

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلكايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : métiers de la ville

Spécialité : géomatique et gestion du foncier

Par : - Boualamat Noureddine

- Mehdaoui Taha Mohamed Yacine

Sujet

Analyse de l'impact du changement climatique sur le réseau routier (Routes nationales et chemins de wilaya) à travers une approche géomatique : cas des inondations dans la commune de Sebdou.

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

M. LOUBIED Abdessamad

Université de Tlemcen

Président

M. CHERIF BENMOUSSA Med Yazid

Université de Tlemcen

Examinateur

Mme. Benzenine Faila

Université de Tlemcen

Encadrante

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Ce travail est le fruit d'un effort commun et d'une collaboration fondée sur le respect, la complémentarité et l'engagement mutuel.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrante, Mme Benzenine Faila, ainsi qu'à notre co-encadrante, Mme Selka Imène, pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur encadrement méthodologique rigoureux qui ont guidé chaque étape de notre projet.

Nous remercions également l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'Institut d'Architecture pour la qualité de l'enseignement dispensé et l'accompagnement constant tout au long de notre parcours universitaire.

Nos remerciements s'adressent aussi aux institutions locales et aux personnes ressources de la commune de Sebdou, pour leur accueil, leur collaboration et leur appui précieux lors de nos travaux de terrain.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à nos familles et à nos proches pour leur patience et leur soutien moral, ainsi qu'à nos camarades de promotion pour les moments d'entraide et de partage qui ont marqué ces années d'études.

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos familles respectives, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien constant tout au long de notre parcours universitaire.

À nos parents, véritables piliers de nos vies, dont les encouragements discrets et les sacrifices quotidiens ont rendu possible cette étape.

À nos enseignants, pour la richesse de leur enseignement, leur bienveillance et leur exigence, qui nous ont permis de grandir intellectuellement et humainement.

À toutes les personnes qui croient en nous, et tout particulièrement à celles qui nous ont soutenus dans les moments de doute.

Et enfin, à nous-mêmes — pour la solidarité, la persévérance et l'esprit d'équipe que nous avons su cultiver jusqu'au terme de cette belle aventure académique.

Sommaire

<i>Remerciements</i>	<i>I</i>
<i>Dédicaces</i>	<i>II</i>
<i>Sommaire</i>	<i>III</i>
<i>Table des illustrations</i>	<i>XII</i>
<i>Liste des Abréviations</i>	<i>XVII</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I : Méthodologie d'évaluation de l'impact des inondations sur le réseau routier</i>	<i>4</i>
1. Introduction	5
2. Données utilisées et méthodologie adoptée	6
2.1. Données de Télédétection :	6
2.2. Données géo-scientifiques.....	8
2.2.1. Données climatiques issues de différentes sources.....	8
2.2.2. Données sur la Couverture Végétale :	9
3. Outils et Méthodologie	9
3.1. Les principaux outils utilisés.....	9
3.2. Méthodologie : approche Géomatique Intégrée	11
3.2.1. Collecte et Prétraitement des Données	11
3.2.2. Modélisation Hydrologique	11
3.2.3. Simulation des Inondations.....	12
3.2.4. Analyse Spatiale et Validation.....	12
3.2.5. Avantages de l'Approche	13
3.3. Traitement à l'aide des logiciels.....	14
3.4. Validation et adaptation des résultats :	15
4. Notions de base sur la météorologie et climat	15
4.1. Définition et concept	15
4.2. Utilité de la météorologie	16
4.3. Les outils du météorologue :	16
4.4. Classification des climats	17

4.5.	Les principaux systèmes de classification.....	17
4.5.1.	Classification de Köppen-Geiger	17
4.5.2.	Classification de Köppen-Geiger appliquée à Sebdu	19
4.6.	Facteurs influençant le climat :	20
4.7.	Distinction entre les conditions météorologiques moyennes et extrêmes.....	20
4.7.1.	Conditions météorologiques moyennes :	20
4.7.2.	Conditions météorologiques extrêmes :	20
4.7.3.	Différences clés entre les conditions météorologiques moyennes et extrêmes	21
5.	Changement climatique	21
5.1.	Distinction entre les conditions météorologiques extrêmes et le changement climatique.....	23
5.1.1.	Conditions météorologiques extrêmes.....	23
5.1.2.	Changement climatique	23
5.2.	Lien entre le changement climatique et les conditions météorologiques extrêmes	24
5.2.1.	Mécanismes d'Amplification par le Changement Climatique	24
5.2.2.	Impacts Observés et attribuables	25
5.2.3.	Projections Futures (Scénarios GIEC).....	25
5.2.4.	Implications pour les infrastructures routières (Cas de Sebdu)	25
5.3.	Changements observés du climat mondial :	27
5.4.	Le concept du changement climatique :	27
5.5.	Distinction entre les conditions météorologiques extrêmes et le changement climatique.....	27
5.6.	Prévisions futures des conditions météorologiques globales	29
5.6.1.	Les scénarios climatiques :	29
5.6.2.	Les principaux scénarios climatiques	29
5.6.3.	Ancienne génération : Scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios)	29
5.6.4.	Nouvelle génération : Scénarios RCP (Representative Concentration Pathways)	29
5.6.5.	Application et utilité des scénarios climatiques :	30
5.6.6.	Prévisions météorologiques au niveau mondiale :	30

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude.....	33
1. Introduction	34
2. Présentation de la commune de Sebdou	34
2.1. Situation géographique de la commune de Sebdou	34
2.2. Climat de la commune de Sebdou :	35
2.3. Géologie	39
2.3.1. L'âge du Secondaire :	39
2.3.2. Le Tertiaire :	40
2.3.3. Le Quaternaire :	40
2.4. Hydrographie et bassins versants	40
2.5. Prévisions météorologiques au niveau de la commune de Sebdou :	41
3. Le changement climatique et l'infrastructure routière.....	43
3.1. Changements climatiques et leurs impacts sur les infrastructures routières	44
3.2. Les Inondations et Leurs Impacts sur les Infrastructures Routières.....	46
3.2.1. Cause des Inondations :	46
3.3. Impacts des Inondations sur les infrastructures routières :	47
3.4. Trajectoire historique des inondations et leurs effets sur le réseau routier de Sebdou.....	48
3.4.1. Consistance de réseau routier :	48
3.4.1.1. Routes nationales (RN)	48
3.4.1.2. Chemins de Wilaya (CW) :	48
3.4.1.3. Ouvrage d'assainissement routier (Dalot).....	49
3.4.1.4. Trajectoire historique des inondations dans la commune de Sebdou : ..	50
3.4.2. Dommages recensés sur les réseaux routiers (RN et CW)	52
3.4.2.1. Au niveau des routes nationales :	52
3.4.2.2. Au niveau des Chemins de Wilaya :	55
4. Conclusion	57
Chapitre III : Collecte et préparation des données de la zone d'étude.....	59
1. Introduction	60
2. Traitement du MNT ALOS-2 sous QGIS	60
3. Importation et préparation du MNT	61

3.1.	Caractéristique du bassin versant de Sebdou	63
3.2.	Structure hydrologique du bassin versant de Sebdou.....	63
4.	Génération de la carte de pente.....	67
4.1.	Modélisation 3D.....	68
5.	Numérisation du réseau routier à partir d’OpenStreetMap sous QGIS.....	69
5.1.	Vérification spatiale et corrections.....	70
5.2.	Attribution et structuration des données.....	70
6.	Numérisation des zones sinistrées à partir de documents photographiques de terrain	71
6.1.	Collecte et organisation des données photographiques.....	71
6.2.	Identification des zones inondées (Critiques)	71
6.3.	Numérisation manuelle sous QGIS	71
6.4.	Validation et intégration.....	72
7.	Implantation stratégique des bermes de protection contre le ruissellement.....	72
7.1.	Identification des bermes et collecte des données.....	72
7.2.	Numérisation sur fond d’image satellite	73
7.3.	Attribution et analyse	73
7.4.	Superposition et validation.....	74
8.	Traitement des données météorologiques liées aux précipitations	75
9.	Analyse morpho-topographique et détection des zones a risque routier dans le bassin versant de Sebdou (saga gis).....	77
9.1.	La direction d’écoulement :	78
9.2.	Carte d’accumulation des flux :	79
9.3.	Pente topographique :.....	80
9.4.	Orientation (ou exposition) :	82
9.5.	Indice topographique d’humidité (TWI) :.....	83
9.6.	Facteur LS (Longueur-pente) :.....	84
9.7.	Le gradient topographique :	85
10.	Conclusion	87
	Chapitre IV : Evaluation des inondations (risques et aléas)	89
1.	Introduction	90

2. Interaction des facteurs anthropiques avec le risque d'inondation.....	91
2.1. Analyse de l'occupation du sol et intégration dans la modélisation hydro-géomatique des inondations	91
2.2. Analyse de la couverture végétale à partir de l'indice NDVI et SAVI.....	92
2.2.1. Comparaison entre NDVI (2015–2024)	92
2.2.2. Interprétation des résultats	93
2.3. Synthèse croisée QGIS–GEE : analyse de l'évolution spatio-temporelle de la végétation à Sebdou (2015–2024).....	95
2.3.1. Lien entre la dégradation de la couverture végétale et le risque d'inondation.....	96
3. Rôle des bermes en terre de protection et leur vulnérabilité.....	97
3.1. Impact de la Dégradation des Bermes sur le Réseau Routier : Cas de la RN 22B au PK 38+800.....	99
4. Les résultats du croisement du réseau routier avec l'analyse morphologique issue de saga gis	100
4.1. Exploitation des cartes d'intersection des facteurs hydro-géomorphologiques avec le réseau routier.....	105
4.1.1. Carte d'accumulation des flux (Flow Accumulation).....	105
4.1.2. Carte du Topographic Wetness Index (TWI)	105
4.1.3. Carte du facteur LS (Longueur-Pente).....	105
4.1.4. Carte de pente (Slope).....	106
5. Croisement du réseau routier avec les données historiques d'inondations issues de Google Earth Engine	109
5.1. Cartographie des zones inondables et vulnérables à Sebdou (2015-2024) : Analyse à l'aide de Google Earth Engine	109
6. Simulation d'inondations des sections critiques du réseau routier sur global mapper	114
6.1. Justification du choix du scénario RCP 6.0.....	115
6.2. Estimation de la hauteur d'eau pour la simulation d'inondation sous le scénario RCP 6.0	115
6.2.1. Courbe d'interpolation :.....	116
6.2.2. Validation des Résultats de Simulation (Scénario RCP 6.0).....	117

6.3.	Présentation des résultats de la simulation d'inondation sous Global Mapper	119
7.	Analyse multicritère par intégration des paramètres morpho-topographiques sous QGIS	123
7.1.	Analyse multicritère de la sensibilité du réseau routier face aux inondations	123
7.1.1.	Résultats de l'évaluation de la sensibilité du réseau routier aux inondations	125
7.2.	Analyse multicritère de la vulnérabilité du réseau routier aux inondations via l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC)	127
7.2.1.	Résumé synthétique de la justification de l'IVC	127
7.2.1.1.	Résumé du Calcul de l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC)	127
7.2.1.2.	Résultats de l'Analyse de IVC	128
7.3.	Résultats finaux de l'analyse multicritères de la vulnérabilité du réseau routier aux inondations à travers l'indice de sensibilité et l'IVC	129
8.	Recommandations pour la gestion et la réduction de la vulnérabilité du réseau routier face aux inondations	134
9.	Conclusion	135
	<i>Conclusion générale</i>	<i>137</i>
	<i>Bibliographie</i>	<i>139</i>
	<i>Annexes</i>	<i>143</i>

Résumé

Ce travail de fin d'études vise à évaluer l'impact du changement climatique sur le réseau routier de la commune de Sebdou, à travers une approche géomatique centrée sur le risque d'inondation. L'étude s'appuie sur l'analyse de données topographiques, hydrologiques, climatiques et d'occupation du sol, intégrées dans un système d'information géographique (SIG). Un modèle hydrologique a été simulé dans SAGA GIS afin de délimiter les zones potentiellement inondables à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT), tandis que des variables morpho-métriques comme la pente, le TWI et le LS ont été calculées pour caractériser la sensibilité du territoire.

Parallèlement, un indice de vulnérabilité combiné (IVC) a été développé à l'aide d'une méthode multicritère, combinant six composantes : la pente, l'indice topographique d'humidité (TWI), le facteur de longueur-pente (LS), l'indice de végétation NDVI, l'état des bermes, et un scénario climatique d'augmentation des précipitations (+20 %). Ces variables ont été normalisées, pondérées, puis agrégées pour produire une carte de la vulnérabilité routière. Les résultats ont permis d'identifier plusieurs tronçons de routes nationales (RN) et chemins de wilaya (CW) exposés à un niveau de vulnérabilité élevé, notamment dans les zones en aval et à proximité de l'oued principal.

Ce travail met en évidence l'intérêt d'une intégration géospatiale des facteurs environnementaux et infrastructurels pour la planification d'adaptations face aux aléas climatiques. Les cartes produites constituent un outil d'aide à la décision pour les autorités locales en matière de prévention, de priorisation des interventions et de résilience du réseau routier.

Mots-clés : Sebdou, Changement climatique, inondation, réseau routier, vulnérabilité, SIG, Sebdou, SAGA GIS, QGIS, indice composite.

English Abstract

This final year project aims to assess the impact of climate change on the road network of the Sebdou municipality through a geomatics-based approach focused on flood risk. The study relies on the analysis of topographic, hydrological, climatic, and land use data integrated into a Geographic Information System (GIS). A hydrological model was simulated in SAGA GIS to delineate potentially flooded areas using a Digital Elevation Model (DEM), while morphometric variables such as slope, TWI, and LS factor were calculated to characterize the sensitivity of the terrain.

In parallel, a composite vulnerability index (CVI) was developed using a multi-criteria method combining six components: slope, Topographic Wetness Index (TWI), Length-Slope factor (LS), NDVI vegetation index, berm condition, and a climate scenario (+20% rainfall increase). These variables were normalized, weighted, and aggregated to produce a spatialized road vulnerability map. The results identified several segments of national (RN) and regional (CW) roads exposed to high vulnerability, especially in downstream areas and near the main wadi.

This study highlights the relevance of geospatial integration of environmental and infrastructural factors for planning adaptation strategies against climate-related hazards. The resulting maps provide a decision-support tool for local authorities regarding prevention, intervention prioritization, and road network resilience.

Keywords: Climate change, flooding, road network, vulnerability, GIS, Sebdou, SAGA GIS, QGIS, composite index.

الملخص باللغة العربية

يهدف مشروع نهاية الدراسة هذا إلى تقييم تأثير تغير المناخ على شبكة الطرق في بلدية سبدو، باستخدام نهج جغرافي يركز على مخاطر الفيضانات. وتستند الدراسة إلى تحليل البيانات الطبوغرافية والهيدرولوجية والمناخية وبيانات استخدام الأراضي، المدمجة في نظام المعلومات الجغرافية (GIS). وقد تمت محاكاة نموذج هيدرولوجي في نظام المعلومات الجغرافية SAGA GIS لتحديد المناطق المعرضة للفيضانات المحتملة بناءً على نموذج التضاريس الرقمية (MNT)، في حين تم حساب المتغيرات الطبوغرافية مثل المنحدرات، ومؤشر التربة العالمي ومعدل التربة المائي المنخفض لتوصيف حساسية المنطقة.

وفي الوقت نفسه، تم تطوير مؤشر مدمج لقياس هشاشة (IVC) باستخدام طريقة متعددة المعايير، حيث تم الجمع بين ستة مكونات: المنحدر، ومؤشر الرطوبة الطبوغرافية (TWI)، وعامل طول المنحدر (LS)، ومؤشر الغطاء النباتي NDVI، وحالة السواثر الترايبية، وسيناريو مناخي لزيادة هطول الأمطار (RCP 6.0، +20%). وقد تم توحيد هذه المتغيرات وترجيحها ثم تجميعها لإنتاج خريطة هشاشة الطرق. وقد مكنت النتائج من تحديد عدة مقاطع من الطرق الوطنية وطرق الولايات المعرضة لمستوى عالٍ من الهشاشة، لا سيما في المناطق الواقعة في أسفل الوادي الرئيسي والقريبة منه.

يسلط هذا العمل الضوء على قيمة التكامل الجغرافي المكاني للعوامل البيئية والبنية التحتية للتخطيط للتكيف في مواجهة المخاطر المناخية. وتشكل الخرائط المنتجة أداة لصنع القرار للسلطات المحلية من حيث الوقاية وتحديد أولويات التدخلات ومرونة شبكة الطرق. صمود الشبكة الطرقية.

الكلمات المفتاحية: التغير المناخي، الفيضانات، شبكة الطرق، الهشاشة، نظم المعلومات الجغرافية، سبدو، SAGA GIS، QGIS، مؤشر مركب.

Table des illustrations

Figures.

Figure 1 : Image satellite ALOS-2	7
Figure 2 : Interface Global Mapper 18	9
Figure 3 : Interface QGIS 3.34.	10
Figure 4 : Interface SAGA GIS 9.6.2.	11
Figure 5 : Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du réseau routier aux inondations	14
Figure 6 : Sebdou : zone d'étude en climat semi-aride (BSh). Köppen-Geiger	19
Figure 7 : L'effet de serre naturel et ses perturbations par les activités humaines.....	22
Figure 8 : Le changement climatique.	23
Figure 9 : Projections des émissions de gaz à effet de serre suivant les cinq scénarios SSP du GIEC. <i>Source : Giec, 1er groupe de travail, 2021</i>	31
Figure 10 : Changements dans les températures moyenne à la surface (1986-2005 à 2081- 2100).....	31
Figure 11 : Changements dans les précipitations moyenne à la surface (1986-2005 à 2081- 2100).....	32
Figure 12 : Situation de la commune de Sebdou.	34
Figure 13 : Modélisation 3D du relief de la commune de Sebdou.	35
Figure 14 : Répartition des précipitations saisonnières (1979/2020).	36
Figure 15 : Moyenne des précipitations mensuelles.....	37
Figure 16 : Moyenne des températures mensuelles.....	38
Figure 17 : Climat de Sebdou, Chute de neige	39
Figure 18 : Anomalies mensuelles de température et des précipitations – Changement climatique Sebdou. (<i>Source Météoblue</i>).....	41
Figure 19 : Changements dans les précipitations et températures moyenne à la surface (1900 à 2024). (<i>Source Météoblue</i>).	42
Figure 20 : Évolution des précipitations et crues enregistrées dans la région de Sebdou entre 2015, 2024	42
Figure 21 : Carte de projection climatique mondiale. (<i>Source : Giec, 1er groupe de travail, 2021</i>).....	43
Figure 22 : Dégâts des inondations sur les infrastructures routières. Daïra de Sebdou.	44
Figure 23 : Aperçu de l'inondation de la ville de Sebdou.	47

Table des illustrations

Figure 24 : Bassin versant de Sebdou.....	51
Figure 25 : Levées de terre pour protection (Berme).	51
Figure 26 : Dégradations observées sur la chaussée de la RN 22.	55
Figure 27 Nombre des ouvrages routier et linéaire des chaussées endommagées (Inondations) RN et CW.....	57
Figure 28 : Model numérique du terrain et bassin versant de Sebdou.	61
Figure 29 : Méthode de modélisation du bassin versant de Sebdou.....	62
Figure 30 : Bassin versant de Sebdou.....	62
Figure 31 : Structure hydrographique du bassin versant Sebdou	65
Figure 32 : Sous-bassin élémentaires du bassin versant Sebdou.....	65
Figure 33 : Anomalie du stockage total de l'eau selon GRACE de 2002 à 2024. Bassin versant et des sous bassins élémentaires (<i>Source. Plateforme Watersheds</i>).	67
Figure 34 : Carte des pentes bassin versant de Sebdou.	68
Figure 35 : Modélisation 3D du bassin versant de Sebdou.	69
Figure 36 : Réseau routier de la commune de Sebdou (RN et CW) sur image Google Earth	70
Figure 37 : Localisation des dalots sinistrés (RN et CW).	72
Figure 38 : Berme en terre (levée en terre).....	73
Figure 39 : Localisation des bermes de protection en terre contre les inondations.....	74
Figure 40 : Evolution annuel des précipitations dans la commune de Sebdou.	77
Figure 41 : Carte de la direction des écoulements.....	79
Figure 42 : Carte d'accumulation des flux.	80
Figure 43 : Carte de pente, fausse couleur.....	81
Figure 44 : Carte d'orientation de pente.	82
Figure 45 : Carte de l'indice topographique de l'humidité.	83
Figure 46 : Carte du facteur LS (Longueur de pente).....	84
Figure 47 : Carte du gradient topographique.....	85
Figure 48 : Carte d'occupation du sol. Bassin versant de Sebdou	91
Figure 49 : Carte d'évolution de végétation à Sebdou entre 2015 et 2024	93
Figure 50 : Evolution des indices de la végétation NDVI et SAVI entre 2015 et 2024.....	95
Figure 51 : Interaction entre l'inondation et la couverture végétale.....	97
Figure 52 : Dégradation des Bermes sur le Réseau Routier : Cas de la RN 22B au PK 38+800	100
Figure 53 : Schéma relationnel : Pente, TWI, Facteur LS et risques	101

Table des illustrations

Figure 54 : Cartes détaillées montrent les intersections entre les paramètres morphologiques et le réseau routier.....	102
Figure 55 : Carte de l'intersection entre les paramètres morphologiques et le réseau routier	104
Figure 56 : Carte de l'historique des inondations à Sebdoou entre 2015 et 2024	110
Figure 57 : Carte 1 de croisement de l'historique des inondations (2015-2024) avec le réseau routier	111
Figure 58 : Carte 2 de croisement de l'historique des inondations (2015-2024) avec le réseau routier	111
Figure 59 : Capture d'écran de l'historique des inondations (2015–2024) – Source : GEE.	112
Figure 60 : Courbe d'interpolation de la hauteur d'eau selon RCP 6.0	116
Figure 61 : Carte 1, croisement des variables multicritère avec le réseau routier.....	121
Figure 62 : Carte 2, croisement des variables multicritère avec le réseau routier.....	122
Figure 63 : Carte de la vulnérabilité (sensibilité) du réseau routier (RN et CW) face au risque d'inondation.....	126
Figure 64 : Carte finale de l'évaluation géomatique de la vulnérabilité du réseau routier (RN et CW) face aux inondations	133

Table des illustrations

Tableaux.

Tableau 1 : Classification des niveaux de vulnérabilité	13
Tableau 2 : Les Cinq Principaux Groupes Climatiques selon la Classification de Köppen-Geiger	18
Tableau 3 : Caractéristiques climatiques et hydrologiques de la commune de Sebdou selon la classification de Köppen-Geiger (BSh)	19
Tableau 4 : Différences clés entre les conditions météorologiques moyennes et extrêmes	21
Tableau 5: Impact observé du changement climatique	25
Tableau 6: Lien entre le changement climatique et les conditions météorologiques extrêmes.	26
Tableau 7 : Différences entre les conditions météorologiques extrêmes et le changement climatique.	28
Tableau 8 : Répartition des précipitations saisonnières (1979/2020).....	36
Tableau 9 : Moyenne des précipitations mensuelles	37
Tableau 10 : Moyenne des températures mensuelles	38
Tableau 11 : Impacts du Changement Climatique sur les Infrastructures Routières.....	45
Tableau 12 : Consistance du réseau routier (RN et CW)	49
Tableau 13 : Inventaire des Ouvrages d'Art et Dalots sur le réseau des routes nationales..	50
Tableau 14 : Inventaire des Ouvrages d'Art et Dalots sur le réseau des chemins de wilaya.	50
Tableau 15: Recensement des dommages observés sur les dalots du réseau des Routes Nationales	53
Tableau 16 : Recensement des dégradations des chaussées et accotements du réseau des Routes Nationales	54
Tableau 17 : Recensement des dommages observés sur les dalots (Chemins communaux)	55
Tableau 18 : Recensement des dégradations des chaussées et accotements du réseau des chemins de wilaya.	56
Tableau 19 : Caractéristiques hydrologiques des sous-bassin versants du bassin versant Sebdou	64
Tableau 20 : Résultat de l'évolution du NDVI (2015–2024)	92
Tableau 21 : Interactions entre la couverture végétale et les phénomènes d'Inondation	97
Tableau 22 : Seuils de référence des principaux paramètres morphologiques	101

Table des illustrations

Tableau 23 : Synthèse des caractéristiques morphologiques calculées sous SAGA GIS .	108
Tableau 24 : Vulnérabilité des routes aux inondations selon la localisation, les impacts observés et la présence de dalots	113
Tableau 25 : Ajustement des seuils topographiques selon les projections climatiques RCP 6.0	114
Tableau 26 : Évaluation de l'impact climatique futur (RCP 6.0) sur les tronçons routiers inondables (2015–2024)	116
Tableau 27 : Évaluation de la performance des simulations d'inondation par comparaison avec les observations de terrain	118
Tableau 28 : Pondération des critères et classification du niveau de sensibilité aux inondations	124
Tableau 29 : Catégorisation des paramètres topographiques en fonction du niveau de risque d'inondation.....	124
Tableau 30 : Critères et poids appliqués dans l'élaboration de l'Indice de Vulnérabilité Combiné	128
Tableau 31 : Seuils de classification de l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC)	128
Tableau 32 : Évaluation de la vulnérabilité des tronçons routiers selon l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC).....	131
Tableau 33 : Synthèse multicritère de la vulnérabilité des axes routiers face aux inondations	132

Liste des Abréviations

Abréviation	Définition en anglais	Traduction en français
GES	Greenhouse Gases	Gaz à effet de serre
GIEC	Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
SSP	Shared Socioeconomic Pathways	Trajectoires socio-économiques partagées
RCP	Representative Concentration Pathways	Trajectoires représentatives de concentration
RN	National Roads	Routes Nationales
CW	Wilaya Roads	Chemins de Wilaya
MNT	Digital Elevation Model (DEM)	Modèle Numérique de Terrain
TWS	Terrestrial Water Storage	Stock d'eau terrestre
GPS	Global Positioning System (P10 to be clarified)	Système de positionnement global (<i>P10 à préciser</i>)
TWI	Topographic Wetness Index	Indice topographique d'humidité
Facteur LS	Length-Slope Factor	Facteur de pente et de longueur de pente
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Indice de végétation par différence normalisée
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	Indice de végétation ajusté au sol
GEE	Google Earth Engine	Moteur de traitement Google Earth
Bandes spectrales	Red and Near Infrared Bands (RED & NIR)	Bandes spectrales rouge et proche infrarouge
Autres paramètres	Slope, flow accumulation, TWI, LS factor, aspect, topographic gradient	Pente, accumulation des flux, TWI, facteur LS, orientation, gradient topographique
IVC	Combined Vulnerability Index	Indice de Vulnérabilité Combiné
DTP	Directorate of Public Works	Direction des Travaux Publics

Introduction générale

Le changement climatique représente aujourd'hui l'un des défis les plus pressants pour les sociétés modernes, avec des répercussions directes sur les infrastructures essentielles. Parmi ces impacts, l'aggravation des précipitations extrêmes se traduit par des inondations plus fréquentes et plus destructrices, mettant en péril les réseaux routiers qui jouent un rôle vital dans la connectivité économique et sociale.

Les infrastructures routières sont de plus en plus exposées aux impacts du changement climatique, notamment aux inondations qui menacent leur durabilité et leur bon fonctionnement. Dans la commune de Sebdo, ces phénomènes hydrométéorologiques extrêmes provoquent des dégradations importantes, affectant la circulation et générant des coûts élevés d'entretien et de réparation.

La commune de Sebdo, particulièrement exposée à ces aléas, voit ses infrastructures routières – routes nationales comme chemins communaux – subir des dommages croissants. Ces phénomènes, amplifiés par le dérèglement climatique, menacent non seulement l'état des chaussées, mais aussi la sécurité des usagers et la stabilité des activités locales dépendantes des transports.

Ce travail est basé sur une approche géomatique, qui utilise l'analyse de données satellitaires et la modélisation hydrologique, pour identifier les zones vulnérables et évaluer les impacts des inondations sur le réseau routier. L'objectif est de proposer des stratégies d'adaptation efficaces afin de renforcer la résilience des infrastructures et d'optimiser leur gestion face aux défis du changement climatique.

Cette étude se concentre sur l'évaluation de la vulnérabilité du réseau routier de Sebdo face à l'intensification des pluies extrêmes. Elle s'appuie sur une approche combinant l'analyse des inondations passées, les projections climatiques régionales et une modélisation géospatiale des zones à risque. L'objectif est d'identifier les secteurs les plus menacés, d'en mesurer les impacts potentiels et de proposer des mesures concrètes pour renforcer la résilience des infrastructures.

