérêt pour les scientifiques et les décideurs afin de réduire les effets négatifs du risque des inondations. Dans le présent travail, l'algorithme LightGBM avec ces trois boosters : DART, GOSS et GBDT ont été utilisés pour cartographier les cartes de susceptibilité aux inondations dans le bassin versant de Macta, au nord-ouest de l'Algérie. La pente, l'aspect de la pente, les précipitations, la densité des cours d'eau l'indice d'humidité topographique (TWI), l'indice de puissance des cours d'eau (SPI), la couverture végétale(NDVI), l'élévation, la courbure et l'ombrage (hillshade) sont les facteurs d'influence des inondations dans la zone étudiée. Ils ont été élaborés à l'aide des systèmes d'information géographique. L'aire sous la courbe (AUC) a été utilisée pour évaluer la validité des modèles proposés. Les résultats montrent que les algorithmes d'apprentissage automatique utilisés ont donné de très bonnes performances, l'algorithme LightGBM combiné avec le booster GBDT était le modèle le plus optimal avec une valeur AUC de 0,95, suivi de LightGBM combiné avec le booster DART avec 0,94 et enfin, LightGBM combiné avec le booster goss avec une valeur AUC de 0,88.

## Mots Clés

Susceptibilité aux inondations, Machine Learning, LightGBM, Machine,Booster, Aire Sous la Courbe (AUC).

# Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des Abréviations

<b>Introduction générale</b>	<b>11</b>
<b>1 Présentation de la zone d'étude</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction	14
1.2 Présentation de la zone d'étude	14
1.2.1 Situation géographique	14
1.2.2 Situation topographique	15
1.2.3 Caractéristiques morphologiques du bassin versant	17
1.2.4 Situation géologique	19
1.2.5 Le type du sol	20
1.2.6 L'occupation du sol	20
1.2.7 Le Couvert végétal	21
1.2.8 Les Ressources en eau	22
1.2.9 La situation hydrologique	24
1.2.10 Le Réseau hydrographique	27
1.3 La problématique des inondations dans le Bassin Versant de la Macta	28
1.3.1 Les inondations dans le Bassin Versant de la Macta	28
1.3.2 Exemples d'inondations dans le Bassin Versant de la Macta	29
1.4 Conclusion	30
<b>2 Etat de l'art sur les inondations et méthodologie de travail</b>	<b>31</b>
2.1 Introduction	32
2.2 Définition	32
2.3 Typologie des inondations	32
2.3.1 Inondation de plaine	32
2.3.2 Inondation par crues torrentielles	32
2.3.3 Inondation par ruissèlement pluvial	33

2.4	Notion de risque	33
2.5	Méthodes de modélisation des inondations	33
2.5.1	Modélisation basée sur les modèles hydrodynamiques	33
2.5.2	Modélisation basée sur les SIG	34
2.5.3	Modélisation basée sur l'apprentissage automatique	34
2.6	Méthodologie de cartographie des risques d'inondations	35
2.6.1	Carte d'inventaire des inondations	36
2.6.2	Les facteurs influant les inondations	37
2.6.3	Modélisation avec l'apprentissage automatique	39
2.6.4	Validation	40
2.6.5	Génération d'une carte de susceptibilité aux inondations	40
2.7	Conclusion	40
<b>3</b>	<b>Élaboration des cartes des facteurs, influant les inondations du bassin versant de la Macta, en utilisant les systèmes d'information géographique</b>	<b>41</b>
3.1	Introduction	42
3.2	Généralités sur les systèmes d'information géographiques (SIG)	42
3.2.1	Définition du SIG	42
3.2.2	Objectifs et intérêts des SIG	42
3.3	Application du SIG et de la télédétection dans le Bassin Versant de la Macta	43
3.4	Résultat	43
3.4.1	Les facteurs	43
3.5	Conclusion	54
<b>4</b>	<b>Élaboration de la carte de susceptibilité du Bassin versant de la Macta, via les modèles d'apprentissages automatiques</b>	<b>55</b>
4.1	Introduction	56
4.2	Définition	56
4.3	Apprentissage automatique comment ça fonctionne	56
4.4	Établir un modèle d'apprentissage automatique	56
4.5	Modélisation basée sur l'apprentissage automatique dans le Bassin Versant de la Macta	58
4.5.1	Des données	58
4.5.2	Un algorithme d'apprentissage	58
4.5.3	Une mesure des performances et validation	59
4.6	Les étapes de modélisation	61
4.6.1	Introduire les données	61
4.6.2	Extraction de la matrice de corrélation	61
4.6.3	Division des données (apprentissage, validation)	62
4.6.4	Application des modèles choisis	62



4.6.5	Validation	62
4.7	Réultats et discussion	62
4.7.1	Matrice de corrélation	62
4.7.2	L'importance des facteurs	63
4.7.3	Validation	64
4.7.4	Elaboration de la carte de susceptibilité	66
4.8	Discussion	68
4.9	Conclusion	69
	<b>Conclusion générale</b>	<b>71</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>76</b>

# Liste des tableaux

1.1	Récapitulatif des caractéristiques morphologiques du bassin versant de de la Macta	19
1.2	Ressources en eau superficielles et souterraines dans le Bassin Versant de la Macta	22
1.3	Ressources en eau superficielles dans le Bassin Versant de la Macta	24
1.4	Ressources en eau superficielles et souterraines dans le Bassin Versant de la Macta	26
1.5	Historique des inondations dans le Bassin Versant de la Macta	29
4.1	L'ordre d'importance des facteurs	64

# Table des figures

1.1	Situation géographique du Bassin Versant de la Macta	15
1.2	La Topographique du Bassin Versant de la Macta (BAAHMAD, 2015)	17
1.3	Situation géologique du Bassin Versant de la Macta (KHADIDJAI, 2016)	20
1.4	Occupation du sol Bassin Versant de la Macta (OBSERVATION et SCIENCE, 2019)	21
1.5	Ressources en eau dans le Bassin Versant de la de la Macta	23
1.6	Réseau Hydrographique (MEDDI, TALIA et MARTIN, 2009)	25
1.7	Réseau Hydrographique (MEDDI, TALIA et MARTIN, 2009)	27
2.1	Methodologie de la cartographie de la susceptibilité aux inondations	35
2.2	Carte d'inventaire des points inondables et des point inondables	36
3.1	La carte de variation de la pente	45
3.2	Carte de variation de la densité des cours d'eau	46
3.3	La carte de variation de l'élévation	47
3.4	La carte de variation de l'aspect	48
3.5	La carte de variation de NDVI	49
3.6	La carte de variation de TWI	50
3.7	La carte de variation de la pluie	51
3.8	La carte de variation de SPI	52
3.9	La carte de variation de la courbure	53
3.10	La carte de variation de l'ombrage	54
4.1	Etape d'élaboration d'un modèle d'apprentissage automatique	57
4.2	Les phase d'apprentissage automatique	61
4.3	Matrice de corrélation	63
4.4	La Courbe ROC avec le modèle LGBM GBDT	65
4.5	La Courbe ROC avec le modèle LGBM DART	65
4.6	La Courbe ROC avec le modèle LGBM GOSS	65
4.7	La carte de susceptibilité avec LGBM GOSS	66
4.8	La carte de susceptibilité avec LGBM DART	67
4.9	La carte de susceptibilité avec LGBM GBDT	68

# Liste des Abréviation

**ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydraulique

**AUC** : Area Under the Curve (Aire sous la courbe)

**BV** : Bassin Versant

**DART** : Dropouts meet Multiple Additive Regression Trees

**FN** : Faux Négatif

**FP** : Faux Positif

**GBDT** : Gradient Boosted Decision Trees

**GOSS** : Gradient-based One-Side Sampling

**LightGBM** : Light Gradient Boosting Machine

**MNT** : Modèle Numérique du Terrain

**N** : Les points négatifs (non inondable).

**NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation par différence normalisée)

**P** : Les points positifs (inondable).

**ROC** : Receiver Operating Characteristic (Caractéristique de fonctionnement du récepteur)

**SIG** : Système d'Information Géographique

**SPI** : Stream Power Index (Indice de puissance de flux)

**STI** : Sediment Transport Index (Indice de transport des sédiments)

**TFP** : Taux des Faux Positif

**TVP** : Taux des Vrai Positif

**TWI** : Topographic wetness Indice (Indice d'humidité topographique)

**VP** : Vrai Positif

**VN** : Vrai Négatif

# Introduction générale

L'eau est une ressource vitale qui a un impact sur notre économie et notre mode de vie. L'eau et ses situations paradoxales sont devenues un sujet de discussion majeur dans le monde entier, avec les pénuries d'un côté et les inondations de l'autre. Ces dernières représentent une menace importante pour le territoire national ainsi que pour le reste du monde, elle est considérée comme la première calamité naturelle du monde.

Les inondations sont des calamités naturelles dévastatrices qui mettent en péril des vies humaines et entraînent des pertes économiques importantes dans le monde entier.

L'Algérie est l'un des pays touchés par les inondations et les crues, qui se présentent de manière désastreuse, constituant une sérieuse limitation de la croissance économique et sociale.

Bien que l'évitement des inondations soit irréalisable, des techniques de prévision peuvent être utilisées pour prédire les inondations futures (TEHRANY, PRADHAN et JEBUR, 2015).

La création d'un modèle de prévision des inondations est nécessaire, ce qui pourrait aider à la préparation d'un plan de réduction des risques d'inondation et à la fourniture de services de secours en cas de catastrophe (AL-JUAIDI, NASSAR et AL-JUAIDI, 2018). Les zones vulnérables aux inondations doivent être identifiées par la création de cartes de susceptibilité aux inondations, ce qui constitue une étape essentielle dans la protection et la gestion de ces dernières. Par conséquent, l'identification des zones à forte sensibilité aux inondations est essentielle pour réduire les inondations futures. En outre, la désignation des zones de faible sensibilité aux inondations pourrait être bénéfique aux efforts de développement (SARHADI, SOLTANI et MODARRES, 2012).

Cependant, diverses méthodes ont été utilisées pour identifier et évaluer les zones inondables. Parmi les premières approches, les statistiques ont permis de corréler les caractéristiques des inondations à certaines propriétés physiques des bassins versants .

Les modèles basés sur la physique, tels que HEC-RAS et MIKE11 (CHUBIN et al., s. d.) pour la cartographie de la susceptibilité aux aléas, ont été développés et reposent sur des données hydrologiques et hydrauliques détaillées. Par conséquent, ils ne peuvent pas être utilisés directement dans des environnements où les données sont rares, comme dans les pays en développement où la disponibilité des données reste un défi majeur.

Récemment, les méthodes d'apprentissage automatique (ML), les systèmes d'informations géogra-

phiques (SIG) et la télédétection ont été utilisés comme un outil utile pour l'analyse spatiale dans l'évaluation des risques , aussi pour l'évaluations des risques naturels tel que les inondations (TIEN BUI et al., 2019) et (AL-JUAIDI, NASSAR et AL-JUAIDI, 2018).

Ces méthodes peuvent être appliquées dans les régions ayant comme problème le manque des données, en particulier dans les pays en développement.

En outre, l'utilisation des systèmes d'information géographique et des technologies d'intelligence artificielle permet une évaluation rapide de la susceptibilité d'une zone spécifique aux inondations. La qualité des données d'entrée, ainsi que la combinaison des approches du SIG avec l'apprentissage automatique et les algorithmes statistiques, déterminent la précision des résultats obtenus.

Afin de venir au bout du problème d'inondation qui frappe le bassin versant de la Macta à chaque évènement de crue, notre travail s'inscrit dans une optique visant à utiliser des modèles d'apprentissage automatique, tels que le LighGBM, pour créer une carte de susceptibilité aux inondations pour le bassin versant de la Macta. L'étude qu'on a effectuée est scindée en quatre chapitres bien distincts.

Le premier chapitre porte sur la présentation de la zone d'étude et nous informe sur sa localisation, le climat dominant, la géologie du terrain ainsi que la problématique des inondations dans le bassin versant de la Macta.

Le deuxième chapitre présente un aperçu sur le phénomène d'inondations, les différents travaux effectués pour étudier ce phénomène, et la méthodologie de travail, effectuée dans le but de réaliser une modélisation des inondations dans le bassin versant de la Macta .

Le troisième chapitre présente les systèmes d'information géographique et leurs applications dans la cartographie des inondations dans bassin versant de la Macta.

Le quatrième chapitre définit les modèles d'apprentissage automatique et leurs applications dans la préparation d'une carte de susceptibilité aux inondations du bassin versant de la Macta.

# Chapitre 1

## Présentation de la zone d'étude

## 1.1 Introduction

Une compréhension approfondie de l'environnement physique (zone d'étude) est essentielle pour appréhender le phénomène étudié et interpréter les résultats.

Du fait que chaque site présente des spécificités, l'étude du site est nécessaire pour connaître les caractéristiques physiques du lieu.

Le présent chapitre sert à présenter dans sa première partie la zone d'étude et ses caractéristiques puis dans sa deuxième partie le problème des inondations dans cette dernière.

## 1.2 Présentation de la zone d'étude

Cette partie est consacrée à la présentation des caractéristiques du bassin versant de la Macta afin de fournir des indices géographiques, topographique, géologiques, climatiques et hydrologiques...etc.

### 1.2.1 Situation géographique

Le bassin versant qui comprend les wilayas de Mascara, Sidi Bel Abbas, Mostaganem, Tlemcen, Oran et Saida, est situé au Nord-Ouest de l'Algérie entre la latitude 34°34' et 35°79' Nord et entre la longitude 0°56' Est et 1°06' Ouest, (Figure 1.1) . Il s'étend sur plus de 14 000 km<sup>2</sup> (14 389 km<sup>2</sup>) entre les latitudes 34°34' et 35°79' nord, et les longitudes 0°56' Est et 10°06' Ouest. A travers le marais de Macta, l'Oued de Macta se jette directement dans la mer Méditerranée. L'Oued Mekerra à l'Ouest et l'Oued El Hammam à l'Est drainent la zone.

Le bassin versant de la Macta est délimité par :

- La mer Méditerranée au Nord ;
- Le plateau du Tighenif et les montagnes de Sada à l'Est ;
- Les hauts plateaux de Ras El Ma et les basses terres du Maalif au Sud ;
- Le plateau de Telagh, les montagnes de Tessala et les montagnes de Tlemcen à l'Ouest.



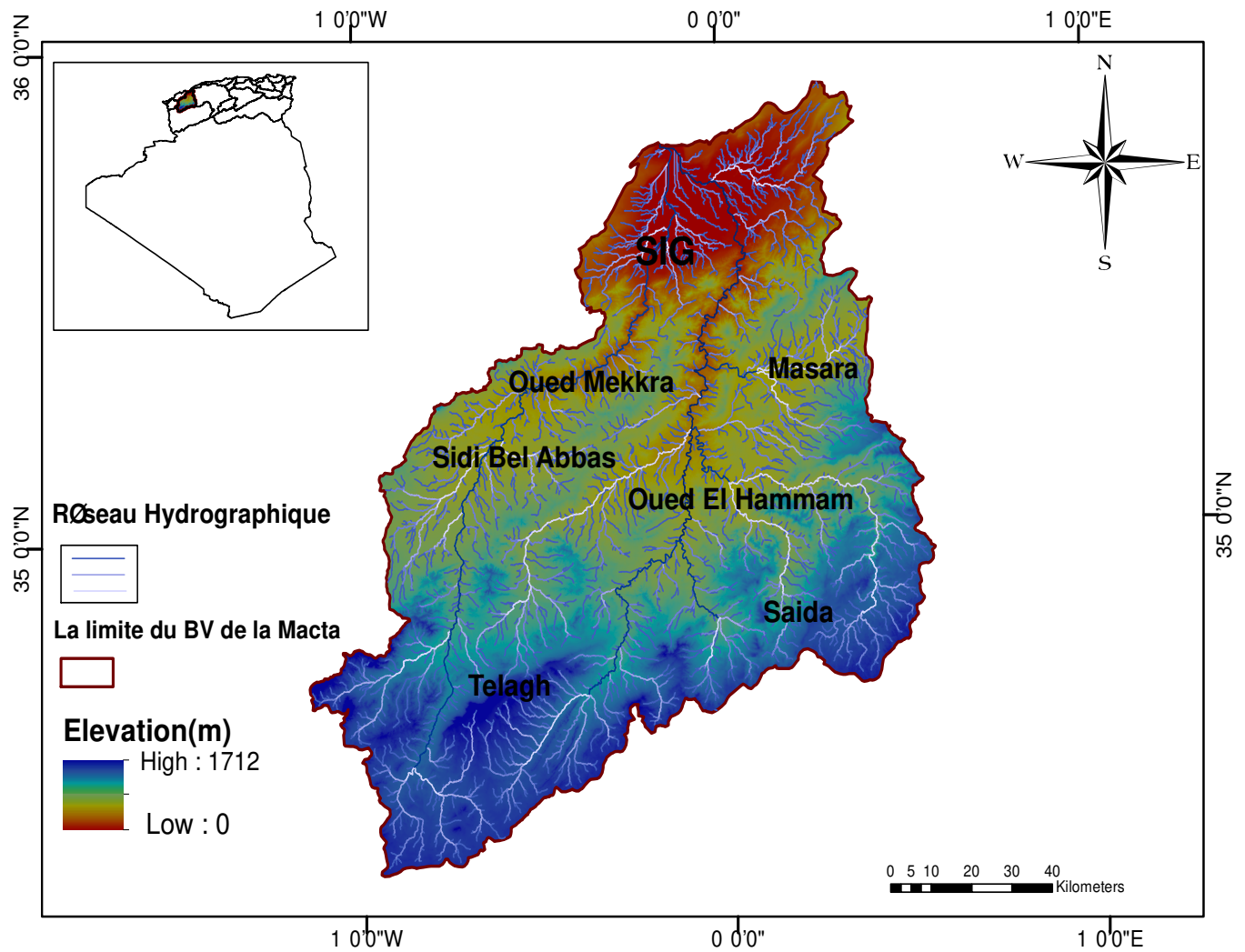


FIGURE 1.1 – Situation géographique du Bassin Versant de la Macta

### 1.2.2 Situation topographique

Le bassin versant de la Macta est constitué, d'une part, de la haute plaine de Sidi Bel Abbes, des plaines de Habra et de Ghriss à Mascara et, d'autre part, de deux systèmes orographiques parallèles à la côte du Sud-Ouest au Nord-Est. Les monts Beni-Chougrane, dont l'altitude varie entre 540 et 900 mètres, et les monts Telagh et Saida, dont l'altitude varie entre 600 et 1200 mètres, sont les principaux responsables de la formation de ces dispositifs.

Le bassin versant de la Macta présente une grande variété de reliefs, allant de hautes altitudes (>1000m) au Sud à des dépressions sublittorales (50m) au Nord (Figure 1.2). On peut cependant différencier les zones des basses plaines littorales, les massifs montagneux et les zones plaines pluviales. Le bassin versant de la Macta comprend les éléments suivants :

**Zone des basses plaines littorales**

Une ceinture de dunes sépare la zone des basses plaines littorales de la mer. Elle présente les hauteurs les plus faibles (moins de 9 m), ce qui permet le développement du plan d'eau, de marais et de steppes plus ou moins humides.

**Massifs montagneux**

Ils confèrent au bassin versant de la Macta son caractère montagneux : Les Monts de Tessala (point culminant 1061 m) à l'Ouest et au Nord-Ouest sont traversés par l'Oued Mebtouh avant de rejoindre la plaine inférieure.

La partie orientale des Monts de Tlemcen relie les massifs montagneux au Sud-Ouest (1412 m) au djebel Ouargla. Les Monts de Beni Chougrane (700 m) occupent une partie considérable du bassin versant qui s'élève à l'Est vers les Monts Sada (1201 m au djebel Tiffrit), et au Sud vers les Monts Dhaya (1455 m au djebel Mezioud).

**Zone des Plaines alluviales**

Des plaines alluviales se trouvent parmi les massifs collinaires, comme la plaine de Sidi Belabbès au Sud, qui est reliée à l'Oued Mekerra, et la plaine de Ghriss à l'Est, qui est drainée par l'Oued Ain Fekane.

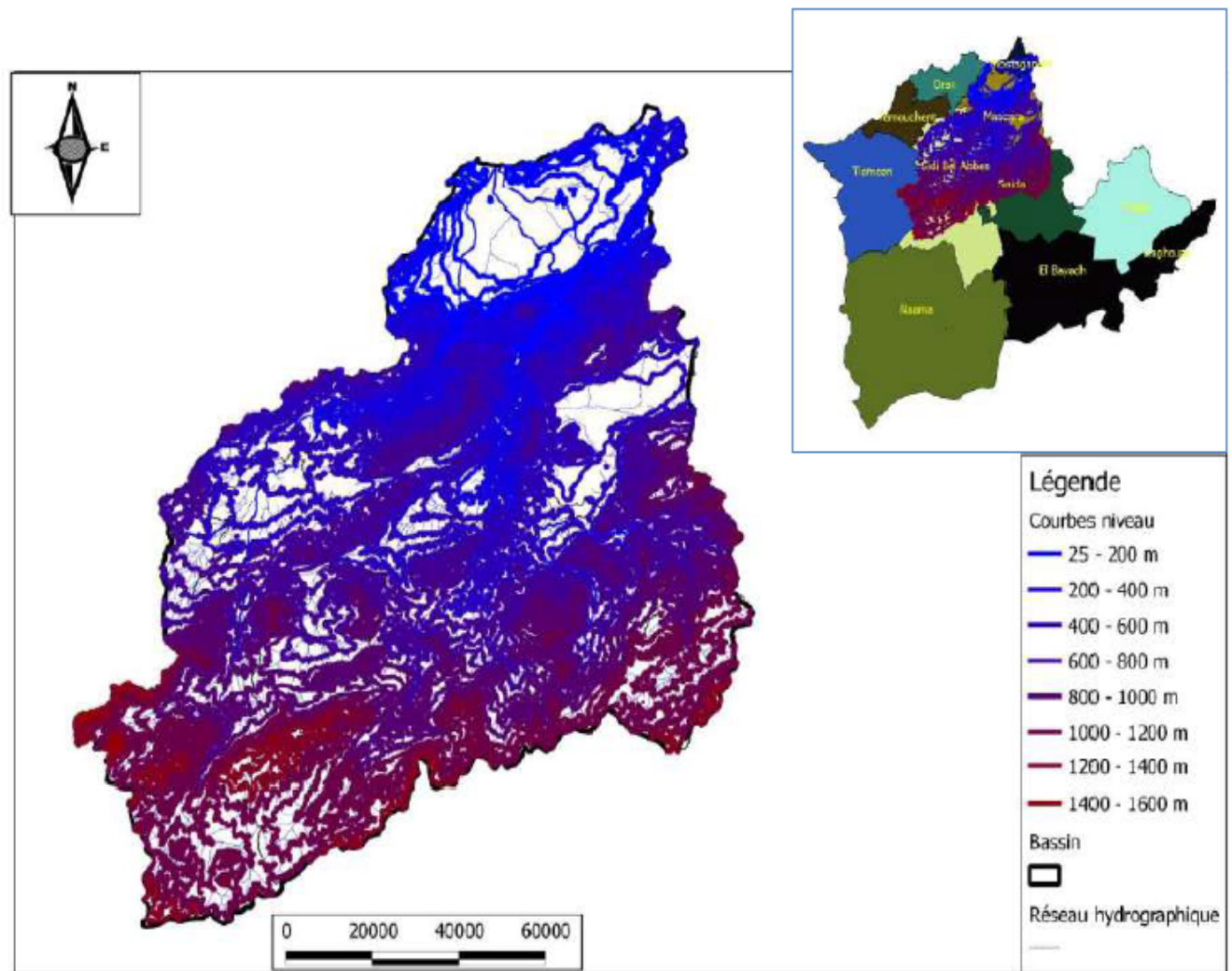


FIGURE 1.2 – La Topographie du Bassin Versant de la Macta (BAAHMAD, 2015)

### 1.2.3 Caractéristiques morphologiques du bassin versant

Les caractéristiques d'un bassin versant peuvent avoir des effets importants, notamment sur la variation des débits en période de crue. Tant les facteurs externes (précipitations et conditions climatiques) que les facteurs internes liés aux caractéristiques morphologiques du bassin versant, en premier lieu, la taille du bassin versant (sa surface), sa forme, son altitude, sa pente et son orientation, ont un impact sur le temps de concentration, qui décrit en partie la vitesse et l'intensité de la réponse du bassin versant aux précipitations.