En fournissant des outils d'aide à la décision fondée sur des données spatiales et climatiques, cette étude vise à guider les acteurs locaux dans la planification d'actions préventives et adaptatives. Elle s'articule autour d'un cadre théorique examinant les liens entre changement climatique et vulnérabilité infrastructurelle, d'une méthodologie intégrant analyse historique et modélisation prospective, et de résultats cartographiques permettant une gestion ciblée des risques. Les conclusions ouvrent sur des recommandations pratiques

pour une meilleure protection des réseaux routiers, tout en soulignant les perspectives de recherche futures dans un contexte climatique en évolution rapide.

Ce mémoire est structuré en plusieurs parties. Après une présentation du cadre théorique relatif au changement climatique, aux risques d'inondation et à la vulnérabilité des infrastructures, la méthodologie utilisée sera exposée, suivie de l'analyse et de la discussion des résultats obtenus, avant de conclure par une synthèse générale et des recommandations pratiques.

Chapitre I : Méthodologie d'évaluation de l'impact des inondations sur le réseau routier

1. Introduction

Face à l'aggravation des phénomènes climatiques extrêmes, les infrastructures routières apparaissent particulièrement vulnérables, avec des impacts croissants sur la sécurité des usagers et la continuité territoriale, surtout dans des zones sensibles comme la commune de Seb dou.

Cette étude se concentre sur l'impact du changement climatique sur le réseau routier de Seb dou, où la combinaison d'une topographie complexe et d'une variabilité climatique marquée accroît les risques d'inondation, nécessitant une approche innovante pour évaluer ces vulnérabilités.

Notre hypothèse centrale postule que l'augmentation des précipitations extrêmes sous l'effet du changement climatique accentue significativement les risques pour les infrastructures routières, particulièrement dans les zones identifiées comme critiques par analyse géomatique.

Les hypothèses secondaires mettent en lumière trois aspects clés :

- La plus grande vulnérabilité des routes nationales due à leur implantation dans des zones topographiquement exposées.
- Le risque accru pour les infrastructures situées en aval des bassins versants.
- L'aggravation des dommages causés par l'absence de systèmes de drainage adaptés.

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer la vulnérabilité du réseau routier face aux précipitations extrêmes grâce à une approche géomatique combinant plusieurs méthodes innovantes.

Pour y parvenir, notre méthodologie s'articule autour de trois axes majeurs :

- La collecte et le traitement de données multidimensionnelles (climatiques, hydrologiques, topographiques).
- La cartographie précise des zones à risque par analyse spatiale et télédétection.
- L'élaboration de recommandations pratiques pour renforcer la résilience des infrastructures.

Cette étude présente une double valeur ajoutée, à la fois scientifique et opérationnelle:

- Sur le plan scientifique : contribution à l'évolution des méthodes géomatiques appliquées à l'étude des risques climatiques.

- Sur le plan pratique : fourniture d'outils concrets d'aide à la décision pour les gestionnaires territoriaux.

L'approche méthodologique se distingue par l'utilisation combinée de technologies avancées :

- Plateformes de télédétection (Google Earth Engine).
- Systèmes d'Information Géographique (QGIS, SAGA GIS).
- Outils de modélisation hydrologique (Global Mapper).

Permettant une analyse spatialisée et fine des interactions entre climat, territoire et infrastructures.

Les résultats attendus de cette recherche doivent permettre une meilleure anticipation des risques et une planification plus efficace des mesures d'adaptation, contribuant ainsi à la durabilité des infrastructures routières dans un contexte de changement climatique.

2. Données utilisées et méthodologie adoptée

Afin de répondre aux objectifs souhaités, des données satellitaires et géo-scientifiques ont été utilisées.

2.1. Données de Télédétection :

Les sources et les principales caractéristiques des données exploitées sont synthétisées dans l'annexe 01.

➤ Model numérique du terrain (MNT) :

Il permet de représenter la topographie de la commune de Sebdou avec précision, ce qui est crucial pour analyser la dynamique des écoulements hydrologiques et identifier les zones les plus vulnérables aux inondations.

Le satellite ALOS-2, également appelé Daichi-2, est une mission japonaise d'observation de la Terre lancée en 2014. Il est équipé d'un radar à synthèse d'ouverture (SAR) fonctionnant en bande L, offrant des observations précises indépendamment des conditions météorologiques. L'image utilisée dans ce travail a été acquise le 20/10/2018 avec une résolution de 12,5 mètres (Figure 1), considérée comme une haute résolution.

Le MNT ALOS-2 (Advanced Land Observing Satellite-2) a été choisi pour sa résolution spatiale de 12,5 m, optimale pour capturer les microreliefs influençant les

écoulements hydrologiques dans un bassin versant montagneux comme celui de Seb dou. Cette résolution permet une modélisation précise des pentes et des talwegs, contrairement aux MNT de résolution inférieure (ex : SRTM 30 m), qui lisseraient les détails topographiques critiques pour l'étude des inondations. De plus, ALOS-2 intègre des corrections radar réduisant les artefacts liés à la végétation, un avantage dans les zones semi-arides où le couvert végétal est discontinu.

➤ **Les images Sentinel-2 (résolution de 10 m) :**

Sont utilisées dans cette étude pour fournir des données détaillées sur l'occupation du sol et les caractéristiques du paysage. Ces images permettent d'analyser la répartition des zones inondables et d'examiner l'impact des événements climatiques extrêmes sur les infrastructures routières. Grâce à leur haute résolution spatiale et leur capacité à capturer des informations multi-spectrales.

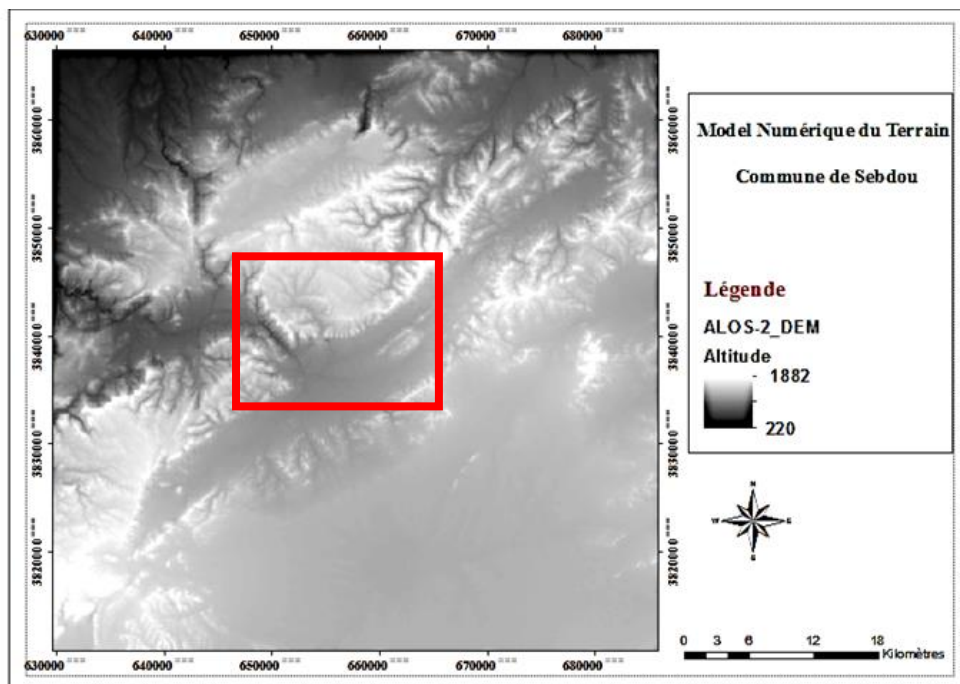


Figure 1 : Image satellite ALOS-2

(Le cadre rouge délimite la zone d'étude)

➤ **Données Hydrologiques des Bassins Versants :**

La plateforme Global Watersheds est une application web gratuite qui permet une délimitation rapide et précise des bassins versants partout dans le monde. Elle s'appuie sur les données satellites de la mission GRACE pour déterminer les zones contributives en amont et les trajectoires d'écoulement en aval à partir de presque n'importe quel point sur

Terre. Cette application est conçue pour être plus rapide que la plupart des autres méthodes disponibles.

➤ **La mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment):**

A révolutionné l'étude des forces gravitationnelles de la Terre et de son système. Pendant plus de 15 ans, les satellites jumeaux GRACE ont mesuré les variations gravitationnelles dues aux déplacements d'eau, permettant d'étudier les calottes glaciaires, le niveau de la mer, l'eau souterraine et les changements dans la Terre solide. Cette mission a amélioré la compréhension des processus climatiques et a suivi des phénomènes tels que la perte de glace et les sécheresses. La mission a pris fin en 2017, et la mission GRACE Follow-On, lancée en 2018, prolonge ses observations.

2.2. Données géo-scientifiques

2.2.1. Données climatiques issues de différentes sources

Notamment :

- **Google Earth Engine (GEE)** est une plateforme cloud de traitement et d'analyse de données géospatiales à grande échelle. Elle permet aux utilisateurs d'accéder à une vaste collection d'images satellitaires et de données environnementales, tout en offrant des outils puissants pour l'analyse, la modélisation et la visualisation. Grâce à son infrastructure de calcul parallèle, GEE facilite l'extraction d'informations à partir de grandes quantités de données, ce qui en fait un outil essentiel pour des applications en télédétection, cartographie, suivi des changements environnementaux et gestion des ressources naturelles.
- **Météoblue** : est une plateforme de prévisions météorologiques qui fournit des données climatiques et atmosphériques basées sur des modèles numériques avancés. Elle offre des informations précises sur la température, les précipitations, le vent et d'autres paramètres météorologiques, adaptées à diverses applications, notamment l'agriculture, l'aviation et la gestion des risques climatiques.

2.2.2. Données sur la Couverture Végétale :

Google Earth Engine (GEE) permet de calculer les indices spectraux de la végétation, tels que l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) et l'Indice de Végétation Ajusté pour le Sol (SAVI), afin d'analyser l'évolution de la végétation dans la région.

3. Outils et Méthodologie

3.1. Les principaux outils utilisés

Dans ce travail, plusieurs outils ont été mobilisés afin d'analyser l'impact des inondations sur le réseau routier de la commune de Sebdo. Notamment les logiciels (la configuration est présentée dans l'annexe 02), Global mapper 18, QGIS 3.34 et SAGA GIS 9.6.2, Ces outils, issus des domaines de la télédétection, de la géomatique et de la modélisation hydrologique, permettent une analyse précise et détaillée des zones vulnérables.

- **Global mapper 18** : Est un logiciel SIG utilisé pour l'analyse et la gestion des données géospatiales. Il permet de traiter des Modèles Numériques d'Élévation (MNE), de visualiser des cartes en 3D et d'analyser les zones à risque d'inondation. Son interface intuitive facilite l'intégration et la manipulation des données, ce qui en fait un outil efficace pour notre étude.

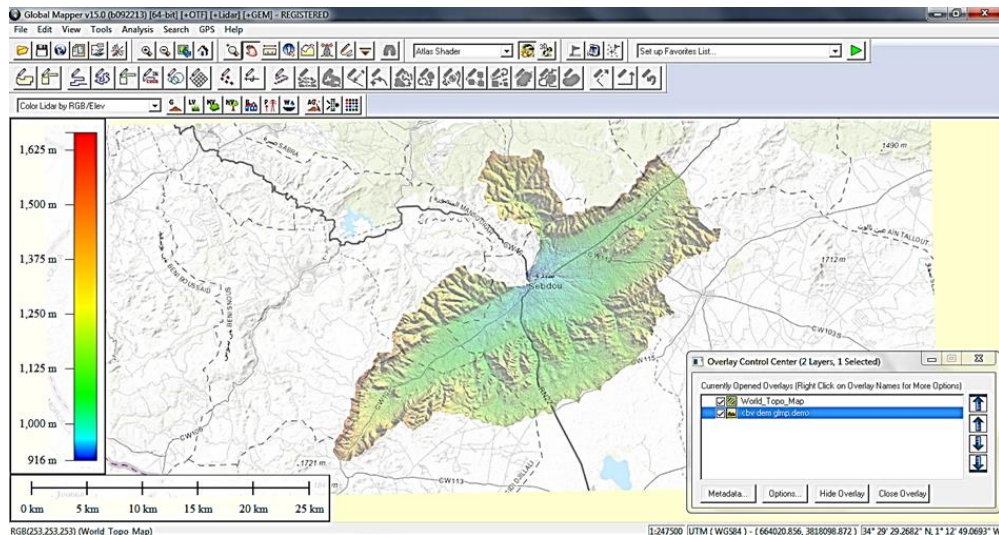


Figure 2 : Interface Global Mapper 18

- **QGIS 3.34** : Est un logiciel SIG open-source permettant l'analyse, la visualisation et la gestion de données géospatiales. Il offre de nombreuses fonctionnalités, comme la manipulation de couches raster et vectorielles, la cartographie avancée et l'analyse

spatiale. Grâce à ses outils et plugins, QGIS est un choix pertinent pour l'étude des inondations et l'évaluation de leur impact sur le réseau routier.

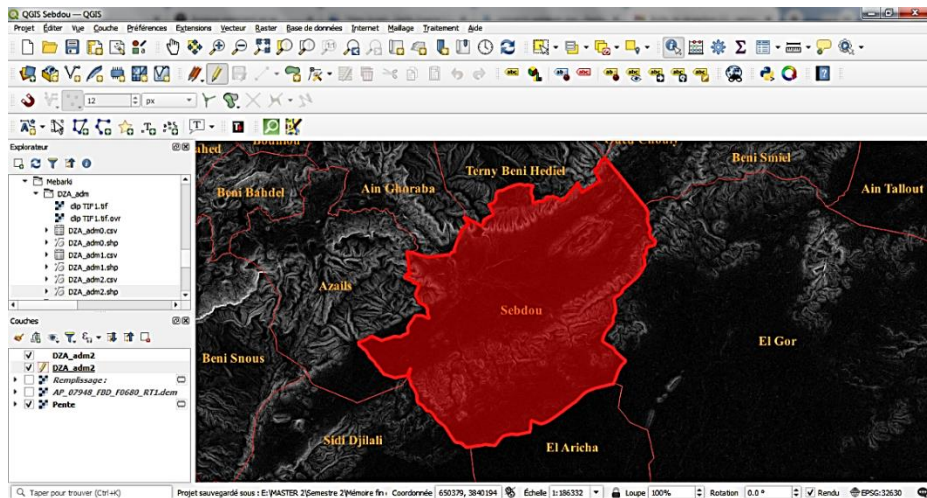


Figure 3 : Interface QGIS 3.34.

- **SAGA GIS 9.6.2.** : (System for Automated Geoscientific Analyses) est un logiciel open-source dédié à l'analyse et au traitement des données géospatiales. Il offre une large gamme d'outils pour la modélisation géomorphologique, l'hydrologie, la télédétection et l'analyse spatiale. Sa flexibilité, sa rapidité et sa compatibilité avec divers formats SIG en font un choix privilégié pour les chercheurs et les professionnels en géomatique.

SAGA GIS a été favorisé pour le calcul des indices morpho-topographiques (TWI, facteur LS) en raison de ses algorithmes spécialisés, tels que la méthode de détermination des bassins versants basée sur le flux multiple (MFD). Contrairement à QGIS, SAGA offre des modules dédiés à l'hydrologie (ex : 'Terrain Analysis → Channels and Drainage Networks') permettant une modélisation plus fiable des écoulements concentrés, essentielle pour identifier les zones d'érosion et d'accumulation d'eau. Ces outils sont validés par la communauté scientifique pour les études hydro-géomorphologiques en contexte semi-aride.

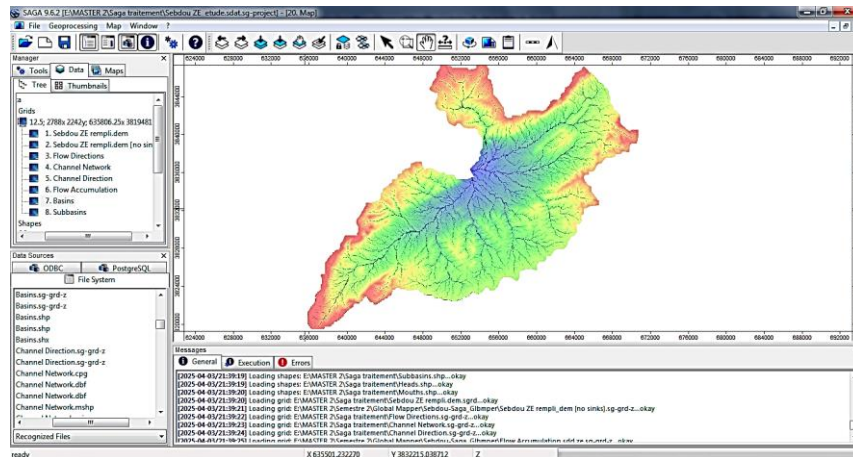


Figure 4 : Interface SAGA GIS 9.6.2.

3.2. Méthodologie : approche Géomatique Intégrée

Cette étude propose une méthodologie multi-outils combinant télédétection, SIG et modélisation hydrologique pour évaluer la vulnérabilité du réseau routier de Sebdou face aux inondations (Figure 5). La démarche s'articule en 4 phases claires :

3.2.1. Collecte et Prétraitement des Données

- **Outils principaux** : Google Earth Engine (GEE), bases de données climatiques. Données utilisées :

Topographie :

- **Image Sentinel-2** : (résolution de 10 m) a été utilisé pour l'analyse des indices de végétation (NDVI et SAVI), l'étude de l'historique des inondations entre 2015 et 2024, ainsi que pour l'extraction des données météorologiques.
- **MNT ALOS-2** : (12,5 m) pour une modélisation fine des microreliefs.
- **Hydrologie** : Bassins versants dérivés de GRACE (Global Watersheds).
- **Climat** : Précipitations extrêmes (Météoblue, GEE).

Traitements initiaux :

- Calcul du TWI sous GEE (seuil = moyenne + écart-type) pour cartographier les zones d'accumulation d'eau.
- Correction des artefacts liés à la végétation (ALOS-2).

3.2.2. Modélisation Hydrologique

Outils : SAGA GIS

Processus :

- Délimitation précise des bassins versants (algorithme MFD *Multi-Flow Direction*).
- Génération du réseau hydrographique à partir du MNT.
- Calcul de l'accumulation de flux pour identifier les zones de convergence des écoulements.

Justification : SAGA GIS a été préféré pour ses modules spécialisés (ex : *Terrain Analysis* → *Channels and Drainage Networks*), validés pour les contextes semi-arides.

3.2.3. Simulation des Inondations

Outil : Global Mapper

Méthode :

- Application de hauteurs d'eau théoriques sur le MNT corrigé (scénarios RCP 6.0).
- Visualisation du cheminement des eaux et superposition avec RN et CW.

Résultat : Cartographie des intersections routes/zones inondables.

3.2.4. Analyse Spatiale et Validation

Outil : QGIS

Étapes :

- Analyse multicritère (MCE) : Combinaison pondérée des couches :
 - Pente
 - Occupation du sol (Sentinel-2).
 - Couverture végétale.
 - Accumulation du flux
 - TWI
 - Facteur LS
 - Données historiques d'inondation.
 - Bermes de protection en terre.

Classification des risques :

Tableau 1 : Classification des niveaux de vulnérabilité

Le niveau de vulnérabilité	Critères
Niveau faible	Zones peu exposées à l'accumulation des eaux et à l'érosion (TWI, pente, LS faibles).
Niveau moyen	Zones susceptible de recevoir un écoulement concentré (TWI élevé + accumulation de flux).
Niveau élevé	Zones critiques où l'inondation impact sévèrement les infrastructures (TWI, pente, LS élevés).

- **Validation terrain :** Comparaison avec les observations historiques et études géomorphologiques locales.

3.2.5. Avantages de l'Approche

- **Complémentarité des outils :** GEE (traitement rapide à large échelle) + SAGA (précision hydrologique) + Global Mapper.
- **Application locale :** Adaptation aux spécificités de Sebdo (topographie complexe, climat semi-aride).
- **Prise de décision :** Sorties cartographiques directement utilisables par les gestionnaires routiers.

En résumé, l'approche méthodologique adoptée repose sur :

- La collecte et l'analyse de données climatiques, topographiques et hydrologiques.
- L'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour la cartographie et l'analyse spatiale des risques.
- La modélisation hydrologique afin de simuler les écoulements et les impacts des inondations.
- Une analyse des vulnérabilités du réseau routier face aux inondations.
- Formulation de recommandations et mise en œuvre des actions d'adaptation.

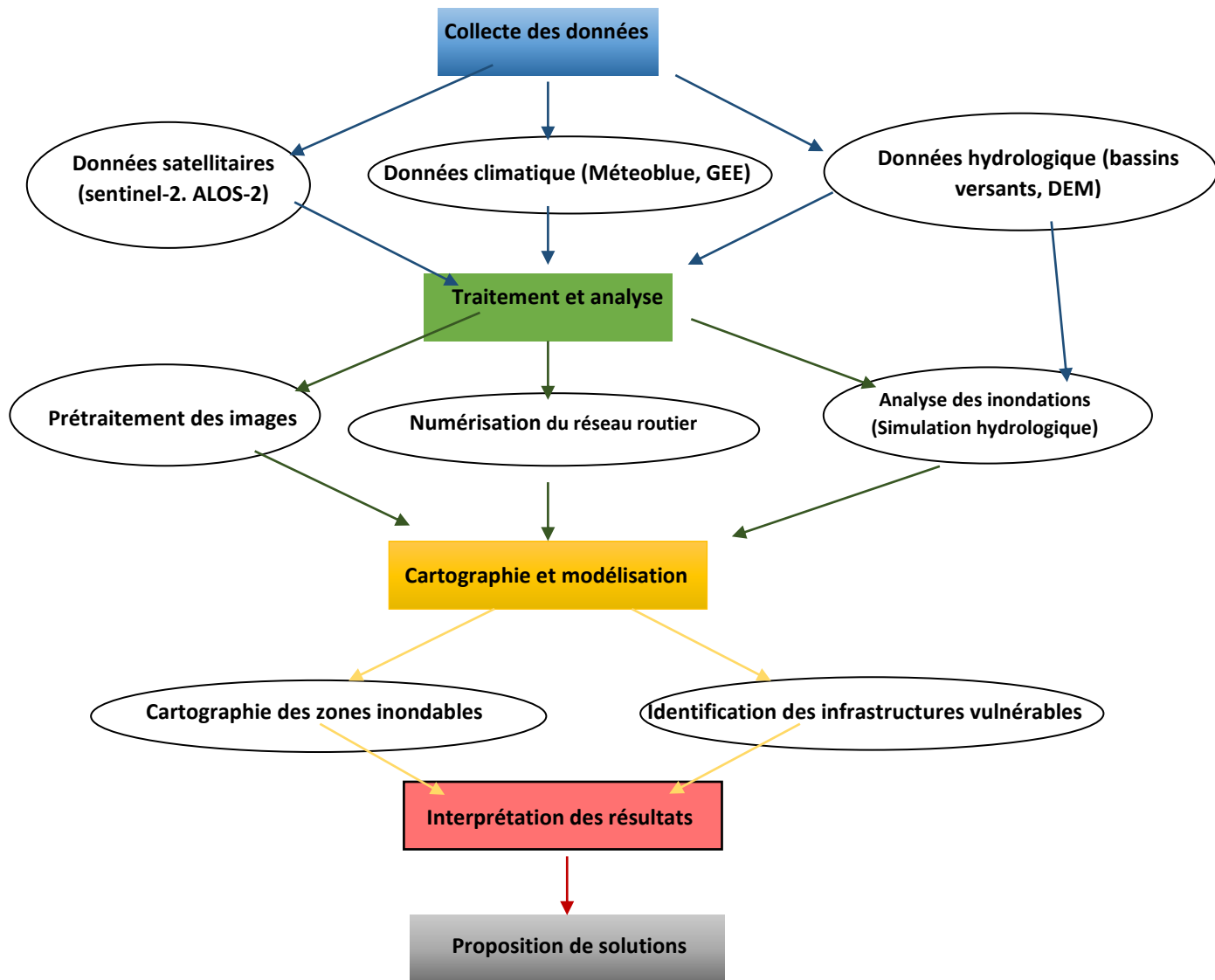


Figure 5 : Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du réseau routier aux inondations
Cette série d'analyses et de traitements est réalisée en deux étapes principales :

3.3. Traitement à l'aide des logiciels

Dans un premier temps, la modélisation et l'analyse des données ont été effectuées à l'aide des logiciels Global Mapper et SAGA GIS. Ces outils ont permis de simuler les inondations et d'analyser leur impact sur le réseau routier en intégrant divers paramètres géomorphologiques et hydrologiques.

Plusieurs étapes ont été mises en œuvre, notamment :

- L'importation et le traitement des données satellitaires et topographiques.
- L'application d'analyses hydrologiques pour la délimitation du bassin versant et l'extraction du réseau hydrographique.

- Le calcul des paramètres géomorphométriques tels que la pente, l'indice de forme et d'autres indicateurs hydrologiques pertinents.
- La simulation des inondations et l'évaluation de leur impact sur l'infrastructure routière.
- **Analyse multicritère dans QGIS** : les différentes couches thématiques (pente, occupation du sol, densité de drainage, proximité des axes hydrographiques, type de sol, NDVI, etc.) ont été croisées à l'aide d'une approche multicritère pondérée (MCE). Chaque critère a été normalisé, pondéré selon sa contribution au risque d'inondation, puis intégré pour produire une carte synthétique des zones à risque.
- **Croisement avec le réseau routier** : les résultats de l'analyse multicritère ont été superposés aux données du réseau routier pour identifier les tronçons situés dans les zones à risque élevé. Cette étape a permis de localiser les infrastructures vulnérables et de hiérarchiser les niveaux d'exposition.

3.4. Validation et adaptation des résultats :

L'incertitude liée aux résultats des analyses numériques impose une validation rigoureuse. Pour cela, les résultats issus de la modélisation et de l'analyse hydrologique sont confrontés aux données de terrain, aux observations historiques et aux études géo-scientifiques antérieures. Cette étape permet d'assurer la fiabilité des conclusions et d'affiner les interprétations en fonction des réalités du terrain.

En mobilisant les outils d'analyse spatiale et de modélisation hydrologique, cette étude contribue ainsi à la mise en place de politiques de gestion proactive du risque, en phase avec les enjeux du développement durable et de l'adaptation au changement climatique.

4. Notions de base sur la météorologie et climat

4.1. Définition et concept

La météorologie est la science qui étudie les phénomènes atmosphériques tels que les nuages, les précipitations, le vent, la température, l'humidité, etc. Elle cherche à comprendre comment ces phénomènes se forment, évoluent et interagissent entre eux.

4.2. Utilité de la météorologie

- **Prévisions météorologiques** : Grâce à des modèles mathématiques complexes et à des données recueillies par des satellites, des radars et des stations météorologiques, les météorologues peuvent établir des prévisions à court et à long terme. Ces prévisions sont essentielles pour de nombreux secteurs d'activité, tels que l'agriculture, l'aviation, la navigation maritime et la gestion des catastrophes naturelles.
- **Comprendre le climat** : La météorologie contribue également à notre compréhension du climat, c'est-à-dire des conditions atmosphériques moyennes sur une longue période. Cela permet d'étudier le changement climatique et ses impacts.
- **Protéger les populations** : Les prévisions météorologiques permettent d'alerter les populations en cas de phénomènes dangereux comme les tempêtes, les inondations ou les canicules.

4.3. Les outils du météorologue :

- **Les stations météorologiques** : Elles mesurent en continu des paramètres comme la température, l'humidité, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, les précipitations.
- **Les radiosondes** : Ce sont des ballons sondes équipés d'instruments de mesure qui sont lâchés dans l'atmosphère pour recueillir des données sur les différentes couches de l'atmosphère.
- **Les satellites météorologiques** : Ils prennent des images de la Terre et mesurent divers paramètres atmosphériques à grande échelle.
- **Les radars météorologiques** : Ils détectent les précipitations et les mouvements de l'air.
- **Les modèles numériques** : Ce sont des programmes informatiques qui simulent l'évolution de l'atmosphère en fonction des données recueillies.

En résumé, la météorologie est une science essentielle pour notre vie quotidienne et pour notre compréhension de notre planète.

4.4. Classification des climats

La classification des climats est un domaine essentiel qui divise la Terre en régions aux caractéristiques atmosphériques similaires. Elle permet de mieux comprendre la répartition des êtres vivants, les activités humaines et les effets du changement climatique.