Le bassin de la Macta englobe sur une superficie de 14 389 Km<sup>2</sup> et un périmètre environ 730,90 km.

**Indice de compacité**

L'indice de compacité est un paramètre de forme, et est utilisé pour caractériser la forme du bassin, il est calculé comme suit :

$$C = 0,28 \frac{P}{\ln S} \quad (1.1)$$

P : le périmètre du bassin versant (Km).

S : la surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

Le coefficient de compacité du bassin versant de la Macta est de 1,71, ce qui traduit son allongement et un développement de l'érosion linéaire.

**Rectangle équivalent**

Le rectangle équivalent est le rectangle de longueur (L) et de largeur (B) qui a la même surface (S) même périmètre (P), même indice de compacité (C) et même hypsométrie que le bassin versant étudié.

Cette variable permet de comparer plus facilement les bassins versants en termes d'influence sur l'écoulement.

La longueur du rectangle équivalent est calculée comme suit :

$$L = \frac{C\sqrt{S}}{1,128} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{C}\right)^2} \right] \quad (1.2)$$

C : indice de compacité ;

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

L : longueur du rectangle équivalent en km.

La largeur du rectangle "B" est calculée en fonction de la surface du bassin versant "S" et l'indice de compacité "C" comme suit :

$$B = \frac{C\sqrt{S}}{1,128} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{C}\right)^2} \right] \quad (1.3)$$

C : indice de compacité ;

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

B : largeur du rectangle équivalent en km.

D'où : L=318,52 km et B= 45,18 km

**Indice de pente moyenne**

$$I_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \quad (1.4)$$

H<sub>max</sub> : altitude maximale du bassin (m) ;

H<sub>min</sub> : altitude minimale du bassin (m) ;

L : longueur du rectangle équivalent en (m) ;

D'où : Imoy = 3,41 (%)

Ces paramètres sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 1.1 – Récapitulatif des caractéristiques morphologiques du bassin versant de de la Macta

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Surface	S	14389,0	Km <sup>2</sup>
Périmètre	P	730,9	m
Indice de compacité	C	1,7	-
Longueur du rectangle équivalent	L	318,5	km
Largueur du rectangle équivalent	B	45,2	km
Altitude minimale	Hmin	18,0	m
Altitude maximale	Hmax	1715,0	m
Altitude moyenne	Hmoy	483,0	m
Indice de pente moyenne	Ip	3,4	%

#### 1.2.4 Situation géologique

Au centre de la plaine de Sidi Bel Abbes se trouve un bassin dont le substratum argilo-marneux date du Miocène ou du Pliocène. Les montagnes plissées de Tessala s'étendent du Sud au Nord et ont une structure crétacée avec un épais recouvrement tertiaire.

Les montagnes de Tlemcen et Saïda sont presque entièrement constituées de roches du Jurassique moyen et supérieur et du Crétacé inférieur et moyen.

A travers la série de Bouhanifia, l'extension de Beni-Chougrane atteint la limite orientale de la plaine de Sidi Bel Abbes, avec une importante formation de remplissage argilo-sableux quaternaire dans la vallée.

Le calcaire est le type de roche le plus courant (Figure 1.3). La roche mère affleure dans de nombreux endroits des hauts contreforts et des montagnes.

La région de la Bénichougrane est caractérisée par un faciès marno-calcaire et un faciès constitué de grès et de conglomérats.

Les dépôts proches de l'exutoire (marais de la Macta) sont en majorité des matériaux transportés ; ils sont argileux et fortement salés. L'écoulement est déterminé par les caractéristiques géologiques des terrains parcourus, telles que le pendage, l'épaisseur, les liaisons tectoniques, la perméabilité, etc.

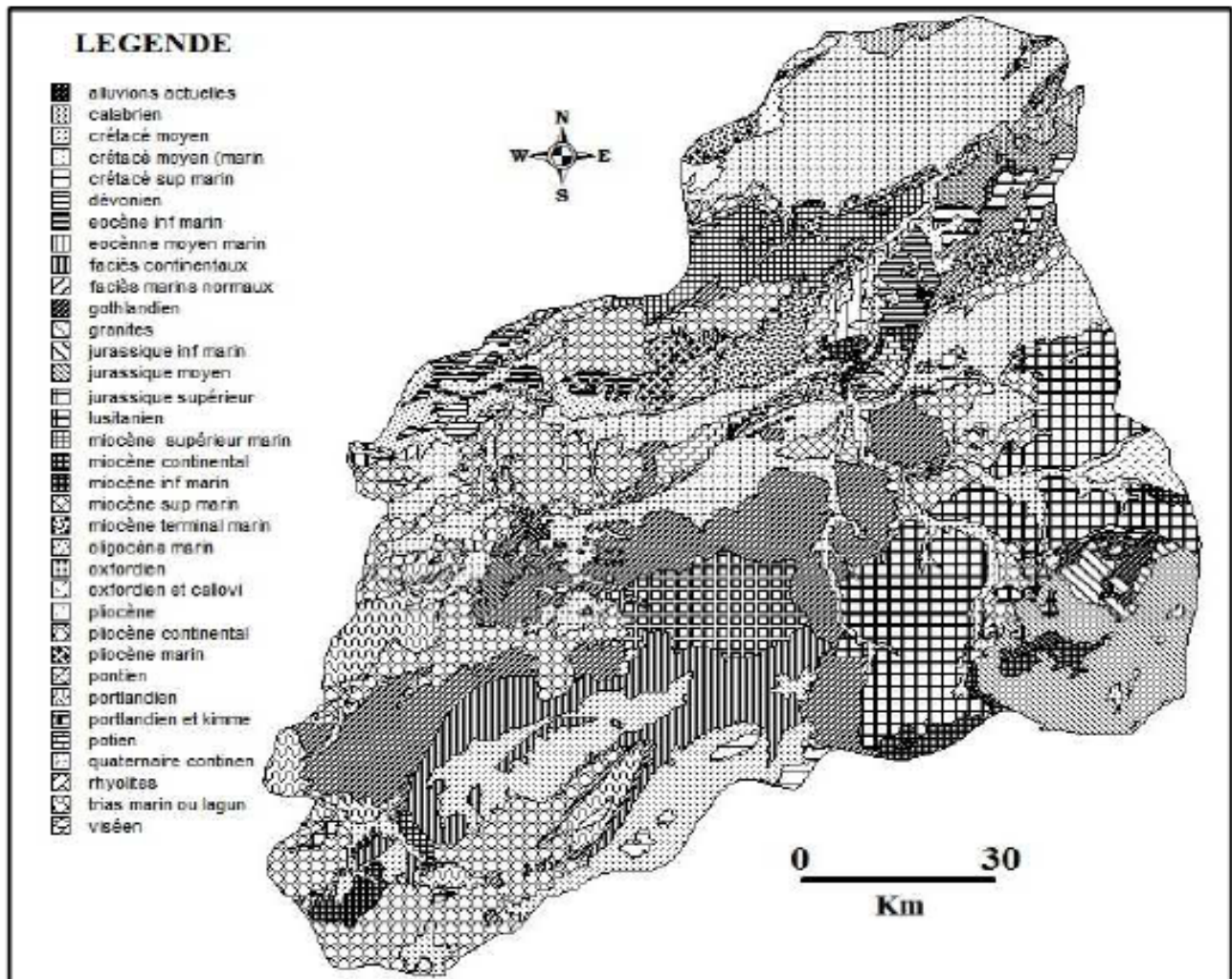


FIGURE 1.3 – Situation géologique du Bassin Versant de la Macta (KHADIDJAI, 2016)

### 1.2.5 Le type du sol

A l'exception des sols, des nombreuses vallées et du bas piémont, qui sont caractérisés par les dépôts les plus récents, les sols du haut piémont et des montagnes sont en grande partie calcaires et peu profonds (sols marneux et argileux). Les faciès gréseux et conglomératiques caractérisent la région du Béni Chougrane.

Près de l'exutoire (marais de la Macta), on trouve des dépôts de matériaux sédimentaires transposés et remaniés.

### 1.2.6 L'occupation du sol

Le bassin versant de la Macta a six (06) classifications qui représentent la superficie et le pourcentage d'occupation du sol (Figure 1.4) :

- Couvert végétal permanent : 2948,03 (Km<sup>2</sup>)
- Couvert végétal temporaire : 8335,48 (Km<sup>2</sup>)
- Couvert végétal clairsemé : 2663,24 (Km<sup>2</sup>)
- Sols nus : 302,89 (Km<sup>2</sup>)
- Eau libre : 14,86 %
- Agglomération : représente 0,87 %

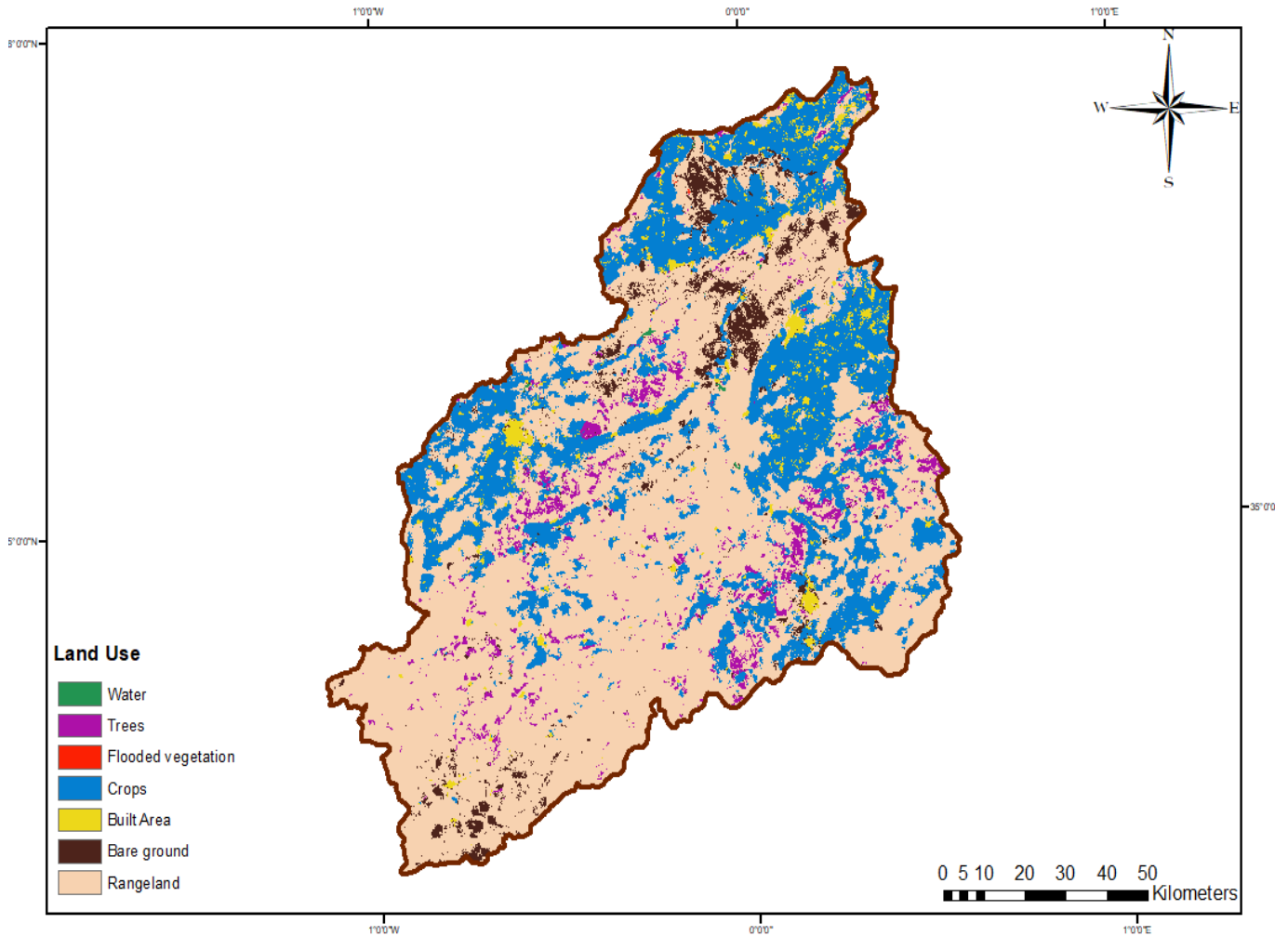


FIGURE 1.4 – Occupation du sol Bassin Versant de la Macta (OBSERVATION et SCIENCE, 2019)

### 1.2.7 Le Couvert végétal

La quantité de couverture végétal a un impact direct sur les inondations. Plus la couverture végétal est importante, plus la résistance au ruissellement est élevée.

Par exemple, les forêts diminuent le ruissellement de surface et modèrent les crues d'amplitude légère et moyenne. Le sol nu, par contre, favorise un écoulement très rapide en raison de sa

faible capacité de rétention.

Les zones d'irrigation du bassin de l'Oued Mekerra se situent principalement dans les plaines de Sidi Bel Abbes et de Sfifef. Le maraîchage et quelques vergers d'arbres fruitiers sont les cultures les plus couramment plantées.

La quasi-totalité de la bande de montagnes de la zone de la Haute de la Macta est couverte de forêts, de broussailles et de buissons. Les pins d'Alep et les chênes verts sont les arbres prédominants de ces forêts.

Des arbres rustiques comme l'amandier, le figuier et l'olivier occupent d'immenses surfaces le long des terrasses luxuriantes de l'Oued-El Hammam. Les forêts de Louza, Belarbi, Tenira, constituées principalement de pins d'Alep, se trouvent dans la partie centrale du bassin versant, plus précisément dans le sous bassin Mekkara, Sarno.

Les cultures céréalières couvrent plus de 80 % de la surface du bassin (en amont de Ras El MA). Entre Ras el Ma et Hacaiba, où l'Alfa couvrait d'énormes régions, les cultures céréalières ont pris leur place au cours des dernières décennies. Dans la plaine de la Mekerra, entre Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes, les cultures céréalières sont parfois couplées à des cultures complémentaires comme les vergers ou les oliveraies.

Les cultures céréalières et maraîchères dominent les cultures exploitées dans le sous bassin versant d'Oued El Hammam, notamment dans les parties Sud et Sud-Est. Les cultures céréalières couvrent périodiquement le sol et le laissent nu pendant la majorité de l'année, ce qui provoque une érosion rapide.

En raison de l'activité humaine et des récents incendies, on a observé que la densité du couvert végétal a diminué ces dernières années. Par conséquent, le débit de notre bassin versant n'est pas bien régulé.

### 1.2.8 Les Ressource en eau

Il existe deux types de ressources en eau dans le Bassin Versant de la Macta qui sont : les ressources en eau souterraines et les ressources en eau superficielles, (Tableau 1.2).

TABLE 1.2 – Ressources en eau superficielles et souterraines dans le Bassin Versant de la Macta

Ressources en eau	Mobilisables Hm <sup>3</sup>	Moolisée Hm <sup>2</sup>
Superficielle	295	227,4
Souterraine	217	76,7
Totale	512	304,2

#### Ressources en eau souterraines

Avec une capacité mobilisée de 76,74 Hm, les aquifères sont concentrés dans le centre et le Nord du bassin versant de la Macta (Figure 1.5).



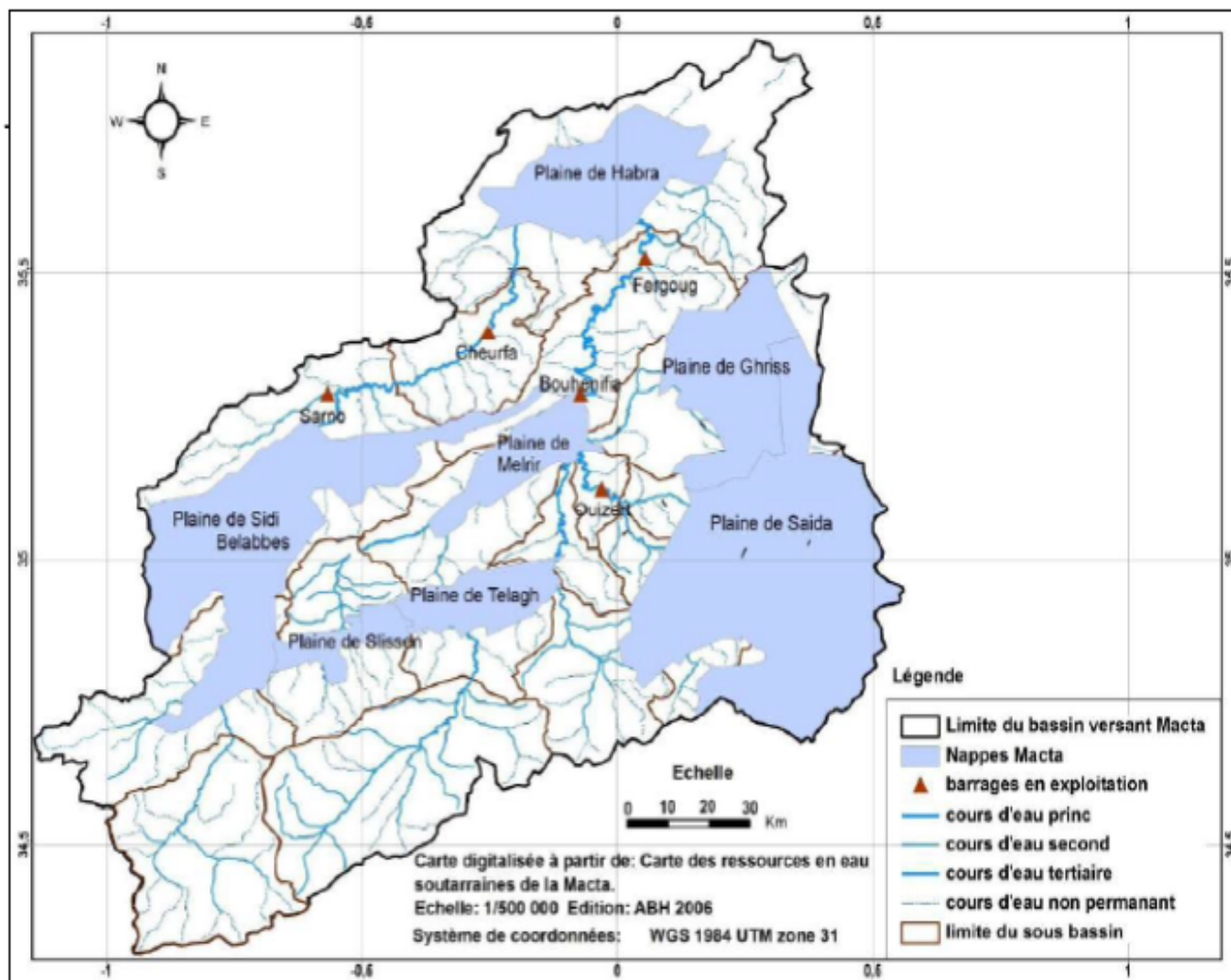


FIGURE 1.5 – Ressources en eau dans le Bassin Versant de la de la Macta

### Ressources en eau superficielles

Les ressources en eau de surface du bassin versant de la Macta sont estimées à 227,41 Hm<sup>3</sup>, mobilisées par cinq (05) barrages dont les caractéristiques sont énumérées dans le (Tableau 1.3).

TABLE 1.3 – Ressources en eau superficielles dans le Bassin Versant de la Macta

Nom du Barrage	Cours d'eau	Date de mise en eau	Capacité initiale( $Hm^3$ )	Apport annuel moyen( $Hm^3$ )	Taux d'envasement	Destination
Bouhenifia	Oued El Hammam	1948	73	138,8	47,8	Irrigation Hachine, AEP Sfisef Bouhni-fea
Fergoug	Oued El Hammam	1970	18	56,0	97,8	Irrigation El Habra, AEP Oran Mohamadia
Ouizert	Oued Sa-haout	1985	100	84,0	6,1	Irrigation, Transfert Bouh-nifea
Cheufra 2	Oued Mebtouh	1992	82	57,0	14,4	Irrigation Sig
Sarno	Oued Sarno	1954	22	12,0	3,4	AEP Sidi Bel Abbas

### 1.2.9 La situation hydrologique

Le bassin de la Macta est composé de seize sous-bassins versants, dont le plus grand est celui de la Macta inférieure (1998 km<sup>2</sup>), il englobe une superficie de 14389 km<sup>2</sup>. Ce bassin présente un écoulement violent dans la moitié amont en raison de sa structure allongée et de son réseau hydrographique dense. L'absence d'affluents importants et la perte de la hauteur de ruissellement le long du cours d'eau réduisent le débit en aval.

L'oued Mekkara à l'Ouest et l'oued El-Hammam à l'Est drainent le bassin, qui se rejoignent non loin du rivage méditerranéen pour former la Macta. Son régime hydrologique est caractérisé par d'importantes irrégularités de débit saisonnières et annuelles. Les crues sont fréquentes et violentes (inondation catastrophique de la région de Sidi bel Abbas). Compte tenu du fort déficit pluviométrique auquel l'Oranien a été confronté au cours des deux dernières décennies, les apports liquides sont plutôt minimes (40 % en moyenne).

#### Écoulement

C'est auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, qui supervise huit stations dans le bassin de la Macta, que les données hydrométriques sont obtenues, Figure(1.6). Trois stations se trouvent sur le sous bassin de l'oued Mekerra et cinq dans le sous-bassin de l'oued El Hammam .

Certaines d'entre elles datent des années 1970, d'autres ont été contrôlées depuis les années 1940, (MEDDI, TALIA et MARTIN, 2009).

Station	Cours d'eau	Mise en service	Alt. (m)	Sup. (km <sup>2</sup> )	Qm (m <sup>3</sup> /s)	Lm (mm)	CV	La max. (mm)	en	La min. (mm)	en
Hacaiba	Oued Mekerra	1961	950	955	0,16	5,3	0,81	17,5	1995	1,0	1993
Sidi Ali Ben Youb	Oued Mekerra	1949	635	1890	0,59	9,8	0,53	21,9	2001	2,2	1998
Sidi Bel Abbès	Oued Mekerra	1942	485	3000	0,82	8,6	0,49	24,8	1995	2,9	1998
Oued Taria	Oued Taria	1972	501	1365	0,93	21,5	0,77	85,9	1987	4,6	1992
Ain Fekane	Ain Fekane	1969	430	1160	0,23	6,3	0,73	14,4	1976	0,54	1998
Trois Rivières	Oued El Hammam	1947	315	7440	2,75	11,7	0,54	28,4	1986	2,6	1995
Bouhanifia	Oued El Hammam	1974	306	7685	1,82	7,5	0,52	17,2	1976	1,4	1993
Hacine	Oued El Hammam	1973	145	7950	0,19	0,8	0,81	2,2	1977	0,08	1993

FIGURE 1.6 – Réseau Hydrographique (MEDDI, TALIA et MARTIN, 2009)

### Transport solide

Le transport solide est important, les exportations les plus importantes sont liées aux ruissellements remarquables qui se produisent à l'automne lorsque les circonstances sont idéales pour le ruissellement (pluies abondantes et relativement intenses, sol nu, encroûtement). Ces ruissellements, qui produisent beaucoup de griffes et de ravines, notamment dans les sols argileux, sont à l'origine de dégradations dramatiques qui peuvent durer des années.

### Précipitation

Les précipitations et les éléments climatiques dans leur ensemble sont des variables extrêmement aléatoires dans le temps et dans l'espace, et ils peuvent expliquer quantitativement les fluctuations des composantes du régime hydrologique au sens large.

Les précipitations annuelles tombent du Nord au Sud, variant de 300 à 500 mm en moyenne (sur la période 1930-2002). En terme de moyennes mensuelles, janvier est généralement le mois le plus humide et juillet le mois le plus sec. (BAAHMAD, 2015)

Les plus fortes quantités de précipitations ont été enregistrées à Telagh (735,4 mm) en 1949/1950,

Sidi Ali Benyoub (660,2 mm) en 2006/2007, Chetouane (618,2 mm) en 1949/1950, et Ras el Ma (587,1 mm) en 1970/1971 pour la période de mesure (1942/1960 - 1968/2007). D'autre part, les stations d'El Haçaba (110,8 mm) et de Ras el Ma (31,2 mm) ont enregistré les plus faibles quantités de précipitations entre 1976 et 1987. À l'échelle du bassin, le cycle hydrologique 2003-2004 a enregistré les plus faibles précipitations moyennes (172,8 mm), tandis que le cycle hydrologique 1949-1950 a enregistré les plus fortes précipitations moyennes (550 mm). Les différences de précipitations moyennes entre les différentes stations sont souvent peu perceptibles. Cela indique une grande homogénéité des valeurs pluviométriques, Tableau(1.4), (HALLOUCHE, 2017)

TABLE 1.4 – Ressources en eau superficielles et souterraines dans le Bassin Versant de la Macta

Nom de la station	Code	Longitude	Latitude	Z	Pmoy	Pmin	Pmax
Ras Elma	110102	-0,8	34,4	1097	198,2	41,9	417,6
Sidi Ali Ben Youb	110201	-0,7	34,9	635	352,4	102,2	686,2
El Haçaiba	110203	-0,8	34,7	950	305,5	63,9	478,8
Sarno Bge	110304	-0,6	35,2	425	358,2	150,4	565,5
Sidi Bel Abbes	110305	-0,7	35,2	485	328,8	103,5	495,3
Hassi Daho	110309	-0,5	35,1	650	327,9	63,2	565,5
Mostefa Ben Brahim	110312	-0,4	35,2	590	326,4	126,5	543,0
Ain Trid	110314	-0,7	35,3	530	404,3	215,7	680,5
Froha	111402	0,1	35,3	467	281,1	93,1	405,1
Tizi	111413	0,1	35,3	453	343,3	116,3	554,1
Mascara	111429	0,1	35,4	550	337,7	136,7	621,0
Ghriss	111424	0,2	35,2	498	299,5	97,5	741,3
Ain Fares	111417	0,2	35,5	806	400,0	117,6	794,3
Sidi Kada	111414	0,3	35,3	549	360,5	109,6	723,8
Matmore	111405	0,2	35,3	482	293,3	108,6	508,5
Nesmoth	111418	0,4	35,2	930	467,3	170,7	878,0
Maoussa	111401	0,2	35,4	494	300,7	136,0	621,0

### Température

Le ruissellement est influencé par la température de l'air en conjonction avec d'autres facteurs climatiques (précipitations, insolation et vent). Dans la présente étude, nous n'avons pu trouver que les données sur les températures moyennes mensuelles et annuelles (sur la période 1987-2007, soit 21 ans d'observations) de trois stations qui représentent bien le bassin versant de la macta (Ras el Ma, El Haçaba, et Sidi Ali Benyoub), ainsi que les minima et maxima. Les températures hivernales varient entre 7,8 et 9 degrés Celsius, tandis que les températures estivales varient entre 20,4 et 23,4 degrés Celsius (tableau 23 et figure 47). Le différentiel de température entre les mois les plus chauds et les mois les plus froids détermine l'amplitude thermique annuelle, qui varie du nord au sud, (MEDDI, TALIA et MARTIN, 2009)

### 1.2.10 Le Réseau hydrographique

Le bassin de la Macta possède un réseau hydrographique typique des zones semi-arides, composé de deux grandes rivières qui servent d'artères de drainage du bassin (Figure 1.7). En période d'étiage, leur débit peut être nul.

Totalisant un réseau de 658 km, ces cours d'eau sont l'Oued Mekerra à l'Ouest et l'Oued El Hammam à l'Est, chacun recevant des affluents descendant des collines environnantes.

Le Fken (1200 km<sup>2</sup>), le Sahaouet (2200 km<sup>2</sup>), le Hounet (1630 km<sup>2</sup>) et le Melghir (1520 km<sup>2</sup>) sont les quatre principaux affluents qui drainent le bassin versant de l'Oued El Hammam.

Le réseau hydrographique du bassin de la Macta est très développé mais comprend surtout des cours d'eau non pérennes.

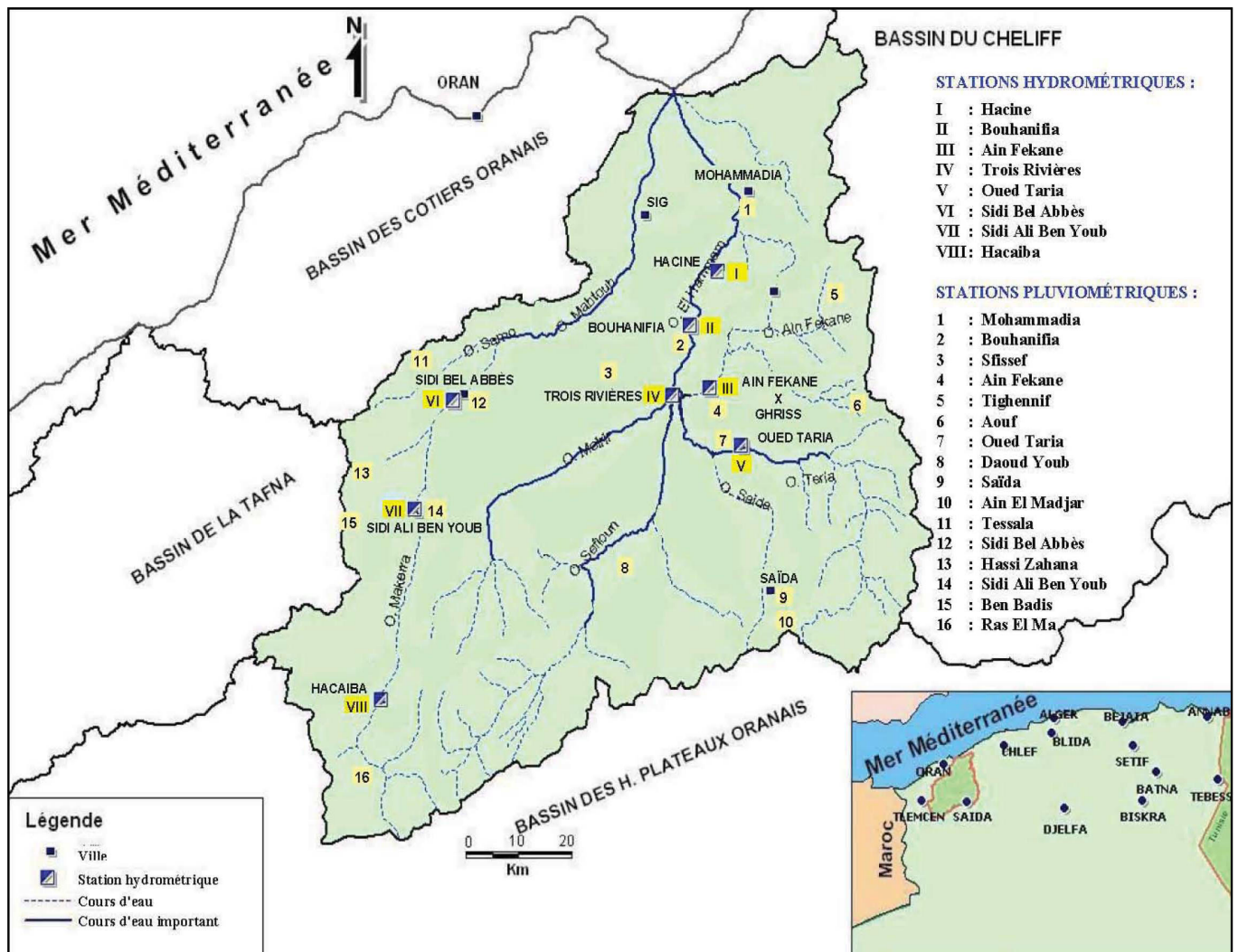


FIGURE 1.7 – Réseau Hydrographique (MEDDI, TALIA et MARTIN, 2009)

## 1.3 La problématique des inondations dans le Bassin Versant de la Macta

Les inondations sont l'un des problèmes majeurs touchant le Bassin Versant de la Macta. De nombreuses inondations ont eu lieu dans l'oued Mekkara, qui traverse la wilaya de Sidi Bel Abbès, causant d'importants dégâts humains et matériels dans les régions urbaines et rurales. Dans ce qui suit, nous présentons les inondations dans le Bassin Versant de la Macta, ses causes et ensuite quelques exemples des inondations les plus notables dans notre bassin versant.

### 1.3.1 Les inondations dans le Bassin Versant de la Macta

Les crues maximales se produisent au début de l'automne, avec des exceptions occasionnelles. En raison de la fréquence des orages accompagnés de pluies torrentielles, des crues destructrices sont entraînées dans le bassin versant de la Macta, créant des inondations régulières. Compte tenu de l'état du lit de l'oued Mekerra, il a été constaté qu'après des pluies torrentielles, les eaux de l'oued montent de manière importante, débordant le lit en plusieurs endroits et noyant les terres environnantes. En amont de Boukhanifis, où l'oued débouche directement sur la plaine, l'insuffisance de la section de l'oued, combinée au débit et à la vitesse provoquée par la forte pente, a entraîné l'inondation de la plaine et des quartiers inférieurs de Sidi Bel Abbès, ainsi que de tous les centres urbains situés en aval, tels que Sidi Khaled et Sidi Lahcen. La combinaison de facteurs naturels (vaste plaine inondable) et humains (infrastructures), associée à la croissance exponentielle de l'urbanisation, a favorisé la multiplication des inondations catastrophiques dans la zone Maktà au cours des dernières décennies (Tableau 1.5). Cela nous amène à évoquer les terribles inondations de la Macta, qui se produisent chaque année au mois d'octobre.

TABLE 1.5 – Historique des inondations dans le Bassin Versant de la Macta

Lieu	Data	Cause
AINELBERD	02/10/1978	Orage
BEN BADIS	06/03/1980	Forte précipitations
BOUKHANIFIS		
SIDIBELABBES	04/10/1986	Orage
SIDIBELABBES	30/04/1990	
TELAGH		
SIBIBEL ABBES	14/03/1991	
SIDIBELABBES	29/09/1994	
BOUKHANIFIS		
SIDILAHCEN		
HASSIZAHANA		
HASSIDAHOU		
OUEDESEFIOUN		
SIDIHAMADOUCHE	16/10/1994	
AINELBERD		
SIDIBELABBES	05/12/1995	
SFISEF		
AINELBERD		
RASELMAA	10/06/1996	
HASSIZAHANA	13/06/1996	
MOULAYSLISSEN	17/08/1997	
BOUKHANIFIS	22/09/1997	
SIDIBELABBES	27/09/1997	
SIDIBELABBES	02/1998	
HASSIZAHANA	18/01/1999	
BOUKHANIFIS	10/02/1999	
RASELMAA	27/07/2000	
MOULAYSLISSEN	18/048/2007	Forte Précipitation

### 1.3.2 Exemples d'inondations dans le Bassin Versant de la Macta

Voici des exemples de quelques crues notables :

#### La crue d'Octobre 1986

La crue du 3 octobre 1986 est la plus importante des cinquante ans d'histoire du Sidi Ali Benayoub. Son débit de pointe est de  $810 \text{ m}^3/\text{s}$ , avec un volume de crue de  $13 \text{ mm}^3$  et une durée de 20 heures (TAHAR, 2013).

### **Crue catastrophique d'octobre 2000**

Une montée des eaux est arrivée dans la plaine avec une vitesse estimée à 7 km/h et un débit de 500 m<sup>3</sup>/s, déposant des tonnes de sable et de matériaux transportés dans la nuit du 23 au 24 octobre 2000. L'eau est restée stagnante pendant une période allant de quelques heures à trois jours.

Les dégâts subis, selon une expertise de la wilaya, concernent les infrastructures routières, les résidences, les institutions gouvernementales et commerciales. Heureusement aucune victime humaine n'était à déplorer.

## **1.4 Conclusion**

Le but principal de ce chapitre est de présenter les données qui donnent un aperçu de la situation géographique, topographique, climatologique, géologique, et d'autres caractéristiques de notre zone d'étude tel que l'occupation du sol, les ressources en eau, le réseau hydrographique ... etc.

Ce chapitre nous a permis également de développer la connaissance sur la problématique des inondations au sein du Bassin Versant de la Macta, ce qui va nous aider à l'élaboration d'une étude contre les inondations en temps de crues.



## Chapitre 2

# Etat de l'art sur les inondations et méthodologie de travail

## 2.1 Introduction

Les inondations ont un impact direct sur l'environnement. Par conséquent, le nombre d'études et de recherches qui traitent la gestion des risques d'inondation a augmenté ces dernières années. Au cours de ce chapitre, on procède à définir les caractéristiques des inondations, clarifier la notion du risque d'inondation, et mentionner quelques méthodes de travail qui ont été établies dans le but de prédire, modéliser et estimer la probabilité des inondations. La méthodologie de travail suivie pour modéliser les risques des inondations dans le Bassin Versant de la Maacta a été présentée à la fin de ce chapitre.

## 2.2 Définition

Étymologie : inondation un mot d'origine latin « inundation » qui peut être défini comme la submersion.

Une inondation peut être traduite par un phénomène régulier ou catastrophique selon les conditions topographiques et météorologiques de la zone affectée. Ainsi elle est définie comme étant une submersion temporaire rapide ou lente des terres qui ne sont pas submergées en temps normal, par des eaux salées ou douces.

## 2.3 Typologie des inondations

Une inondation pourrait être déclenchée par un ou plusieurs facteurs citons comme exemple : le débordement des eaux en dehors de leur lit habituel d'écoulement, les différentes actions et activités de l'homme et les fortes pluies en durée et (ou) en intensité.

D'où on distingue différents types d'inondations, citons ceux affectant notre bassin.

### 2.3.1 Inondation de plaine

Elle se manifeste par un débordement d'un cours d'eau sorti de son lit mineur rejoignant le lit majeur. Elle peut aussi être précédée ou suivie par des remontées de nappes phréatiques. Elles se caractérisent par une montée lente des eaux, ayant comme origine des précipitations successives et soutenues, ou suite d'une combinaison de plusieurs facteurs, précipitations importantes et fonte des neiges par exemple.

### 2.3.2 Inondation par crues torrentielles

Lors des précipitations intenses tombant sur toute la superficie du bassin versant, un ruissèlement rapide des eaux se déclenche menant à une concentration élevée des eaux dans les cours d'eau, ce qui fait que ces précipitations provoquent des crues brutales et violentes dans les torrents

et les rivières torrentielles. Usuellement ces crues apportent des sédiments et des embauches qui forment des obstacles qui obstruent l'écoulement et que lors de leur destruction libèrent des vagues importantes qui provoquent des énormes dégâts humains et matériels.

### 2.3.3 Inondation par ruissèlement pluvial

Selon le milieu rural ou urbain, les inondations par ruissèlement incluent de différents phénomènes physiques qui se caractérisent par leur soudaineté et leur courte durée, conduisant à des phénomènes peu prévisibles ce qui les rendent, en période de crise, difficile à maîtriser. Le ruissèlement pluvial urbain combiné avec l'imperméabilisation élevée des terrains et d'autres facteurs tels qu'un tapis végétal faible, une forte pente et des précipitations agressives mènent à d'importantes inondations, ce qui nous donne un phénomène naturel qu'on ne peut pas éviter.

## 2.4 Notion de risque

La définition générale du risque : est la probabilité qu'un dommage survienne en raison de l'exposition à un danger.

Dans notre cas, « le risque » est le résultat de deux composantes : « vulnérabilité » et « Aléa ». Un aléa est la manifestation d'un phénomène physique, naturel et incontrôlable qui, compte tenu de son occurrence et de son intensité, peut provoquer des dommages.

La vulnérabilité se définit à la suite de phénomènes pouvant entraîner des pertes humaines et matérielles. On peut aussi dire que la vulnérabilité doit mesurer la capacité des systèmes interdépendants à résister aux perturbations extérieures les plus imprévisibles, (GILARD et GENDREAU, 1998).

## 2.5 Méthodes de modélisation des inondations

De nombreuses études ont été menées pour comprendre le problème des inondations, et diverses méthodes ont été proposées pour cartographier et modéliser le danger, la susceptibilité et le risque dans les zones urbaines et rurales. Ces études peuvent être classées comme suit :

### 2.5.1 Modélisation basée sur les modèles hydrodynamiques

- (GILLES et al., 2012) ont réussi à modéliser les inondations fluviales en utilisant un modèle couplé 1-D/2-D de l'Institut hydraulique danois (DHI) Mike Flood™. En utilisant des MNT (Modèle Numérique de Terrain) basés sur le lidar, ce modèle est un choix courant pour la cartographie de prédiction des inondations.
- (DOMINGO et al., 2010) ont utilisé Mike Flood pour modéliser les inondations dues à l'élévation du niveau de la mer et aux ondes de tempête dans les grandes villes dans le cadre de scénarios de changement climatique, et ont constaté que le modèle couplé était

plus performant que les approches d'analyse de terrain en termes de visualisation des inondations en provenance de la mer.

### 2.5.2 Modélisation basée sur les SIG

Pour l'analyse des risques d'inondation, les systèmes d'information géographique (SIG) constituent un outil efficace et interactif d'aide à la décision spatiale pour cartographier les zones à risque d'inondations.

- (CLEMENT, 2013) a utilisé le progiciel ArcView GIS pour numériser une carte topographique et d'autres thèmes pertinents de la zone d'étude afin de construire une carte des zones à risque d'inondations. Il a créé un modèle numérique d'élévation de la région étudiée, ainsi qu'une carte de classification des zones à risque d'inondation dans une ville donnée, à l'aide des fonctions de superposition et de manipulation du SIG.
- (SINNAKAUDAN et al., 2003) a développé une extension ArcView GIS « AVHEC-6.avx » pour intégrer le modèle hydraulique HEC-6 dans un contexte SIG. L'extension a été écrite à l'aide du langage de programmation Avenue Script et du Dialog Designer, qui comprend un certain nombre d'options, tel que « pointer et cliquer ». Elle peut analyser les profils calculés de la surface de l'eau générés par le modèle HEC-6, et générer une carte d'inondation pour la rivière Pari en utilisant le SIG ArcView .

### 2.5.3 Modélisation basée sur l'apprentissage automatique

Dans plusieurs grandes villes, afin de pouvoir anticiper et déterminer quelles zones sont susceptibles d'être inondées à l'avenir, plusieurs modèles d'apprentissage automatique ont été utilisés pour prévoir et évaluer les risques des inondations, notamment :

- (YUSYA, SEPTYANDY et INDRA, 2020) ont réalisé plusieurs modèles pour prédire et évaluer les risques d'inondation dans la ville de Jakarta, en utilisant, des SIG basés sur des modèles SVM, des modèles d'analyse de processus hiérarchiques (AHP), l'apprentissage automatique avec des modèles d'ensemble, et des arbres discriminants, de classification et de régression multivariés.
- Dans la ville de Sarri, en Iran, une modélisation avec les méthodes GeneticAlgorithmRule-Set Production (GARP) et Quick Unbiased Efficient StatisticalTree (QUEST) a été utilisée, dans le but de prédire les inondations catastrophiques et d'évaluer les facteurs qui influencent l'occurrence des inondations et qui seront inclus dans la profondeur de la carte de susceptibilité aux inondations. Les facteurs inclus dans ce modèle se composent en sept éléments, à savoir, les précipitations, l'utilisation des terres, la hauteur de la zone, la pente, la distance des grandes rivières, la distance à la rivière et la profondeur du niveau des eaux souterraines (DARABI et al., 2019).

## 2.6 Méthodologie de cartographie des risques d'inondations

La présente étude consiste à définir la cartographie de susceptibilité aux inondations. Plus précisément, la production d'une carte de susceptibilité des inondations à l'aide d'une approche de modélisation en employant les outils du SIG et d'apprentissage automatique, (CHOUBIN et al., s. d.).

La méthodologie de cartographie des inondations comprend quatre étapes principales, (Figure 2.1) :

1. construction d'une base de données géo spatiale pour les facteurs d'influence et les événements historiques d'inondation ;
2. développement et application des modèles d'apprentissage automatique ;
3. validation des résultats et évaluation de la performance des modèles ;
4. génération de la carte de susceptibilité aux inondations, par superposition des cartes de facteurs de conditionnement déterminés auparavant.

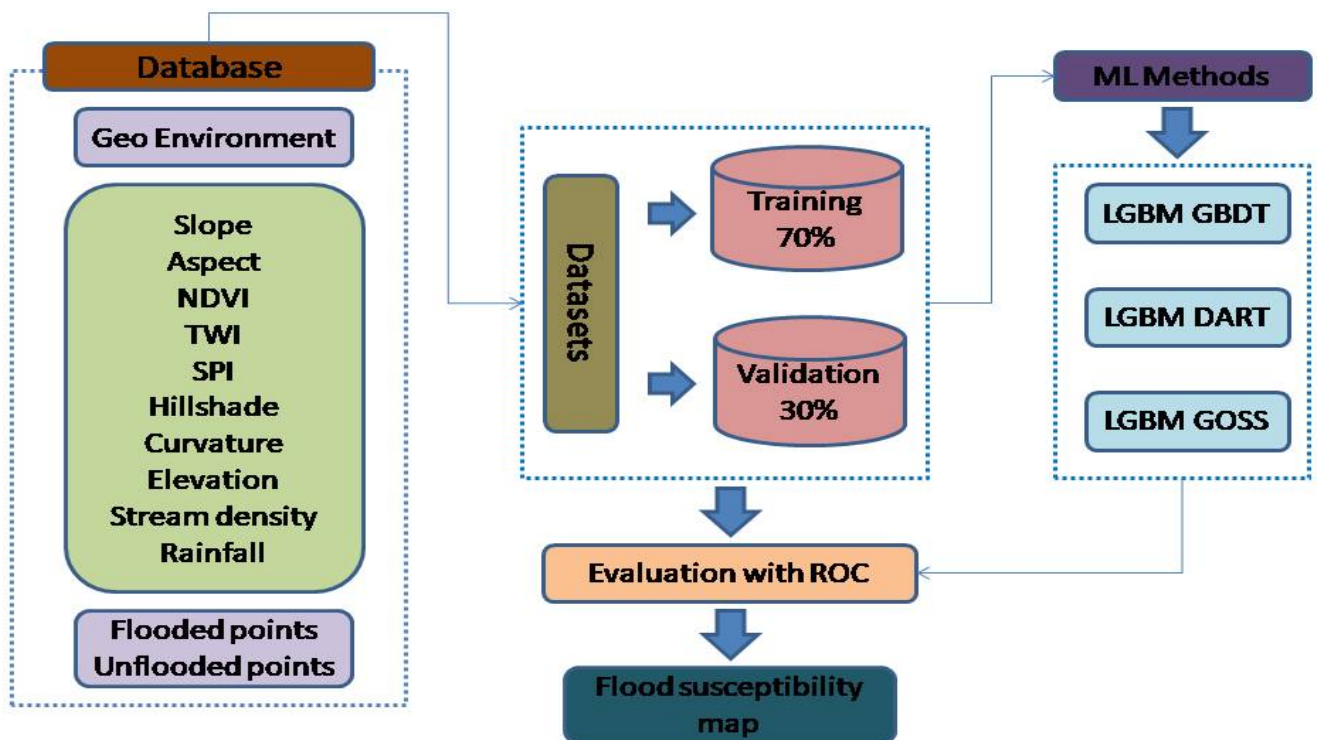


FIGURE 2.1 – Methodologie de la cartographie de la susceptibilité aux inondations

Une description détaillée de chaque étape sera présentée dans les chapitres à venir.

### 2.6.1 Carte d'inventaire des inondations

La carte d'inventaire des inondations est une carte de base pour l'évaluation de la susceptibilité aux inondations et aussi pour prédire les occurrences des risques d'inondations futures d'une région. Une analyse précise de la susceptibilité aux inondations nécessite une carte d'inventaire des inondations précise qui montre les lieux d'occurrence des inondations.

Une carte d'inventaire des inondations enregistre les emplacements des points inondables et fournit des informations détaillées sur les caractéristiques des inondations historiques, (CHOUBIN et al., s. d.) et (AL-JUAIDI, NASSAR et AL-JUAIDI, 2018).

Les emplacements des événements d'inondation ont été obtenus par le biais d'enregistrements historiques et d'enquêtes de terrain approfondies effectuées par [le ministères des ressources en eau et de sécurité hydrique].