De plus, elle joue un rôle crucial dans l'adaptation aux variations climatiques et la gestion des ressources naturelles, elle est très utile pour :

- **Comprendre les distributions** : Les climats influencent directement la répartition des plantes, des animaux et des populations humaines.
- **Prévoir les changements** : En étudiant les classifications climatiques, les scientifiques peuvent mieux anticiper les impacts du changement climatique.
- **Améliorer les modèles climatiques** : Les classifications servent de base pour développer des modèles climatiques plus précis.

4.5. Les principaux systèmes de classification

Plusieurs systèmes de classification ont été élaborés au fil du temps. Le plus connu est celui de Köppen-Geiger.

4.5.1. Classification de Köppen-Geiger

La classification de Köppen-Geiger est un système largement utilisé pour catégoriser les climats à l'échelle mondiale en fonction de la température et des précipitations. Elle divise la planète en cinq grands groupes climatiques, chacun subdivisé en plusieurs types en fonction de leurs caractéristiques spécifiques. Ce système permet une compréhension précise des variations climatiques et de leur impact sur les écosystèmes et les activités humaines.

Tableau 2 : Les Cinq Principaux Groupes Climatiques selon la Classification de Köppen-Geiger

Catégorie	Code	Nom	Caractéristiques principales	Exemples de régions
Climats tropicaux (A)	Af	Forêt tropicale	Chaud toute l'année, précipitations abondantes (>2000 mm/an)	Amazonie, Indonésie, Congo
	Am	Mousson	Saison sèche courte, pluies intenses en été	Inde, Cote ouest africaine
	Aw	Savane	Saison sèche marquée, pluies en été	Afrique de l'Ouest, Brésil
Climats arides (sec) (B)	BW	Désertique	Très faible précipitation (<250 mm/an), forte évaporation	Sahara, Désert d'Atacama
	BS	Semi-aride (Steppe)	Pluviométrie modérée (250-500 mm/an), forte variabilité	Centre des Etats-Unis, Sahel
Climats tempérés (C)	Cfa	Subtropical humide	Hivers doux, étés chauds et humides	Sud-est des Etats-Unis, Chine
	Cfb	Océanique	Températures douces, précipitations bien réparties	Europe de l'Ouest, Nouvelle-Zélande
	Cfc	Océanique subpolaire	Etes frais, hivers froids	Iles britanniques, Patagonie
	Csa	Méditerranéen chaud	Etes chauds et secs, hivers doux et pluvieux	Sud de l'Espagne, Californie
	Csb	Méditerranéen frais	Etes tempérés, hivers doux et pluvieux	Portugal, Chili central
Climats continentaux (D)	Dfa	Continental chaud	Etes chauds, hivers froids, précipitations toute l'année	Centre des Etats-Unis, Chine du Nord
	Dfb	Continental humide	Etes plus frais, hivers rigoureux	Canada, Russie
	Dfc	Subarctique	Hivers très longs et froids, été court	Sibérie, Alaska
Climats polaires (E)	ET	Toundra	Été court ($T^{\circ} < 10^{\circ}\text{C}$), hiver très long et froid	Groenland, Nord du Canada
	EF	Glaciaire	Températures négatives toute l'année	Antarctique, Groenland central

4.5.2. Classification de Köppen-Geiger appliquée à Seb dou

La commune de Seb dou est classée dans la zone BSh selon la classification de Köppen-Geiger (Figure 6). Ce type de climat est caractérisé par des conditions semi-arides avec des hivers tempérés. Les caractéristiques climatiques et hydrologiques suivantes influencent directement les risques d'inondation dans la région.



Figure 6 : Seb dou : zone d'étude en climat semi-aride (BSh). Köppen-Geiger

Tableau 3 : Caractéristiques climatiques et hydrologiques de la commune de Seb dou selon la classification de Köppen-Geiger (BSh)

Catégorie	Données / Observations
Classification Köppen-Geiger	BSh
Signification	B : Climat aride S : Steppe h : Hivers tempérés (moyenne > 0°C)
Précipitations annuelles	200–400 mm
Evaporation estivale	Forte
Amplitude thermique	Marquée
Carte de localisation	Inclure carte SIG de Seb dou avec zonage BSh
Facteurs favorisant le ruissellement rapide	<ul style="list-style-type: none"> • Faible couverture végétale • Sols crustés et faible infiltration • Pentes marquées (15–30 % sur 60 % du territoire)
Facteurs aggravant le risque d'inondation	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité de rétention d'eau limitée • Réponse hydrologique rapide aux pluies intenses • Ravinement important dans les bassins versants

La classification de Köppen-Geiger reste l'outil principal pour comprendre la distribution climatique mondiale. Elle offre une base solide pour analyser les vulnérabilités régionales face aux aléas climatiques, notamment dans les régions semi-arides comme Seb dou. Sa lecture facilitera l'interprétation des impacts du changement climatique présentés dans les chapitres suivants.

- **Autres systèmes de classification :** Il existe d'autres systèmes de classification, comme celui de Thornthwaite, qui prend en compte l'évapotranspiration potentielle, ou encore des classifications basées sur les masses d'air.

4.6. Facteurs influençant le climat :

- **La latitude :** L'éloignement par rapport à l'équateur influence l'insolation et les températures.
- **La répartition des terres et des mers :** Les océans modèrent les températures, tandis que les continents connaissent des amplitudes thermiques plus importantes.
- **Les reliefs :** Les montagnes influencent les précipitations et les températures.
- **Les courants marins :** Ils transportent de la chaleur et de l'humidité, influençant ainsi le climat des régions côtières.

4.7. Distinction entre les conditions météorologiques moyennes et extrêmes.

4.7.1. Conditions météorologiques moyennes :

Les conditions météorologiques moyennes représentent les caractéristiques climatiques habituelles d'une région sur une longue période, généralement de 30 ans. Elles sont déterminées en calculant les moyennes de différents paramètres météorologiques tels que :

- **La température :** température maximale, minimale, moyenne annuelle.
- **Les précipitations :** quantité totale annuelle, nombre de jours de pluie, intensité moyenne des précipitations.
- **L'ensoleillement :** durée moyenne d'ensoleillement par jour.
- **Le vent :** vitesse et direction moyennes.

Ces moyennes permettent de définir le climat d'une région et servent de référence pour comparer les conditions actuelles aux conditions normales.

4.7.2. Conditions météorologiques extrêmes :

Ce sont des événements météorologiques rares et violents qui s'écartent significativement des normes établies pour une région donnée. Elles sont caractérisées par une grande amplitude et une durée limitée. Quelques exemples de phénomènes météorologiques extrêmes :

- **Vagues de chaleur :** périodes prolongées de températures anormalement élevées.
- **Vagues de froid :** périodes prolongées de températures anormalement basses.
- **Sécheresses :** périodes prolongées de précipitations insuffisantes.
- **Inondations :** débordements de cours d'eau ou ruissellements importants.

- **Ouragans, cyclones, tempêtes :** vents violents accompagnés de fortes précipitations.
- **Grêle :** chute de morceaux de glace.
- **Tornades :** tourbillons de vent violents et destructeurs.

4.7.3. Différences clés entre les conditions météorologiques moyennes et extrêmes

Comme le montre le tableau 4, les conditions météorologiques moyennes définissent le climat habituel d'une région, tandis que les conditions extrêmes correspondent à des phénomènes exceptionnels aux impacts significatifs sur les sociétés humaines et les écosystèmes. Distinguer ces deux types de conditions est crucial pour mieux s'adapter au changement climatique.

Tableau 4 : Différences clés entre les conditions météorologiques moyennes et extrêmes

Caractéristique	Conditions météorologiques moyennes	Conditions météorologiques extrêmes
Fréquence	Régulières, fréquentes	Rares, ponctuelles
Intensité	Modérée	Très forte
Durée	Longue période	Courte durée
Impact	Définissent le climat	Peuvent causer des dommages importants
Utilisation	Agriculture, urbanisme, etc.	Prévision, gestion des risques

5. Changement climatique

Le changement climatique est un phénomène naturel qui entraîne des variations de température, de précipitations, de vent et d'autres paramètres sur plusieurs décennies. Au cours de millions d'années, notre planète a connu des périodes de réchauffement et de refroidissement par rapport à la situation actuelle. Cependant, nous assistons aujourd'hui à un réchauffement rapide principalement induit par les activités humaines, notamment par la combustion de combustibles fossiles qui génère des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Figure 7).

Ces activités humaines, notamment la combustion d'énergies fossiles et la déforestation, libèrent d'importantes quantités de GES tels que le dioxyde de carbone et le méthane dans l'atmosphère. Ces émissions, en constante augmentation, piègent la chaleur solaire et entraînent ainsi une élévation des températures. La dernière décennie s'est révélée

être la plus chaude jamais enregistrée, soulignant l'urgence de la situation climatique actuelle.

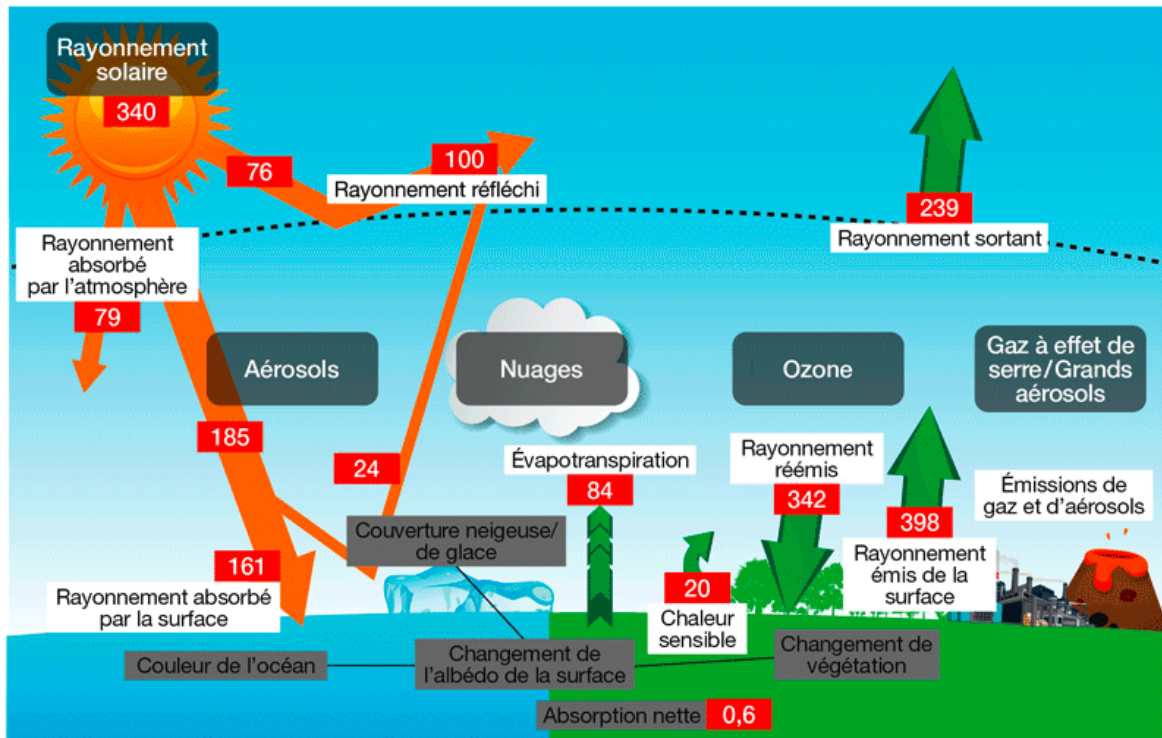


Figure 7 : L'effet de serre naturel et ses perturbations par les activités humaines.

(Sources : Météo-France ; Giec, 1er groupe de travail, 2013).

Le changement climatique ne se limite pas à l'augmentation des températures (Figure 8) : il provoque également sécheresses, inondations, incendies, élévation du niveau de la mer et perte de biodiversité. Ces phénomènes perturbent les modes de vie, endommagent les infrastructures routières, isolent les communautés et perturbent les chaînes d'approvisionnement.

Limiter le réchauffement climatique à 1,5°C est essentiel pour éviter les pires conséquences. Malheureusement, les émissions actuelles de gaz à effet de serre nous dirigent vers un réchauffement bien plus important, pouvant atteindre 4,4°C d'ici la fin du siècle.

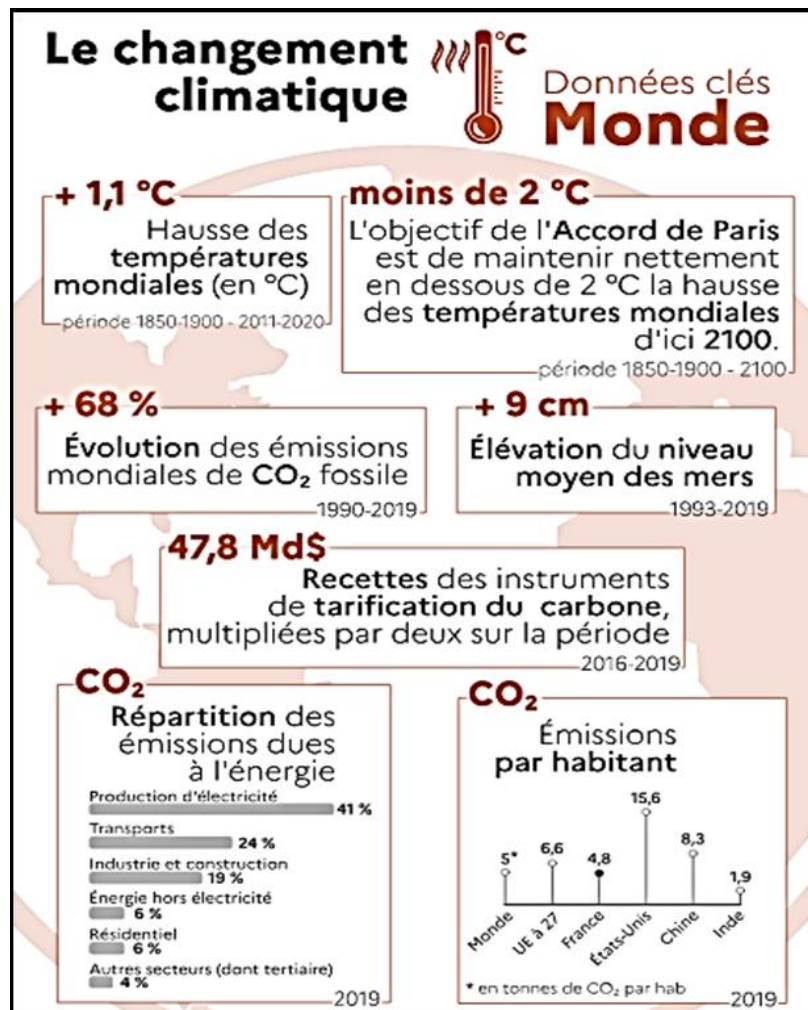


Figure 8 : Le changement climatique.

(Source : statistiques.developpement-durable.gouv.fr/).

5.1. Distinction entre les conditions météorologiques extrêmes et le changement climatique.

5.1.1. Conditions météorologiques extrêmes

- **Exemples** : vagues de chaleur, sécheresses, inondations, ouragans, tornades...
- **Durée** : Généralement de courte durée, quelques heures, jours ou semaines.
- **Cause** : Ces événements sont souvent liés à des phénomènes naturels complexes et peuvent être influencés par des facteurs locaux.

5.1.2. Changement climatique

- **Causes principales** : Augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, due principalement aux activités humaines.

- **Conséquences :** Réchauffement global, élévation du niveau de la mer, modification des régimes de précipitations, événements météorologiques extrêmes plus fréquents et plus intenses.
- **Échelle de temps :** Le changement climatique se manifeste sur des décennies, des siècles, voire des millénaires.

5.2. Lien entre le changement climatique et les conditions météorologiques extrêmes

5.2.1. Mécanismes d'Amplification par le Changement Climatique

Le changement climatique agit comme un multiplicateur de risques pour les événements météorologiques extrêmes via plusieurs processus clés :

- **Augmentation de l'énergie atmosphérique :**
 - Le réchauffement global (+1.1°C depuis 1850, GIEC 2023) accroît l'évaporation et la capacité de l'air à retenir l'humidité (loi de Clausius-Clapeyron : +7% d'humidité par °C).
 - **Résultat :** Précipitations plus intenses (ex : +20% de pluie en 24h lors d'événements extrêmes en Méditerranée).
- **Modification des régimes de circulation :**
 - Affaiblissement du jet stream polaire → stagnation des systèmes météo (vagues de chaleur prolongées, comme en Europe en 2022).
 - Dérèglement des moussons (ex : inondations au Pakistan en 2022).
- **Rétroactions positives :**
 - Fonte des glaces réduit l'albédo → amplification du réchauffement aux pôles (Arctique +3°C depuis 1980).
 - Sécheresses → diminution de l'évapotranspiration → augmentation des températures locales.

5.2.2. Impacts Observés et attribuables

Le GIEC (AR6) attribue avec haute confiance l'aggravation des événements suivants aux activités humaines :

Tableau 5: Impact observé du changement climatique

Phénomène	Tendance	Exemple Régional
Vagues de chaleur	+50% de fréquence depuis 1950	Canicule 2021 au Canada (49.6°C) («
Pluies extrêmes	+30% d'intensité en zones tempérées	Inondations en Allemagne (2021)
Sécheresses	Durée +40% en régions subtropicales	Corne de l'Afrique (2020-2023)
Cyclones tropicaux	+5% d'intensité des vents	Ouragan Ida (USA, 2021)

5.2.3. Projections Futures (Scénarios GIEC)

Selon les trajectoires d'émissions (RCP/SSP) :

- **RCP 2.6 (Limitation à +1.5°C)** : Doublement des vagues de chaleur, mais stabilisation des précipitations extrêmes après 2050.
- **RCP 8.5 (Pire cas)** :
 - ×5 les canicules, +50% les pluies intenses, et +2 m niveau marin d'ici 2100.
 - Risque de "inondations composées" (pluie + montée marine) pour les zones côtières.

5.2.4. Implications pour les infrastructures routières (Cas de Sebdou)

- **Vulnérabilité accrue** :
 - Les routes en aval des bassins versants subiront des crues éclairs plus fréquentes (modèles hydrologiques projettent +35% de débits de pointe d'ici 2050 sous RCP 4.5).
 - Dégradation des chaussées : Stress thermique (+40% de fissures sous canicules répétées).

➤ **Données clés pour l'étude :**

- Croisement des projections RCP 6.0 avec les cartes de vulnérabilité SIG pour prioriser les tronçons à risque.
- Le changement climatique ne crée pas les événements extrêmes, mais augmente la fréquence, l'intensité et la durée. Pour les infrastructures routières, cela exige :
- Une mise à jour des normes de construction (ex : drainage adapté aux pluies du siècle futur).
- Une planification spatiale intégrant les scénarios RCP (ex : éviter les zones inondables identifiées par modélisation).

Tableau 6: Lien entre le changement climatique et les conditions météorologiques extrêmes.

Phénomène climatique	Lien avec le changement climatique	Conséquences sur l'environnement et les infrastructures
Précipitations extrêmes (intensité et fréquence)	L'augmentation de la température accroît l'évaporation et la capacité de l'air à retenir l'humidité, ce qui intensifie les épisodes de fortes pluies.	Inondations soudaines, saturation des sols, endommagement des routes, glissements de terrain.
Sécheresses prolongées	Modification des régimes pluviométriques et augmentation de l'évapotranspiration due au réchauffement global.	Assèchement des sols, fissuration des chaussées, affaiblissement des structures routières.
Températures extrêmes (canicules)	Hausse générale des températures moyennes et fréquence accrue des vagues de chaleur.	Dilatation des matériaux routiers, déformations de la chaussée, dégradation prématurée des revêtements.
Épisodes de gel/dégel	Variabilité accrue des températures hivernales, augmentation des cycles de gel/dégel.	Formation de fissures, affaiblissement des fondations routières, accélération de l'usure des structures.
Tempêtes et vents violents	Modification des régimes atmosphériques et augmentation de l'énergie des systèmes dépressionnaires.	Chutes d'arbres sur les voies, endommagement des équipements (signalisation, éclairage, ouvrages).

En résumé :

- **Les événements météorologiques extrêmes** sont les manifestations visibles et immédiates du changement climatique.
- **Le changement climatique** : est le processus à long terme qui modifie les conditions météorologiques moyennes et augmente à la fois la fréquence et l'intensité des événements extrêmes. Par exemple, les vagues de chaleur deviennent plus fréquentes et plus longues, tandis que les précipitations deviennent plus intenses mais moins fréquentes dans certaines régions.

Il est important de distinguer ces deux concepts pour mieux comprendre les enjeux liés au réchauffement climatique et pour mettre en place des stratégies d'adaptation et d'atténuation efficaces.

5.3. Changements observés du climat mondial :

Les changements climatiques ne sont plus une prédiction lointaine, mais une réalité tangible que nous observons déjà à travers le monde. Ces modifications du climat global sont principalement attribuées aux activités humaines, notamment aux émissions de gaz à effet de serre (GES).

5.4. Le concept du changement climatique :

Le changement climatique, reconnu mondialement par la communauté scientifique et exposé dans les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), résulte des travaux de milliers de chercheurs à l'échelle mondiale. Ces rapports détaillent les causes, les impacts et les prévisions futures du changement climatique, tout en présentant des solutions pour en atténuer les effets et s'adapter à ses conséquences.

Le premier rapport biennal de l'Algérie sur le changement climatique souligne les défis à relever, notamment en matière de financement et de mise en œuvre des politiques climatiques. Il réaffirme l'engagement de l'Algérie à contribuer aux efforts mondiaux pour lutter contre le changement climatique, tout en s'adaptant aux impacts inévitables.

5.5. Distinction entre les conditions météorologiques extrêmes et le changement climatique.

- **Les événements météorologiques extrêmes** sont les manifestations visibles et immédiates du changement climatique.

- **Le changement climatique** est le processus à long terme qui modifie les conditions météorologiques moyennes et augmente à la fois la fréquence et l'intensité des événements extrêmes. Par exemple, les vagues de chaleur deviennent plus fréquentes et plus longues, tandis que les précipitations deviennent plus intenses mais moins fréquentes dans certaines régions.

Tableau 7 : Différences entre les conditions météorologiques extrêmes et le changement climatique.

Caractéristique	Conditions météorologiques extrêmes	Changement climatique
Définition	Événements météorologiques rares et violents qui s'écartent significativement des normes établies	Modification à long terme des modèles climatiques mondiaux ou régionaux
Exemples	Vagues de chaleur, sécheresses, inondations, ouragans, tornades	Réchauffement global, élévation du niveau de la mer, modification des régimes de précipitations
Échelle de temps	Courte durée (heures, jours, semaines)	Longue durée (décennies, siècles)
Causes	Phénomènes naturels complexes, parfois influencés par des facteurs locaux	Augmentation des gaz à effet de serre due aux activités humaines
Conséquences	Dommages matériels, pertes humaines, perturbations économiques	Augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, impacts sur les écosystèmes, les sociétés humaines, etc.
Lien avec le changement climatique	Le changement climatique augmente la fréquence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes	Le changement climatique est la cause sous-jacente de la modification des modèles météorologiques à long terme

5.6. Prévisions futures des conditions météorologiques globales

5.6.1. Les scénarios climatiques :

Les scénarios climatiques (Figure 9) sont des projections des conditions climatiques futures basées sur différentes hypothèses d'évolution des émissions de gaz à effet de serre (GES), de l'utilisation des sols et des activités humaines. Ils sont utilisés pour anticiper les impacts du changement climatique sur divers secteurs, y compris les infrastructures routières.

5.6.2. Les principaux scénarios climatiques

Les scénarios sont développés par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et sont principalement regroupés en deux générations :

5.6.3. Ancienne génération : Scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios)

Définis en 2000, ils reposent sur des trajectoires socio-économiques et des niveaux d'émissions de GES :

- **A1** : Croissance économique rapide, forte consommation d'énergie fossile.
- **A2** : Développement régional, croissance économique plus lente, émissions élevées.
- **B1** : Croissance économique mais avec une transition vers des technologies propres.
- **B2** : Développement régional avec des efforts modérés pour la réduction des émissions.

5.6.4. Nouvelle génération : Scénarios RCP (Representative Concentration Pathways)

Introduits dans le 5^e rapport du GIEC (AR5, 2014), ils se basent sur les concentrations de GES et leur impact radiatif (forçage radiatif en W/m² en 2100) :

- **RCP 2.6** : Réduction ambitieuse des émissions (scénario optimiste, +1,5°C à +2°C).
- **RCP 4.5** : Stabilisation des émissions avec des politiques climatiques modérées.
- **RCP 6.0** : Réduction limitée des émissions (scénario intermédiaire).
- **RCP 8.5** : Scénario du "laisser-faire" avec des émissions très élevées (scénario pessimiste, +4°C à +5°C).

Scenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) : Dans le 6^e rapport du GIEC (AR6, 2021), les SSP sont combinés aux RCP pour inclure les trajectoires socio-économiques :

- **SSP1** (Durabilité - Monde vert).
- **SSP2** (Scénario intermédiaire).
- **SSP3** (Rivalités régionales).
- **SSP4** (Inégalités socio-économiques).
- **SSP5** (Croissance économique basée sur les énergies fossiles).

5.6.5. Application et utilité des scénarios climatiques :

Les scénarios climatiques sont utiles pour :

- **Modéliser les inondations futures :** sous différents niveaux de précipitations extrêmes.
- **Évaluer l'évolution des risques hydrologiques :** (crues, érosion) pour le réseau routier.
- **Anticiper les vulnérabilités des infrastructures :** et proposer des mesures d'adaptation.

Les scénarios climatiques du GIEC permettent d'évaluer l'évolution probable des conditions météorologiques selon différents niveaux d'émissions de gaz à effet de serre. Leur utilisation dans ce projet vise à projeter les risques futurs pour les infrastructures routières de Sebdu et ainsi guider les stratégies d'adaptation.

5.6.6. Prévisions météorologiques au niveau mondiale :

Les prévisions météorologiques mondiales indiquent une intensification des conditions extrêmes sous l'effet du changement climatique. Selon les scénarios climatiques du GIEC, notamment les RCP et les SSP, l'augmentation continue des températures mondiales pourrait entraîner des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses, ainsi que des sécheresses prolongées dans certaines régions.

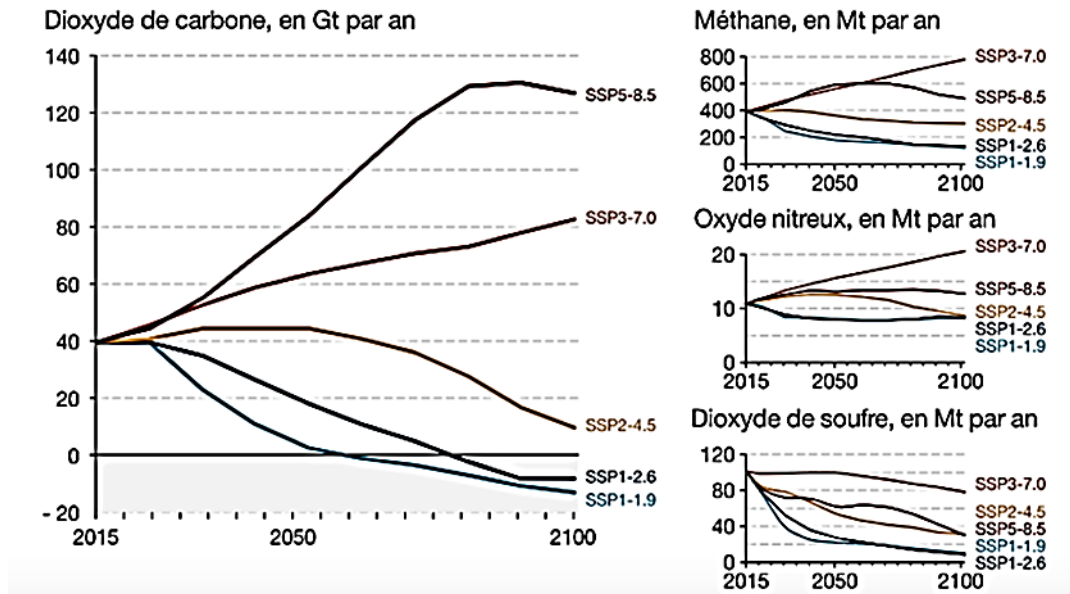


Figure 9 : Projections des émissions de gaz à effet de serre suivant les cinq scénarios SSP du GIEC. *Source : Giec, 1er groupe de travail, 2021*

Note : les derniers nombres (1.9, 2.6, 4.5, 7.0 et 8.5) nommant chaque trajectoire correspondent aux forçages radiatifs induits à l'horizon 2100 par rapport à l'ère préindustrielle, exprimés en W/m2.