Dans la présente étude, un total de 83 points ont été identifiés comme des points inondables, tandis que 83 points non inondables ont été choisis au hasard dans les zones non inondées, (Figure 2.2)

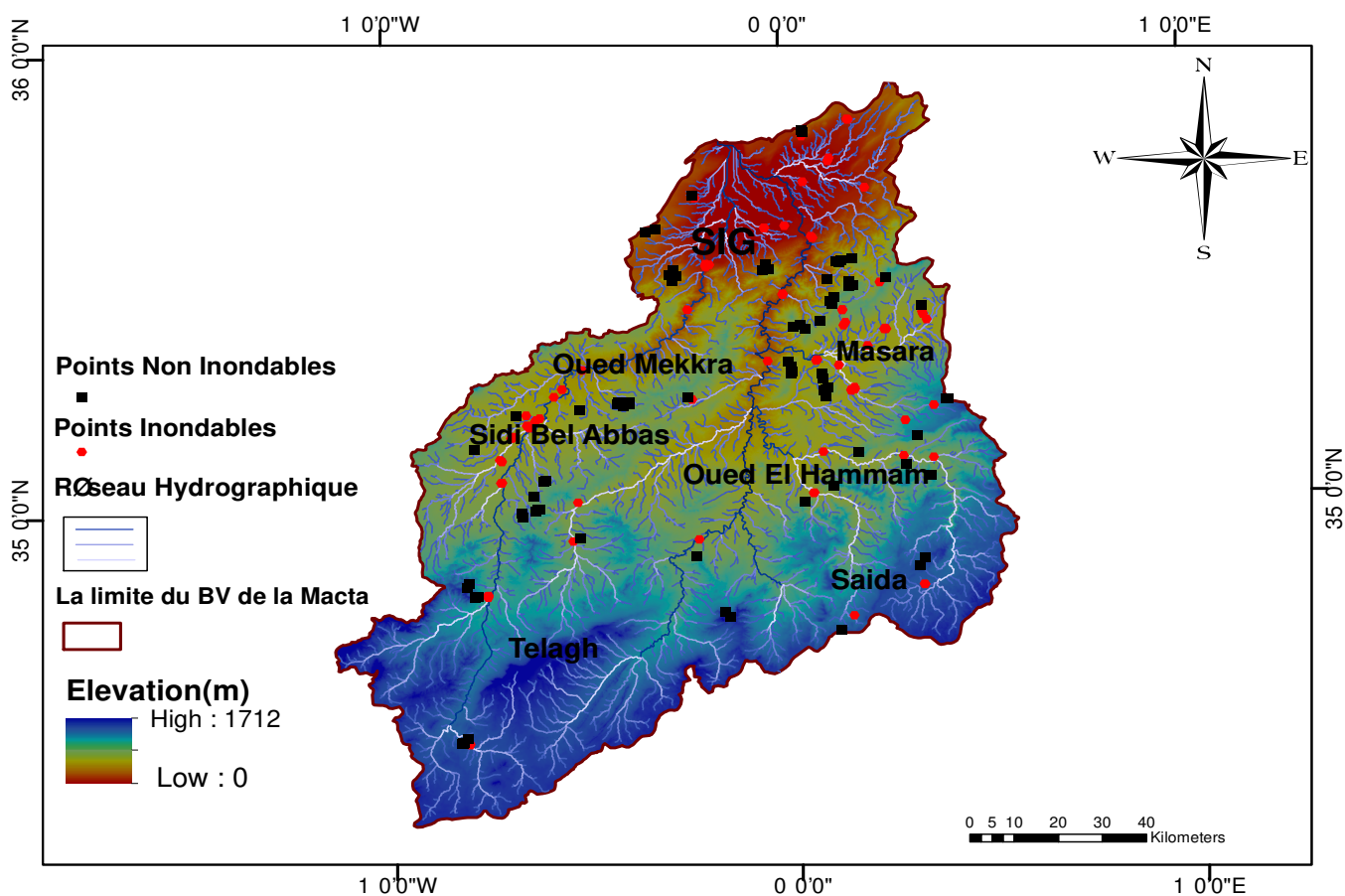


FIGURE 2.2 – Carte d'inventaire des points inondables et des point inondables

### 2.6.2 Les facteurs influant les inondations

La modélisation des inondations nécessite la caractérisation des informations géospatiales sur les propriétés hydrologiques clés de la zone d'étude. Par conséquent, une série de facteurs de conditionnement et leur relation avec les inondations doivent être étudiées pour créer des cartes de susceptibilité aux inondations, (BUI et al., 2019).

Il n'existe pas de directives universelles pour la sélection des facteurs conditionnant les inondations. La sélection des facteurs de causalité varie généralement d'un endroit à un autre en fonction de la zone d'étude et de la disponibilité des données.

Dans cette étude, onze facteurs ont été sélectionnés pour la cartographie des inondations : la pente, l'aspect de la pente, les précipitations, l'indice d'humidité topographique (TWI), l'indice de puissance des cours d'eau (SPI), l'indice de transport des sédiments (STI), l'indice de densité des cours d'eau, la couverture végétale (NDVI), l'élévation, la courbure et l'ombrage (hillshade).

Ces derniers sont déterminés à l'aide des outils de SIG et de la télédétection et ils sont définis comme suit :

#### **Pente (slope)**

La pente est définie comme un indicateur de surface qui reflète le degré de changement topographique, qui contribue directement à la vitesse de ruissellement de surface et à la percolation verticale.

La pente a été utilisée dans cette étude car l'écoulement de l'eau est entraîné par la gravité, en se déplaçant des altitudes les plus élevées vers les plus basses, (REGMI et al., 2014).

#### **Aspect**

L'aspect de la pente est défini comme la direction de la pente la plus élevée de la surface du terrain, qui est un paramètre important de susceptibilité aux inondations. Cet indice a été choisi car il est lié à la convergence et aux directions d'écoulement de l'eau, (SKILODIMOU et al., 2019).

#### **Elévation**

L'élévation est l'une des variables les plus importantes affectant les inondations telle que l'élévation identifie les gammes de points les plus bas et les plus élevés de la région.

En général, il existe une relation inverse entre la fréquence des inondations et l'élévation ; plus l'élévation diminue, plus la fréquence des inondations augmente, ce qui rend les basses élévations plus susceptibles aux inondations, (TEHRANY, PRADHAN et JEBUR, 2014) et (AL-JUAIDI, NASSAR et AL-JUAIDI, 2018).

**Couverture végétale (NDVI)**

Le NDVI est un prédicteur clé de la couverture végétale, en mesurant l'effet de fond du couvert végétal, y compris le sol, le sol humide, la neige et la rugosité de la surface, et en montrant l'état de la couverture végétale. Les crues éclair sont les plus susceptibles de se produire dans des endroits où il y a moins de végétation, (KHOSRAVI et al., 2016). Cet indice est produit à l'aide de la combinaison des bandes d'images 4 et 5 du satellite Landsat 8 OLI suivant l'équation ci-dessous :

$$NDVI = \frac{Bande5 - Bande4}{Bande5 + Bande4} \quad (2.1)$$

**Indice d'humidité topographique (TWI)**

Cet indice a été largement utilisé pour mesurer l'influence de la topographie sur les processus hydrologiques. Il est déterminé par la pente ainsi que par la quantité de surface contributive en amont par unité de largeur orthogonale à la direction de l'écoulement, (COSTACHE, 2019), et il est calculé suivant l'équation ci-dessous :

$$TWI = \ln\left(\frac{Ac}{\tan(\alpha)}\right) \quad (2.2)$$

Avec :

Ac : accumulation d'écoulement

$\alpha$  : la pente (°)

**Indice de puissance des cours d'eau (SPI)**

Cet indice mesure la puissance d'érosion de l'écoulement de l'eau sur un site topographique spécifique. La quantité d'eau apportée par les zones en amont et la vitesse d'écoulement de l'eau augmentent avec la superficie du bassin versant et la pente ; ainsi, l'indice de puissance du cours d'eau et le risque d'érosion augmentent (WANG et al., 2020). Il est calculé suivant l'équation suivantes :

$$SPI = A \ln \tan \alpha \quad (2.3)$$

Avec :

A : surface du bassin versant

$\alpha$  : la pente (°)

**Précipitations (Rainfall)**

La pluie est l'un des facteurs déclencheurs les plus importants des inondations. Ce facteur mesure directement et indirectement l'intensité des précipitations, ainsi que la capacité de captage et la production annuelle d'eau de la surface sous-jacente. Les caractéristiques des précipitations varient en fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques topographiques, ce



qui entraîne des différences temporelles et spatiales importantes lors d'un événement pluvial, (HAPUARACHCHI, WANG et PAGANO, 2011).

### **Indice d'érosion (STI)**

L'indice STI, est utilisé pour quantifier l'érosion du paysage et pour décrire le processus d'érosion et de dépôt de façon qualitative. Ce dernier prend en considération la convergence et la divergence des flux, qui influencent par la suite l'occurrence des inondations (KHOSRAVI et al., 2019).

### **Courbure**

L'analyse de la courbure du plan peut fournir des informations géomorphologiques utiles. Elle indique la morphologie de la topographie dans une zone spécifique et décrit le degré de distorsion de la surface de la pente. La courbure détermine aussi la variété topographique, y compris les formations du lit. Comme elle permet des projections de la profondeur de l'eau stagnante, elle peut être utilisée pour refléter avec précision l'accumulation et la vitesse de l'écoulement. Elle peut être calculée à partir des données du MNT, (RAHMATI, POURGHASEMI et ZEINIVAND, 2016).

### **Ombrage (hillshade)**

L'ombrage est un paramètre hydrologique typique qui influence à la fois l'intensité du flux et l'accumulation d'eau. Il a été sélectionné car il est lié à la convergence et aux directions d'écoulement de l'eau (MARTINEZ-CASASNOVAS, RAMOS et POESEN, 2004).

### **Densité des cours d'eau**

La densité des cours d'eau, est l'un des principaux facteurs de conditionnement qui contribue fortement à l'occurrence des inondations. Elle est calculée en divisant la longueur de la rivière (km) par la superficie du bassin (km<sup>2</sup>). Les régions avec une densité de cours d'eau plus élevée sont plus susceptibles d'avoir une réponse rapide aux tempêtes de pluie et sont plus enclines aux crues soudaines, (BRODY et al., 2007) et (ONUŞLUEL GÜL, 2013).

## **2.6.3 Modélisation avec l'apprentissage automatique**

Après avoir préparé les facteurs de conditionnement des inondations, une modélisation par apprentissage automatique est effectuée en utilisant plusieurs modèles, afin de déterminer le poids de chacun de ces derniers qui représente son influence sur l'occurrences des inondations.

### 2.6.4 Validation

Les résultats de prédiction obtenus par les différents modèles d'apprentissage automatique utilisés seront évalués qualitativement à l'aide de plusieurs critères objectifs, afin de trouver le modèle le plus performant, donnant les meilleurs résultats et surtout le meilleur pourcentage de précision, (BUI et al., 2019).

### 2.6.5 Génération d'une carte de susceptibilité aux inondations

La carte de susceptibilité aux inondations est le résultat de notre modélisation, elle sert à identifier les zones sujettes d'avoir une empreinte spatiale des crues. Selon la méthodologie, cette carte est produite sur la base d'une superposition des cartes des facteurs obtenus par l'application des outils d'ArcGIS en affectant à chaque facteur un poids déterminé par l'application d'un modèle d'apprentissage automatique. Par conséquent, l'influence des facteurs sur le résultat final dépend de son poids.

Enfin, cette carte est classifiée en cinq classes définissant le niveau de risque très faible, faible, modéré, élevé et très élevé.

## 2.7 Conclusion

La problématique des inondations est particulièrement complexe à gérer. La protection des agglomérations de ce type de catastrophes, susceptibles de causer tellement de dégâts autant matériels qu'humains, nécessite l'implication de plusieurs disciplines afin de déterminer les divers paramètres contribuant dans leur formation, ainsi que les solutions appropriées. Plusieurs recherches sont faites afin de développer des méthodes utiles qui servent à simuler, prévenir et estimer la probabilité d'une inondation et enfin pouvoir protéger les vies et l'environnement. Une méthodologie de travail à suivre s'avère fondamentale pour la préparation d'une carte de susceptibilité. Une description détaillée des étapes de cette dernière aura lieu dans les prochains chapitres.

## Chapitre 3

Élaboration des cartes des facteurs, influant les inondations du bassin versant de la Macta, en utilisant les systèmes d'information géographique

### 3.1 Introduction

La cartographie est définie comme un ensemble d'études et d'activités scientifiques, techniques, basées sur des observations ou une documentation de première main, dans le but de développer, d'établir et d'utiliser des cartes, des plans et d'autres formes d'expression.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter, dans la première partie, les techniques et les méthodes de cartographie des risques d'inondation, y compris un large aperçu des systèmes d'information géographique. La méthodologie d'application des systèmes d'information géographique, au sein du bassin Versant de la Macta est présentée dans la seconde partie. Dans la troisième partie, nous présentons les résultats acquis sous forme des cartes des facteurs de causalité, puis nous expliquons leurs distributions spatiales.

### 3.2 Généralités sur les systèmes d'information géographiques (SIG)

#### 3.2.1 Définition du SIG

Le SIG est un système d'information géographique qui intègre de nombreux types de données, et qui permet de collecter, gérer et analyser ces données. Il utilise des cartes et des scènes 3D pour évaluer la position spatiale et organiser des couches de données en éléments visuels.

Le SIG est aussi défini comme un ensemble de matériel informatique, de logiciels et de données géographiques utilisés pour saisir, stocker, mettre à jour, gérer, analyser et afficher tous les types d'informations à référence géographique, selon le dictionnaire de la terminologie SIG de l'Environmental Systems Research Institute.

#### 3.2.2 Objectifs et intérêts des SIG

Le SIG fournit des services qui répondent aux objectifs suivants, qui sont divisés en deux catégories :

##### **Les besoins des utilisateurs**

Un système de saisie, de sauvegarde, d'extraction, de recherche et d'affichage de données spécifiques à un endroit précis.

##### **Les exigences des décideurs**

Un ensemble de données dans l'espace disposé de telle sorte que des résumés sont utiles à la prise de décision.

De nombreuses organisations qui ont intégré l'utilisation d'un SIG ont découvert que l'un des principaux avantages est la gestion des ressources.

Le SIG permet de relier géographiquement tous les types de données, il fournit :

- Un accès plus facile aux données ;

- Des cartes thématiques qui peuvent être créées rapidement ;
- Le croisement des données provenant de plusieurs sources ;
- Un meilleur partage de l'information et une meilleure communication entre les services.

### 3.3 Application du SIG et de la télédétection dans le Bassin Versant de la Macta

Dans notre travail nous visons à réaliser une cartographie des risques d'inondation dans le Bassin Versant Mekta à partir des Système d'information géographique (SIG). Le but de ce chapitre est de déterminer les facteurs influençant les risques d'inondations dans le Bassin Versant Mekta.

La méthodologie poursuivie comporte les quatre étapes suivantes :

1. Tout d'abord, intégrer au sein d'un SIG les informations géographiques pertinentes prises à partir des images satellitaires.
2. Ensuite, employer les fonctionnalités d'ARCGIS sur les données qu'on a intégré au SIG auparavant afin de calculer les facteurs influant les inondations dans le Bassin Versant de la Macta. Les résultats seront présentés sous forme de cartes détaillées.  
Le calcul des facteurs se fait suivant des méthodes différents, citons-les ci-dessous :
  - Le réseau hydrographique a été généré automatiquement à partir du MNT en utilisant l'extension du SIG.
  - Le couvert végétal (NDVI) et les précipitations sont obtenue par le traitement des images satellitaires à l'aide d'ARCGIS.
  - Les autres facteurs tels que la pente, SPI, TWI . . .etc, sont calculés à partir des MNT.
3. Par la suite, nous avons passé à la standardisation des facteurs résultants à l'aide d'ARCGIS. Comme la standardisation est une stratégie visant à convertir les différentes entrées d'un problème de décision à une échelle commune afin de pouvoir les comparer (BELLMAN et ZADEH, 1970), nous avons standardisé les facteurs, dans notre cas d'étude, pour que leurs valeurs soient comprises entre 0 et 1 .
4. Finalement, à partir des cartes résultantes, nous avons tiré les données caractéristiques des points inondables et non inondables sous forme de tableau numérique. Ces données seront utilisées dans la prochaine étape de notre travail.

### 3.4 Résultat

#### 3.4.1 Les facteurs

A l'aide du logiciel Arcgis, nous avons élaboré les cartes des différents facteurs, la carte de variation de la pente Figure (3.1), la carte des densité des cours d'eau Figure (3.2), la carte

de variation d'élévation Figure (3.3), la carte de variation de l'aspect Figure(3.4), la carte de variation de NDVI Figure (3.5), la carte de variation de TWI Figure (3.6), la carte de variation des précipitations Figure (3.7), la carte de variation de SPI Figure (3.8), la carte de variation de la courbure Figure (3.9) et la carte de variation de l'ombrage Figure (3.10). Ces cartes peuvent fournir des informations importantes dans l'optique de mettre en oeuvre des cartes de susceptibilité.

### **La pente**

La Figure (3.1) montre que les pentes sont majoritairement dispersées de façon irrégulière sur tout le bassin versant.

Les faibles pentes se trouvent des parties extrêmes du Sud, du Nord et de l'Est de la région, qui sont principalement représentées par les plaines de Sidi Belabbès au Sud, la plaine de Ghriss à l'Est et les basses plaines côtières au Nord ( $< 7^\circ$ ). Les pentes raides se trouvent au centre du bassin versant, elles sont représentées par les massifs qui s'étendent du Sud-Ouest au Nord-Est, au Nord-Ouest et à l'Ouest représentées par les Monts de Tessala( $> 12^\circ$ ). La partie Sud-Ouest est caractérisée par des pentes modérée (de  $7$  à  $12^\circ$ ).

Les parties Sud-Est et Sud-Ouest représentent une variété des pentes telles que des pentes raides, faibles et modérées.

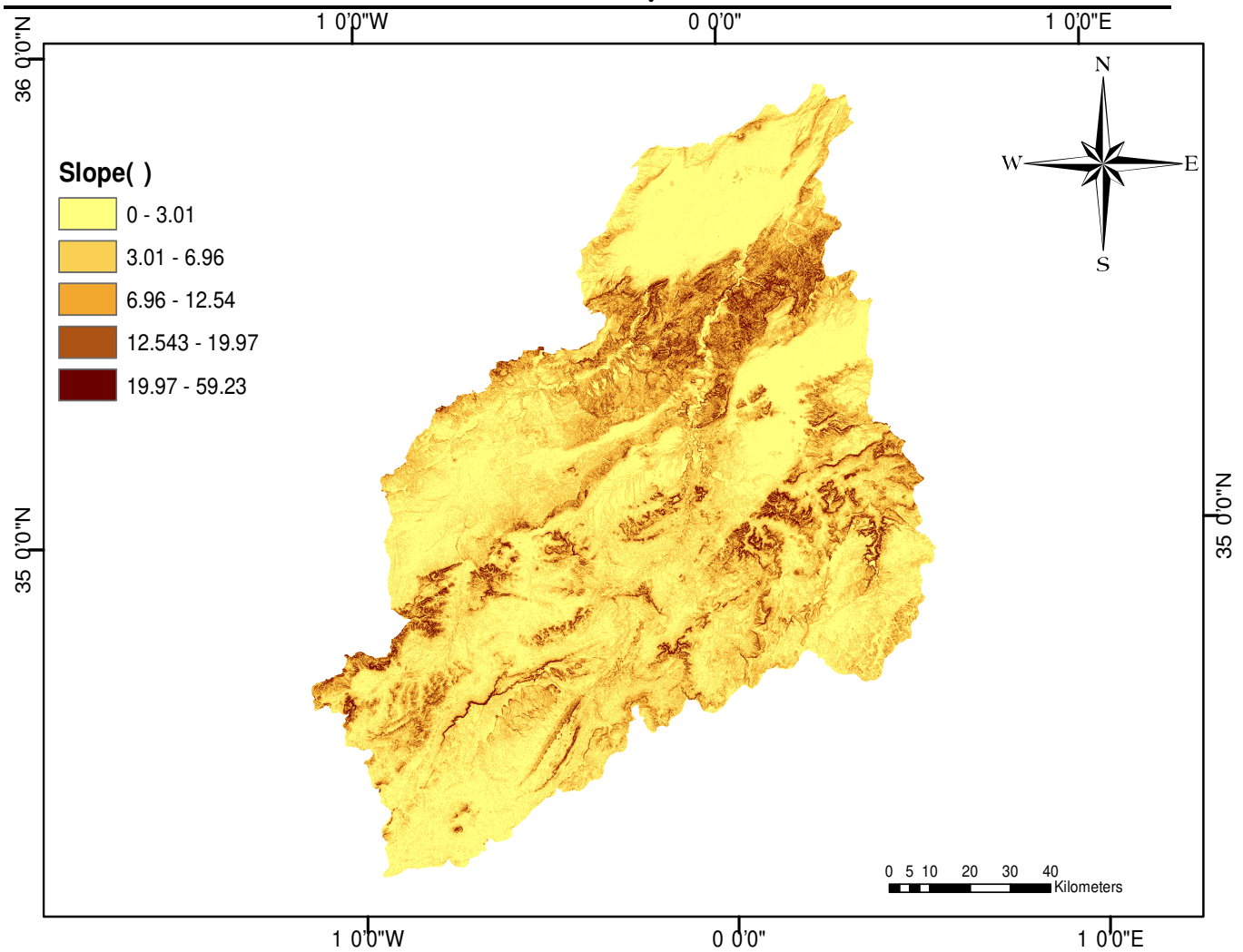


FIGURE 3.1 – La carte de variation de la pente

### Densité des cours d'eau

La Figure (3.2) indique que les valeurs de densité des cours d'eau sont élevées dans le cheminement des deux cours d'eau principaux Oued Mekkera et Oued El hammam ce qui est dû au rassemblement des affluents dans ces derniers. On remarque aussi que les valeurs de la densité des cours d'eau sont extrêmement élevées dans l'exutoire qui est le point de rassemblement des deux cours d'eaux principaux du bassin versant. Cette densité diminue au fur à mesure qu'on s'éloigne des cours d'eau jusqu'à atteindre des valeurs presque nulles.

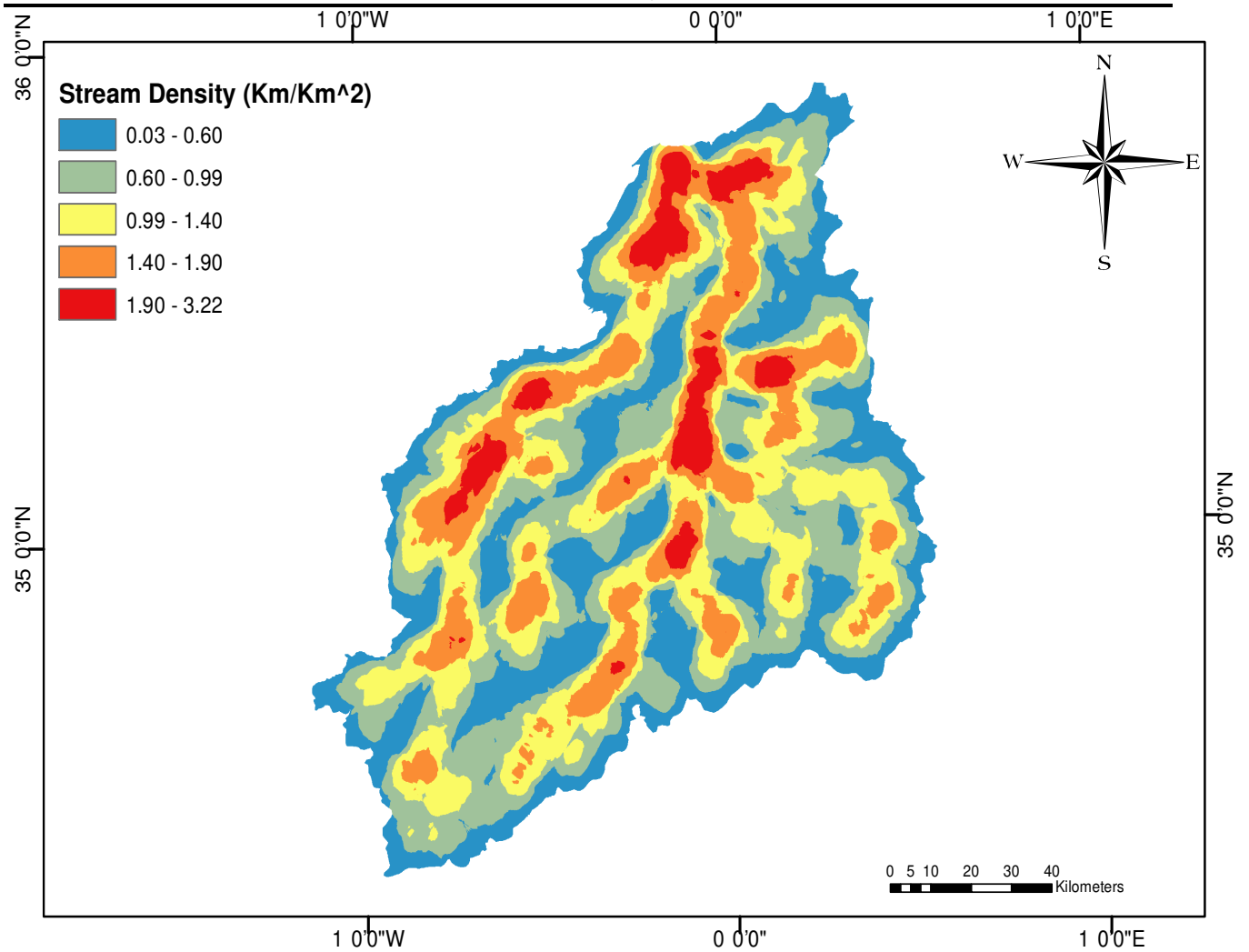


FIGURE 3.2 – Carte de variation de la densité des cours d'eau

### Elévation

La Figure (3.3) montre que la topographie de la zone est séparée en trois sections. La première section, altitude < 260 m, est située au Nord, elle se trouve dans les basses plaines littorales. La deuxième section, 260m < altitude < 700 m, est située au centre, et la troisième section, altitude >700 m, est située au Sud. Cette dernière est caractérisée par les Monts de Tlemcen (1412 m au djebel Ouargla), et les Monts Dhaya (1455 m au djebel Mezioud).