Dans les scénarios à fortes émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5 ou SSP5-8.5), le réchauffement climatique s'accélérerait, amplifiant les phénomènes météorologiques extrêmes tels que les tempêtes, les précipitations intenses et l'élévation du niveau de la mer. À l'inverse, des scénarios plus optimistes, comme RCP 2.6 ou SSP1-2.6, supposent une réduction des émissions et une atténuation des impacts climatiques, limitant ainsi la fréquence et l'intensité des événements extrêmes.

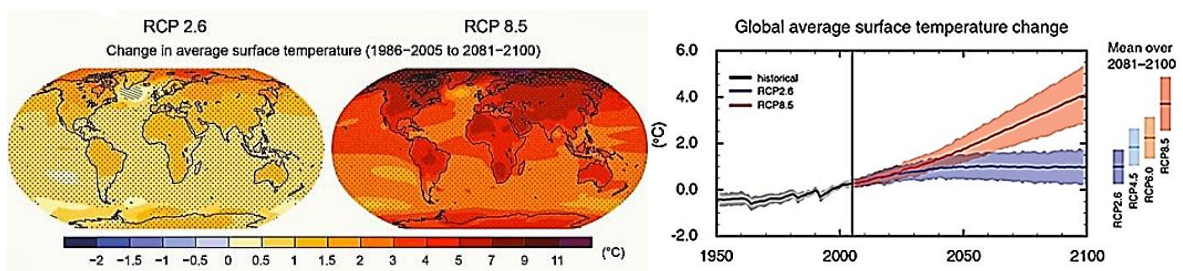


Figure 10 : Changements dans les températures moyennes à la surface (1986-2005 à 2081-2100).

Les cyclones, les inondations et les incendies de forêt devraient également devenir plus fréquents et destructeurs, en particulier sous des scénarios intermédiaires ou pessimistes (RCP 4.5, RCP 6.0, SSP2-4.5). Ces tendances soulignent la nécessité d'adopter des mesures

d'atténuation pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et de renforcer les stratégies d'adaptation afin de faire face aux impacts climatiques à l'échelle mondiale.

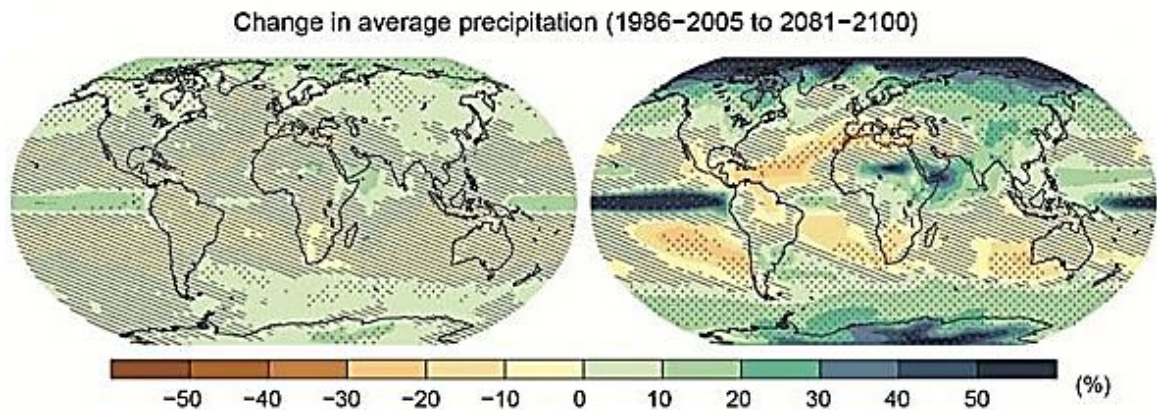


Figure 11 : Changements dans les précipitations moyenne à la surface (1986-2005 à 2081-2100).

Conclusion

Ce chapitre détaille la méthodologie employée pour évaluer l'impact des inondations sur le réseau routier de Sebdu, dans un contexte de changement climatique. L'approche repose sur l'intégration de données issues de la télédétection, de la modélisation hydrologique et de l'analyse spatiale via les SIG.

Les données utilisées incluent des images satellites (ALOS-2, Sentinel-2), des données climatiques (GEE, Météoblue), hydrologiques (GRACE, Global Watersheds) et des indicateurs de végétation (NDVI, SAVI). Les outils mobilisés sont QGIS, SAGA GIS, Global Mapper et Google Earth Engine.

La méthode s'articule autour de quatre étapes principales : prétraitement des données, modélisation hydrologique, simulation d'inondations (scénario RCP 6.0), et analyse multicritère de la vulnérabilité.

Les résultats ont été validés par croisement avec des données de terrain et historiques, constituant ainsi une base scientifique pour orienter des mesures d'adaptation ciblées. Le chapitre suivant présentera les caractéristiques de la zone d'étude afin de contextualiser les enjeux identifiés.

Le chapitre 2 contextualise l'analyse en présentant les caractéristiques géographiques, climatiques et hydrologiques de Sebdu, afin de mieux cerner les facteurs locaux de vulnérabilité. Il met en lumière les enjeux spécifiques liés à son réseau routier.

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

1. Introduction

Dans le cadre de cette étude, une zone présentant des problématiques récurrentes liées aux inondations a été retenue comme terrain d'analyse. Ce choix s'appuie à la fois sur la pertinence géographique du site, la disponibilité des données, et la fréquence des événements hydrométéorologiques impactant les infrastructures locales.

La commune de Sebdou, retenue comme zone d'étude (Figure 12), fera l'objet d'une présentation dans la section suivante, où seront mises en lumière ses principales caractéristiques physiques, hydrologiques et infrastructurelles, afin de mieux cerner les enjeux liés au risque d'inondation.

2. Présentation de la commune de Sebdou

Sebdou, commune de la wilaya de Tlemcen en Algérie, allie une économie rurale (agriculture, artisanat) à un patrimoine culturel préservé. Son développement s'appuie sur un réseau d'infrastructures en expansion, bien que confronté aux défis d'un climat semi-aride (BSH). Cette combinaison fait de Sebdou un territoire représentatif des enjeux algériens en matière de résilience locale.

2.1. Situation géographique de la commune de Sebdou

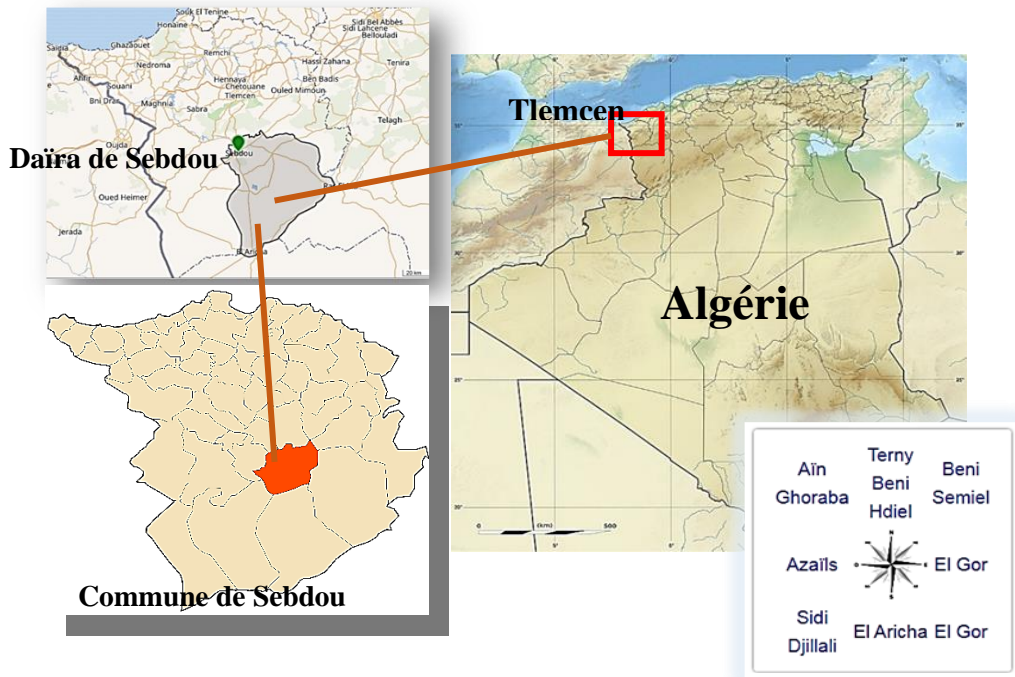


Figure 12 : Situation de la commune de Sebdou.

La commune de Sebdou (34° 38' 22" Nord, 1° 19' 37" Ouest.), située dans la wilaya de Tlemcen au nord-ouest de l'Algérie, se trouve à 38 km au sud de la ville de Tlemcen. Elle s'étend sur une superficie de 24 260 ha, dans une zone de transition entre les contreforts sud de Tlemcen et la steppe. La commune est confinée au sein d'un large synclinal orienté est-ouest, avec un relief marqué par des collines qui entourent Sebdou et par des plateaux élevés au sud. Cette diversité géographique, associée à sa position, rend la région particulièrement vulnérable aux aléas climatiques, notamment les risques d'inondation. Son réseau routier moderne et bien entretenu constitue un véritable atout pour la région. En effet, Sebdou est desservie par des axes routiers principaux, routes nationaux (RN) et chemins de wilaya (CW) qui facilitent la mobilité des habitants et le transit des marchandises.

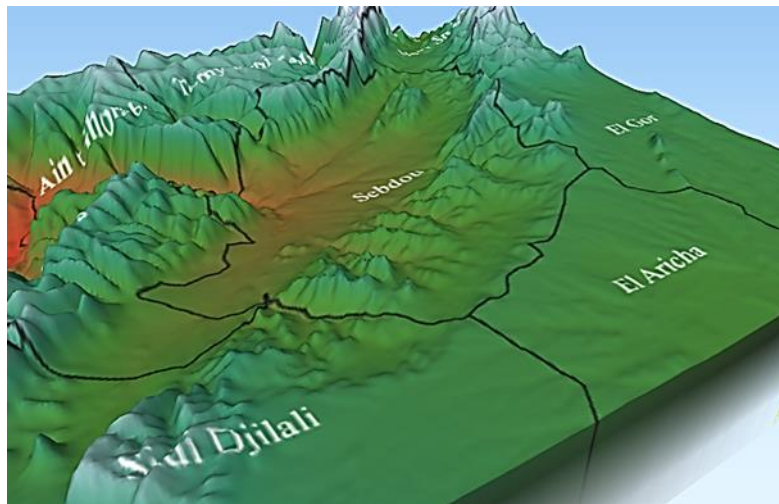


Figure 13 : Modélisation 3D du relief de la commune de Sebdou. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

2.2. Climat de la commune de Sebdou :

La commune de Sebdou, est caractérisée par un climat semi-aride (classification de Köppen : bsh). Ce type de climat se distingue par des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux et modérément pluvieux.

Tableau 8 : Répartition des précipitations saisonnières (1979/2020).

Mois	T(C°)	P(mm)
Sep	23.4	20.5
Oct	19	28.9
Nov	14	40.8
Déc	10.8	45.6
Jan	9.7	45
Fév	10.7	42.1
Mars	13.2	44.2
Avr	15.1	33.8
Mai	18.7	30.2
Juin	23.4	10.8
Juil	28	5.3
Août	28.6	7.3

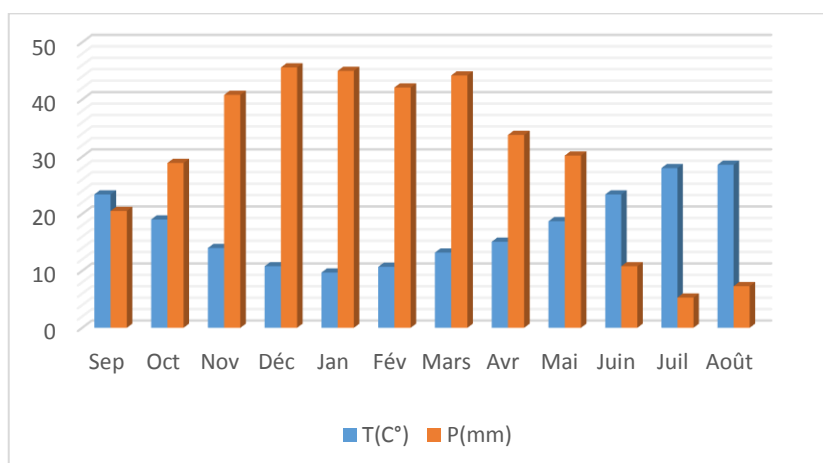


Figure 14 : Répartition des précipitations saisonnières (1979/2020).

Sur la période allant de 1979 à 2020, la pluviométrie annuelle moyenne à Sebdu s'élève à 354,4 mm, avec un pic à 694 mm (en 1995/1996) et un minimum à 197,5 mm (en 2019/2020). Les précipitations les plus abondantes se concentrent entre janvier et mars, avec une moyenne de 45 mm, tandis que juillet demeure le mois le plus sec, à 5,3 mm. Il est important de noter que ces précipitations sont nettement plus élevées sur les massifs de Ghar Boumaaza, où elles alimentent plusieurs sources sur les plateaux de Habalat.

Les températures moyennes annuelles sont irrégulières. Le mois de Janvier est le plus froid avec 9,7°C, les mois de Juillet-Août sont les plus chauds avec une température de 28°C. La moyenne enregistrée est de 17,9°C.

Tableau 9 : Moyenne des précipitations mensuelles

Désignation	P (mm)	Nbre jours
S	10	4
O	23	6
N	35	8
D	42	6
J	43	6
F	41	6
M	37	7
A	35	5
M	34	7
J	15	3
J	5	3
A	7	4
Total	326	65

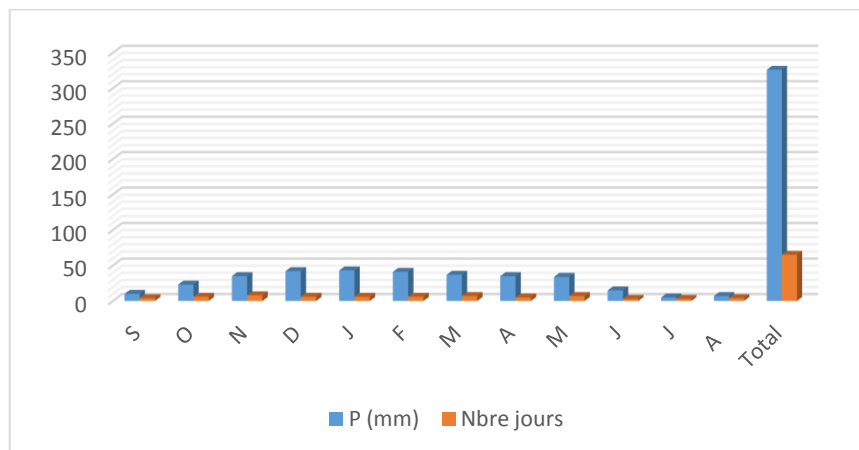


Figure 15 : Moyenne des précipitations mensuelles

L'amplitude thermique est assez importante avec la présence d'une saison sèche beaucoup plus étalée que la saison humide. La température moyenne enregistrée est de 13,7°C, variant entre un minima de -1,5°C et un maxima de 35,6°C.

Tableau 10 : Moyenne des températures mensuelles

Désignation	m	M	$(M+m^2)/2$
J	-1.5	11.5	5.5
F	-1.2	12.4	5.6
M	0.9	15.9	8.4
A	2.9	20.8	11.8
M	7.2	24.7	15.9
J	10.9	29.8	20.3
J	14.1	35.6	24.3
A	14.6	35	24.8
S	11.1	29.8	20.5
O	6.4	23.2	14.8
N	1.1	14.8	7.9
D	-1.5	11.9	5.2
Total	5.4	22.1	13.7

- *M* : température maximale
- *m* : température minimale
- $(M+m^2)/2$: température moyenne annuelle

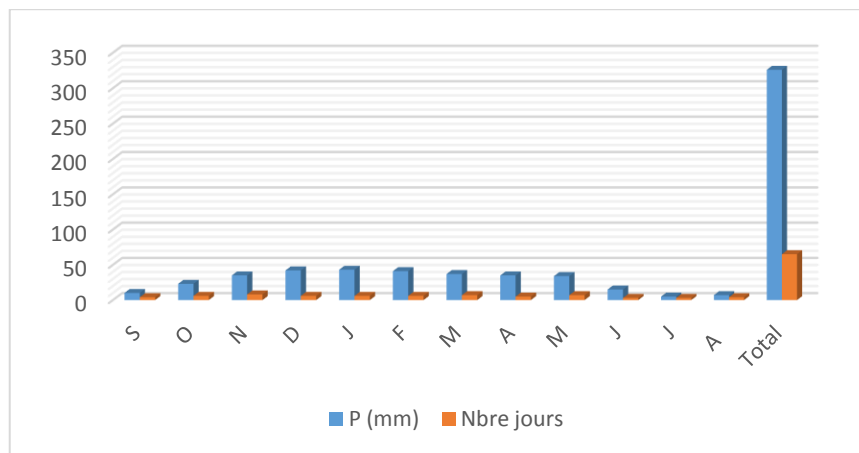


Figure 16 : Moyenne des températures mensuelles.

La neige est assez fréquente avec des hauteurs moyennes comprises entre 15 et 20 cm, engendrant des perturbations de la circulation routière. La gelée qui suit l'enneigement génère le phénomène de glace, ce qui complique d'avantage l'activité et le transport interurbain.



Figure 17 : Climat de Sebdou, Chute de neige

La période estivale (juillet-août) est exposée à des vents chauds (sirocco), résultant des influences désertiques, fortement chargé en sable et limons, réduisant ainsi la visibilité et accélérant les feux d'incendie des forêts et champs agricoles.

Le vent du Nord est présent pendant toute l'année, avec quelques fois du vent du Sud/Ouest, dont la vitesse moyenne annuelle est de 2,35 m/s. La vitesse maximale est de 32 m/s, soit 115,2 km/heure.

On enregistre une fréquence de 17% pour les vents du Nord et 13% pour ceux de l'Ouest. Les vents, dits calmes, avoisinent les 34%. La vitesse moyenne des vents est moyenne de 2,95 m/s.

2.3. Géologie

Les principales formations géologiques rencontrées à travers l'espace communal de Sebdou sont principalement :

2.3.1. L'âge du Secondaire :

Qui forme l'ossature principale, représentée par le Jurassique supérieur. On distingue :

- **Les Grès de Boumediene** : une alternance de grès à ciment calcaire et d'argile jaunâtre, sableuse à perméabilité médiocre, couvrant de grandes étendues et contiennent des réserves permanentes en eau souterraine.
- **Les Dolomies de Tlemcen** : ce sont des calcaires dolomitiques karstifiés, avec présence de grottes à perméabilité excellente où affleurent plusieurs sources.

2.3.2. Le Tertiaire :

Formé par les dépôts, essentiellement des marnes et grès d'âge Miocène inférieur et moyen à perméabilité très faible, localisés au pied des reliefs à partir desquelles jaillissent des sources à faibles débit.

2.3.3. Le Quaternaire :

Formé par les dépôts continentaux à profondeur moyenne se développant sur des croûtes calcaires qu'on retrouve au niveau des fonds de vallées sous forme de terrasses à haute valeur agricole.

Ainsi, de point de vue géotechnique, les sols sont hétérogènes. Ce sont des sols à substrat calcaire dur, parfaitement adapté à tout type de construction. Aussi, il est à noter que les sols sont sous la dépendance de la roche-mère qui leur a donné naissance en raison de leur impuissance, ce qui conforte leur stabilité.

Au milieu de cette structure abrupte, s'est formée une dépression de plio-quaternaire à sol caillouteux, hormis certaines terrasses alluviales où les dépôts limoneux et fertiles le long de la Tafna.

2.4. Hydrographie et bassins versants

La commune de Sebdu recèle un important réseau hydrographique drainant les écoulements superficiels, qu'on peut répartir en six sous-bassin hydrographiques : Tafna, Oued Sebdu, Oued Kicole, Oued Kadous, Oued Guettara Hassel et Taoudlala. Globalement, les mesures de débit à partir de la station de jaugeage d'Oued Sebdu ont permis d'enregistrer des débits moyens de 28 m³/s, avec un débit max de 64 m³/s.

Les oueds du sud présentent un fort potentiel de crue en raison de leurs caractéristiques intermittentes., notamment :

- **Oued Kicole** : c'est le plus redoutable des cours d'eau traversant l'agglomération de Sebdu sur un linéaire de 2,3 Kms. Il reçoit de multiples affluents et déborde facilement sur le tissu urbain en raison de la dégradation de ses berges.
- **Oued Guettara El Hassel** : traverse également l'agglomération chef-lieu dans le même sens (de Sud vers le Nord) sur un linéaire de 1,4 Kms.
- **Oued Kadous** : constitue une véritable contrainte pour la zone industrielle.

2.5. Prévisions météorologiques au niveau de la commune de Sebdu :

Les prévisions météorologiques pour la commune de Sebdu selon les modèles climatiques susmentionnées, indiquent une tendance à des conditions climatiques de plus en plus extrêmes. Le réchauffement des températures entraîne des vagues de chaleur et des sécheresses prolongées avec des précipitations abondantes et des tempêtes violentes. Ces phénomènes augmentent les risques d'inondations et d'incendies de forêt.

Le graphique (Figure 18) montre l'anomalie de température pour chaque mois depuis 1979 jusqu'à aujourd'hui. L'anomalie indique de combien il a fait plus chaud ou plus froid que la moyenne climatique sur 30 ans de 1980 à 2010. Ainsi, les mois rouges ont été plus chauds et les mois bleus plus froids que la normale. Dans la plupart des endroits, on constate une augmentation des mois plus chauds au fil des ans, ce qui reflète le réchauffement associé au changement climatique.

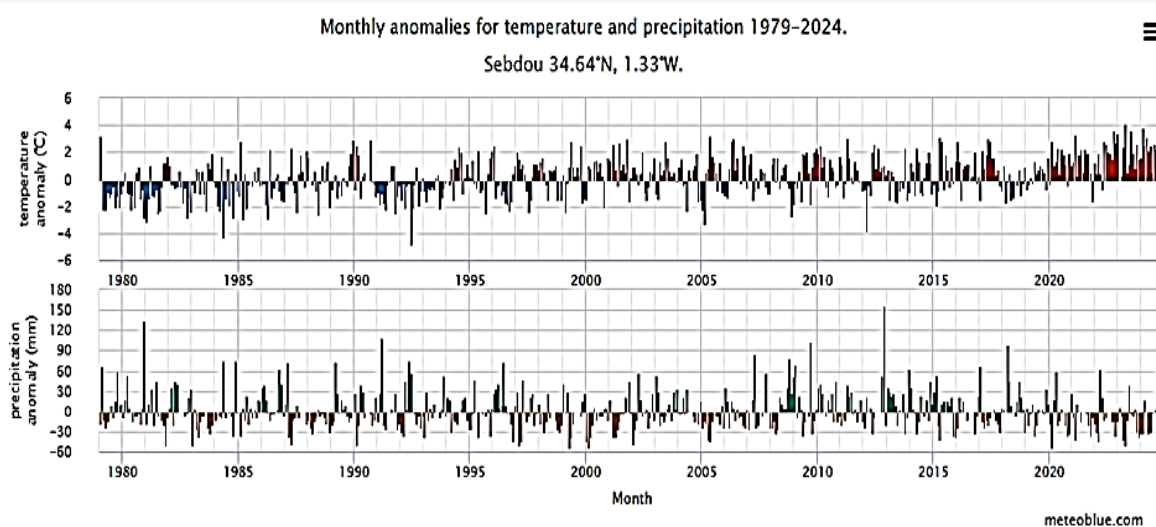


Figure 18 : Anomalies mensuelles de température et des précipitations – Changement climatique Sebdu. (Source *Météoblue*).

Le graphique (Figure 19) montre clairement une hausse de la température, accompagnée d'une augmentation de l'évaporation, tandis que les précipitations diminuent de manière significative. Cette tendance explique le phénomène de sécheresse prolongée qui caractérise actuellement le climat de la région de Sebdu.

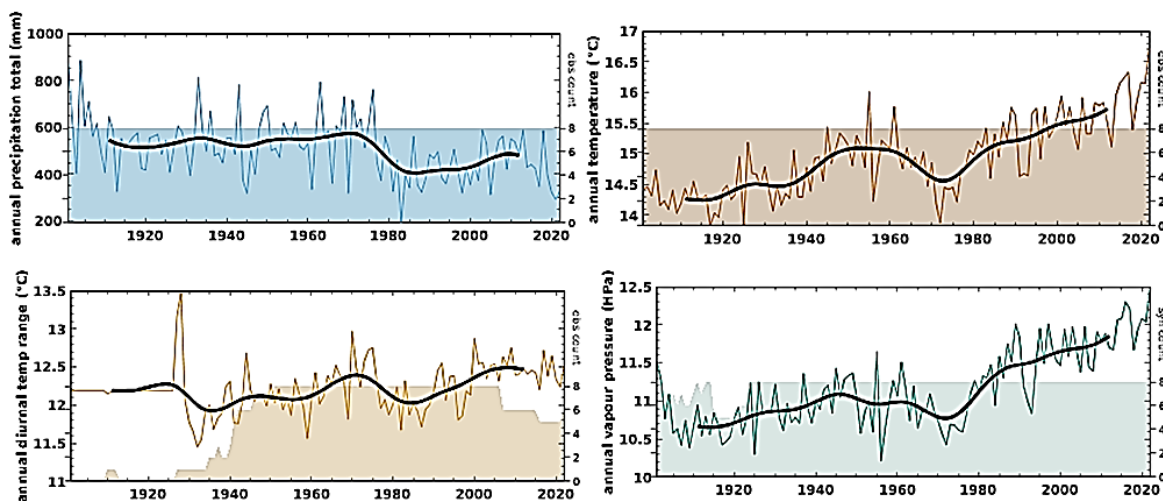


Figure 19 : Changements dans les précipitations et températures moyenne à la surface (1900 à 2024). (Source Météoblue).

Comme le montre la carte de projection climatique mondiale (Figure 21) et le diagramme de l'évolution des précipitations (Figure 20), la région de Sebdo, située en Afrique du Nord, est particulièrement exposée à une intensification des épisodes pluvieux extrêmes, augmentant ainsi le risque d'inondations. Bien que son climat soit semi-aride, les précipitations, bien que rares, peuvent survenir de manière soudaine et intense, provoquant des crues rapides.

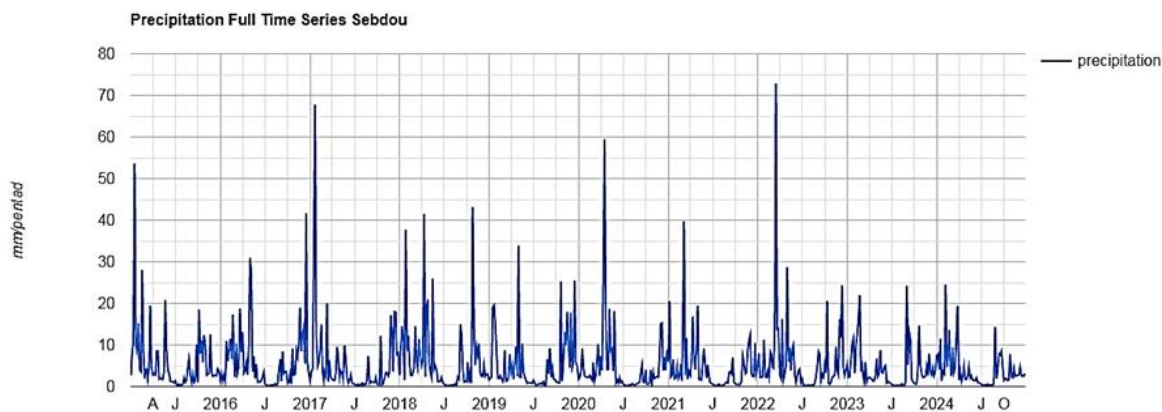


Figure 20 : Évolution des précipitations et crues enregistrées dans la région de Sebdo entre 2015, 2024

Le changement climatique accentuera ce phénomène, entraînant une augmentation de la fréquence et de la gravité des inondations, avec des impacts significatifs sur les infrastructures, l'agriculture et les populations locales.

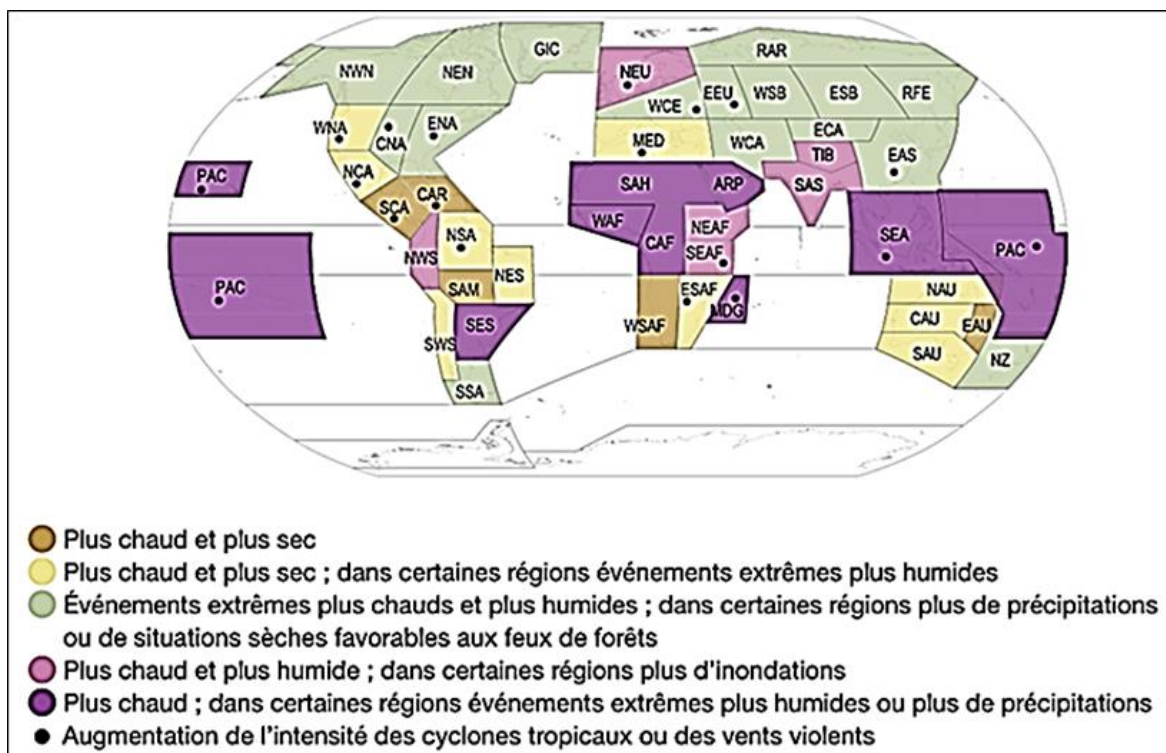


Figure 21 : Carte de projection climatique mondiale. (Source : Giec, 1er groupe de travail, 2021)

Note : les régions du monde sont groupées en cinq classes, en fonction des impacts climatiques. La période de référence correspond au milieu du 21^{ème} siècle ou un réchauffement mondial moyen de + 2 °C, par comparaison avec une période de référence climatologique 1960-2014.

Remarque : Il est donc crucial que la Commune de Sebdou renforce ses mesures de prévention et d'adaptation face au changement climatique, car les inondations ont déjà causé des dommages significatifs aux infrastructures routières.

3. Le changement climatique et l'infrastructure routière

Les infrastructures routières sont essentielles au développement économique et social, facilitant les échanges commerciaux, l'accès aux services et l'intégration des territoires. Elles renforcent la mobilité des personnes et des biens, stimulant ainsi la croissance et réduisant l'isolement des zones rurales. Cependant, leur vulnérabilité aux aléas climatiques, compromet leur pérennité. Il est donc crucial d'investir dans leur résilience pour assurer un développement durable et inclusif.

Le changement climatique accentue les phénomènes météorologiques extrêmes, menaçant la durabilité des infrastructures routières. Parmi ces menaces, les inondations

constituent un risque majeur, provoquant l'érosion des chaussées, l'affaiblissement des fondations et l'endommagement des ouvrages de drainage. L'accumulation d'eau sur la voirie entraîne également une détérioration rapide des matériaux et une augmentation des coûts d'entretien.



Figure 22 : Dégâts des inondations sur les infrastructures routières. Daïra de Sebdu.

3.1. Changements climatiques et leurs impacts sur les infrastructures routières

Le changement climatique affectera directement les infrastructures routières en modifiant des paramètres clés comme la profondeur de gel et les températures moyennes. L'intensification des événements météorologiques extrêmes tel que les inondations accentueront les risques, rendant indispensable l'adaptation des méthodes de conception des routes. Ces changements entraîneront une hausse des besoins en entretien et réparation, augmentant les coûts et les perturbations du trafic. Le tableau récapitulatif (Tableau 11) illustre ces effets en mettant en évidence les principaux changements climatiques, et leurs impacts potentiels sur les infrastructures routières.

Tableau 11 : Impacts du Changement Climatique sur les Infrastructures Routières.

(Source, Thèse Patrick Rychen 2013).

Effet du changement climatique	Changements des conditions environnementales	Impacts potentiels sur les infrastructures routières
Changement des températures moyennes	Augmentation des températures moyennes des chaussées	- Périodes de pose des enrobés bitumineux plus longues.
Changement des températures minimales extrêmes	Augmentation des températures minimales	- Périodes de gel moins nombreuses, élévation de la limite d'enneigement. - Meilleure adhérence véhicule-route.
Changement des températures maximales extrêmes	Augmentation des températures maximales	- Dégradations accélérées des performances structurelles et fonctionnelles (ornièrage, ressuage, vieillissement thermique des bitumes, etc.). - Expansion thermique des matériaux (chaussées en béton, ponts, joints, etc.).
Variation journalière des températures	Augmentation de la variabilité journalière des températures des chaussées	- Dégradations liées aux cycles gel-dégel accélérés (fissuration thermique, fatigue, etc.).
Apparition de périodes de sécheresse et de canicules	Augmentation du nombre et de l'intensité des périodes de sécheresse et de canicules	- Dégradations accélérées des infrastructures. - Expansion thermique accentuée des chaussées en béton, ponts, joints, etc. - Conditions de construction plus pénibles pour les travailleurs. - Assèchement des sols et tassement différentiel des fondations.
Apparition de périodes de froid prolongé	Diminution du nombre et de l'intensité des périodes de froid prolongé	- Périodes de gel moins nombreuses, diminution de la profondeur de gel, élévation de la limite d'enneigement. - Meilleure adhérence véhicule-route.
Précipitations moyennes en hiver	Précipitations neigeuses plus nombreuses en altitude ; Précipitations pluvieuses plus nombreuses à basse altitude	- Dégradations accélérées des performances structurelles et fonctionnelles (adhérence, sensibilité à l'eau, etc.). - Érosion accentuée des sols et fondations de routes. - Risque accru d'avalanches et de glissements de terrain.

Précipitations moyennes en été	Précipitations pluvieuses moins nombreuses	- Assèchement des sols et tassement différentiel des fondations. - Périodes de pose des enrobés bitumineux plus larges.
Événements de précipitations extrêmes	Augmentation du nombre et de l'intensité des événements de précipitations extrêmes	- Dégâts aux infrastructures dus aux inondations et à l'érosion des sols et des fondations. - Risque accru d'avalanches et de glissements de terrain. - Dégradations accélérées des performances structurelles et fonctionnelles (adhérence, fissuration, etc.).
Événements de tempêtes extrêmes	Augmentation du nombre et de l'intensité des tempêtes extrêmes	- Dégâts aux infrastructures dus aux objets tombants, dégâts aux ponts, dégâts aux dispositifs extérieurs à la voie (panneaux, lumières, signaux, etc.).
Changement du niveau de la mer	Augmentation du niveau de la mer	- Inondations et dégâts aux infrastructures à faible altitude. - Érosion accentuée des sols et fondations de routes.

3.2. Les Inondations et Leurs Impacts sur les Infrastructures Routières

Les inondations sont parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et destructrices, impactant divers secteurs, dont les infrastructures routières. Elles sont principalement causées par des précipitations intenses, des crues soudaines et une mauvaise gestion des eaux pluviales. Dans le contexte du changement climatique, la fréquence et l'intensité des inondations augmentent, posant des défis majeurs pour la résilience des infrastructures routières et la protection de la population.

3.2.1. Cause des Inondations :

Les inondations peuvent résulter de plusieurs facteurs naturels et d'origine humaine :

- **Précipitations extrêmes** : Les fortes pluies dépassant la capacité d'infiltration du sol provoquent un ruissellement important.
- **Débordement des cours d'eau** : Lors de fortes crues, les rivières et oueds peuvent sortir de leur lit et inonder les zones environnantes.

- **Urbanisation et imperméabilisation des sols** : L'extension des surfaces bétonnées réduit l'infiltration de l'eau et accélère le ruissellement.
- **Mauvaise gestion des infrastructures hydrauliques** : Le manque d'entretien des canalisations et des ouvrages de drainage contribue à l'accumulation des eaux pluviales.
- **Facteurs géographiques et topographiques** : Certaines régions, comme les zones à relief accidenté ou situées en basses plaines, sont plus vulnérables aux inondations.



Figure 23 : Aperçu de l'inondation de la ville de Sebdou.

3.3. Impacts des Inondations sur les infrastructures routières :

- **Dégradation des Chaussées** : Les inondations provoquent une saturation en eau des couches de chaussée, entraînant une perte de portance et une accélération de la dégradation (orniérage, fissuration, affaissement, etc.). Les matériaux bitumineux et les structures en béton sont particulièrement sensibles à l'effet de l'eau prolongée.
- **Effondrement et Érosion des Fondations** : L'eau en mouvement exerce une pression considérable sur les infrastructures routières, érodant les talus et affaiblissant les fondations. L'érosion des berges et des remblais peut entraîner l'effondrement partiel ou total de certains segments routiers.
- **Dégradation des Ouvrages Hydrauliques** : Les ponts, buses et canalisations peuvent être obstrués ou endommagés par des débris transportés par les eaux en crue. Une mauvaise évacuation des eaux peut accentuer l'inondation des routes et prolonger la durée de l'impact.

- **Perturbation du Trafic et Conséquences Économiques** : Les routes inondées deviennent impraticables, entraînant des interruptions de circulation et des détours coûteux. Ces perturbations ont des répercussions économiques importantes, notamment en ralentissant les échanges commerciaux et en augmentant les coûts de maintenance et de réparation.

3.4. Trajectoire historique des inondations et leurs effets sur le réseau routier de Sebdou

3.4.1. Consistance de réseau routier :

Le réseau routier de la commune est composé de deux voies d'importance nationale (RN22 et RN 22B), auxquels s'ajoutent quatre (4) chemins de wilaya (CW09, CW46, CW107 et CW112) et huit (8) chemins communaux.

3.4.1.1. Routes nationales (RN)

- **La RN22** : reliant Béni Saf à Mecheria, passant par Tlemcen et Sebdou. Son importance réside dans sa connexion avec le réseau routier national, notamment la RN35A au nord et la RN6 au sud, en supportant une partie des flux, depuis la métropole d'Oran vers le grand Sud (Naama, Bechar, Adrar, Tindouf). Au niveau de la commune de Sebdou c'est la voie de circulation mécanique la plus dynamique. Toutefois, son passage en plein centre-ville de Sebdou a été à l'origine d'encombrement, ce qui a nécessité le recours à un évitement du côté Est, desservant l'agence routière.
- **La RN 22B** : Elle relie Sebdou à Ouled Mimoun, ce qui lui permet de rentrer en connexion avec la RN7 (Maghnia - Rélizane, autoroute Est-Ouest). A l'échelle locale, elle relie Sebdou à sa partie Est (Chahid Madani, Bey Miloud et le CW112 en direction d'El Gor.

3.4.1.2. Chemins de Wilaya (CW) :

Globalement, l'espace communal de Sebdou dispose d'un réseau de chemins de wilaya, totalisant 21 Kms, dont 18 Kms revêtus et 03 Kms (CW09) à l'état de piste. Cette dernière est récemment promue en CW, dans l'attente d'une opération de revêtement.

Le reste du réseau est dans un état moyen, nécessitant des travaux d'élargissement et de réfection au niveau de certains tronçons.

- **Le CW46**, emprunte la vallée de la Tafna pour desservir les communes de Ain Ghoraba, Azails, Beni Snous et Beni Bahdel.
- **Le CW107** relie Sebdou à Sidi Djillali et se poursuit vers El Bouihi. Localement, il dessert une zone éparsée à forte concentration en fermes agricoles.
- **Le CW09** relie la ville de Sebdou (Benaïssa) à l'agglomération de Tafsara (Azails).
- **Le CW112** relie la RN 22B au niveau de l'AS-Bey Miloud (Dermam) en direction de la zone steppique Sud-Ouest, notamment la commune d'El Gor et Ras El Ma.

Tableau 12 : Consistance du réseau routier (RN et CW)

Catégorie	Désignation	Revêtue (Km)	Non Revêtue (Km)	Total
RN	RN 22	18.600	-	18.600
	RN 22B	13.600	-	13.600
CW	CW 46	3.000	-	3.000
	CW 107	7.000	-	7.000
	CW 09	-	3.000	3.000
	CW 112	8.000	-	8.000

3.4.1.3. Ouvrage d'assainissement routier (Dalot)

Le dalot est un ouvrage d'assainissement routier essentiel pour évacuer efficacement les eaux pluviales, prévenir l'accumulation d'eau sur la chaussée et limiter les dégradations du réseau routier. Il est dimensionné selon les caractéristiques hydrologiques locales et son entretien régulier garantit la sécurité des usagers et la durabilité des infrastructures.

Les dalots constituent une composante essentielle du réseau routier de Sebdou, qui présente un nombre particulièrement élevé par rapport au linéaire desservi, Les tableaux 13 et 14, illustrent la configuration du réseau routier en matière de dalots.

Tableau 13 : Inventaire des Ouvrages d'Art et Dalots sur le réseau des routes nationales.

N°	RN.	PK	LOCALISATION	OBSTACLE FRANCHISSE	ANNEE CONSTRUCTION	TYPE OA	TYPE FONDATION	TYPE SUPERSTRUCTURE	LONGUEUR (m)	LARGEUR (m)	SURFACE (m2)	HAUTEUR (m)	LARGEUR TROTTOIR	Nombre de travée	ITINERAIRE DE DEVIATION
1	22	100+500	Sebdou	Oued Tafna	1988	Béton armé	profond	Béton armé	46.00	17.00	1 088.00	07.60	1.70/1.70	4	Oui rn 22 pk 100+500+ex RN 22 pk100+765
2	22	100+765	Sebdou	Oued TAFNA	/	ARC	Superficiel	ARC	25.50	4.00	102.00	6	/	1	/
3	22	102+100	Sebdou	Oued guetara	1998	Dalot	Superficiel	Béton armé	10.00	10.00	100.00	4.60	1.50/1.50	4	Oui (urbain)
4	22	102+400	Sebdou	Oued kikol	/	Béton armé + maçonnerie	Superficiel	Béton armé + maçonnerie	10.00	13.40	134.00	06.00	1.50/1.50	1	Oui (urbain)
5	22	106+820	Sebdou	Oued kikol	/	Maçonnerie + béton armé	Superficiel	Béton armé + maçonnerie	9.15	6.50	54.47	4.10	/	1	/
6	22	109+011	Sebdou	Oued kikol	/	Maçonnerie + béton armé	Superficiel	Béton armé + maçonnerie	5.30	9.00	47.7	2	0.50/0.50	1	/
7	22	110+270	Sebdou	Oued kikol	1970	Maçonnerie + béton armé	Superficiel	Maçonnerie + béton armé	8.00	8.50	68.00	2	/	1	/
1	22B	36+100	Sebdou	Oued Sam	/	Maçonnerie + béton armé	Superficiel	ARC	04.00	07.30	29.2	03.30	/	1	/
2	22B	44+100	Sebdou	Oued el-Kebir	/	Maçonnerie + béton armé	superficiel	Travée indépendante	07.00	09.50	66.5	06.60	/	1	/

Tableau 14 : Inventaire des Ouvrages d'Art et Dalots sur le réseau des chemins de wilaya.

N°	CW	PK	LOCALISATION	OBSTACLE FRANCHISSE	ANNEE CONSTRUCTION	TYPE OA	TYPE FONDATION	TYPE SUPERSTRUCTURE	LONGUEUR (m)	LARGEUR (m)	SURFACE (m2)	HAUTEUR (m)	LARGEUR TROTTOIR	Nombre de travée
1	9	15+900	Sebdou	FARCH	/	DALOT	Superficiel	DALOT	9.50	10.30	97.85	03.40	/	4
1	46	1+000	SEBDOU	Oued TAFNA	1991	OUVRAGE D'ART	PROFOND	/	09.00	20.00	180.00	13.00	/	2
1	107	04+070	SEBDOU	O/Meghtour	/	DALOT	Superficiel	/	9.00	7.00	63.00	12.00	/	3
1	112	2+500	SEBDOU	CHAABET	/	DALOT	Superficiel	/	04.50	06.00	27.00	1.5	/	1
2	112	03+900	SEBDOU	Oued KENDOSSI	/	DALOT	Superficiel	/	07.50	6.00	45	1.5	/	1

3.4.1.4. Trajectoire historique des inondations dans la commune de Sebdou :

En raison de sa situation géographique et de sa topographie, la commune de Sebdou est traversée par plusieurs oueds (Kicole, El Guettara, Guettara Hassel, Sidi Moussa, Sebdou et Kadous) qui reçoivent d'importantes précipitations. Ces précipitations, associées à des temps de concentration très courts, entraînent une surface inondable globale évaluée à 213 hectares. Les inondations dans la région sont caractérisées par des crues rapides. L'impact sur la population est significatif, avec 17 % des habitants touchés. Selon le Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI), le plan d'action pour Sebdou (Consortium, 2014), élaboré par le groupement AGIR-ASAL, la vulnérabilité de la ville est jugée à un niveau de risque très élevé (Annexe 03).

La commune de Sebdou est située dans le bassin versant où les différents oueds convergent vers l'exutoire en amont de l'oued Tafna, accentuant ainsi la complexité hydrologique de la région.

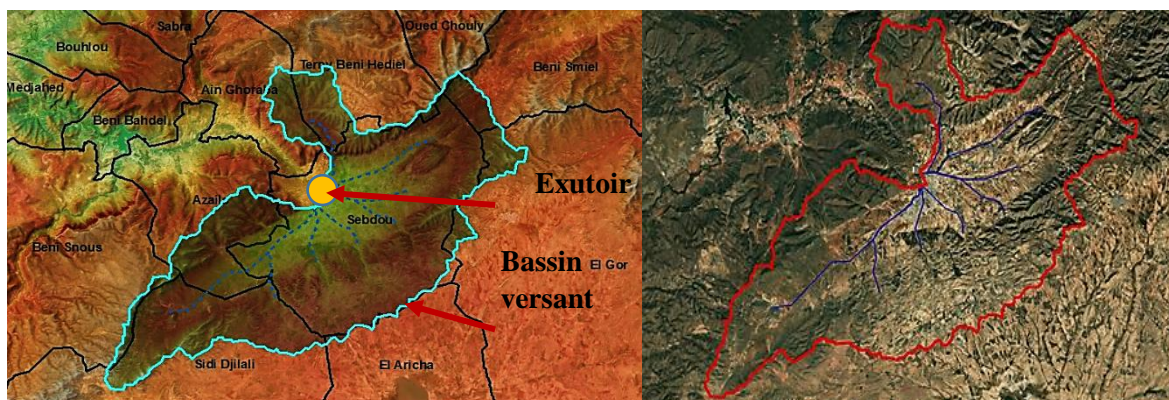


Figure 24 : Bassin versant de Sebdo.

Pendant la période coloniale, les autorités françaises ont aménagé autour de Sebdo, des bermes en terre (Figure 25) suivant les courbes de niveau afin de protéger les espaces agricoles, de préserver les terres fertiles et de ralentir l'écoulement des eaux pluviales transitant par les oueds. Ces levées de terre jouent un rôle essentiel dans la protection à la fois de la ville de Sebdo et du réseau routier.

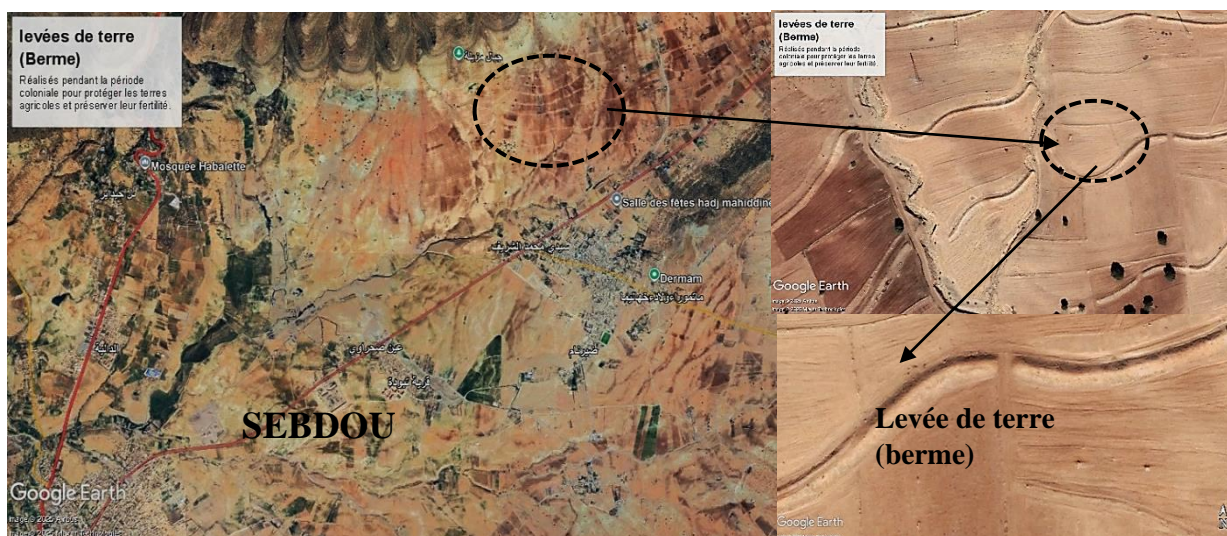


Figure 25 : Levées de terre pour protection (Berme).

Depuis 2015, la commune de Sebdo connaît une augmentation des inondations, causant des pertes humaines et des dégâts matériels importants. En 2024, la région a été touchée à deux reprises par des crues soudaines, entraînant la mort de deux personnes et provoquant des destructions dans les biens privés et publics, notamment au niveau des infrastructures routières.

3.4.2. Dommages recensés sur les réseaux routiers (RN et CW)

3.4.2.1. Au niveau des routes nationales :

Les inondations survenues dans la commune de Sebdou ont fortement impacté le réseau des Routes Nationales, entraînant divers types de dégradations. L'intensité des précipitations et le ruissellement des eaux ont fragilisé les infrastructures, provoquant des affaissements de chaussée, l'érosion des accotements et des dommages aux ouvrages hydrauliques. Ces dégradations compromettent la circulation et augmentent les risques pour les usagers, rendant nécessaire une intervention rapide pour la réhabilitation et la mise en sécurité des axes concernés. Les dommages recensés dans les tableaux 15, 16, 17 et 18 n'incluent pas les dégradations observées sur les ouvrages d'assainissement routier de type buse, ni ceux dont la travée est inférieure à 4 mètres.

Tableau 15: Recensement des dommages observés sur les dalots du réseau des Routes Nationales

Dégradations des ouvrages d'assainissement routier (Dalot)				
Axe Routier	Localisation	Dommages constatés	Date	Photos
RN 22B		Effondrement d'une partie du gabionnage et affouillement du remblai d'accès	27/10/2015	
	Dalot Seloukia PK 44+100	Effondrement complet du gabionnage, affouillement du remblai d'accès et destruction des garde-corps	31/08/2022	
		Avancement des dégradations constatées.	10/08/2024	
RN 22	Dalot Bellahsin PK 102+400	affouillement du radier, destruction des garde-corps	29/04/2018 12/10/2020 10/08/2024	

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude





	Viaduc (Oued Kikol) PK 100+400	Destruction de la chape de protection du remblai situé sous le viaduc.	31/08/2022	
	Dalot Pk 109+000	Affouillement des accotements, mur de soutènement endommagé	29/04/2018 12/10/2020 31/08/2022 22/09/2024	

Tableau 16 : Recensement des dégradations des chaussées et accotements du réseau des Routes Nationales

Dégradations localisées de la chaussée et des accotements par section				
Axe Routier	Localisation	Dommages constatés	Date	Photos
RN 22B	Du Pk 44+000 au PK 44+200	Affouillement des accotements	27/10/2015 29/04/2018 12/10/2020 10/08/2024	
RN 22	Du Pk 109+000 au PK 109+200	Affouillement des accotements et du fossé en terre	29/04/2018 12/10/2020 31/08/2022 10/08/2024	

Les dégâts constatés sur les chaussées incluent l'arrachement de la couche de roulement en béton bitumineux, le faïençage et l'apparition de fissures, comme en témoigne l'état dégradé de la chaussée de la RN 22 qui a fait l'objet d'un projet de reconstruction en 2020.





Figure 26 : Dégradations observées sur la chaussée de la RN 22.

3.4.2.2. Au niveau des Chemins de Wilaya :

Les tableaux 17 et 18 présentent l'état des chemins de wilaya.

Tableau 17 : Recensement des dommages observés sur les dalots (Chemins communaux)

Dégradations des ouvrages d'assainissement routier (Dalot)				
Axe Routier	Localisation	Dommages constatés	Date	Photos
CW 09	Dalot El Farch PK 15+800	Effondrement d'une partie du gabionnage, affouillement du remblai d'accès et destruction des garde-corps	27/10/2015 31/08/2022 10/08/2024	
CW 107	Dalot O/Meghbour PK 04+070	Mur de soutènement endommagé et affouillement du remblai d'accès	12/10/2020 31/08/2022 10/08/2024	

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude




CW 112	Dalot O/Kendoussi PK 03+900	Mur de soutènement endommagé, affouillement du remblai d'accès et des accotements	29/04/2018	
			12/10/2020	
			31/08/2022	
			22/09/2024	

Tableau 18 : Recensement des dégradations des chaussées et accotements du réseau des chemins de wilaya.

Dégradations localisées de la chaussée et des accotements par section				
Axe Routier	Localisation	Dommages constatés	Date	Photos
CW 107	Du Pk 06+300 au PK 06+600	Fossé en béton endommagé et affouillement des accotements	12/10/2020	
			31/08/2022	
			22/09/2024	
CW 112	Du Pk 03+850 au PK 03+900	Glissière de sécurité endommagée et affouillement des accotements	29/04/2018	
			12/10/2020	
			31/08/2022	
			22/09/2024	

Les deux graphiques (Figure 27) mettent en évidence une progression de la fréquence et des dommages subis par les infrastructures routières entre 2015 et 2022, aussi bien en termes nombre d'ouvrages sinistrés, que d'ampleur (linéaire endommagé). Cette évolution est étroitement liée à l'aggravation des aléas climatiques, en particulier à l'augmentation des épisodes d'inondation.

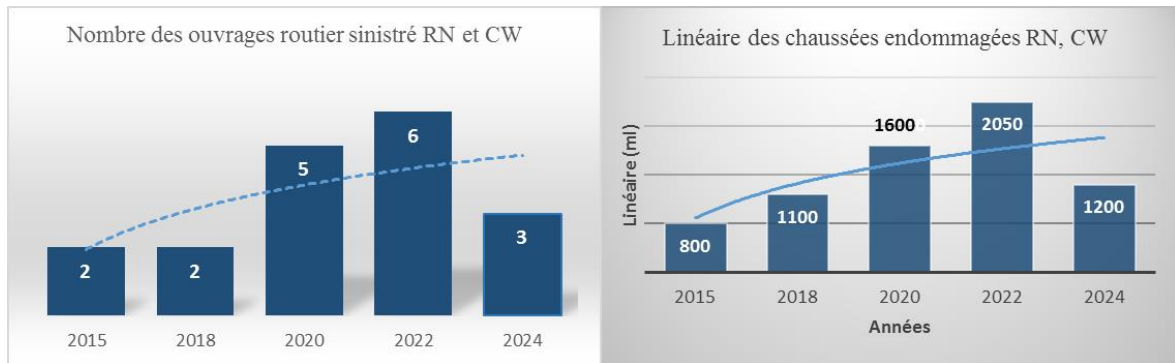


Figure 27 : Nombre des ouvrages routier et linéaire des chaussées endommagées (Inondations) RN et CW.

4. Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir les fondements scientifiques essentiels à la compréhension des interactions complexes entre les dynamiques climatiques et la vulnérabilité des infrastructures routières. En nous appuyant sur les principes fondamentaux de la météorologie et de la climatologie, nous avons démontré l'importance cruciale des systèmes de classification climatique, particulièrement la classification de Köppen-Geiger, pour analyser les variations climatiques régionales. L'étude approfondie des outils de surveillance modernes - incluant les stations météorologiques, les satellites d'observation et les modèles numériques - a révélé leur rôle indispensable dans le suivi et l'anticipation des phénomènes climatiques extrêmes.