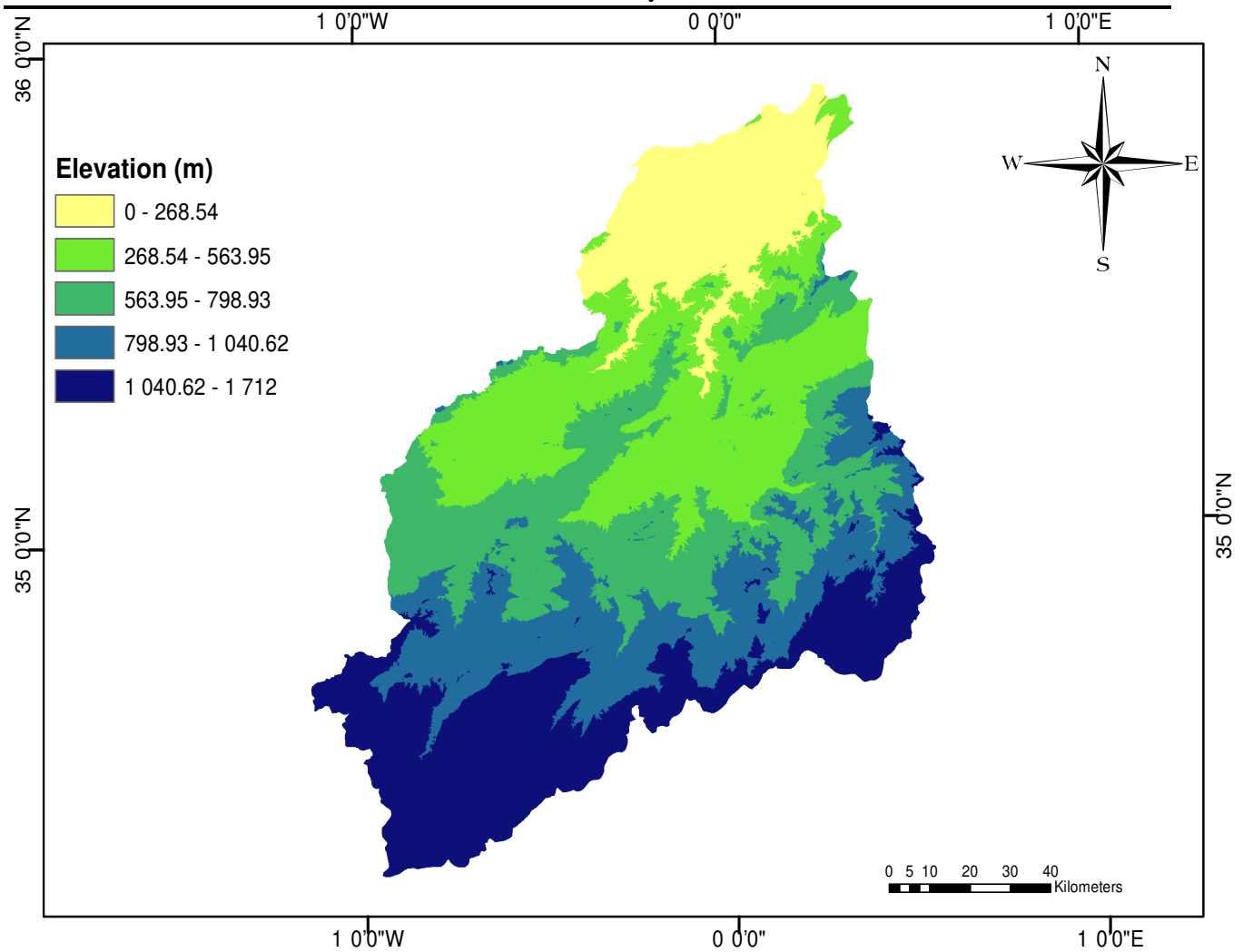


FIGURE 3.3 – La carte de variation de l'élavation

### Aspect

L'aspect qui correspond à l'orientation de la pente se distingue dans la Figure (3.4) par une palette de couleurs. Les directions de pente se présentent d'une façon irrégulière sur tout le bassin versant, autrement dit il n'y a pas une direction prépondérante dans une partie du bassin versant.

Le plateau de Telagh, les montagnes de Tessala et les montagnes de Tlemcen dans la cote Ouest du bassin versant se caractérisent par des pentes dirigées vers le Nord-Est et vers le Sud-Est. La région de la plaine de Ghriss à l'Est et le massif central du bassin versant se caractérisent majoritairement par des pentes dirigées vers le Nord-Ouest.

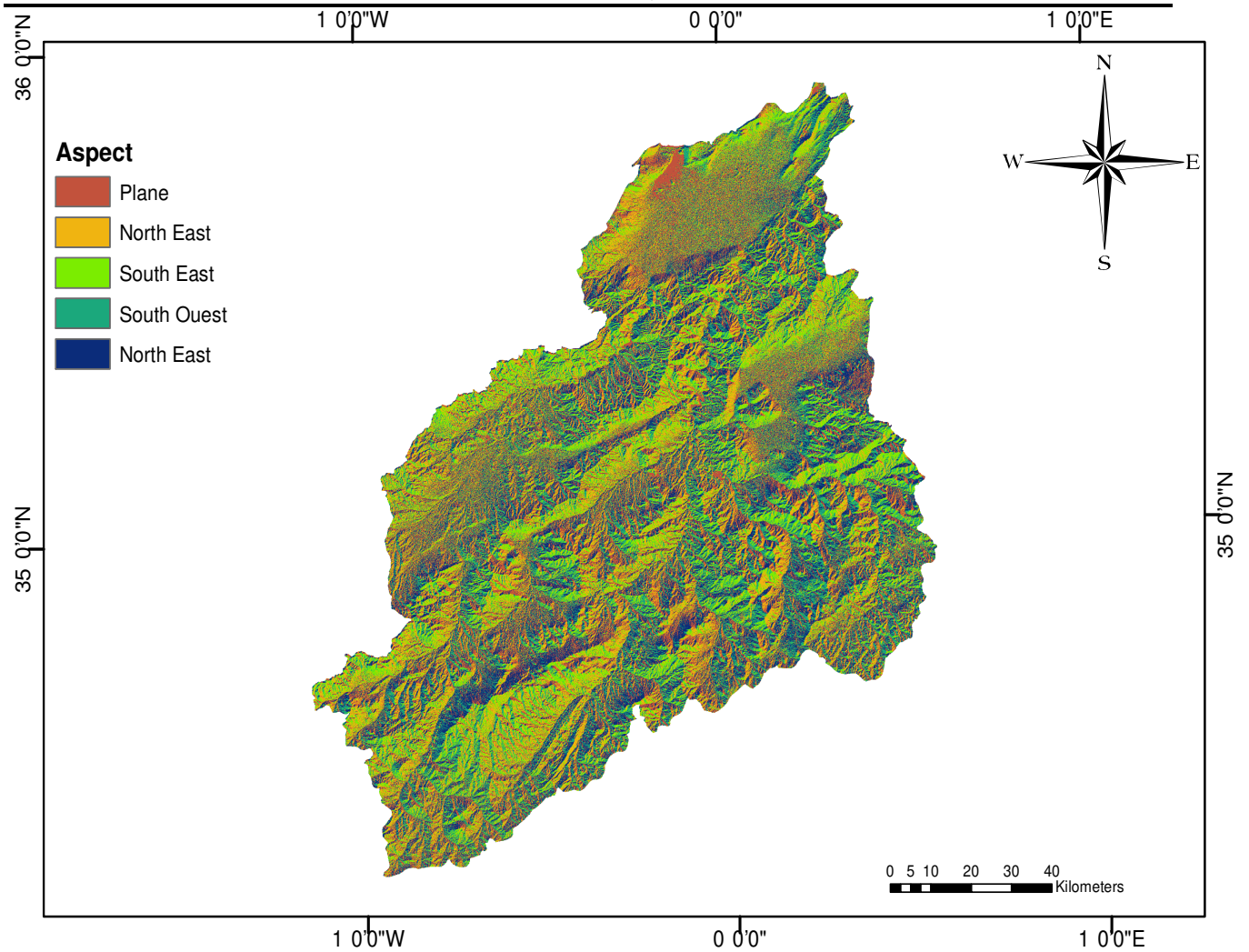


FIGURE 3.4 – La carte de variation de l'aspect

#### La couverture végétale,(NDVI)

D'après la Figure (3.5), la zone d'étude peut être divisée en trois parties principales sur la base de l'indice de végétation NDVI :

1. Une première partie avec des valeurs allant de (-0,75 à 0,18), elle représente les plans d'eau, l'urbanisation, les rochers et les sols nus, principalement au Sud et au Nord-Est de la zone où il y a une forte agglomération.
2. Une deuxième partie avec des valeurs allant de (0,18 à 0,4), elle domine plus de 80% du bassin versant, et représente les différentes cultures coréalisées.
3. Une troisième partie avec des valeurs supérieures à 0,4, elle représente généralement les zones forestières, les jardins publics et les zones agricoles, principalement au Sud-Est et au Nord-Ouest.

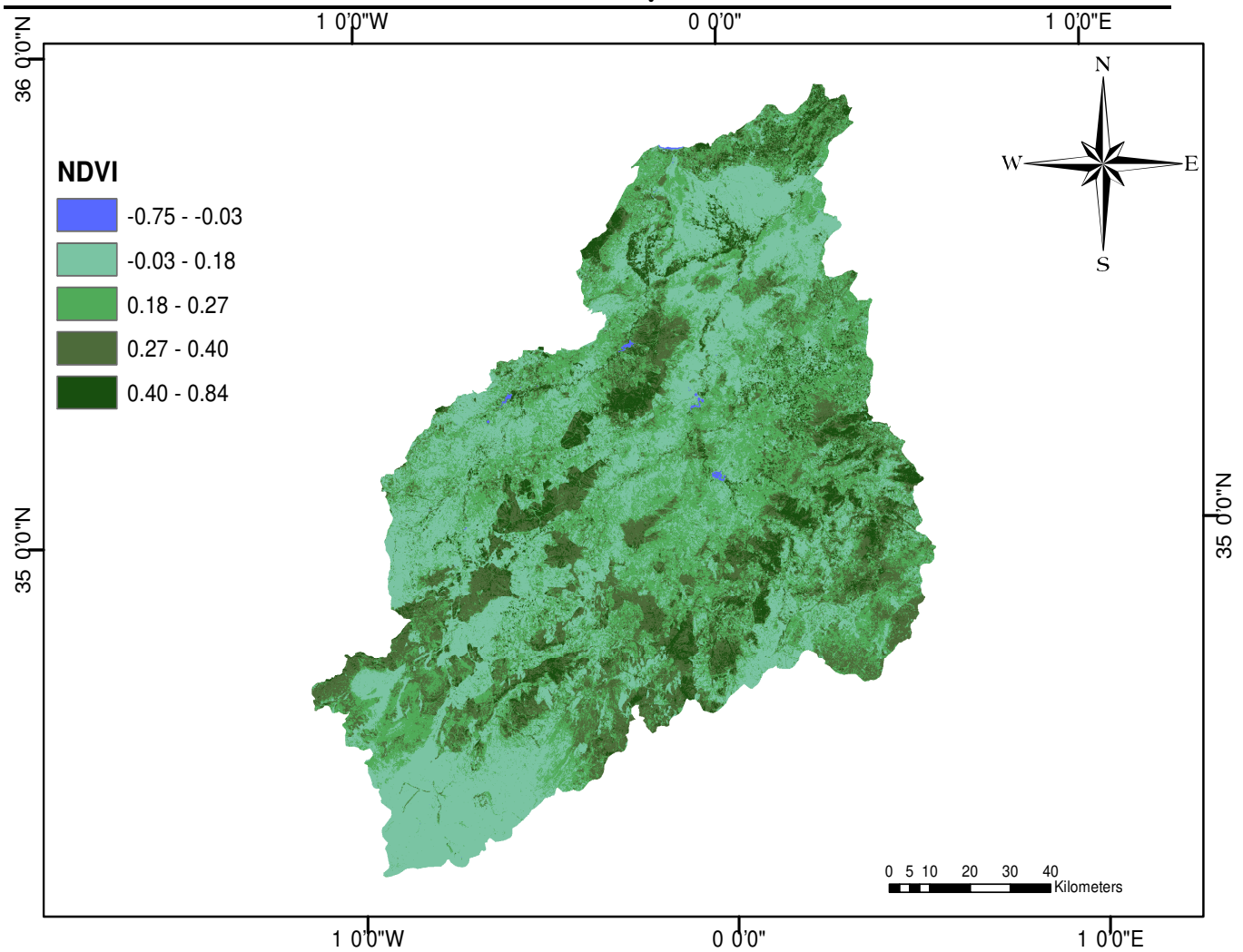


FIGURE 3.5 – La carte de variation de NDVI

### Indice d'humidité topographique, (TWI)

La figure (3.6) montre que les parties Centre et Sud-Est du bassin versant présentent des valeurs faibles de TWI, allant de (3,018 à 8,4), cela indique la présence d'une faible humidité. Les parties Nord, Sud et Sud-Ouest du bassin versant présentent des valeurs moyennes de TWI, allant de (8,4 à 10,84), cela indique la présence d'une moyenne humidité. L'exutoire et le cheminement des cours d'eau sont caractérisés par des valeurs élevées de TWI, allant de (10,84 à 25,20), cela indique une forte humidité dû à la présence de ruissellement.

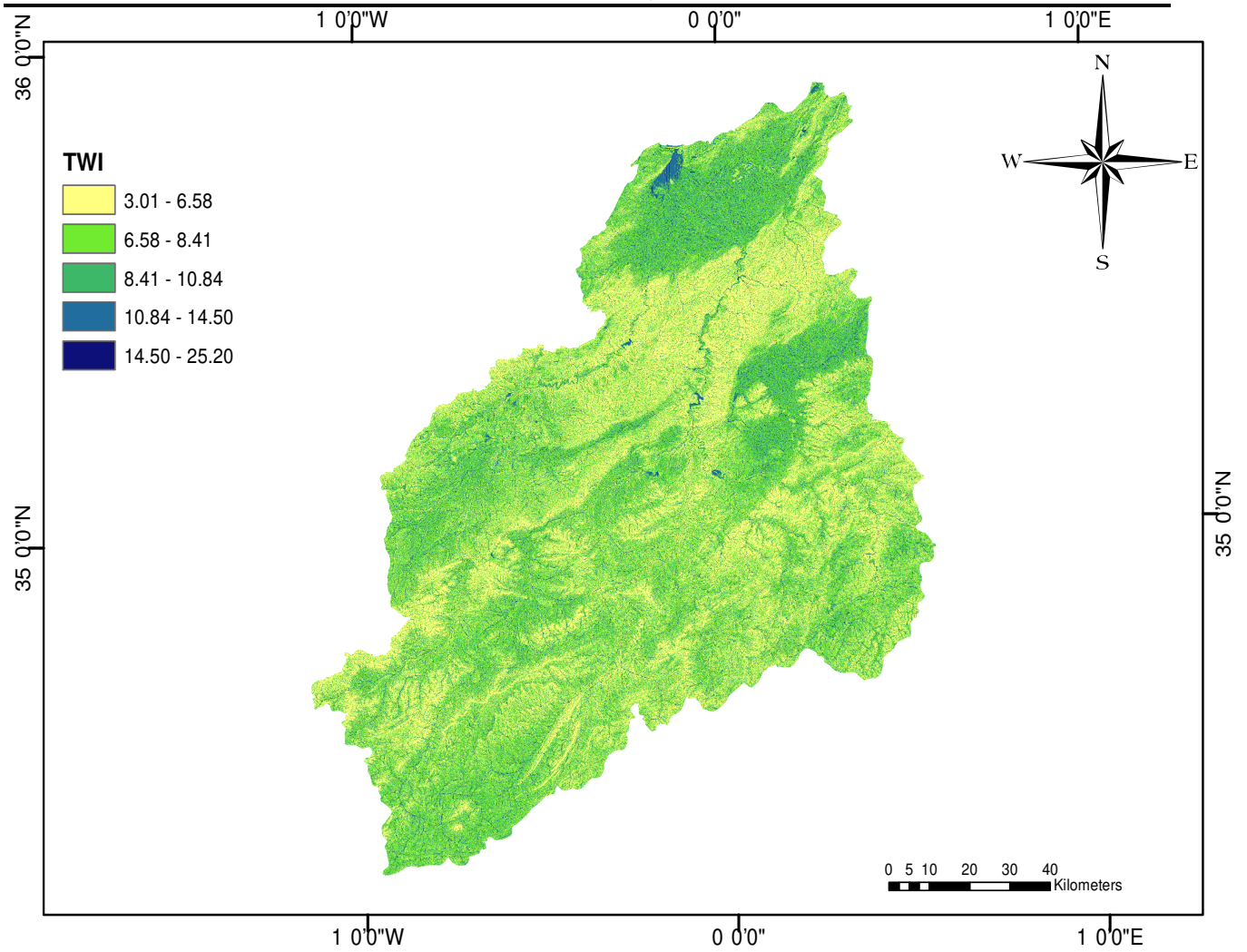


FIGURE 3.6 – La carte de variation de TWI

### Précipitations (Rainfall)

Comme l'indique la Figure (3.7), la pluviométrie moyenne se repartit en 5 paliers, avec un maximum d'environ 714 mm sur toute la partie Est du bassin versant, touchant une partie des villes (Mascara, Saida et Mostaganem) et un minimum d'environ 480 mm au Sud, Le reste du bassin versant est marqué par une pluviométrie moyenne entre 580 et 616 mm. On remarque que les précipitations diminuent en allant de l'Est vers l'Ouest, et du Nord vers le Sud.

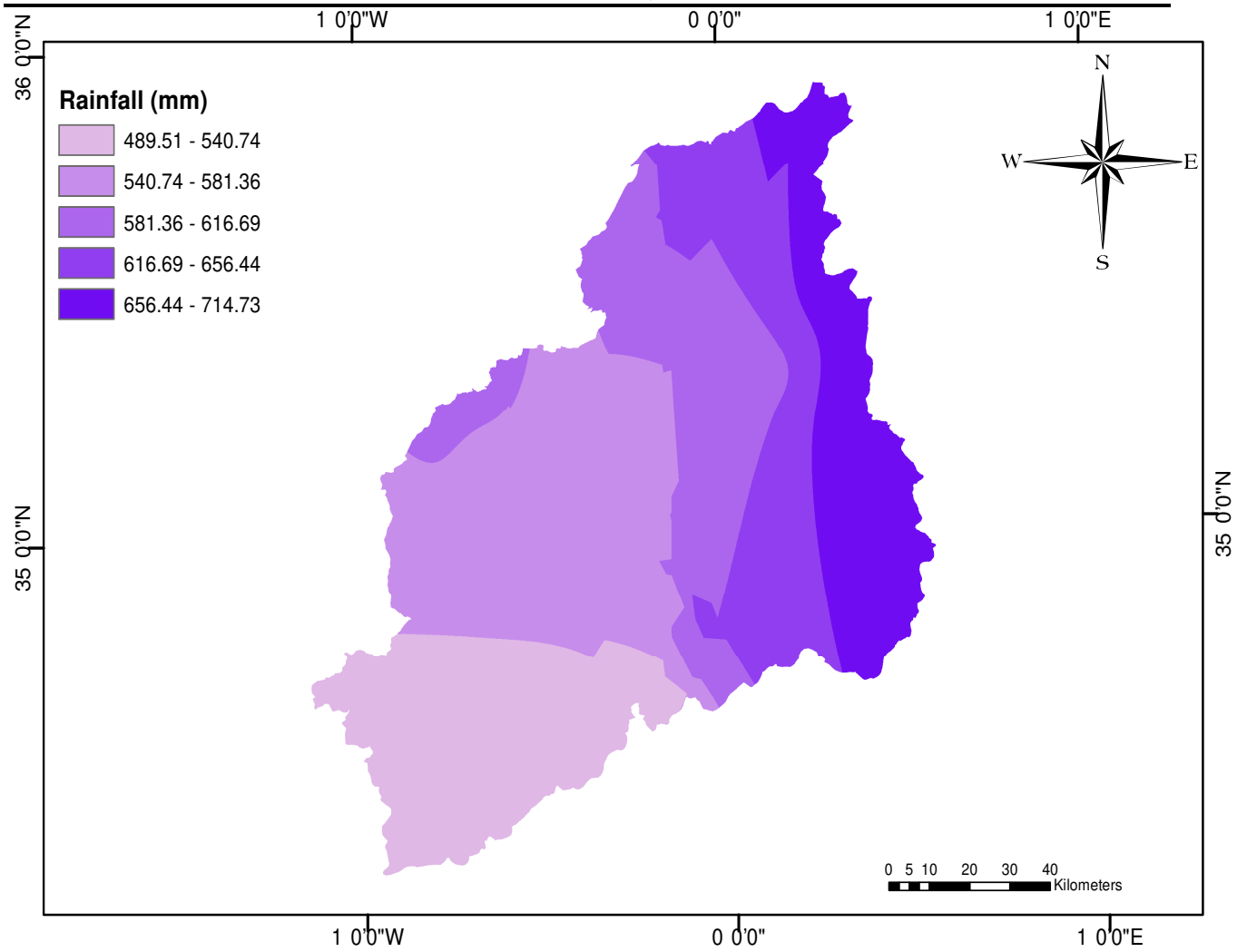


FIGURE 3.7 – La carte de variation de la pluie

### Indice de puissance des cours d'eau (SPI)

La Figure (3.8) désigne la puissance des cours d'eau. Comme on peut le repérer, les valeurs de cet indice sont notables qu'au niveau des cours d'eau or qu'ailleurs sont extrêmement faibles, voire nulles.

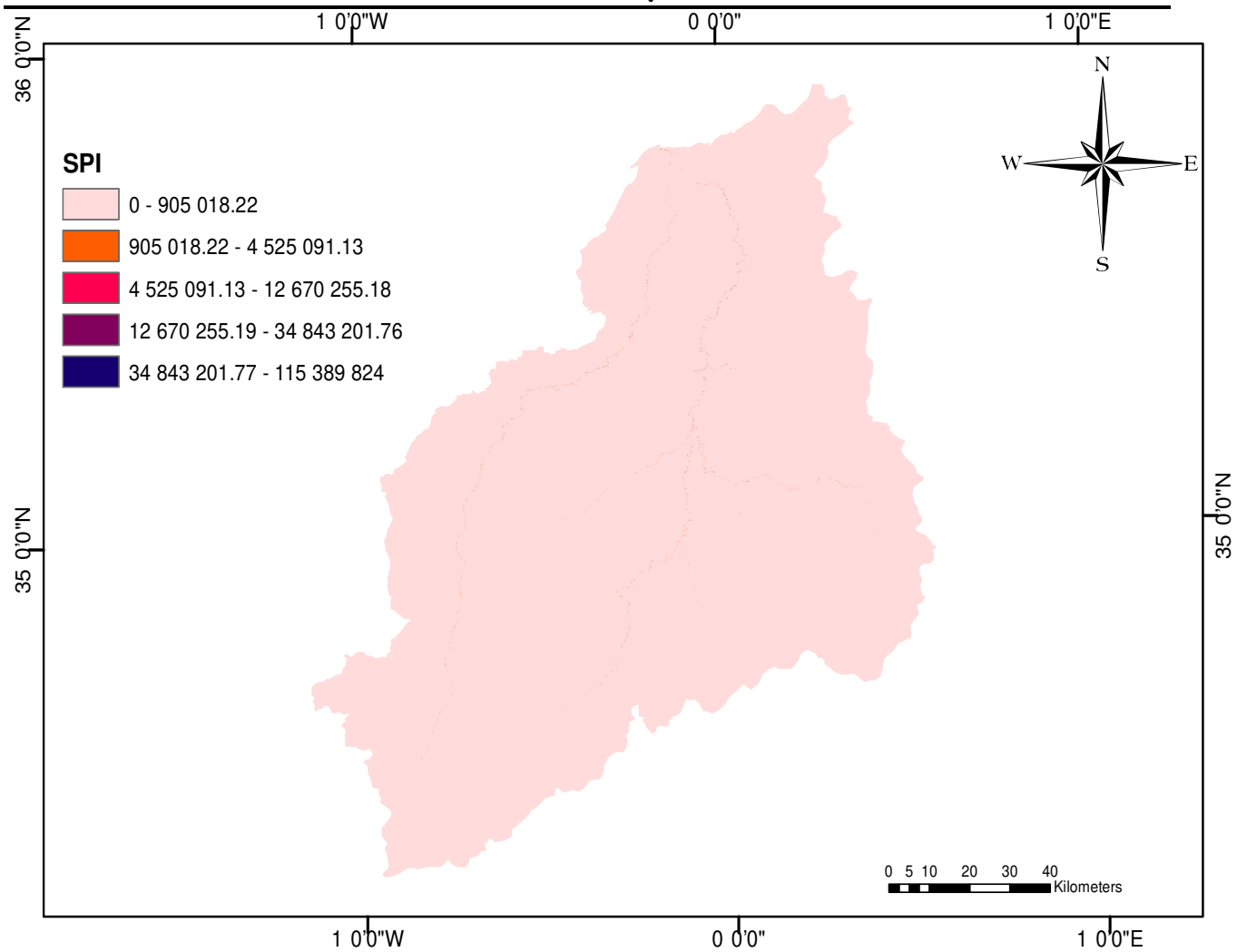


FIGURE 3.8 – La carte de variation de SPI

### Courbure

La courbure du plan est décrite dans la Figure (3.8). On constate qu'elle présente des valeurs élevées dans la partie centrale, le Sud-Est et le Sud-Ouest du bassin versant ce qui indique une variété topographique dans ces zones. Par ailleurs elle présente des valeurs faibles a nulles, à cause de l'absence de variété topographique.

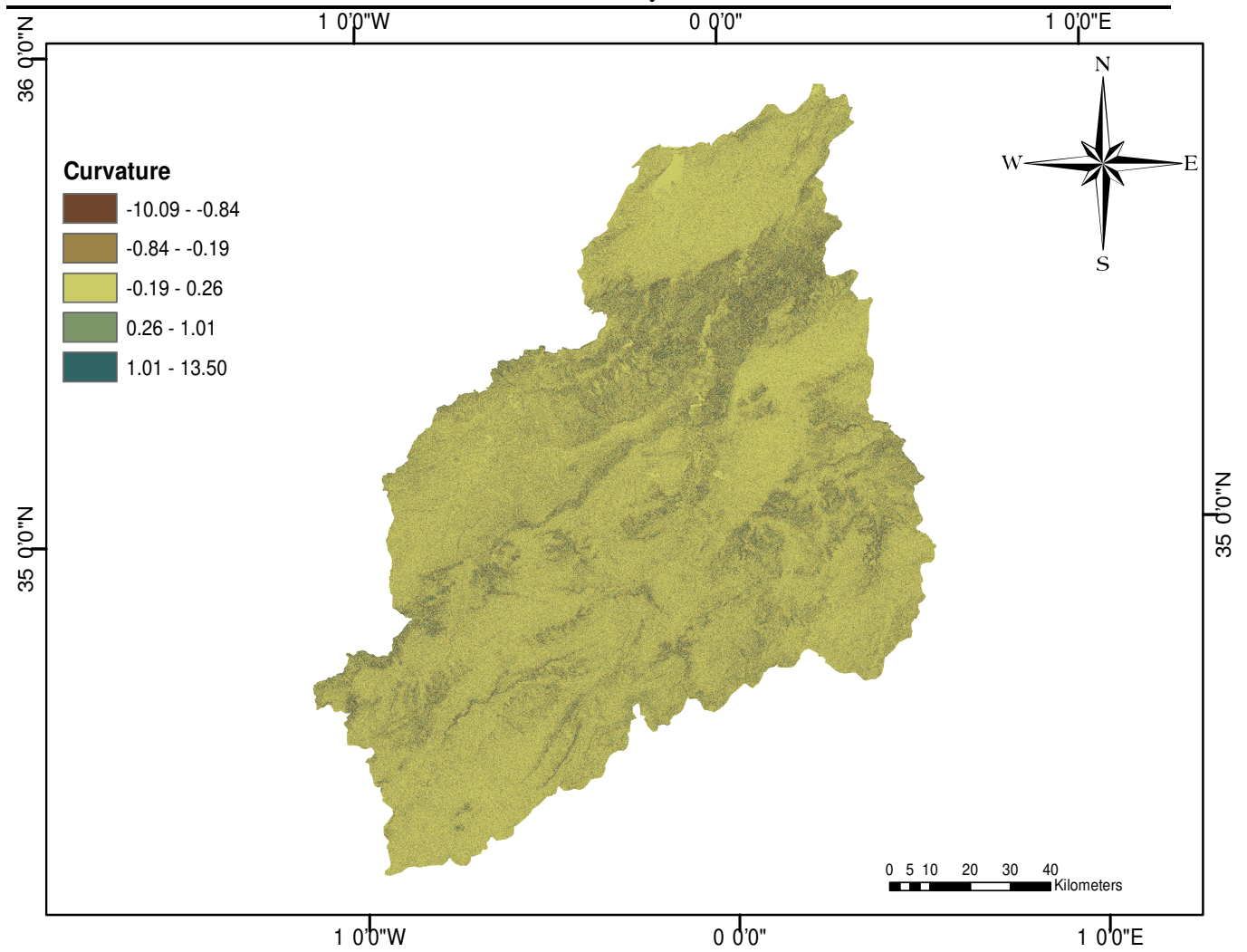


FIGURE 3.9 – La carte de variation de la courbure

### Ombrage (hillshade)

La Figure (3.10) indique l'ombrage des pentes. Comme la partie centrale, le Sud-Ouest et le Sud-Est sont caractérisées par des valeurs élevées, la convergence d'écoulement de l'eau l'est aussi.

Le reste du bassin versant est caractérisé par des valeurs d'ombrage faibles à moyennes, d'où la convergence d'écoulement de l'eau est faible dans cette partie.

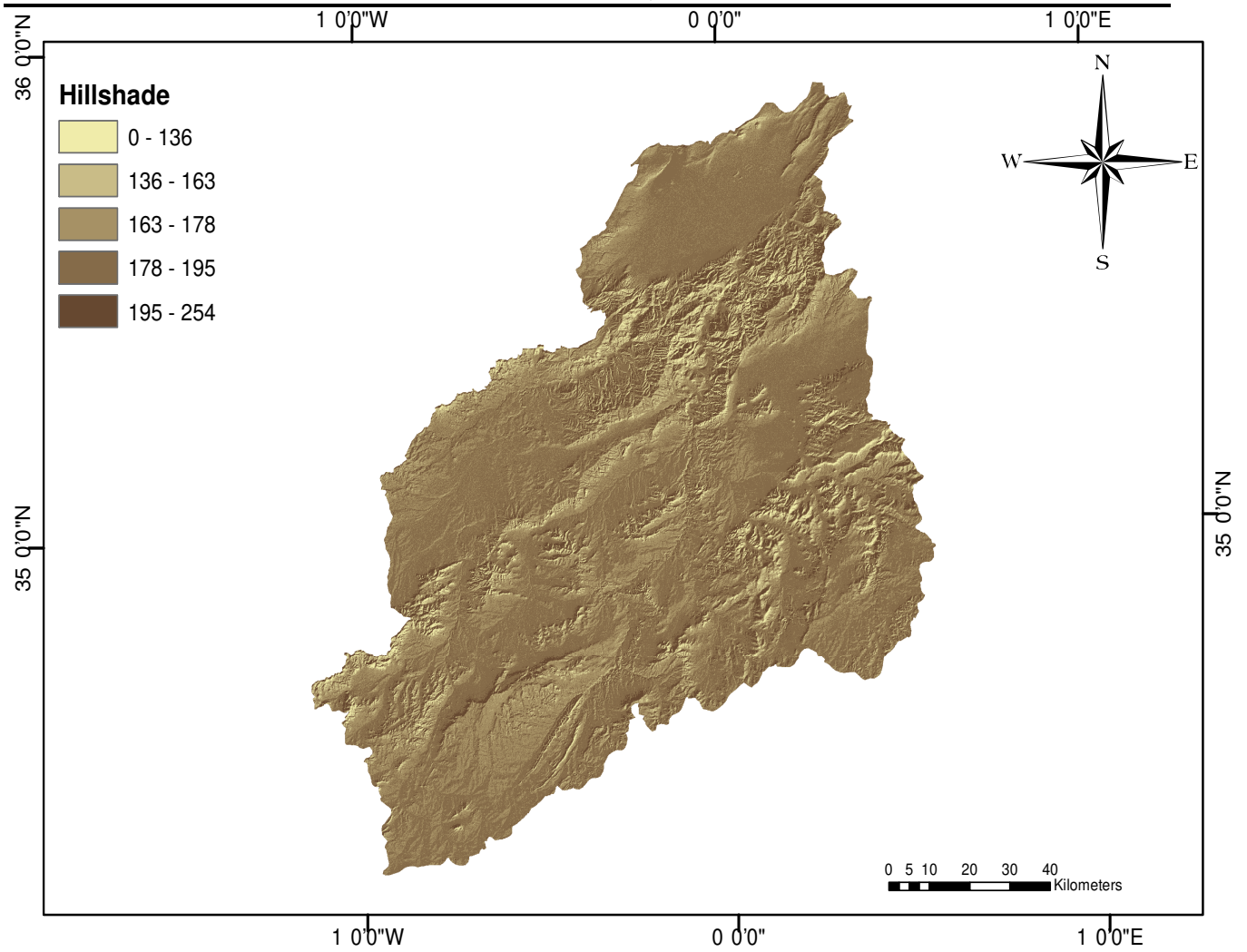


FIGURE 3.10 – La carte de variation de l’ombrage

### 3.5 Conclusion

A travers ce chapitre nous avons montré l’apport de l’application des outils du SIG dans l’élaboration des cartes des différents facteurs de conditionnement des inondations. Le but de ce chapitre est de présenter et interpréter les résultats acquis qui sont des cartes des facteurs de conditionnement. Ces cartes seront utilisées par la suite comme étant le paramètre de départ à introduire dans les modèles d’apprentissage automatique afin de générer la carte de susceptibilité aux inondations.



## Chapitre 4

# Élaboration de la carte de susceptibilité du Bassin versant de la Macta, via les modèles d'apprentissages automatiques

## 4.1 Introduction

L'apprentissage automatique est le processus de résolution d'un problème pratique par la collecte d'un ensemble de données puis la construction algorithmique d'un modèle statistique basé sur cet ensemble de données.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter, en premier temps, les outils et les stratégies d'apprentissage automatique. Ensuite, l'application des programmes et algorithmes d'apprentissage automatique, pour la préparation d'une carte de susceptibilité, est utilisée comme une première étape de gestion des inondations dans le Bassin Versant de la Macta.

Enfin, les résultats acquis des modèles d'apprentissage automatique sont présentés par la carte de susceptibilité final. Les résultats sont interprétés et la fiabilité des modèles employés est discutée à la fin de ce chapitre.

## 4.2 Définition

« L'apprentissage automatique est l'étude qui consiste à donner aux ordinateurs la capacité d'apprendre sans être explicitement enseignés », selon la définition de (SAMUEL, 2000). Autrement dit c'est le processus de programmation d'ordinateurs pour maximiser un critère de performance ou pour optimiser les paramètres d'un modèle en fonction d'une expérience antérieure ou de données d'exemple.

L'apprentissage automatique peut également être défini comme le processus de résolution d'un problème pratique par la collecte d'un ensemble de données, et la construction algorithmique d'un modèle statistique basé sur cet ensemble de données.

## 4.3 Apprentissage automatique comment ça fonctionne

L'apprentissage automatique permet aux ordinateurs d'apprendre en utilisant des modèles qui ont été formés sur des flux de données à analyser. Les algorithmes d'apprentissage automatique améliorent leurs performances au fur et à mesure de leur apprentissage.

Plus les modèles contiennent d'informations, plus ils sont précis.

Enfin, Les modèles doivent être capables de produire des résultats à partir de données qu'ils n'ont jamais traitées, une fois qu'ils ont été formés.

## 4.4 Établir un modèle d'apprentissage automatique

Les quatre processus clés du développement d'un modèle d'apprentissage automatique sont :

- D'abord, il faut choisir et organiser un ensemble de données. Ces informations seront envoyées au modèle d'apprentissage automatique, qui apprendra ensuite à résoudre le problème pour lequel il a été conçu.

- L'étape suivante consiste à choisir un algorithme à appliquer sur les données d'apprentissage extraites. Le type d'algorithme à utiliser est déterminé par deux facteurs : le type et le volume des données d'apprentissage ainsi que le problème à résoudre.
- L'algorithme doit ensuite être entraîné. Il s'agit d'un processus itératif. Des variables sont transmises à l'algorithme et les résultats sont comparés à ce que l'algorithme aurait dû produire. Pour accroître la précision du résultat, les variables peuvent être modifiées avant que l'algorithme ne soit relancé jusqu'à ce que le résultat escompté soit obtenu. Après avoir été entraîné, l'algorithme prend la forme d'un modèle d'apprentissage automatique.
- Enfin, il faut mettre le modèle au travail et l'améliorer. Le modèle est alors appliqué à de nouvelles données, dont la source est déterminée par la situation en cours. La précision du modèle peut également fluctuer dans le temps, (BROSSAULT, 2022).

La figure ( 4.1), montre ces quatre étapes d'élaboration d'un modèle d'apprentissage automatique.

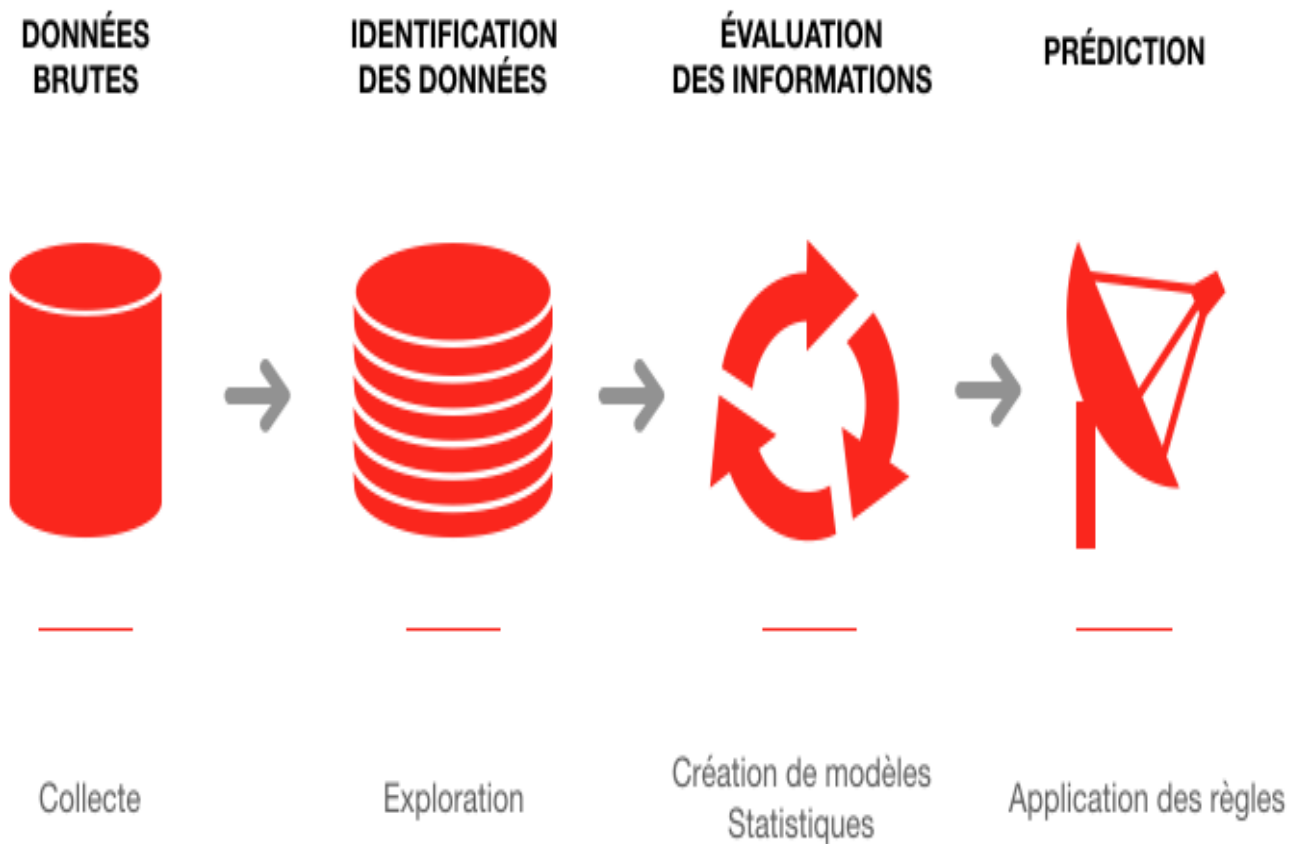


FIGURE 4.1 – Etape d'élaboration d'un modèle d'apprentissage automatique

## 4.5 Modélisation basée sur l'apprentissage automatique dans le Bassin Versant de la Macta

L'apprentissage automatique est une méthode permettant de modéliser des phénomènes afin de prendre des décisions stratégiques. Dans cette situation, la « modélisation » consiste à représenter le comportement des inondations dans le bassin versant de la Macta afin de pouvoir aider à la résolution de ce problème.

Un problème d'apprentissage automatique qui est dans notre cas la modélisation des inondations comporte plusieurs éléments spécifiques et des étapes à suivre, (Figure 4.2). Ces éléments sont :

### 4.5.1 Des données

Les données dans notre cas sont les facteurs influant les inondations résultants de la partie précédentes sous forme de tableau numérique.

### 4.5.2 Un algorithme d'apprentissage

L'algorithme d'apprentissage constitue la méthode avec laquelle le modèle statistique va se paramétrer à partir des données. Il existe de nombreux algorithmes, le type d'algorithme que nous utiliserons est déterminé par la tâche que nous voulons accomplir et le type de données dont nous disposons. On opte pour l'algorithme LightGBM combiné avec ses trois boosters DART, GOSS et GBDT qui sont des algorithmes d'apprentissage supervisé du type classification. Cet algorithme a été choisi en se basant sur une recherche bibliographique, indiquant que cet algorithme a donné de meilleurs résultats dans la résolution de problème de modélisation dans plusieurs domaines comme la médecine, la biologie et les finances. (SHAKER et al., 2021) et (WANG, ZHANG et ZHAO, 2017), (CHEN et al., 2019), et (SUN, LIU et SIMA, 2020), respectivement.

LightGBM est un nouvel algorithme, qui a été utilisé dans de nombreux types de tâches d'exploration de données, telles que la classification, la régression et l'ordonnancement. Il met en œuvre un algorithme d'apprentissage d'arbre de décision basé sur un histogramme hautement optimisé, qui présente de grands avantages en termes d'efficacité et de consommation de mémoire, le cadre LightGBM prend en charge différents boosters, notamment GBDT, GOSS et DART ; (KE et al., 2017) et (SHAKER et al., 2021).

On procède donc à expliquer et comparer ces méthodes entre elles :

#### LightGBM GBDT (Gradient Boosted Decision Trees)

Cet algorithme est le traditionnel arbre de décision de Gradient Boosting. De nos jours, le GBDT est largement utilisé en raison de sa précision, de son efficacité et de sa stabilité. GBDT est un modèle d'ensemble d'arbres de décision, Il repose sur trois principes importants :

- Les apprenants faibles (arbres de décision)
- Optimisation du gradient
- Technique de boosting

Ainsi, dans la méthode GBDT, nous avons un grand nombre d'arbres de décision (apprenants faibles), Ces arbres sont construits de manière séquentielle :le premier arbre apprend à s'adapter à la variable cible. Le deuxième arbre apprend à s'adapter au résidu (différence) entre les prédictions du premier arbre et la vérité terrain, et le troisième arbre apprend à ajuster les résidus du deuxième arbre et ainsi de suite.

#### **LightGBM DART (Dropouts meet Multiple Additive Regression Trees)**

Le booster DART, est une méthode qui utilise le dropout, standard dans les réseaux neuronaux, pour améliorer la régularisation du modèle et traiter certains autres problèmes moins évidents rencontrés lors de l'application de GBDT.

En effet, GBDT souffre de surspécialisation, ce qui signifie que les arbres ajoutés lors d'itérations ultérieures ont tendance à n'avoir un impact sur la prédiction que de quelques instances et à apporter une contribution négligeable aux instances restantes. L'ajout de dropout rend plus difficile pour les arbres des itérations ultérieures de se spécialiser sur ces quelques échantillons et donc améliore les performances.

#### **LightGBM GOSS (Gradient-based One-Side Sampling)**

Goss est l'implémentation la plus récente et la plus légère de gbdt.

Le GBDT standard est fiable mais il n'est pas assez rapide sur les grands ensembles de données. Goss propose donc une méthode d'échantillonnage basée sur le gradient pour éviter de chercher dans tout l'espace de recherche. Pour chaque instance de données, lorsque le gradient est faible, cela signifie qu'aucune donnée n'est bien formée et lorsque le gradient est élevé, il faut procéder à un nouvel apprentissage. Nous avons donc deux côtés, des instances de données avec de grands et de petits gradients. Ainsi, GOSS conserve toutes les données à gradient élevé et effectue un échantillonnage aléatoire (c'est pourquoi il est appelé One-SideSampling) sur les données à faible gradient.

### **4.5.3 Une mesure des performances et validation**

La seule façon de vérifier l'efficacité de la généralisation d'un modèle à de nouvelles instances est de le mettre à l'épreuve. Tel que la mise en production du modèle et le suivi de ses performances, et enfin la validation du modèle pour évaluer le résultat prédictif. Pour notre étude, on utilise :

#### **la courbe ROC et le Paramètre AUC :**

- La courbe ROC (receiver operating characteristic), également appelée courbe caractéristique de performance, est un graphique qui représente la performance d'un modèle de clas-

sification. C'est-à-dire un système visant à classer des éléments dans deux catégories distinctes en fonction d'une ou plusieurs propriétés de ces éléments. Dans notre étude, nous représentons les pixels positifs (inondation) et négatifs (non inondation) qui sont précisément triés en classes positives et négatives qui sont appelés vrais positifs, vrais négatifs, faux positifs et faux négatifs, en terme de graphe cette courbe ROC nous présente le taux des vrais positifs (Sensibilité) en fonction du taux des faux positifs (Spécificité) (SAJEDI-HOSSEINI et al., 2018). Les taux des vrais positifs et des vrais négatifs sont calculé par les formules suivante :

Le taux des Vrais positifs :

$$TVP = \frac{VP}{VP + FN} \quad (4.1)$$

Le taux des faux positifs :

$$TFP = \frac{VN}{VN + FP} \quad (4.2)$$

Avec :

VP : vrai positif (La valeur réelle était positive et le modèle la prédit une valeur positive).