L'analyse des effets du changement climatique a mis en évidence une augmentation préoccupante de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, notamment les inondations et les sécheresses, avec des répercussions directes sur la durabilité des infrastructures. Les scénarios prospectifs élaborés par le GIEC (RCP et SSP) offrent une vision alarmante mais nécessaire des tendances futures, soulignant l'urgence d'adopter des approches proactives en matière de gestion des risques climatiques.

L'application de ces concepts théoriques au cas concret de la commune de Sebdo, située dans une zone climatique semi-aride (BSh selon Köppen-Geiger), a permis de contextualiser ces enjeux globaux à l'échelle locale. Les caractéristiques spécifiques de cette région - marquées par une topographie accidentée, des sols crustés et une couverture végétale en déclin - exacerbent la vulnérabilité des infrastructures routières face aux aléas climatiques. L'exploitation méticuleuse des données historiques a confirmé une

intensification notable des phénomènes extrêmes, validant ainsi pleinement la pertinence scientifique et l'actualité pratique de cette recherche.

Dans la continuité logique de cette analyse, le chapitre suivant présentera la méthodologie géomatique innovante que nous avons développée pour évaluer précisément la vulnérabilité des infrastructures routières de Sebdo. Cette approche intègre des techniques avancées de collecte et de traitement des données spatiales, combinant l'imagerie satellitaire (Sentinel-2 et ALOS-2), les systèmes d'information géographique (QGIS, SAGA GIS) et des modèles hydrologiques précieux. Nous décrivons en détail les processus d'analyse multicritère, les algorithmes de modélisation des risques, ainsi que les protocoles de validation terrain qui sous-tendent notre démarche scientifique.

Cette méthodologie rigoureuse constituera le socle technique permettant d'établir un diagnostic précis de l'état du réseau routier et d'identifier les points critiques les plus exposés aux risques climatiques. Les résultats de cette analyse alimenteront directement l'élaboration de recommandations opérationnelles ciblées, visant à renforcer la résilience des infrastructures face aux défis climatiques actuels et futurs. Cette transition entre la théorie et l'application concrète marque une étape cruciale dans notre recherche, ouvrant la voie à des solutions pratiques ancrées dans une compréhension approfondie des mécanismes climatiques et de leurs impacts territoriaux.

Chapitre III : Collecte et préparation des données de la zone d'étude

1. Introduction

Dans un contexte de variabilité climatique accrue, la compréhension fine des dynamiques hydro-géomorphologiques est essentielle pour anticiper les risques liés aux inondations et protéger les infrastructures critiques. Ce chapitre s'appuie sur une approche géomatique intégrée pour analyser les paramètres morpho-topographiques du bassin versant de Seb dou, en mettant l'accent sur leur influence sur le comportement hydrologique local, en plus de la localisation sur carte des bermes en terre réalisées pendant la période coloniale pour protection contre les ruissellements.

L'objectif est d'identifier les zones vulnérables à travers l'exploitation de données issues d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), combinées à des analyses spatiales réalisées sous QGIS, SAGA GIS et Global Mapper. Les cartes de pente, d'orientation, d'accumulation des flux, de TWI, du facteur LS et du gradient topographique ont permis de localiser avec précision les secteurs les plus sensibles aux phénomènes d'érosion, de ruissellement et de saturation hydrique. Cette analyse constitue ainsi une base essentielle pour la modélisation hydrologique du bassin et l'évaluation de l'exposition du réseau routier (routes nationales et chemins de wilaya) aux aléas climatiques.

2. Traitement du MNT ALOS-2 sous QGIS

Le MNT ALOS-2 (Advanced Land Observing Satellite-2) (Figure 28) a été choisi pour sa résolution spatiale de 12,5 m, optimale pour capturer les micro-reliefs influençant les écoulements hydrologiques dans un bassin versant montagneux comme celui de Seb dou. Cette résolution permet une modélisation précise des pentes et des talwegs, contrairement aux MNT de résolution inférieure (ex : SRTM 30 m), qui lisseraient les détails topographiques critiques pour l'étude des inondations. De plus, ALOS-2 intègre des corrections radar réduisant les artefacts liés à la végétation, un avantage dans les zones semi-arides où le couvert végétal est discontinu.

Dans le cadre de ce travail, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) ALOS-2 a été utilisé afin d'analyser la topographie de la commune de Seb dou et de modéliser les phénomènes d'inondation susceptibles d'impacter les infrastructures routières.

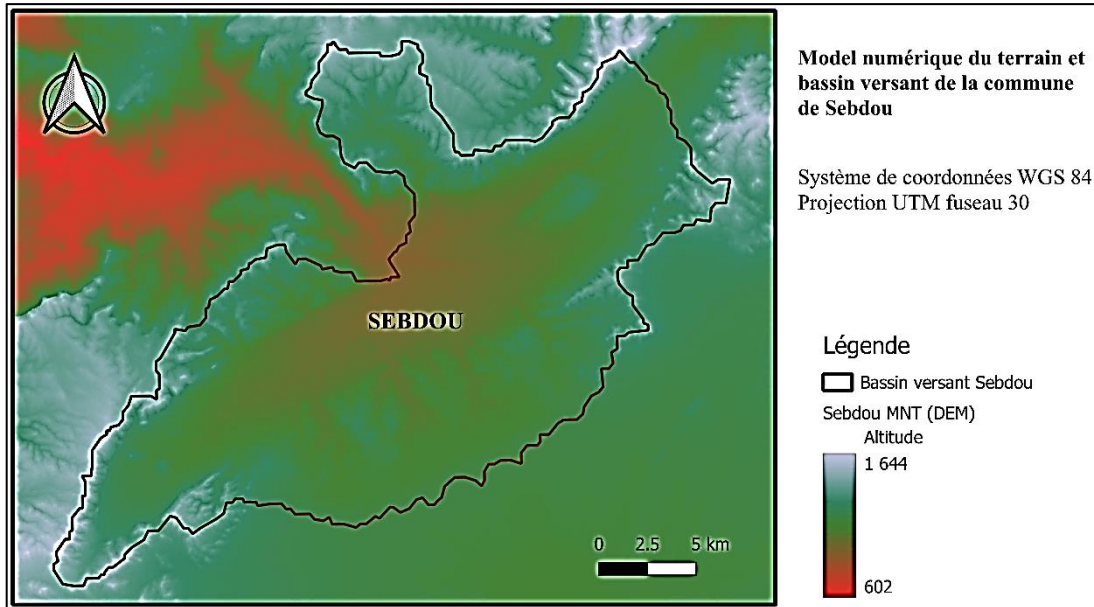


Figure 28 : Model numérique du terrain et bassin versant de Sebdo. (*Source : Réalisation des auteurs, 2025*)

3. Importation et préparation du MNT

Le MNT ALOS-2, d'une résolution spatiale de 12,5 mètres, a été importé dans QGIS au format GeoTIFF. Ce MNT constitue une base essentielle pour l'analyse hydro-géomorphologique du terrain et pour la simulation des écoulements de surface.

- **Délimitation de la zone d'étude :** La zone d'étude a été délimitée en croisant une couche vectorielle des limites administratives de la commune de Sebdo avec les contours du bassin versant téléchargé depuis la plateforme Watersheds. Cette opération a permis de découper précisément le MNT afin de ne conserver que l'emprise spatiale d'intérêt, optimisant ainsi les performances des traitements SIG en réduisant la volumétrie des données.
- **Délimitation du bassin versant de la commune de Sebdo :** La délimitation du bassin versant (Figure 30) de la commune de Sebdo a été réalisée à l'aide de la plateforme en ligne Watersheds, reconnue pour sa précision et sa facilité d'utilisation. En spécifiant un point exutoire, la plateforme génère automatiquement les limites du bassin versant à partir d'un MNT haute résolution. Le résultat, exportable sous format SIG, permet une intégration directe dans les analyses spatiales. Cette méthode présentée dans la figure 29 en dessous, garantit une représentation fidèle de la dynamique hydrologique locale, essentielle pour l'évaluation des risques d'inondation.

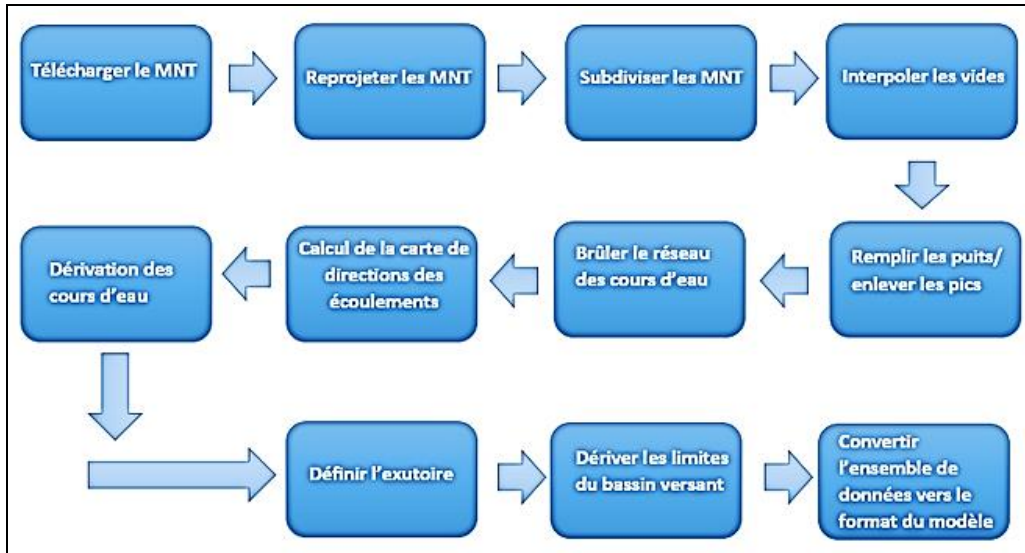


Figure 29 : Méthode de modélisation du bassin versant de Sebdoou.

Une fois les limites du bassin versant délimitées, la plateforme permet leur téléchargement sous plusieurs formats compatibles avec les SIG, tels que GeoJSON, GeoPackage, KML et Shapefile. Ces limites sont ensuite importées dans SAGA GIS afin de délimiter précisément la zone d'étude sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT), en vue de procéder à son découpage. Cette étape est illustrée par la carte présentée à la figure 30.

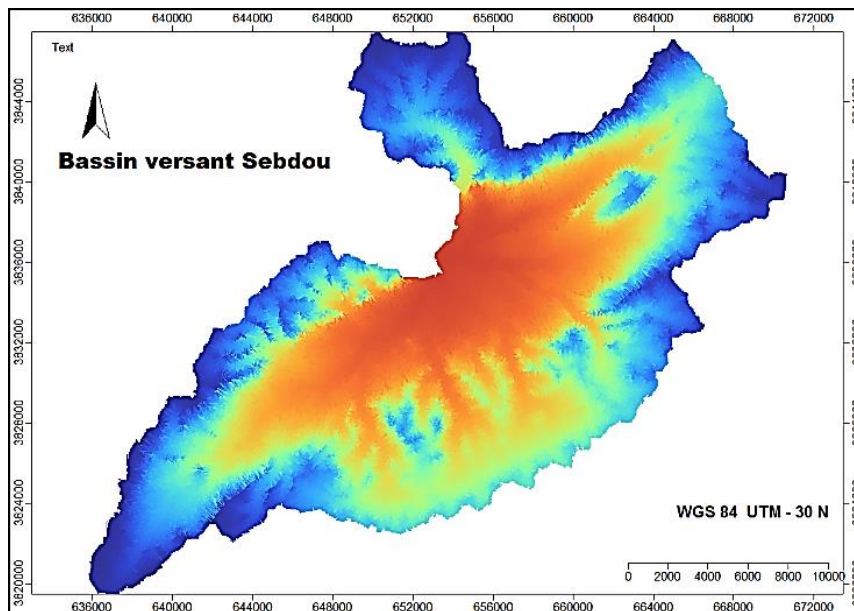


Figure 30 : Bassin versant de Sebdoou. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

3.1. Caractéristique du bassin versant de Sebdou

Le bassin versant de l'Oued Sebdou, situé au nord-ouest de l'Algérie, couvre une superficie de 256 km² et est drainé par l'Oued Sebdou sur une longueur de 29,7 km, se jetant dans la cuvette du barrage de Béni Bahdel (63,106 millions de m³). La région est dominée par des montagnes issues de l'orogénèse alpine, avec des sommets culminant à 1465 m d'altitude dans les monts de Tlemcen. Le relief accidenté du bassin présente des pentes supérieures à 25% sur 49% de sa superficie, et une densité de drainage de 2,88 km/km². Sa lithologie est majoritairement calcaire, incluant des terrains karstiques et des sols alluvionnaires dans la cuvette de Sebdou, où de nombreuses sources émergent. Les hauteurs des monts de Tlemcen sont couvertes de croûtes marnogréseuses et calcaire-gréseuses.

Le bassin est marqué par un couvert végétal discontinu et dégradé, dominé à 44% par un couvert forestier fragile, ce qui offre une faible protection contre l'érosion hydrique. Situé dans une zone semi-aride, il reçoit des précipitations variant entre 470 mm et 660 mm en fonction de l'altitude, avec des niveaux plus élevés en montagne. Entre 1985 et 1998, le module annuel a varié entre 0,43 et 2,15 m³/s, avec une moyenne de 1,1 m³/s, tandis que le débit solide oscillait entre 0,87 et 48,24 kg/s, avec une dégradation spécifique moyenne de 1330 t/km²/an. Depuis plusieurs décennies, le bassin subit une sécheresse prolongée, réduisant ses apports en eau de 70%. Cette situation est aggravée par des crues brèves et intenses, responsables de la majeure partie des apports en eau et en sédiments (ANRH, 2019).

3.2. Structure hydrologique du bassin versant de Sebdou

Le bassin versant de Sebdou est composé de six sous bassins versants (Figure 32), délimités en fonction des oueds principaux existants dans la zone. La délimitation de ces sous-bassin a été réalisée à l'aide de la plateforme en ligne Watersheds.

Chaque sous-bassin correspond à un secteur de drainage spécifique à un oued, facilitant ainsi l'analyse détaillée de la dynamique hydrologique (Des photographies aériennes par drone des oueds du bassin versant de Sebdou sont présentées en annexe 04). Cette approche permet également d'évaluer avec plus de précision les risques d'inondation dans les zones traversées par les infrastructures routières, en tenant compte de la variation des caractéristiques hydrologiques et topographiques de chaque sous-bassin. Grâce à cette méthode, il est possible d'obtenir une représentation fidèle de l'écoulement des eaux et de mieux comprendre l'impact potentiel des événements pluvieux extrêmes sur le réseau routier.

Tableau 19 : Caractéristiques hydrologiques des sous-bassin versants du bassin versant Sebdou

N° du sous bassin	Superficie (Ha)	Oued principal de drainage	Longueur de l'oued principal (km)	Localisation de l'exutoire	Rôle hydrologique
01	4993	Oued Sebdou	7.8	Exutoire du Bassin versant de Sebdou	Draine les eaux de pluie et souterraines vers l'oued Tafna
02	2686	Oued Kicole	6.6	Exutoire du Bassin versant de Sebdou	Joue un rôle clé dans l'alimentation du réseau hydrographique en période de crue
03	3618	Oued Guettara el Hassel	8.5	Exutoire du Bassin versant de Sebdou	Alimente le réseau hydrographique en période de crue
04	8534	Oued El Kadous	7.5	Exutoire du Bassin versant de Sebdou	Essentiel pour l'alimentation du réseau hydrographique en période de crue
05	5988	Oued Taoudlala	11.5	Aval d'un segment de l'oued principal, près de la ville de Sebdou	Draine les eaux de pluie et souterraines vers l'oued Tafna
06	3678	Oued Boukhrouf	6.3	Aval de l'oued Taoudlala	Contribue à l'alimentation du réseau hydrographique, surtout lors des crues

La carte (Figure 32) illustre la répartition spatiale ainsi que la configuration des sous bassin identifiés dans la partie amont du bassin de Sebdou.

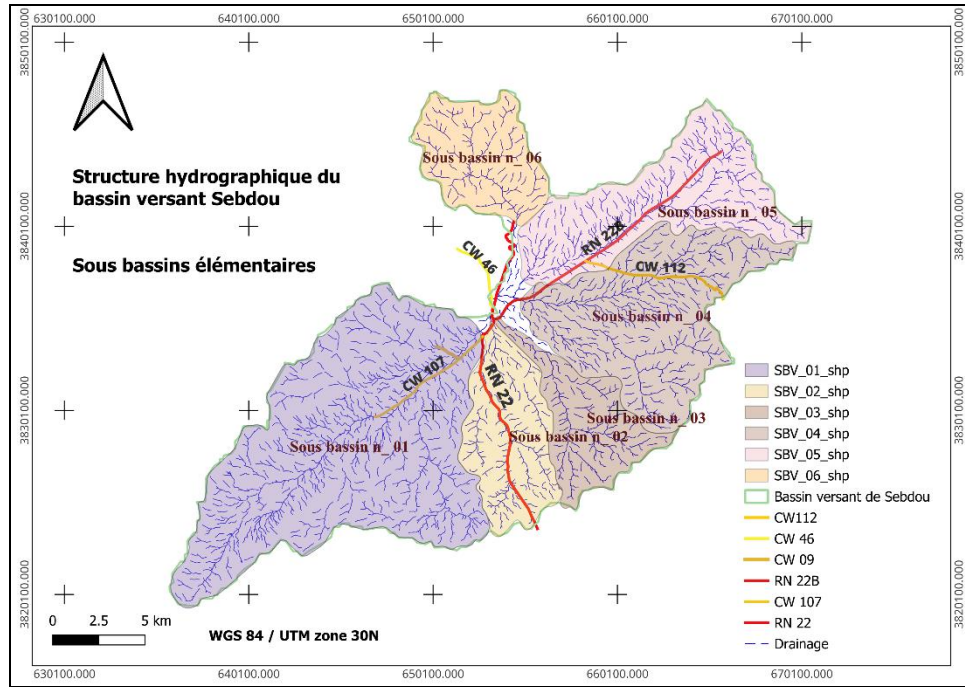


Figure 31 : Structure hydrographique du bassin versant Sebdo. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

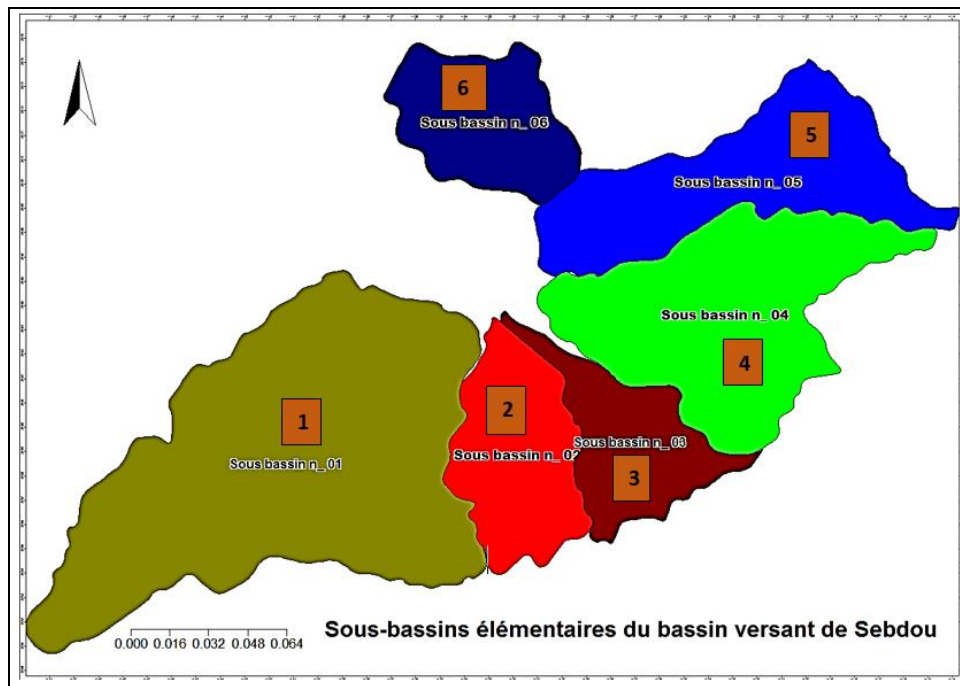


Figure 32 : Sous-bassin élémentaires du bassin versant Sebdo. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

Évolution préoccupante des réserves en eau : une tendance à la baisse confirmée

L'analyse des anomalies du stock d'eau terrestre (TWS) du bassin versant ainsi des sous bassins élémentaires, entre 2002 et 2024 révèle une diminution significative de -2,3 à -

2.4 cm par décennie ($P < 0,001$) (Figure 33), soulignant une perte progressive des réserves hydriques. Cette tendance linéaire, statistiquement robuste, indique un déséquilibre durable entre les apports naturels et les prélèvements ou pertes d'eau.

- **Des fluctuations marquées, mais une tendance nette :** Le graphique montre une forte variabilité interannuelle, avec des pics ponctuels (ex. +15 cm en 2003-2004) et des creux profonds (ex. -20 cm après 2020). Ces oscillations reflètent des épisodes climatiques extrêmes, comme des sécheresses prolongées ou des épisodes de pluies intenses. Cependant, la tendance globale reste orientée à la baisse, suggérant une dégradation structurelle des ressources en eau.
- **Causes et implications :** Dans un contexte de changement climatique et de pression anthropique croissante, cette réduction du TWS pourrait s'expliquer par :
 - Une baisse de la recharge des nappes due à des précipitations moins fréquentes ou plus irrégulières.
 - Une augmentation de l'évaporation liée à des températures plus élevées.
 - Une surexploitation des eaux souterraines pour l'agriculture ou les besoins domestiques, notamment dans les régions arides comme le bassin versant de Sebdou (37 km²) mentionné précédemment.

Urgence à agir

Cette tendance alarmante appelle à une gestion plus durable des ressources en eau, intégrant :

- Des politiques de rationalisation des prélèvements.
- Le développement d'infrastructures de rétention et recharge artificielle des nappes.
- Un renforcement de la surveillance des stocks d'eau pour anticiper les crises.

En l'absence de mesures correctives, la poursuite de ce déclin pourrait menacer la sécurité hydrique des écosystèmes et des populations dépendantes de ces réserves.

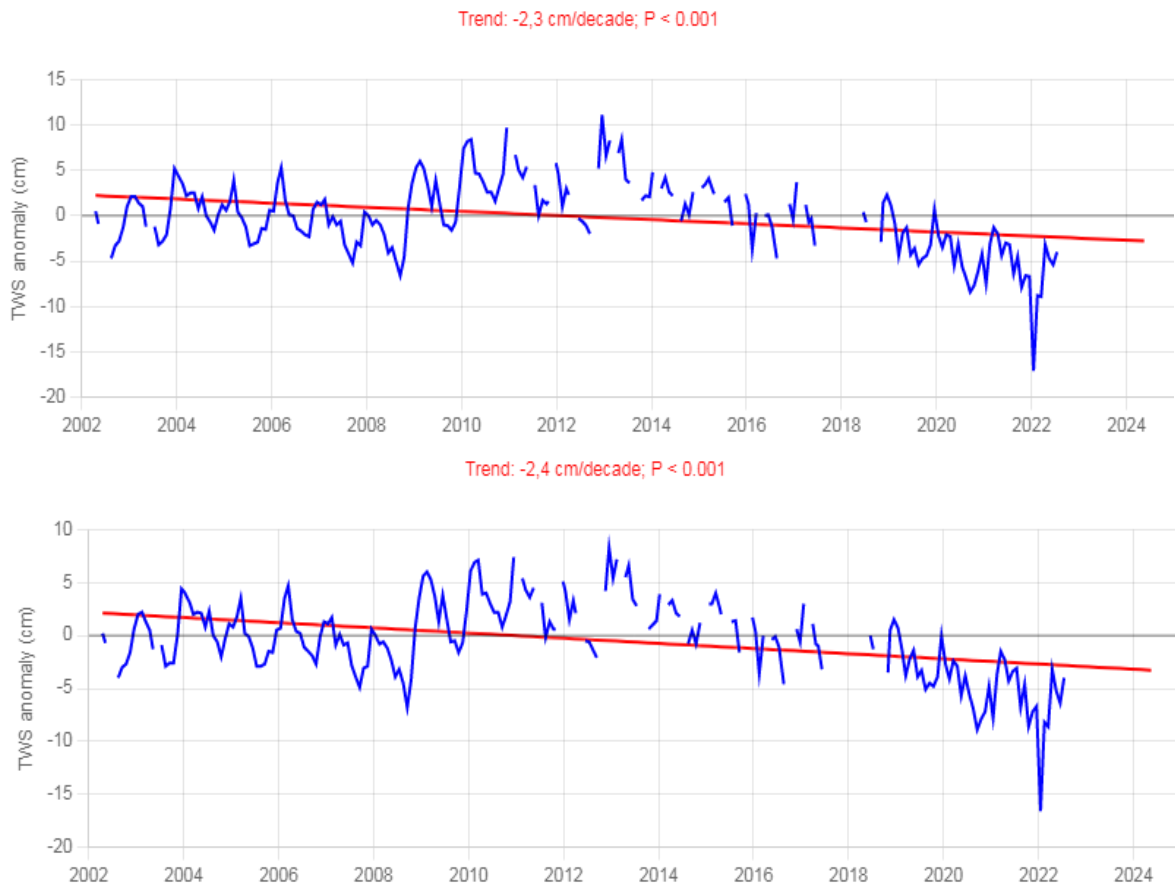


Figure 33 : Anomalie du stockage total de l'eau selon GRACE de 2002 à 2024. Bassin versant et des sous bassins élémentaires (Source. Plateforme Watersheds).

4. Génération de la carte de pente

À partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) traité dans QGIS, une carte de pente (Figure 34) a été générée afin de visualiser les variations topographiques de la zone d'étude. Cette carte, représentée en niveaux de gris, met en évidence les zones à forte déclivité (teintes claires) et les zones à faible pente (teintes foncées).

L'analyse de la pente constitue une étape clé dans l'étude des inondations, car elle influence directement la vitesse d'écoulement des eaux de surface, la concentration des ruissellements et le transport des sédiments. Les pentes fortes favorisent un ruissellement rapide, tandis que les pentes faibles peuvent être des zones d'accumulation d'eau, augmentant ainsi le risque d'inondation, notamment au niveau des infrastructures routières vulnérables.

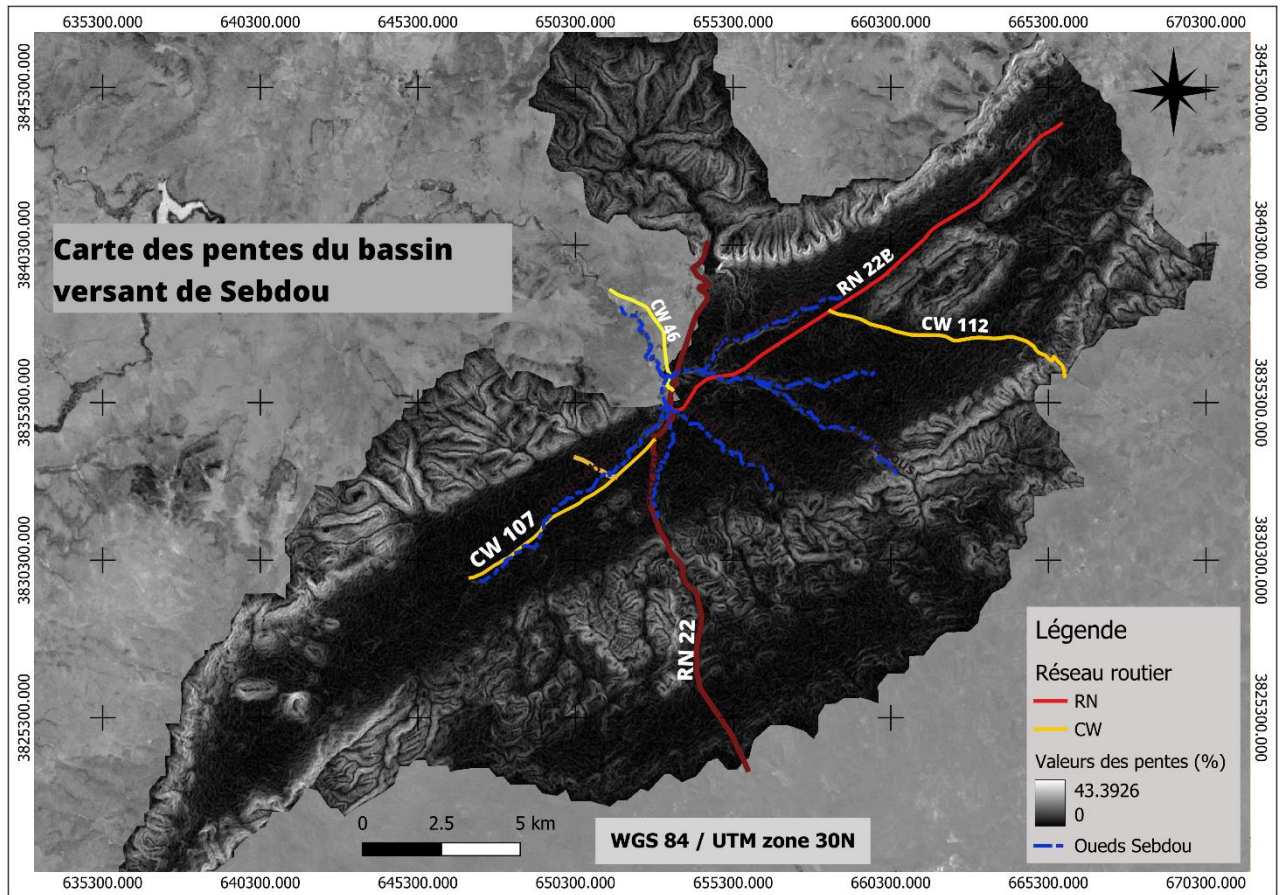


Figure 34 : Carte des pentes bassin versant de Sebdu. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

4.1. Modélisation 3D

La modélisation tridimensionnelle du terrain a été réalisée grâce au module QGIS 3D, accessible depuis la fenêtre de carte :

- Création d'une vue 3D en configurant la couche MNT comme surface d'élévation.
- Application de l'ombrage et des couleurs pour une meilleure perception du relief.
- Ajustement du facteur d'exagération verticale pour accentuer les détails topographiques.