FP : faux positif (La valeur réelle était positive et le modèle la prédit une valeur négative).

VN : vrai négatif (La valeur réelle était négative et le modèle la prédit une valeur négative).

FN : faux négatif (La valeur réelle était négative et le modèle la prédit une valeur positive).

- Le paramètre AUC est un indice qui sert à évaluer la performance globale du modèle lors de la classification de données, ce paramètre qui reflète l'air sous la courbe ROC est donné selon la formule suivantes :

$$AUC = \frac{VN + VP}{P + N} \quad (4.3)$$

avec :

P : les points positifs (inondable).

N : les points négatifs (non inondable).

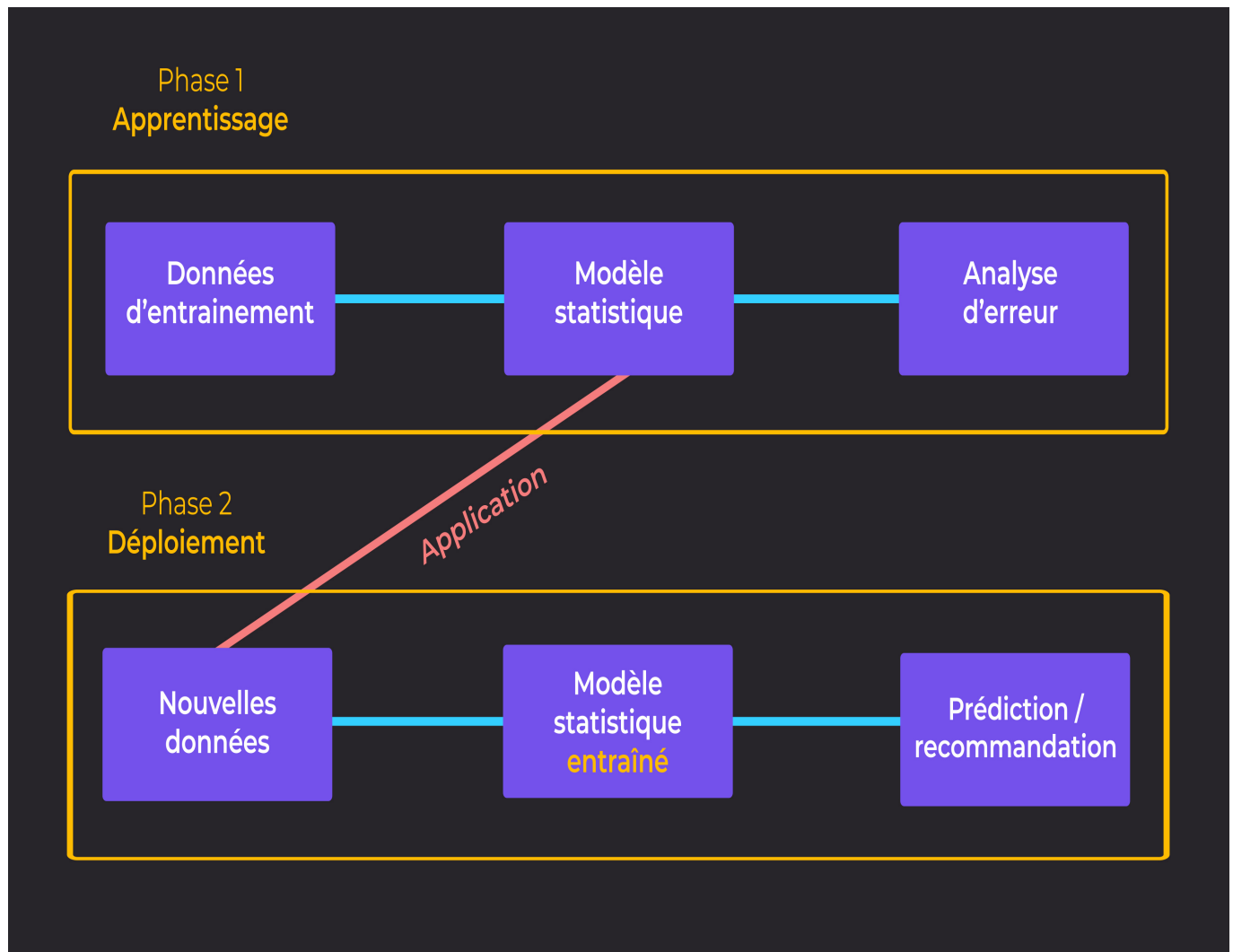


FIGURE 4.2 – Les phase d'apprentissage automatique

## 4.6 Les étapes de modélisation

### 4.6.1 Introduire les données

Tout d'abord, nous rassemblons les données qui sont, dans ce cas, les facteurs influant les inondations sous une forme consolidée, afin qu'elles soient toutes contenues dans un seul tableau. Puis, nous procédons au prétraitement de ces données et à l'élimination des valeurs nulles....etc. Un modèle d'apprentissage réussi nécessite avant tout de bonnes données.

### 4.6.2 Extraction de la matrice de corrélation

Trouver les liens entre les données d'entraînement (facteurs influant les inondations) nous permettent de voir si un facteur donné est directement dépendant d'un autre, cela exprime le

degré de corrélation entre les différents facteurs. Par la suite, nous éliminons l'un des facteurs fortement corrélé car ces derniers auront la même influence.

### 4.6.3 Division des données (apprentissage, validation)

Dans cette étape, on procède à diviser les données en deux ensembles :

- Les données d'apprentissage qui serviront à entraîner les algorithmes choisis.
- Les données de validation qui seront utilisées pour vérifier la performance du résultat.

En général, d'après plusieurs articles dans la cartographie des inondations, 70 % des données sont utilisées pour l'apprentissage et 30 pourcent sont conservées pour la validation, (TEHRANY et al., 2015) et (COSTACHE, 2019).

### 4.6.4 Application des modèles choisis

Dans cette étape on procède à appliquer les algorithmes choisis auparavant. Ceci se fait en introduisant les données requis par application des outils du SIG sous format numérique consolidée pour que les algorithmes apprennent (phase d'apprentissage), puis on les laisse interpréter le reste des résultats (phase de validation), ainsi interpréter d'autres paramètres tels que le poids des facteurs.

### 4.6.5 Validation

La deuxième composante des données qui est l'ensemble de données de validation, est utilisée dans cette phase de validation. Ce sous-ensembles de données affinent le modèle en introduisant des données que l'ordinateur n'a pas rencontré pendant la phase de l'apprentissage. Cela permet d'évaluer la performance du modèle dans la cartographie des inondations. Les modèles utilisés seront validés par la courbe ROC et par le paramètre AUC.

Les résultats pourront servir d'aide à la décision dans l'élaboration des futurs documents d'urbanisme ou, plus largement dans l'optimisation des projets urbains ou territoriaux des villes de ce bassin versant.

## 4.7 Résultats et discussion

### 4.7.1 Matrice de corrélation

Une matrice de corrélation est un tableau contenant des coefficients de corrélation entre des variables, dans notre cas ces variables sont les facteurs de conditionnement des inondations. Cette matrice est utilisée pour évaluer la dépendance entre les différents facteurs de conditionnement en même temps, tel que chaque cellule représente une valeur de corrélation qui est le degré de dépendance entre deux facteurs de conditionnement, cette valeur est comprise entre



-1 et 1 Dans notre étude, la matrice de corrélation obtenue en employant nos modèles d'apprentissage automatique révèlent que les facteurs SPI et STI(Sediment Transport Index) sont fortement corrélés, (Figure (4.3)) d'où pour la suite , seul le facteur SPI est utilisé or que le facteur STI est éliminé.

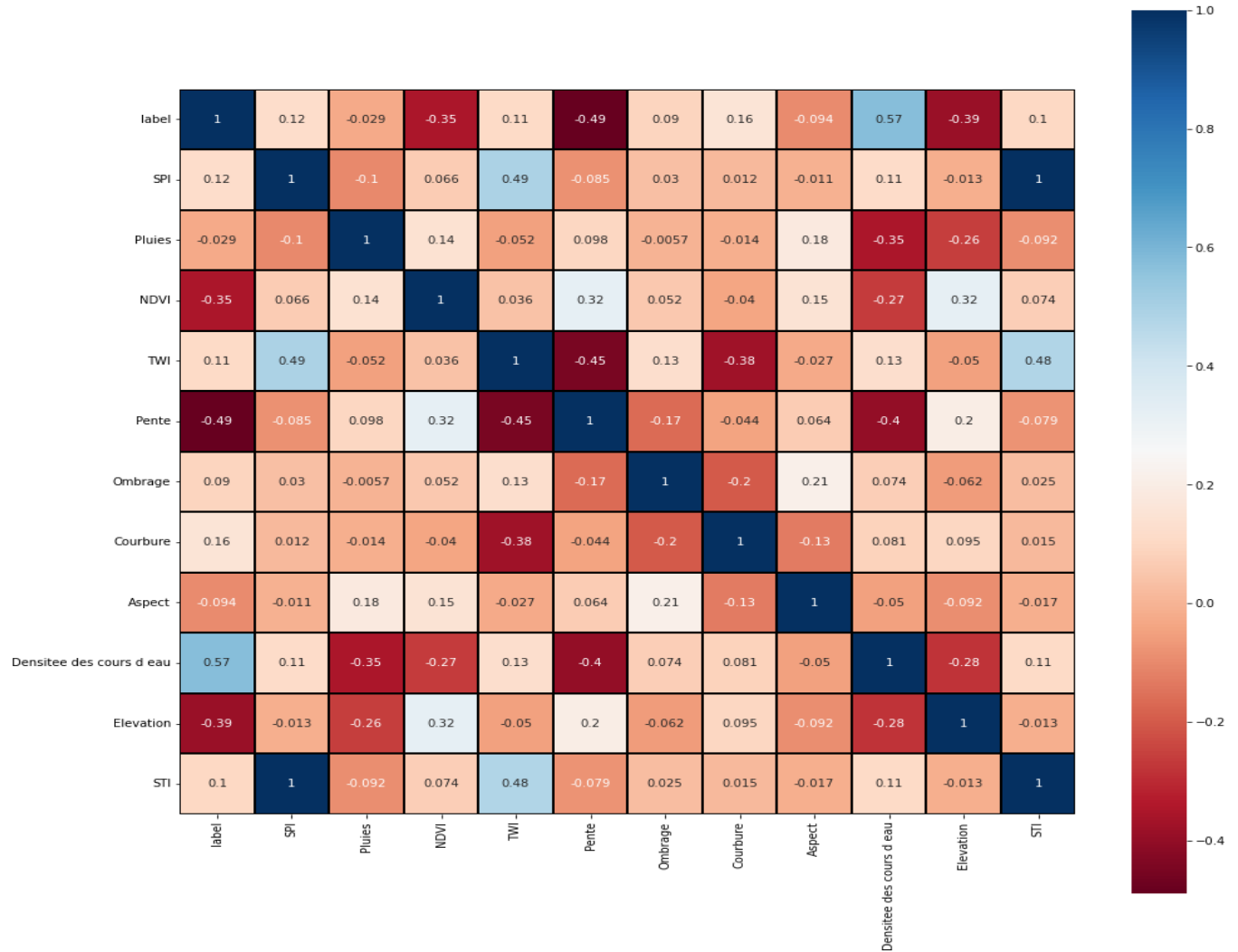


FIGURE 4.3 – Matrice de corrélation

#### 4.7.2 L'importance des facteurs

Les modèles d'apprentissage automatique ont l'aptitude de fournir des estimations sur l'importance des facteurs, ce qui est l'une de leurs caractéristiques les plus utiles. Dans notre cas on a opté pour le modèle LightGBM avec ces 3 boosters : GOSS, DART et GBDT.

- Pour le modèle LightGBM avec le booster de GOSS, les paramètres les plus critiques étaient respectivement l'élévation, la densité des cours d'eau, la pente et les précipitations, suivis par le SPI, NDVI, l'ombrage, la courbure, l'aspect, et le TWI.
- Les éléments les plus pertinents selon le booster de DART étaient respectivement la

densité des cours d'eau, les précipitations, la pente et l'élévation suivis par l'ombrage puis le SPI, le NDVI et l'aspect qui ont le même pourcentage d'importances d'où la même influence sur l'occurrence des inondations dans notre bassin versant. Enfin le TWI et la courbure étaient les paramètres les moins pertinents.

- Pour le booster GBDT du modèle LightGBM, les facteurs, élévation, densité des cours d'eau, la pente et les précipitations viennent en premier comme étant les plus importants, suivis par NDVI, TWI, et l'ombrage qui ont le même pourcentage d'importances, d'où la même influence sur l'occurrence des inondations dans notre bassin versant. En dernier, viennent l'aspect, la courbure et le SPI, avec un pourcentage nul, donc ils n'ont pas d'influence sur l'occurrence des inondations dans notre bassin versant.

En conclusion, des similitudes importantes peuvent être observées dans les classements de pertinence des trois modèles.

Le tableau 4.1 indique le classement des différents facteurs, selon le modèle LightGBM avec ses trois boosters.

TABLE 4.1 – L'ordre d'importance des facteurs

Classe	DART	GOSS	GBDT
1	Élévation	Densité des cours d'eau	Élévation
2	Densité des cours d'eau	Précipitations	Densité des cours d'eau
3	Pente	Pente	Pente
4	Précipitations	Élévation	Précipitations
5	SPI	Ombrage	NDVI
6	NDVI	SPI	TWI
7	Ombrage	NDVI	Ombrage
8	Courbure	Aspect	Aspect
9	Aspect	TWI	SPI
10	TWI	Courbure	Courbure

### 4.7.3 Validation

Dans l'analyse de susceptibilité aux inondations, il est important de localiser les zones susceptibles d'être affectées par des futures inondations. Quelle que soit la méthode utilisée pour la validation, il est important de valider les cartes de susceptibilité aux inondations futures inconnues, (AL-JUAIDI, NASSAR et AL-JUAIDI, 2018).

La validation des prédictions des modèles a été effectuée en utilisant la valeur AUC de la courbe ROC (receiver operating characteristics). La courbe ROC évalue la précision de prédiction de chaque modèle en traçant les valeurs observées et prédites.

La méthode ROC calcule les taux de réussite de prédiction de la carte de susceptibilité aux inondations en fonction des données sur les événements d'inondation précédents. L'AUC du ROC illustre l'exactitude d'un modèle de prédiction en déterminant la capacité de la technique à calculer l'occurrence et la non-occurrence d'une inondation à partir de données historiques et de

zones prédéfinies, (POURTAGHI et POURGHASEMI, 2014). L'AUC est aussi utilisée pour évaluer qualitativement la précision de la prédiction de la susceptibilité aux inondations (PRADHAN, 2010).

Les résultats de la courbe ROC montrés dans les figures (4.4), (4.5) et (4.6) ont indiqué que le modèle LighGBM combiné avec le booster GBDT avait la plus grande précision de prédiction (AUC = 0,95) (Figure 4.4), suivi par le modèle LighGBM combiné avec le booster DART (AUC = 0,94) (Figure 4.5), et enfin le modèle LighGBM combiné avec le booster GOSS (AUC = 0,88) (Figure 4.6).

L'analyse des valeurs AUC a montré que le modèle LighGBM combiné avec le booster GBDT était plus performant que les autres.

La relation entre l'AUC et les précisions de prédiction de la carte de susceptibilité aux inondations peut être décrite dans les catégories suivantes : 0,6-0,7 (moyenne), 0,7-0,8 (bonne), 0,8-0,9 (très bonne) et 0,9-1,0 (excellente), (AL-JUAIDI, NASSAR et AL-JUAIDI, 2018).

Par conséquent la précision de la prédiction du modèle LighGBM combiné avec le booster GOSS est très bonne, tandis que les précisions de la prédiction du modèle LighGBM combiné avec les booster DART et GBDT sont excellentes.

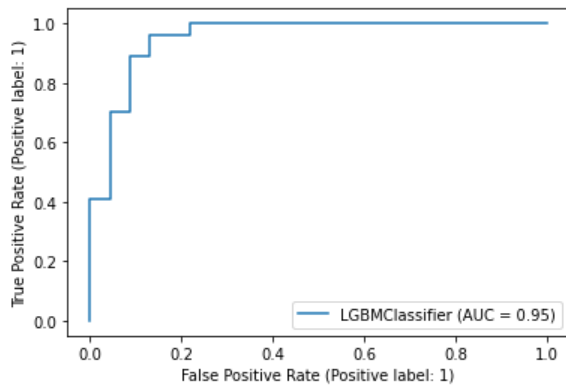


FIGURE 4.4 – La Courbe ROC avec le modèle LGBM GBDT

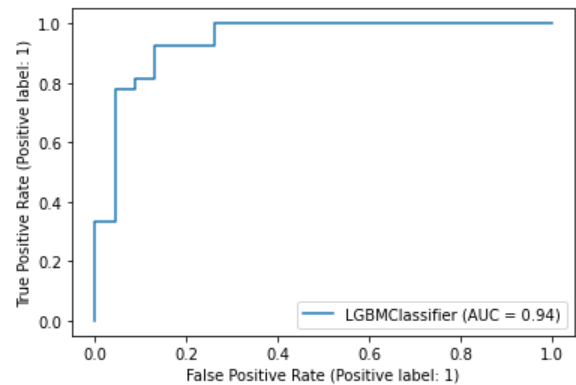


FIGURE 4.5 – La Courbe ROC avec le modèle LGBM DART

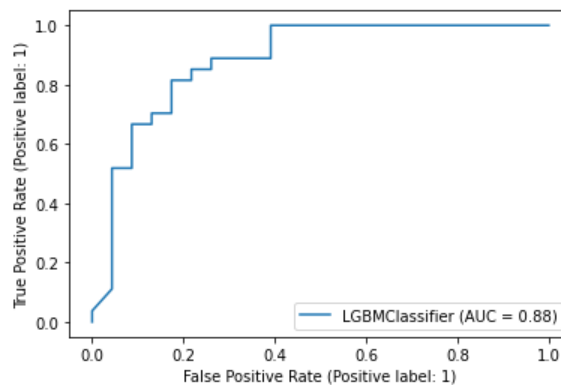


FIGURE 4.6 – La Courbe ROC avec le modèle LGBM GOSS

#### 4.7.4 Elaboration de la carte de susceptibilité

D'après la Figure (4.7) présentée ci-dessous, qui a été obtenue en utilisant le modèle LightGBM avec le booster de GOSS, la zone présente cinq classes de susceptibilité. Elles sont divisées comme suit : susceptibilité très faible, faible, modérée, élevée et très élevée. Les deux premières classes (très faible et faible) représentent, respectivement 13,9% et 21,3% de la surface totale, alors que les trois classes restantes (modérée, élevée et très élevée) représentent, respectivement, 24,9 %, 24,6 % et 15,2 % de la surface totale de la zone.

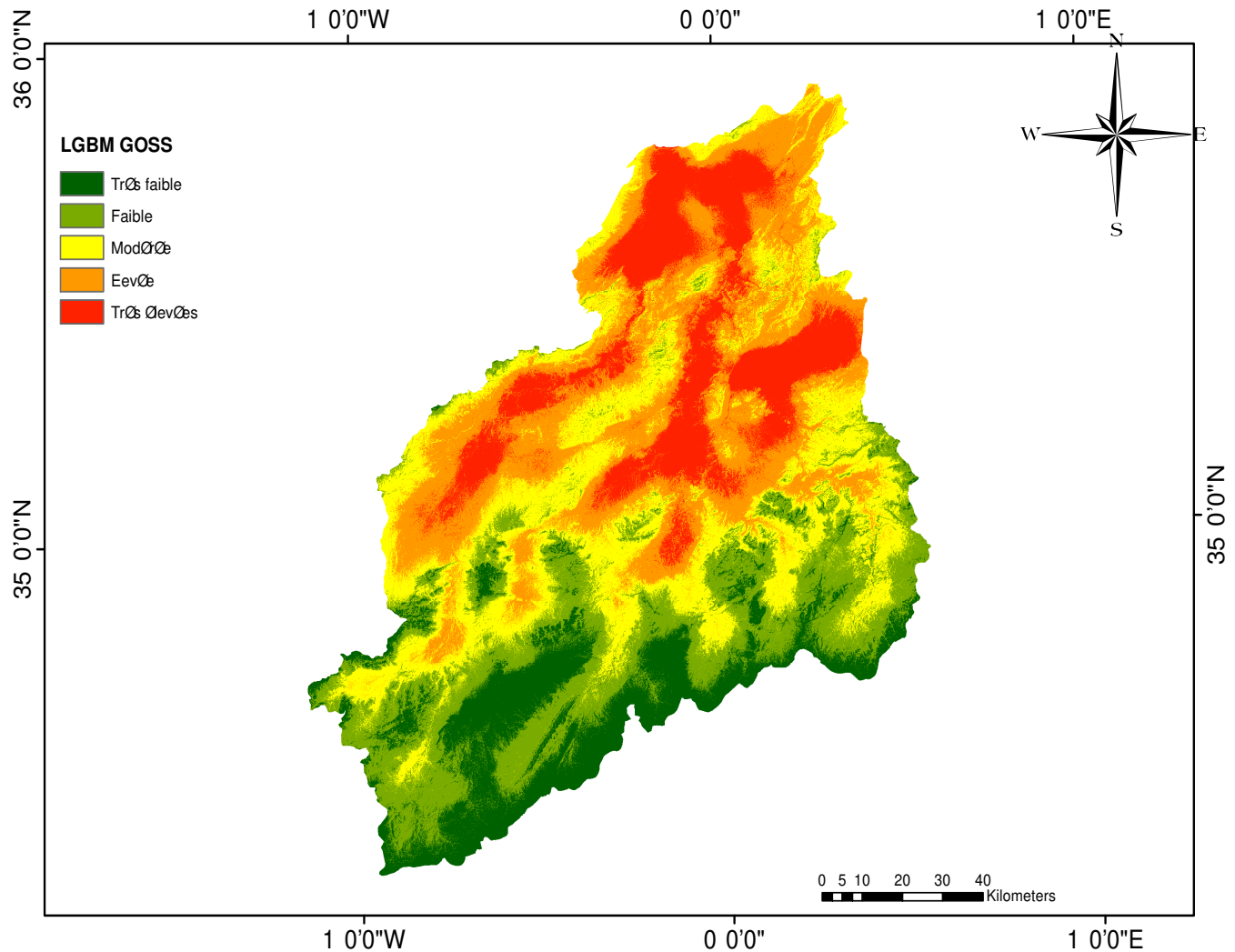


FIGURE 4.7 – La carte de susceptibilité avec LGBM GOSS

Selon le modèle lighGBM avec le booster DART, la carte de susceptibilité présentée dans la Figure (4.8) ci-dessous, a été générée en utilisant, pour la classification, la méthode des ruptures naturelles (natural breaks). Elle comprend cinq classes de susceptibilité. La couverture spatiale des zones sensibles aux inondations très élevées et élevées est respectivement de 14,25% et 25,39% de la surface totale de la zone. Ces zones sont principalement situées dans la région

près des Oueds, principalement Oued Mekkera et Oued El Hammam et dans le littorale. Le reste de la zone est associé à des régions de susceptibilité modérée, faible et très faible. Les pourcentages des superficies couvertes par ces zones sont respectivement 29,6 % 26 % et 4,7 %.

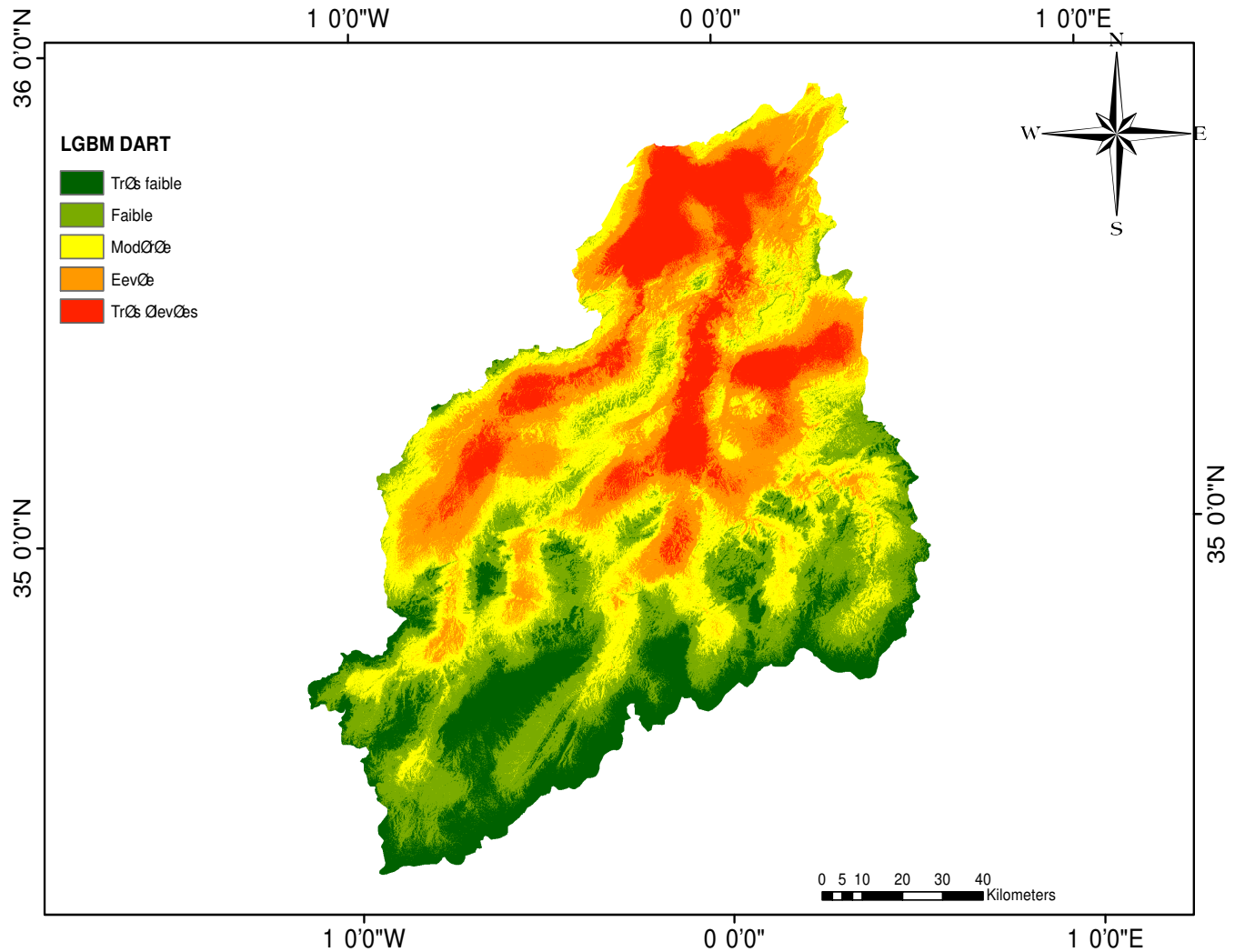


FIGURE 4.8 – La carte de susceptibilité avec LGBM DART

Selon le modèle LightGBM avec le booster GBDT, la carte de susceptibilité présentée par la Figure 4.9 ci-dessous, a été générée en utilisant le booster de GBDT. Elle comprend cinq classes de susceptibilité. Les couverture spatiale des zones sensibles aux inondations très élevées et élevées sont respectivement de 12,7% et 24,5% de la surface totale de la zone. Ces zones sont principalement situées dans la région près des Oueds, principalement Oued Mekkera et Oued ElHammam et dans le littorale. Le reste de la zone est associé à des régions de susceptibilité modérée, faible et très faible. Les pourcentages des superficies couvertes par ces zones sont respectivement 26,8 %, 23,6 % et 12,4 %

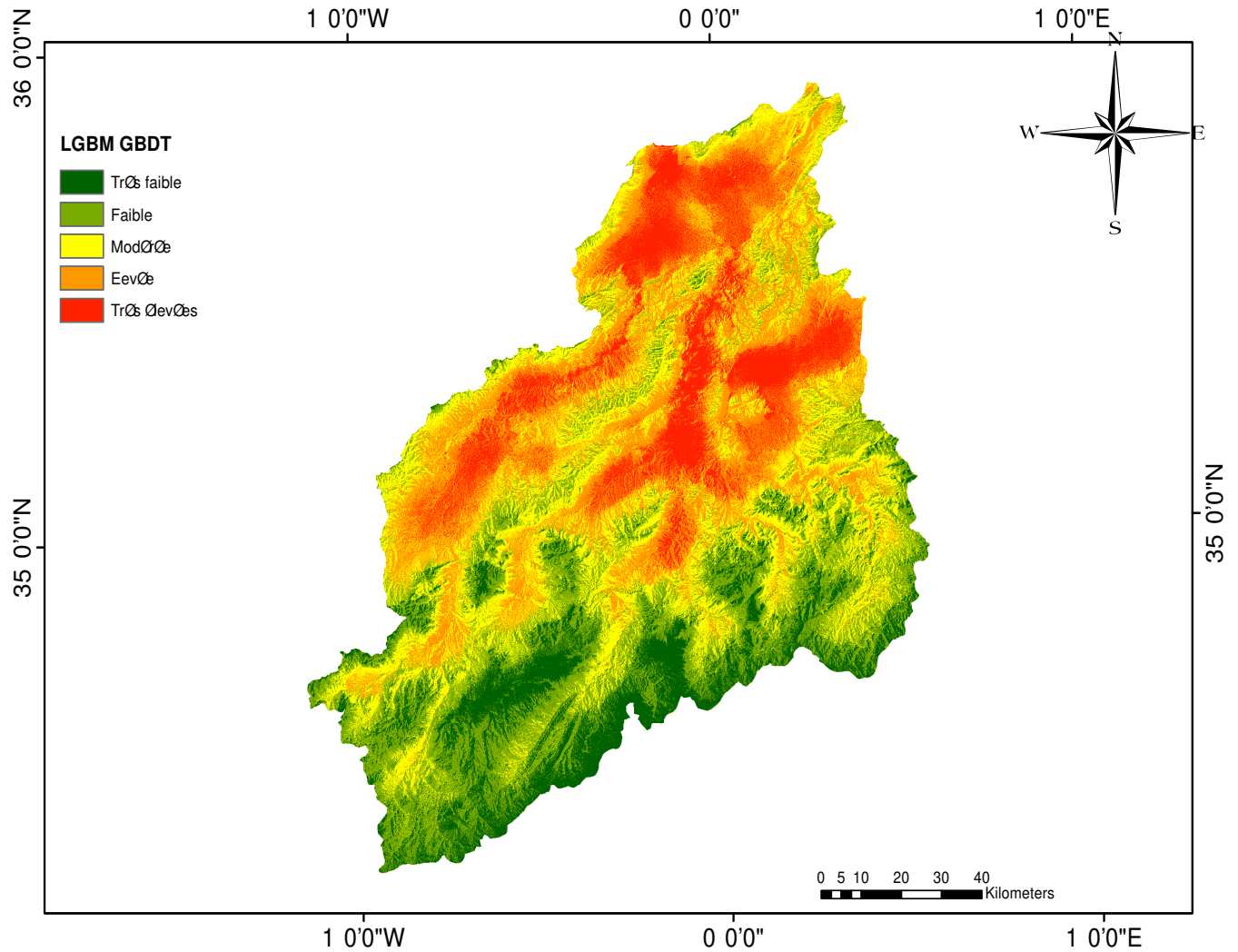


FIGURE 4.9 – La carte de susceptibilité avec LGBM GBDT

## 4.8 Discussion

Le risque des crues soudaines ne peut pas être totalement évité, les mesures les plus importantes que l'on peut appliquer sont celles de la prédiction des inondations futures. Les zones sujettes aux inondations peuvent être identifiées et les mesures structurelles et non structurelles (biologiques) appropriées peuvent être appliquées pour réduire les pertes dues aux inondations. Dans notre travail, nous avons opté pour un modèles d'apprentissage automatique pour cartographier la sensibilité aux inondations dans le bassin versant de la Macta qui est l'algorithme LightGBM combiné avec les 3 boosters : DART, GOSS et GBDT, ce sont des algorithmes qui n'ont pas été utilisée auparavant pour cartographier les risques d'inondations.

Les paramètres et les données d'entrée les plus pertinents pour les modèles utilisés sont la densité des cours d'eau, l'élévation, les précipitations et la pente. Un nombre plus élevé de

facteurs augmenterait probablement la précision du modèle, mais cela dépend également de la zone d'étude et de la disponibilité des données sur les facteurs de conditionnement, (NACHAPPA et al., 2020).

La cartographie des inondations détermine les zones susceptibles d'être inondées sur la base d'une prise en compte des facteurs affectant les inondations ( liés aux conditions géologiques, hydrologiques, topographiques et morphologiques locales, (TEHRANY, PRADHAN et JEBUR, 2015).

D'après les cartes obtenus, on constate que pour les trois modèles employés, les zones les plus inondables se situent souvent dans des régions à basses altitudes et à densité des cours d'eau élevée.

Les cartes de susceptibilité aux inondations générées par notre étude révèlent que les zones susceptibles d'être affectées d'un niveau de risque très élevé des inondations sont, au niveau de Oued Mekkeria et Oued El Hammam , la partie des villes Sidi BelAbbes et Sig traversées par Oued Mekkeria et la partie ouest des villes Mohammadia, Sfisef, Telagh. D'après le modèle LightGBM combiné avec le booster DART, ces zones représentent 14,25 % de la surface totale du bassin versant. D'après le modèle LightGBM combiné avec les boosters GOSS et GBDT, ces zones représentent, respectivement 15,2 % et 12,7 % de la surface totale du bassin versant. Une planification préalable de l'utilisation des terres s'impose pour une meilleure gestion des risques d'inondation dans ces zones, et pour faire des choix d'aménagement pertinents.

L'intégration de la modélisation par apprentissage automatique est essentielle pour identifier les endroits sensibles aux inondations et pour développer des mesures de surveillance et de gestion appropriées pour ce risque naturel.

Une modélisation et une cartographie précises peuvent réduire l'impact des inondations et le risque de pertes financières et économiques à l'avenir.

Cependant, la limite des approches actuelles et la cartographie de la susceptibilité aux inondations en général, est qu'elles ne montrent que les endroits où les inondations se produiront ou ne se produiront pas. Ces méthodes ne disposent pas d'informations sur la profondeur et la vitesse des inondations.

Pour les études futures, il est recommandé que le présent type d'étude soit combiné avec une modélisation hydraulique, telle que la nouvelle version du système d'analyse des rivières du Centre d'ingénierie hydrologique (CEIWR-HEC) (HEC-RAS 5)(KHOSRAVI et al., 2019) et les versions les plus récentes qui peuvent fournir des cartes 2D, à la fois pour la profondeur et la vitesse des crues.

## 4.9 Conclusion

Dans ce chapitre, afin de générer une carte des risques d'inondation qui montre les différentes classes de susceptibilité aux inondations et qui sert de support prévisionnel nécessaire à la maîtrise de ce phénomène, nous avons utilisé l'algorithme LightGBM combiné avec trois boosters :

DART, GOSS et GBDT.

Dans notre cas, et selon les valeurs de l'AUC, le modèle LightGBM combine avec le booster GBDT a donné les meilleurs résultats en termes de performance de prédiction avec un AUC de 0,95.

Ce travail nous permettra de faire un choix pertinent, dans le futur, concernant l'aménagement dans le bassin versant Macta.



# Conclusion générale

Les inondations sont les phénomènes catastrophiques les plus dommageables au monde. Elles constituent un problème particulièrement difficile à résoudre.

Le bassin versant de la Macta est une zone à risque d'inondations, une gestion efficace des inondations est donc nécessaire pour prévoir les inondations qui se produiront dans le futur. Par conséquent, l'identification et le zonage des zones sujettes aux inondations, est l'une des mesures importantes pour l'élaboration de plans d'atténuation et l'allocation adéquate des ressources en réponse à des futures inondations.

L'objectif de cette étude est de développer une méthodologie qui génère une carte des risques d'inondation qui montre les différentes classes des risques d'inondations.

Pour ce faire, l'utilisation d'outils informatiques, notamment les systèmes d'information géograp-

hique, et les programmes d'apprentissage automatique, a révélé un horizon très ambitieux pour le développement de nouvelles approches pour la modélisation et la cartographie.

Dans cette étude, nous avons utilisé, pour la première fois dans l'étude des inondations, l'algorithme LightGBM combiné avec les boosters : DART, GOSS et GBDT, pour générer une carte de susceptibilité aux inondations du bassin versant de la Macta.

L'analyse de sensibilité a indiqué que les pourcentages de densité des cours d'eau, d'élévations, de précipitations et de la pente étaient les facteurs les plus importants pour la cartographie de la susceptibilité aux inondations dans le bassin versant de la de la Macta. Les résultats de la validation montrent que tous les modèles ont donné de bons résultats, mais le modèle LightGBM combiné avec le booster GBDT a donné les meilleurs résultats. Ce dernier peut donc être appliqué, sans risque, à la construction des cartes de susceptibilité aux inondations.

A cet effet, l'intégration de la modélisation par apprentissage automatique est essentielle pour identifier les endroits sensibles et développer des mesures de surveillance et de gestion appropriées pour ce risque naturel pour lequel la rapidité de calcul est cruciale.

Il s'agit d'une modélisation qualitative qui permet de repérer les zones sujettes aux inondations et les degrés de risque dans ces dernières. Par contre, cette modélisation ne fournit pas d'informations sur la profondeur ou le rythme des inondations.

À la lumière de cela, il est conseillé que les études futures combinent le type d'étude actuel avec une modélisation hydraulique dans les zones où le degré de susceptibilité aux inondations

est élevé, dand l'objectif fournir des cartes 2D à la fois pour la profondeur et la vitesse. Enfin, nous soutenons que l'amélioration de la prévision et de la prévention des inondations restera un instrument crucial pour lutter contre le phénomène des inondations et ses effets néfastes et désastreux, pour l'homme (décès) et pour la nature (dégâts matériels, détérioration des voies de communication, etc.)

En conclusion, les cartes de susceptibilité aux inondations, générées par cette étude, pourraient être utiles pour la planification préalable de l'utilisation des terres dans les zones susceptibles d'être affectées par des inondations et pour une meilleure gestion des risques d'inondation dans les zones exposées aux inondations. Elles pourraient aussi être utiles pour faire des choix d'aménagement pertinents.

# Bibliographie

- AL-JUAIDI, Ahmed EM, Ayman M NASSAR et Omar EM AL-JUAIDI (2018). “evaluation of flood susceptibility mapping using logistic regression and GIS conditioning factors”. In : *arabian journal of geosciences* 11.24, 1-10. [Online] Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-018-4095-0>.
- BAAHMAD, Djelloul (2015). “bilan hydrique et evaluation des ressources en eau superficielles du bassin de la Macta”. Thèse de doct. université des sciences et de la technologie mohamed boudiaf d’Oran. [Online] Available at [https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/These\\_BAAHMED\\_Hydr.pdf](https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/These_BAAHMED_Hydr.pdf).
- BELLMAN, Richard E et Lotfi Asker ZADEH (1970). “decision-making in a fuzzy environment”. In : *management science* 17.4, B-141. [Online] Available at <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.17.4.b141>.
- BRODY, Samuel D et al. (2007). “the rising costs of floods : Examining the impact of planning and development decisions on property damage in Florida”. In : *journal of the American planning association* 73.3, 330-345. [Online] Available at <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01944360708977981>.
- BROSSAULT, Bénédicte (2022). *qu’est-ce que le machine learning et comment ça fonctionne*.
- BUI, Dieu Tien et al. (2019). “a novel hybrid approach based on a swarm intelligence optimized extreme learning machine for flash flood susceptibility mapping”. In : *catena* 179, 184-196. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S034181621930147X>.
- CHEN, Cheng et al. (2019). “LightGBM-PPI : predicting protein-protein interactions through LightGBM with multi-information fusion”. In : *chemometrics and intelligent laboratory systems*. [Online] Available at 191, 54-64. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016974391930262X>.
- CHOUBIN, Bahram et al. (s. d.). “an ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines”. In : *science of the total environment* 651 (), 2087-2096. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718339378>.
- CLEMENT, Abah Roland (2013). “An application of geographic information system in mapping flood risk zones in a north central city in Nigeria”. In : *african journal of environmental science and technology* 7.6, 365-37. [Online] Available at <https://www.ajol.info/index.php/ajest/article/view/93868>.
- COSTACHE, Romulus (2019). “flood susceptibility assessment by using bivariate statistics and machine learning models-a useful tool for flood risk management”. In : *water resources management* 33.9, 3239-3256. [Online] Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-019-02301-z>.
- DARABI, Hamid et al. (2019). “urban flood risk mapping using the GARP and QUEST models : A comparative study of machine learning techniques”. In : *journal of hydrology* 569, 142-154. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169418309302>.
- DOMINGO, NDS et al. (2010). “climate change and storm surges : assessing impacts on your coastal city through Mike Flood coding : DHI Water”. In : *environment & health*. [Online] Available at [http://www.dhigroup.com/upload/publications/mikeflood/domingo1\\_2010.pdf](http://www.dhigroup.com/upload/publications/mikeflood/domingo1_2010.pdf).

- GILARD, O et N GENDREAU (1998). “inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d’inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants”. In : *revue des sciences de l’eau/journal of water science* 11.3, 429-444. [Online] Available at <https://www.erudit.org/en/journals/rseau/1900-v1-n1-rseau3292/705315ar>.
- GILLES, Daniel et al. (2012). “inundation mapping initiatives of the Iowa Flood Center : statewide coverage and detailed urban flooding analysis”. In : *Water* 4.1, 85-106 consulté. [Online] Available at <https://www.mdpi.com/2073-4441/4/1/85>.
- HALLOUCHE, Bachir (2017). “bassin versant de la haute MEKERRA (NW Algérien) : hydrologie, géochimie et pollution.” In : *université abou bekr belkaid Tlemcen (UABT)*. [Online] Available at <http://www.secheresse.info/spip.php?article78898>.
- HAPUARACHCHI, HAP, QJ WANG et TC PAGANO (2011). “a review of advances in flash flood forecasting”. In : *hydrological processes* 25.18, 2771-2784. [Online] Available at <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.8040>.
- KE, Guolin et al. (2017). “Lightgbm : A highly efficient gradient boosting decision tree”. In : *advances in neural information processing systems* 30. [Online] Available at <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa>.
- KHADIDJAI, Semari (2016). “forme des lits pour les cours d’eau du bassin versant de la Macta”. Thèse de doct. universite de mustapha stambouli - Mascara. [Online] Available at <http://dspace.univ-mascara.dz:8080/js-pui/handle/123456789/204>.
- KHOSRAVI, Khabat et al. (2016). “flash flood susceptibility analysis and its mapping using different bivariate models in Iran : a comparison between Shannon’s entropy, statistical index, and weighting factor models”. In : *environmental monitoring and assessment* 188.12, 1-21. [Online] Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-016-5665-9>.
- KHOSRAVI, Khabat et al. (2019). “a comparative assessment of flood susceptibility modeling using multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods”. In : *journal of hydrology* 573, 311-323. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419303026>.
- MARTINEZ-CASASNOVAS, JA, MC RAMOS et Jean POESEN (2004). “assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis”. In : *Geomorphology* 58.1-4, 305-321. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X03002629>.
- MEDDI, Mohamed, Amel TALIA et Claude MARTIN (2009). “évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l’Algérie)”. In : *physio-géo. géographie physique et environnement*. Volume 3, 61-84. [Online] Available at <https://journals.openedition.org/physio-geo/686>.
- NACHAPPA, Thimmaiah Gudiyangada et al. (2020). “flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using dempster shafer theory”. In : *journal of hydrology* 590, 125275. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169420307356>.
- OBSERVATION, earth resources et SCIENCE (2019). “national land cover database”. In : [Online] Available at <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/national-land-cover-database>.
- ONUŞLUEL GÜL, Gülay (2013). “estimating flood exposure potentials in Turkish catchments through index-based flood mapping”. In : *natural hazards* 69.1, 403-423. [Online] Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-013-0717-8>.
- POURTAGHI, Zohre Sadat et Hamid Reza POURGHASEMI (2014). “GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran”. In : *hydrogeology journal* 22.3, 643-662. [Online] Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-013-1089-6>.

- PRADHAN, Biswajeet (2010). “flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing”. In : *journal of spatial hydrology [Online]* Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169413006872> 9.2.
- RAHMATI, Omid, Hamid Reza POURGHASEMI et Hossein ZEINIVAND (2016). “flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran”. In : *geocarto international* 31.1, 42-70. [Online] Available at <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106049.2015.1041559>.
- REGMI, Amar Deep et al. (2014). “application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya”. In : *arabian journal of geosciences* 7.2, 725-742. [Online] Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-012-0807-z>.
- SAJEDI-HOSSEINI, Farzaneh et al. (2018). “a novel machine learning-based approach for the risk assessment of nitrate groundwater contamination”. In : *science of the total environment* 644, 954-962. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718325373>.
- SAMUEL, Arthur L (2000). “some studies in machine learning using the game of checkers”. In : *IBM journal of research and development*. 44.1.2, 206-226. [Online] Available at <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5389202>.
- SARHADI, Ali, Saeed SOLTANI et Reza MODARRES (2012). “probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers : linking GIS techniques and frequency analysis”. In : *journal of hydrology* 458, 68-86. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169412005380>.
- SHAKER, Bilal et al. (2021). “LightBBB : computational prediction model of blood–brain-barrier penetration based on LightGBM”. In : *bioinformatics* 37.8, 1135-1139. [Online] Available at <https://academic.oup.com/bioinformatics/article/37/8/1135/5942084?login=true>.
- SINNAKAUDAN, Shanker Kumar et al. (2003). “flood risk mapping for Pari River incorporating sediment transport”. In : *environmental modelling & software* 18.2, 119-130. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815202000683>.
- SKILODIMOU, Hariklia D et al. (2019). “multi-hazard assessment modeling via multi-criteria analysis and GIS : a case study”. In : *environmental earth sciences* 78.2, 1-21. [Online] Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-018-8003-4>.
- SUN, Xiaolei, Mingxi LIU et Zeqian SIMA (2020). “a novel cryptocurrency price trend forecasting model based on LightGBM”. In : *finance research letters* 32, 101084. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1544612318307918>.
- TAHAR, Samira (2013). “impact des inondations sur l’espace urbain”. Thèse de doct. université des sciences et de la technologie mohamed boudiaf d’Oran. [Online] Available at [https://theses.univ-oran1.dz/document/T\\_H4179.pdf](https://theses.univ-oran1.dz/document/T_H4179.pdf).
- TEHRANY, Mahyat Shafapour, Biswajeet PRADHAN et Mustafa Neamah JEBUR (2014). “flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS”. In : *journal of hydrology* 512, 332-343. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169414001826>.
- TEHRANY, Mahyat Shafapour, Biswajeet PRADHAN et Mustafa Neamah JEBUR (2015). “flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method”. In : *stochastic environmental research and risk assessment* 29.4, 1149-1165. [Online] Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-015-1021-9>.
- TEHRANY, Mahyat Shafapour et al. (2015). “flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types”. In : *catena* 125, 91-101. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S034181621400294X>.

- TIEN BUI, Duie et al. (2019). “flood spatial modeling in northern Iran using remote sensing and gis : a comparison between evidential belief functions and its ensemble with a multivariate logistic regression model”. In : *remote sensing* 11.13, 1589. [Online] Available at <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/13/1589>.
- WANG, Dehua, Yang ZHANG et Yi ZHAO (2017). “LightGBM : an effective miRNA classification method in breast cancer patients”. In : 7-11. [Online] Available at <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3155077.3155079>.
- WANG, Yi et al. (2020). “flood susceptibility mapping using convolutional neural network frameworks”. In : *journal of hydrology* 582, 124482. [Online] Available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002216941931217X>.
- YUSYA, RR, MR SEPTYANDY et TL INDRA (2020). “flood risk mapping of Jakarta using genetic algorithm rule-set production (GARP) and quick qnbiased efficient statistical tree (QUEST) methods”. In : *IOP conference series : materials science and engineering*. T. 875. 1. IOP Publishing, 012051. [Online] Available at <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/875/1/012051/meta>.