Cette modélisation 3D (Figure 35) permet de localiser visuellement les zones de dépression, les talwegs, les pentes marquées ou les zones de stagnation, susceptibles d'engendrer des accumulations d'eau en cas de fortes précipitations. Ces informations sont cruciales pour évaluer l'exposition des routes nationales et chemins de wilaya aux risques d'inondation.

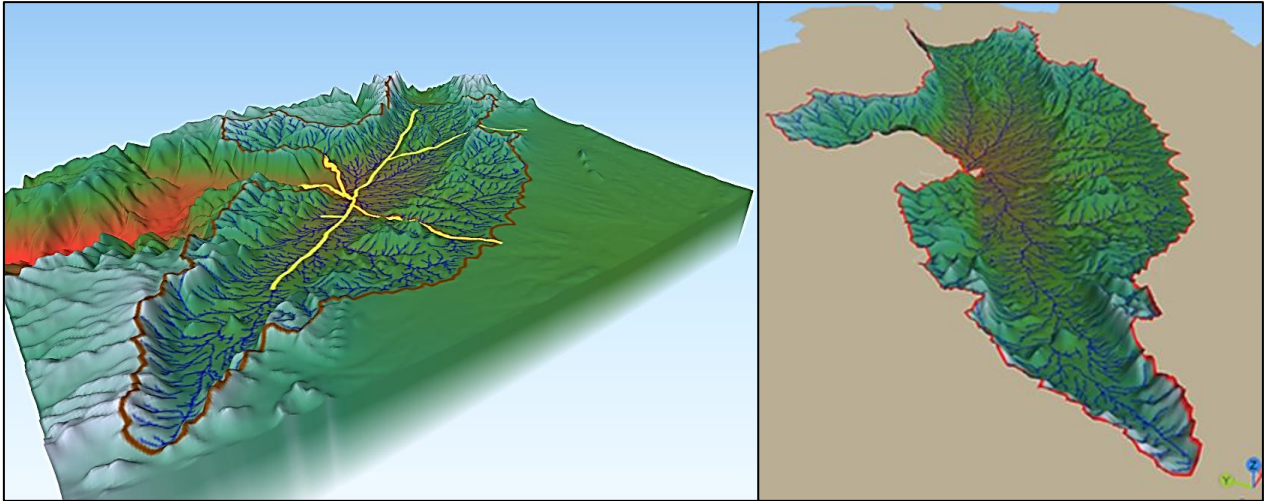


Figure 35 : Modélisation 3D du bassin versant de Sebdou. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

5. Numérisation du réseau routier à partir d'OpenStreetMap sous QGIS

Dans le cadre de cette étude, la numérisation du réseau routier a été réalisée à partir des données d'OpenStreetMap (OSM), en utilisant les outils intégrés à QGIS. Cette étape vise à extraire et structurer les tronçons routiers situés dans la commune de Sebdou, en particulier les routes nationales (RN) et les chemins de wilaya (CW).

La numérisation du réseau routier a été réalisée à l'aide des données disponibles sur OpenStreetMap dans QGIS. Sur la base des informations fournies par la Direction des Travaux Publics, le tracé et la numérotation des routes ont été vérifiés et corrigés si nécessaire. Cette étape de validation a permis d'assurer la fiabilité et la conformité du réseau routier numérisé avec la réalité du terrain.

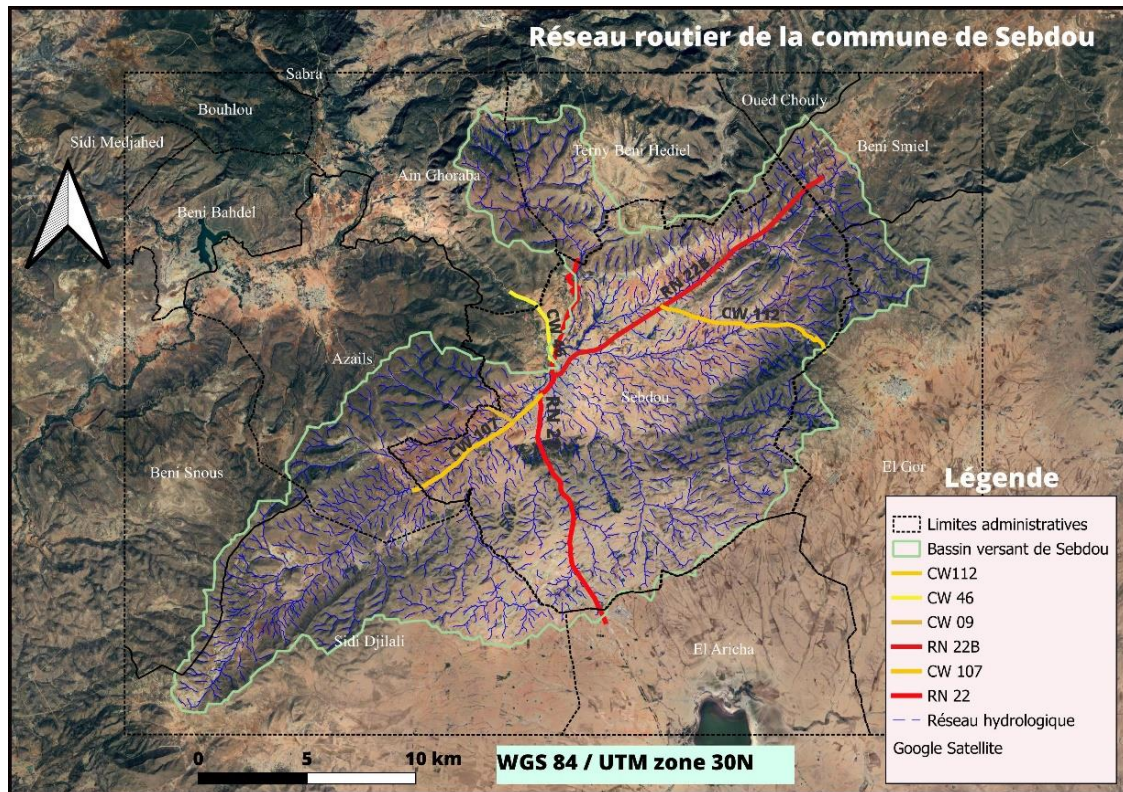


Figure 36 : Réseau routier de la commune de Sebdou (RN et CW) sur image Google Earth

5.1. Vérification spatiale et corrections

Une superposition avec la couche d'imagerie satellite et la couche administrative de Sebdou a été effectuée afin de :

- Vérifier la cohérence spatiale du réseau numérisé.
- Corriger manuellement certains segments manquants ou mal alignés, en utilisant l'outil de numérisation de QGIS.

5.2. Attribution et structuration des données

Chaque tronçon a été enrichi avec des attributs descriptifs pour l'analyse ultérieure :

- Type de route (RN, CW)
- Nom des axes routiers
- Longueur (calculée automatiquement via le champ géométrique)

Cette couche vectorielle du réseau routier servira de base à la spatialisation des impacts liés aux inondations. Elle permettra de croiser les zones inondées issues des simulations hydrologiques avec les infrastructures linéaires vulnérables.

6. Numérisation des zones sinistrées à partir de documents photographiques de terrain

La délimitation des zones inondées dans la commune de Sebdou a été réalisée à partir d'un ensemble de photographies prises sur le terrain lors des épisodes d'inondation du 2015 jusqu'à 2024. Ces documents visuels, fournis par les services techniques locaux et/ou collectés au cours de visites de terrain, ont permis une identification précise des secteurs affectés par les crues.

6.1. Collecte et organisation des données photographiques

Un ensemble de photos prises lors ou après les épisodes d'inondation a été rassemblé. Chaque photo a été localisée manuellement sur la carte à l'aide des indications de terrain, des points de repère visibles (routes, ponts, bâtiments) et des métadonnées (si disponibles, comme les coordonnées GPS ou la date).

6.2. Identification des zones inondées (Critiques)

En se basant sur l'analyse visuelle des photographies et des observations de terrain, les zones ayant présenté :

- Une accumulation importante d'eau,
- Des débordements d'oueds ou de ravines,
- Ou des dégâts visibles sur les infrastructures routières,
- Ont été localisées et définies comme zones sinistrées.

6.3. Numérisation manuelle sous QGIS

Les zones inondées ainsi les dalots sinistrés (Figure 37) ont été numérisées à partir d'une image Sentinel-2, sous forme de polygones, en utilisant l'outil de dessin de QGIS. La délimitation s'est appuyée sur des repères visuels identifiables sur l'image ainsi que sur leur localisation approximative. À chaque polygone a été associé un ensemble de champs descriptifs :

- Date de l'inondation,
- Localisation (quartier, route, ouvrage),
- Source de l'information (photo terrain),
- Niveau d'impact observé (léger, modéré, sévère).

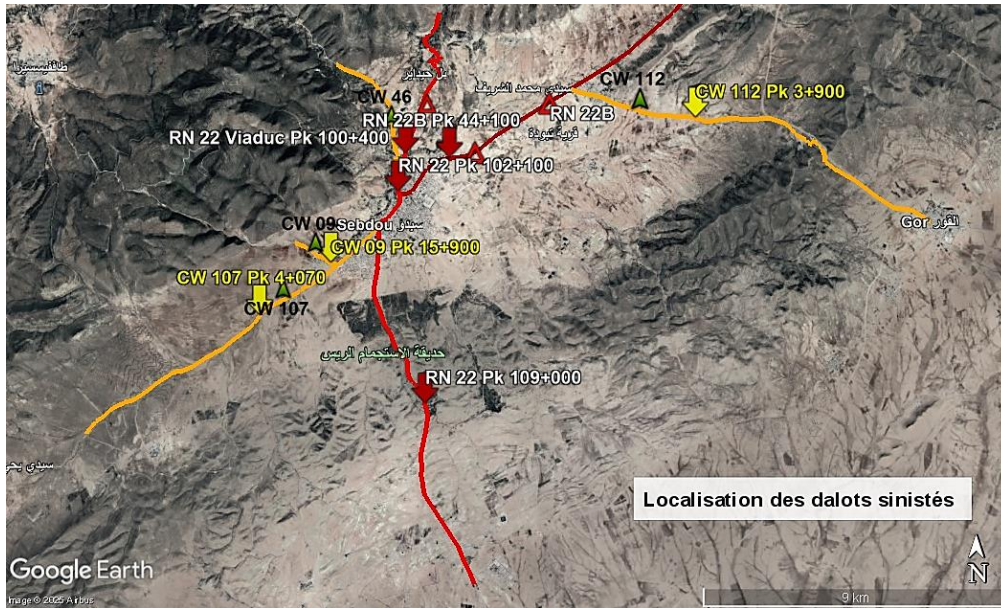


Figure 37 : Localisation des dalots sinistrés (RN et CW).

6.4. Validation et intégration

Les zones numérisées ont été superposées au MNT et au réseau routier afin de vérifier leur cohérence topographique. Ce croisement permet également d'identifier les tronçons routiers exposés ou endommagés, contribuant ainsi à l'analyse des vulnérabilités du réseau face aux événements hydrométéorologiques extrêmes, exacerbés par le changement climatique.

7. Implantation stratégique des bermes de protection contre le ruissellement

Les levées de terre (ou bermes) (Figure 38) ont été utilisées, depuis la période coloniale, comme dispositifs de protection contre les inondations en limitant les effets des crues. Ces aménagements, souvent constitués de remblais de terre, ont été conçus pour protéger les zones sensibles et maintenir la stabilité des terres fertiles face aux phénomènes hydrologiques.

7.1. Identification des bermes et collecte des données

L'identification des bermes a été réalisée directement sur les images satellitaires, telles que celles de Google Earth, permettant d'observer leur présence et leur état actuel. Cette identification a ensuite été vérifiée sur le terrain pour garantir la précision des informations et évaluer l'intégrité de ces structures face aux phénomènes d'inondation.



Figure 38 : Berme en terre (levée en terre).

7.2. Numérisation sur fond d'image satellite

La numérisation de 10% des bermes dans QGIS, bien que limitée à des besoins de visualisation, a été complétée par l'exploitation du MNT permettant une analyse exhaustive des phénomènes de ruissellement sur l'ensemble du territoire. Cette méthode a permis de :

- Visualiser précisément les contours des bermes et leur intégration avec le réseau routier.
- Identifier les modifications ou dégradations récentes qui pourraient résulter de phénomènes d'érosion ou de crues répétées.
- Délimiter les zones où les levées de terre sont en place, afin de mieux comprendre leur efficacité en tant que mécanisme de protection contre les inondations.

Les levées de terre ont été numérisées sous forme de polygones ou de lignes suivant leur configuration. Les outils de numérisation de QGIS ont permis de tracer ces éléments avec une grande précision, en se basant sur les repères visibles dans les images satellites, tels que les bordures de terre, les chemins de remblais, ou les ouvrages associés (ponts, canaux).

7.3. Attribution et analyse

Chaque polygone ou ligne représentant une berme a été attribué de plusieurs champs descriptifs :

- **Type de levée** : bermes naturelles ou artificielles.
- **Date d'aménagement** (si connue) ou estimation historique.
- **État actuel** : intact, endommagé, effondré, etc.
- **Hauteur et largeur estimées** (en se basant sur l'analyse des images).

7.4. Superposition et validation

La superposition des bermes numérisées avec la couche du drainage et le réseau routier (Figure 39) permet d'analyser leur efficacité actuelle face aux inondations, ainsi que de vérifier si elles couvrent correctement les zones à risque. Ce croisement avec des zones inondées identifiées précédemment sur la base des photos de terrain ou d'autres données géospaciales permet de valider l'intégrité de ces structures de protection et d'évaluer leur rôle face aux risques croissants induits par le changement climatique.

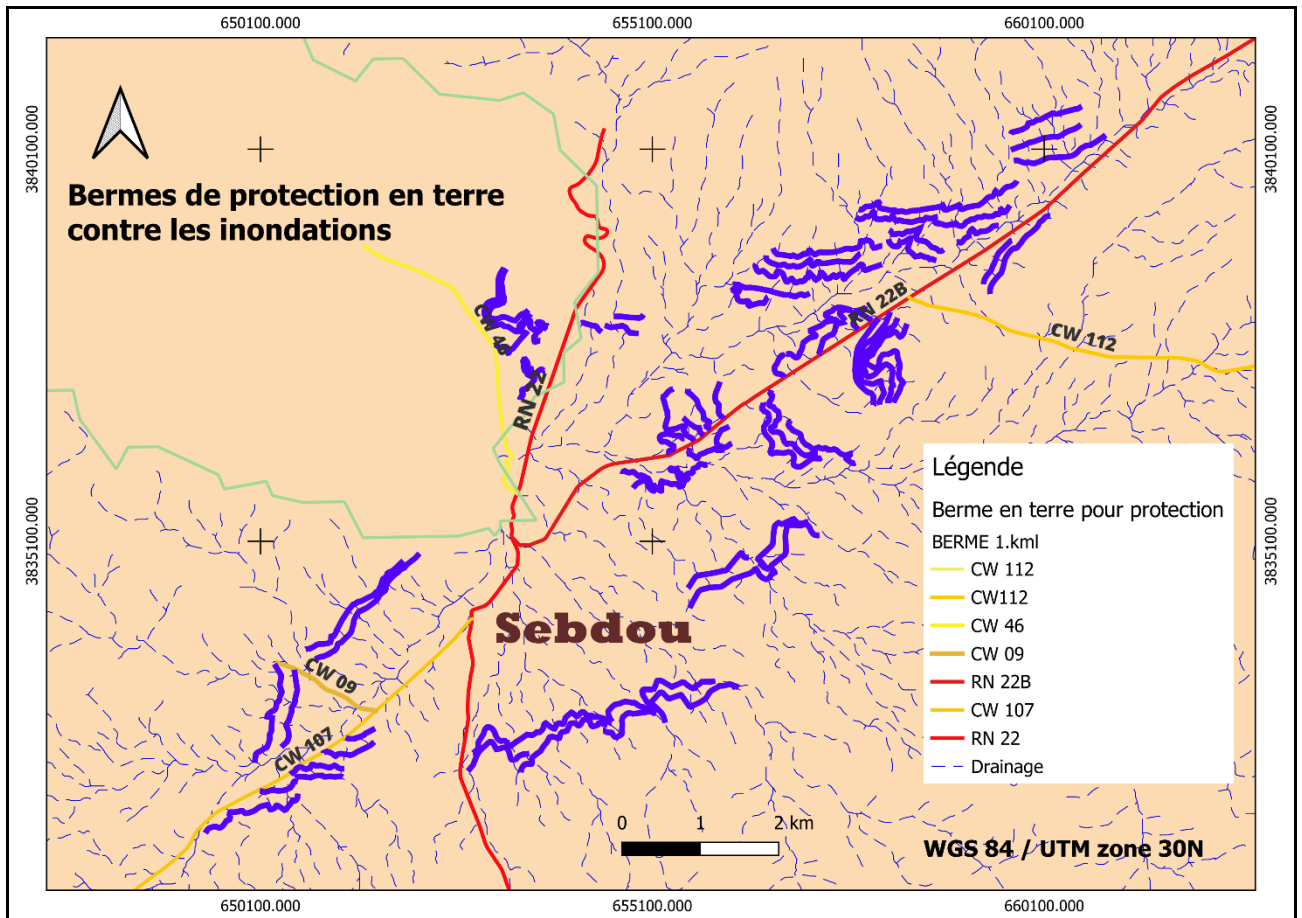


Figure 39 : Localisation des bermes de protection en terre contre les inondations. (Source : *Réalisation des auteurs, 2025*)

Les bermes de protection en terre présentées sur la carte ont été implantées de manière stratégique, perpendiculairement aux talwegs principaux, dans le but d'intercepter et de ralentir les écoulements de surface avant qu'ils n'atteignent les infrastructures routières. Cette orientation permet de briser la dynamique naturelle du ruissellement concentré, particulièrement intense dans les zones à forte pente et à densité de drainage élevée.

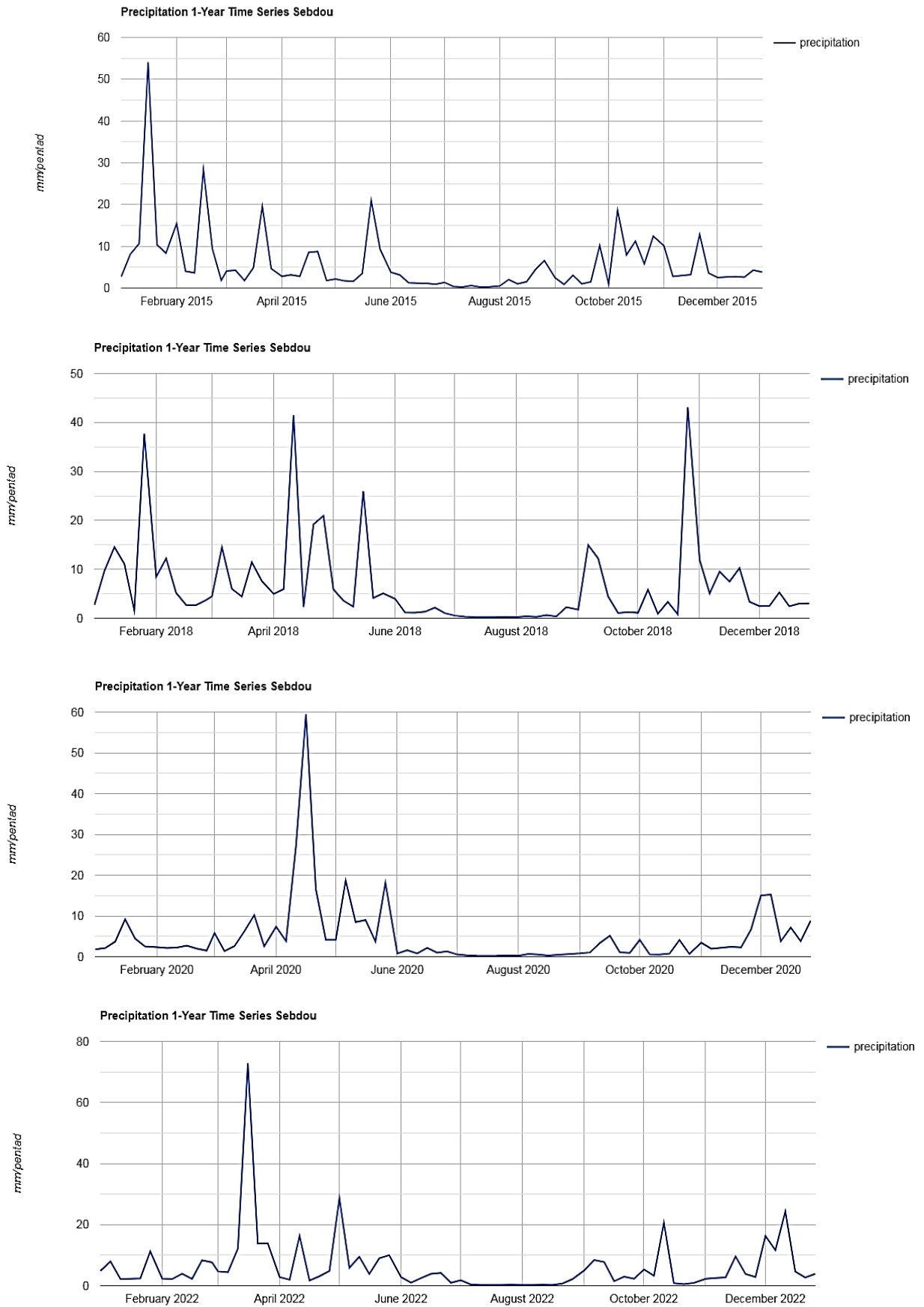
En s'opposant à la direction naturelle des flux hydriques, ces bermes agissent comme des barrières physiques temporaires qui favorisent l'infiltration locale de l'eau et limitent le transport des sédiments vers les chaussées et les accotements. Leur positionnement à proximité des routes nationales (RN 22, RN 22B) et des chemins de wilaya (CW 112, CW 107, CW 46) permet de réduire les risques d'érosion des emprises routières et de préserver la stabilité des ouvrages lors des épisodes pluvieux extrêmes.

8. Traitement des données météorologiques liées aux précipitations

L'exploitation de la plateforme Google Earth Engine (GEE) a permis l'extraction et l'analyse chronologique des données pluviométriques satellitaires, en ciblant spécifiquement les périodes correspondant aux événements d'inondation recensés au cours des années 2015, 2018, 2020, 2022 et 2024 dans la commune de Sebdou. Cette démarche a facilité la mise en évidence des dynamiques spatio-temporelles des précipitations à l'échelle du bassin versant.

Les séries temporelles générées offrent une visualisation précise de l'intensité et de la variabilité interannuelle des précipitations, permettant d'identifier les épisodes pluviométriques extrêmes potentiellement responsables des crues soudaines et des perturbations observées au niveau des infrastructures routières. Les diagrammes pluviométriques (Le script GEE utilisé pour l'extraction des diagrammes de précipitation est présenté en annexe 05) ainsi produits constituent un support analytique pertinent pour l'évaluation des relations entre les anomalies climatiques et la vulnérabilité du réseau routier.

Chapitre III : Collecte et préparation des données de la zone d'étude



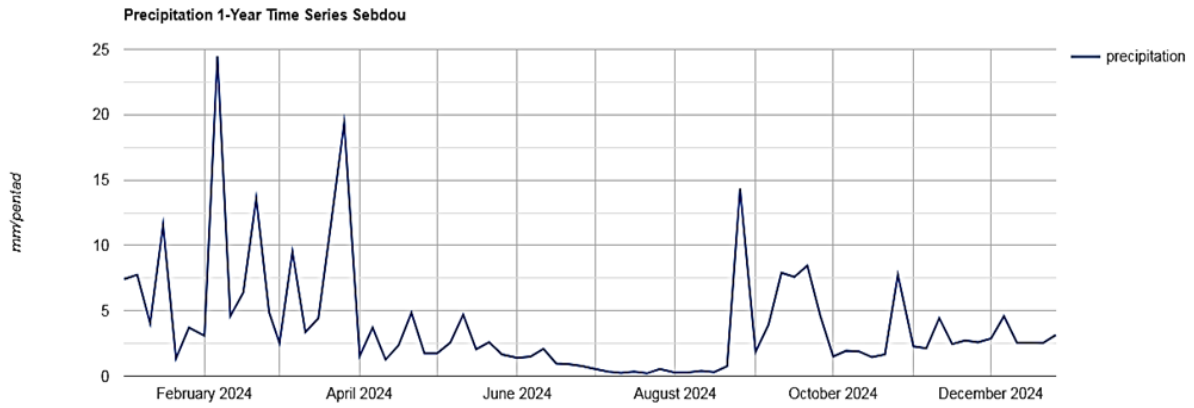


Figure 40 : Evolution annuel des précipitations dans la commune de Sebdou.

Les résultats de l'analyse sont visualisés sous forme des diagrammes (Figure 40), permettant une lecture claire des tendances pluviométriques.

L'analyse des séries temporelles de précipitations à Sebdou sur les années du 2015 au 2024, met en évidence une variabilité interannuelle notable et une forte saisonnalité. Les périodes humides, généralement concentrées entre octobre/novembre et mai, sont suivies de saisons sèches estivales. Des pics de précipitations significatifs ont été observés en avril 2020 et 2022, suggérant des anomalies climatiques potentielles.

Pour l'année 2024, les précipitations ont été particulièrement marquées entre février et mai, suivies d'une période sèche de juin à août. Des pics notables en février et avril 2024 renforcent aussi l'idée d'anomalies climatiques potentielles. Comparées aux données des années précédentes, ces observations pourraient indiquer des tendances à long terme ou des variations interannuelles significatives.

Le changement climatique est porté d'expliquer ces variations observées dans les précipitations et le régime hydrologique à Sebdou.

9. Analyse morpho-topographique et détection des zones a risque routier dans le bassin versant de Sebdou ()

Après l'achèvement du traitement du MNT et des numérisations des données relatives au réseau routier ainsi qu'aux zones sinistrées, les fichiers ont été exportés vers le logiciel SAGA GIS pour poursuivre les analyses spatiales. Cette étape permet de tirer parti des outils d'analyse avancée de SAGA GIS pour effectuer une évaluation détaillée des impacts des inondations sur les infrastructures routières et identifier les zones les plus vulnérables aux événements climatiques extrêmes.

Le MNT, préalablement traité à l'aide du logiciel QGIS, a été importé dans SAGA GIS pour les besoins de l'analyse. Cette étape vise à exploiter les données altimétriques afin d'évaluer l'influence du relief sur la dynamique des inondations.

L'analyse morphologique offre une compréhension approfondie de l'impact du relief sur la dynamique des écoulements superficiels, tout en permettant de localiser précisément les zones potentiellement sujettes à la rétention hydrique. Ces données morpho-métriques représentent un élément fondamental pour :

- La simulation numérique des phénomènes d'inondation
- L'évaluation précise de la résilience des infrastructures routières
- L'analyse des risques liés aux événements hydrométéorologiques extrêmes (changement climatique).

Elle repose sur l'exploitation de plusieurs paramètres morpho-métriques extraits du Modèle Numérique de Terrain (MNT), tels que l'accumulation des flux, la pente, l'exposition (orientation des versants), la courbure, l'indice topographique d'humidité (TWI), le facteur LS (Longueur et pente des versants) ainsi que la délimitation des lignes de crête et des talwegs. Ces indicateurs permettent de caractériser les conditions de ruissellement et d'identifier les zones de concentration des écoulements susceptibles d'affecter la stabilité et la fonctionnalité du réseau routier.

9.1. La direction d'écoulement :

Représente l'orientation que suit l'eau à partir de chaque cellule d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), déterminée principalement par la pente locale. Cette information est cruciale pour les analyses hydrologiques, telles que la délimitation des bassins versants et la modélisation des flux d'eau.

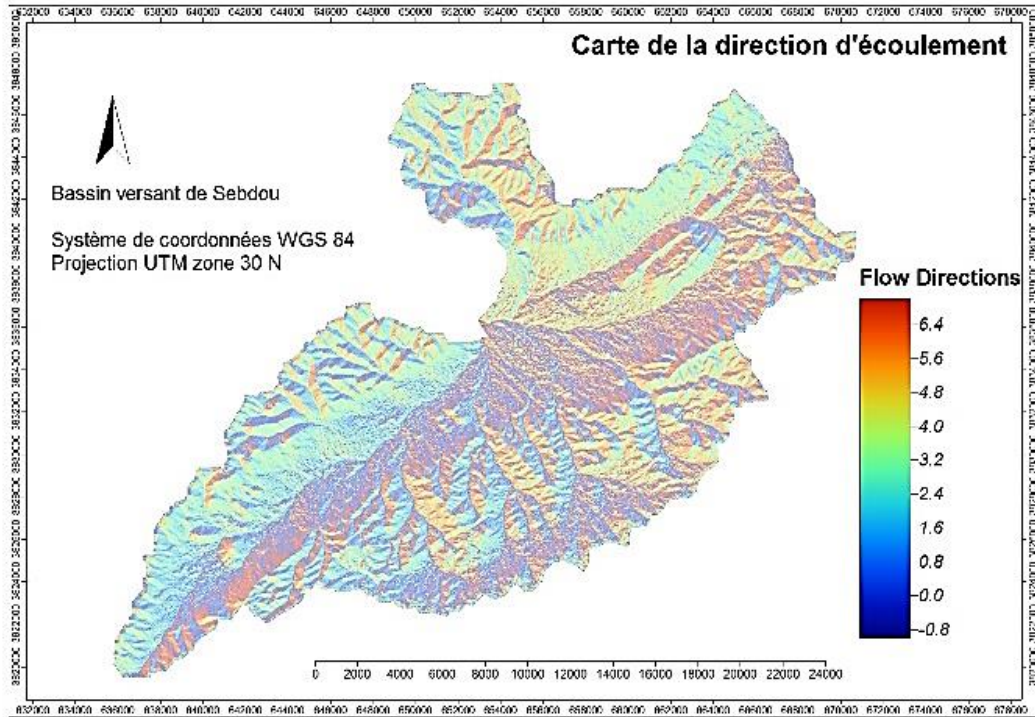


Figure 41 : Carte de la direction des écoulements. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

La carte de la direction d'écoulement (Figure 41) du bassin versant de Sebdoou illustre les trajectoires privilégiées du ruissellement de surface, dictées par la topographie. Les variations colorées sur cette carte reflètent la diversité des orientations de l'écoulement, convergeant des zones élevées vers les dépressions et les talwegs. Ce maillage directionnel constitue l'ossature du réseau hydrographique, anticipant les chemins empruntés par l'eau pour alimenter les cours d'eau.

En suivant les gradients de couleur, on visualise l'eau s'organisant en flux cohérents, descendant les pentes et se concentrant dans les vallées. Cette représentation spatiale des directions d'écoulement est une étape fondamentale pour la modélisation hydrologique, permettant de délimiter les zones contributrices, de calculer l'accumulation des flux et d'analyser la structure du réseau de drainage. Elle offre ainsi un aperçu essentiel de la manière dont l'eau se déplace à travers le paysage de Sebdoou, influençant l'érosion, le transport des sédiments et la distribution des ressources hydriques.

9.2. Carte d'accumulation des flux :

Il s'agit d'une carte représentant l'accumulation d'eau (ou d'autres substances) sur un terrain, générée à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) qui fournit les altitudes. Un calcul suit la trajectoire de l'eau en fonction de la pente du terrain. Les zones claires

indiquent une faible accumulation d'eau, tandis que les zones foncées en montrent une forte accumulation (comme les rivières, par exemple). Ce type de carte est particulièrement utile en hydrologie (pour l'analyse des rivières), en géomorphologie (pour l'étude de l'érosion), en aménagement du territoire (pour identifier les zones inondables) et en écologie.

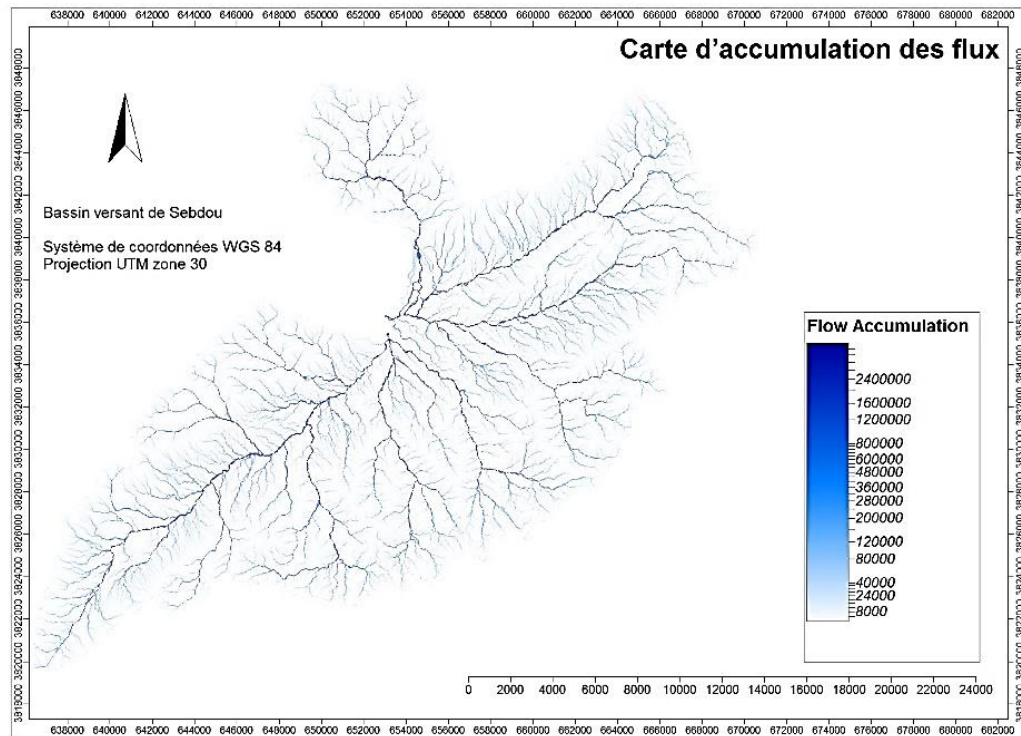


Figure 42 : Carte d'accumulation des flux. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

La carte d'accumulation des flux (Figure 42) du bassin versant de Sebdu révèle la structure d'un réseau hydrographique dense. Les nuances de bleu, allant du clair au foncé, illustrent la progression des écoulements d'eau, depuis les zones de faible accumulation en amont (bleu clair) jusqu'aux axes de drainage majeurs en aval (bleu foncé), où les flux convergent pour former les cours d'eau principaux. Cette configuration suit la pente naturelle du terrain, avec des affluents de faible ordre qui se rejoignent progressivement pour alimenter des collecteurs plus importants en aval. L'intensité des couleurs reflète la hiérarchie des cours d'eau, proportionnelle à la quantité d'eau provenant des zones en amont.

9.3. Pente topographique :

Paramètre clé caractérisant l'inclinaison du relief qui détermine :

- L'intensité du ruissellement superficiel
- La cinétique des écoulements hydriques
- La dynamique de transfert des eaux pluviales

Cette variable morpho-métrique exerce une influence déterminante sur :

- L'accélération des processus érosifs
- La modulation des débits de pointe
- La distribution spatiale des zones d'accumulation hydrique

Son analyse quantitative permet d'anticiper les comportements hydrologiques différentiels au sein du bassin versant.

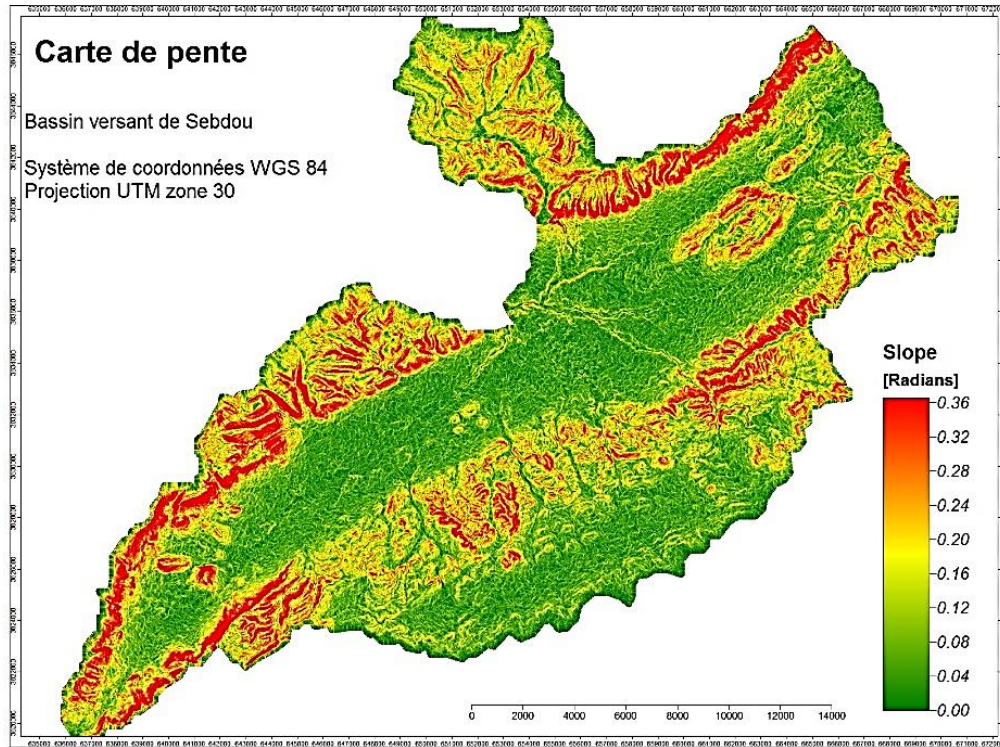


Figure 43 : Carte de pente, fausse couleur. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

La carte de pente (Figure 43) du bassin versant de Sebdou, met en évidence une forte variabilité topographique. Les pentes les plus marquées (en rouge et orange) se concentrent au niveau des versants escarpés et des zones périphériques, atteignant jusqu'à 0.36 radians (20.63 degrés), ce qui indique un fort potentiel de ruissellement et d'érosion. À l'inverse, les zones en vert foncé présentent des pentes faibles à modérées, inférieures à 0.12 radians (6.87 degrés), localisées principalement dans les fonds de vallées, propices à l'accumulation d'eau. Cette répartition spatiale des pentes constitue un paramètre clé dans l'analyse de la vulnérabilité aux inondations et à l'érosion dans le cadre de la gestion du risque hydrométéorologique.

9.4. Orientation (ou exposition) :

L'exposition des versants, qui désigne l'orientation des pentes, influence fortement les processus hydrologiques. Elle affecte la répartition des précipitations, l'évapotranspiration, l'humidité des sols et les flux énergétiques de surface. Cette caractéristique joue un rôle clé dans la genèse des écoulements préférentiels, la formation des zones de saturation et la réponse hydrologique des versants. Son analyse spatialisée permet ainsi d'identifier les zones à risque hydrique et de mieux comprendre les mécanismes à l'origine des crues rapides.

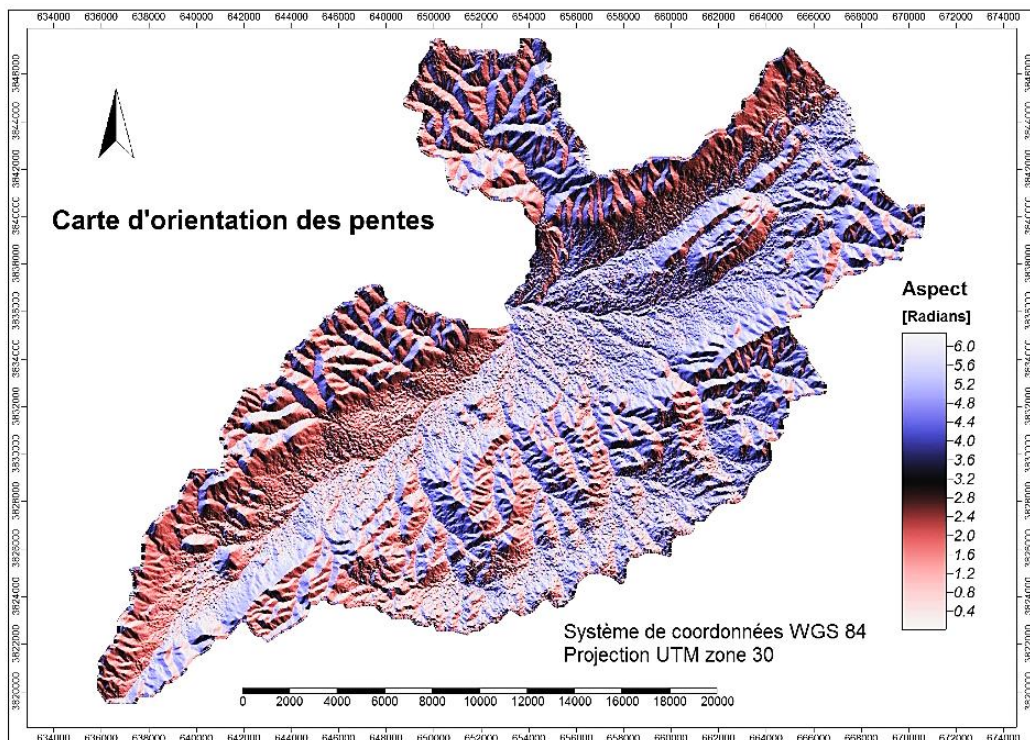


Figure 44 : Carte d'orientation de pente. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

La carte d'orientation des pentes (Figure 44) de la commune de Sebdou révèle la complexité topographique de la région. Les zones rouges, représentant les versants sud, sont plus chaudes, bénéficient d'un ensoleillement plus direct, et présentent des conditions propices à une évaporation accrue et à une végétation adaptée à des conditions plus sèches. Les zones bleues, représentant les versants nord, sont plus fraîches, conservent davantage d'humidité et favorisent une végétation adaptée à des conditions moins arides. Les couleurs intermédiaires soulignent la diversité des orientations et la mosaïque de microclimats qui existent à l'échelle locale. Ces variations sont étroitement liées au réseau hydrographique et à la structure géologique de la région, influençant l'érosion et la végétation naturelle.

9.5. Indice topographique d'humidité (TWI) :

Est un indicateur spatial qui évalue le potentiel de saturation des sols en combinant la surface contributive amont et la pente locale. Il permet d'identifier les zones d'accumulation d'eau, d'analyser la répartition de l'humidité des sols, et de localiser les aires à risque d'inondation. Il reflète l'équilibre entre les flux hydriques et la dissipation par la pente. Il permet de repérer les zones favorables à l'accumulation d'eau, donc plus vulnérables aux inondations.

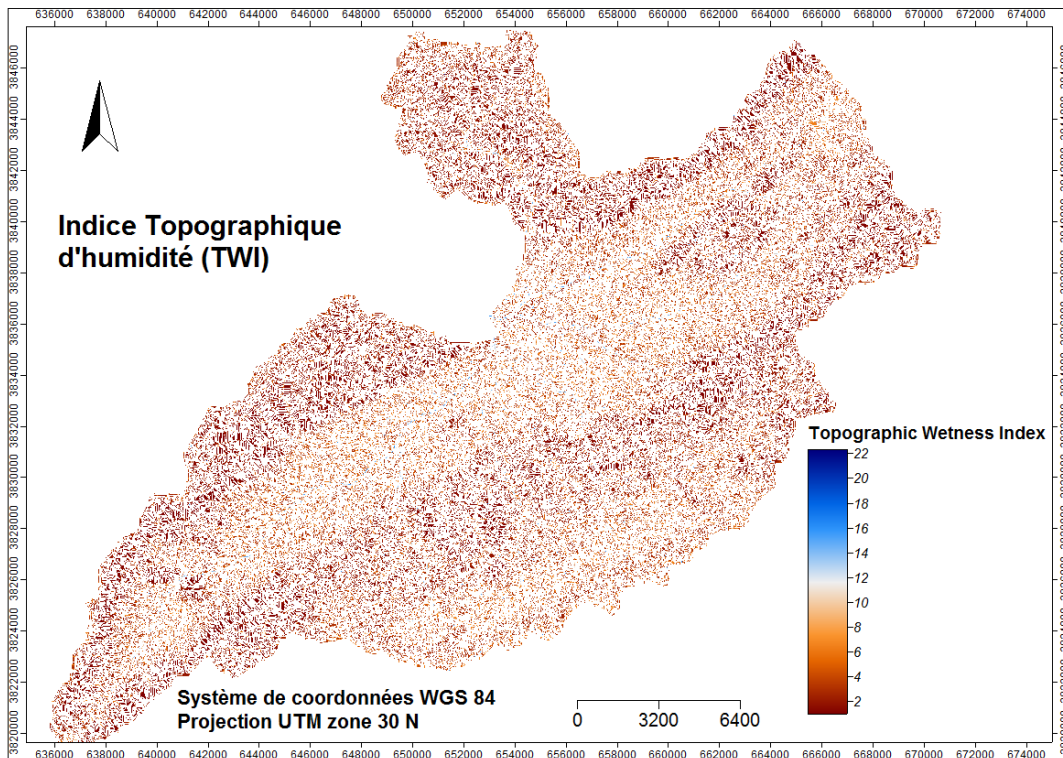


Figure 45 : Carte de l'indice topographique de l'humidité. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

La carte de l'Indice Topographique d'Humidité (TWI) (Figure 45) du bassin versant de Sebdo révèle une distribution hétérogène du potentiel d'accumulation d'eau, en fonction de la configuration du terrain. Les zones en bleu, représentant des valeurs élevées du TWI, se situent le long des axes de drainage, indiquant les vallées et zones de bas de pente où l'eau s'accumule en raison de pentes faibles et d'une large surface contributive en amont. Ces secteurs sont plus susceptibles d'être humides, voire saturés. En revanche, les teintes brunâtres et orangées, associées à de faibles valeurs du TWI, dominent les crêtes et versants supérieurs, où les pentes plus fortes entraînent un drainage rapide et des conditions plus

sèches. Les couleurs intermédiaires (rouge clair et bleu clair) délimitent des zones présentant des conditions d'humidité transitoires.

Cette carte permet d'identifier les zones humides potentielles, d'évaluer le risque de saturation des sols et de mieux comprendre la distribution de la végétation et le potentiel d'érosion.

9.6. Facteur LS (Longueur-pente) :

Combine la longueur de pente et son inclinaison, utilisé pour estimer le potentiel d'érosion hydrique. Il mesure l'effet combiné de la pente et de sa longueur sur l'intensité de l'érosion hydrique. Il est essentiel pour localiser les zones à risque de ruissellement concentré et orienter les actions de protection des infrastructures exposées aux phénomènes d'érosion.

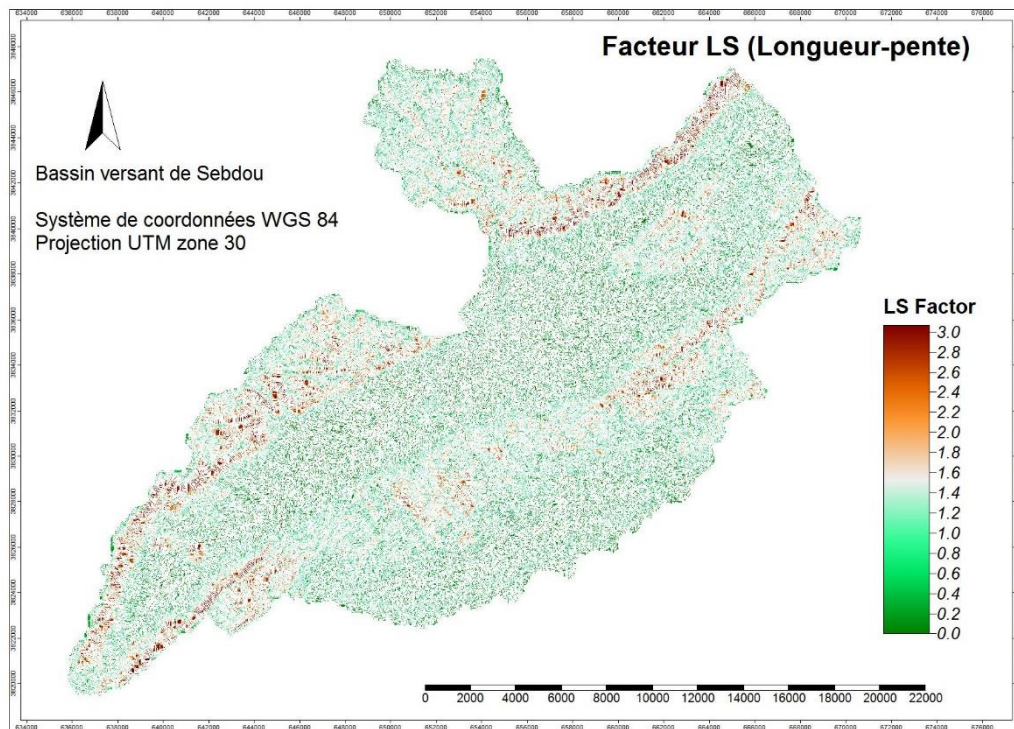


Figure 46 : Carte du facteur LS (Longueur de pente). (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

La carte du Facteur LS (Longueur-Pente) (Figure 46) du bassin versant de Sebdo met en évidence les zones les plus vulnérables à l'érosion hydrique. Les teintes rouge-brun, correspondant à des valeurs élevées du facteur LS, se concentrent principalement sur les pentes et les versants abrupts, où la combinaison de pentes longues et/ou fortes accroît

l'énergie érosive de l'eau de ruissellement. Ces zones représentent des secteurs à risque élevé de perte de sol.

À l'opposé, les zones en vert clair, associées à de faibles valeurs du facteur LS, sont situées sur les plateaux et dans les zones à faible pente, où le potentiel érosif est limité en raison de la courte distance parcourue par l'eau ou de la faible inclinaison du terrain. Les nuances intermédiaires de jaune et d'orange indiquent un risque d'érosion modéré.

9.7. Le gradient topographique :

Est un indicateur fondamental qui décrit la pente maximale à partir d'un point donné. Il permet de modéliser le sens et la force des écoulements, et joue un rôle essentiel dans l'analyse des dynamiques hydrologiques et la prévention des risques liés au relief.

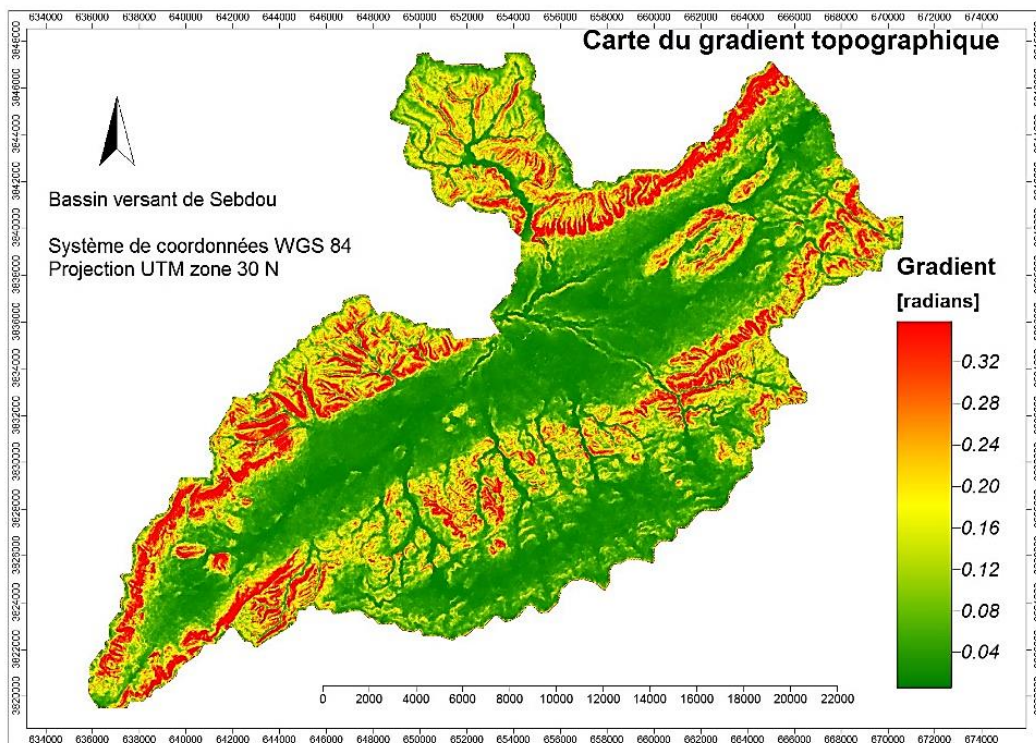


Figure 47 : Carte du gradient topographique. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

La carte du gradient topographique (Figure 47) du bassin versant de Sebdu dévoile un relief varié en termes d'inclinaison des pentes. Les zones intensément colorées en rouge correspondent à un relief abrupt, où les variations d'altitude sont rapides sur de courtes distances. Ces pentes fortes favorisent un écoulement rapide des eaux de surface, ce qui augmente le potentiel d'érosion hydrique tout en limitant l'infiltration de l'eau.

En revanche, les zones colorées en vert signalent des pentes faibles, voire quasi planes, où le ruissellement est plus lent et l'infiltration est plus probable. Ces secteurs, typiques des plateaux et fonds de vallée, présentent une faible sensibilité à l'érosion par l'eau. Les teintes intermédiaires de jaune et d'orange marquent des zones de relief modéré.

10. Conclusion

L'analyse croisée des paramètres morpho-topographiques du bassin versant de Sebdu – à travers les cartes de pente, d'exposition, d'accumulation des flux, de TWI (Topographic Wetness Index), du facteur LS (Longueur-Pente) et du gradient topographique – permet de caractériser de manière intégrée les dynamiques hydro-géomorphologiques à l'échelle locale.

Cette approche a permis d'identifier plusieurs zones à forte sensibilité aux processus d'érosion, à la saturation des sols, ainsi qu'aux risques d'inondation, en particulier dans les fonds de vallée, les zones de faible déclivité au centre du bassin, et le long des principaux talwegs traversant le périmètre urbain de la commune.

Parallèlement, des facteurs anthropiques tels que l'occupation du sol – notamment l'évolution spatio-temporelle de la couverture végétale – et les dispositifs de protection existants, comme les bermes en terre, seront intégrés à l'analyse pour affiner la lecture du risque. Ces éléments influencent significativement la dynamique de ruissellement et le comportement hydrologique du bassin en période de crue.

Sur le plan technique, les résultats issus de ces traitements spatiaux constituent une base solide pour la délimitation des zones à risque hydrique, en particulier celles en interaction directe avec les infrastructures routières. Le croisement des cartes d'accumulation des flux avec les pentes a permis de mettre en évidence les talwegs jouant un rôle prioritaire dans le drainage naturel, notamment dans les secteurs traversés par les routes nationales (RN) et les chemins de wilaya (CW), fortement exposés aux phénomènes de crue. Ces croisements SIG ont permis de localiser précisément les tronçons les plus vulnérables du réseau.

Dans cette optique, des simulations d'inondation ont été réalisées à l'aide du logiciel Global Mapper, en s'appuyant sur la topographie locale pour modéliser les écoulements de surface. Bien que ne constituant pas des modèles hydrologiques complets, ces simulations offrent des indications précieuses sur l'extension potentielle des zones inondables et permettent de mieux évaluer l'exposition du réseau routier aux aléas hydriques, dans un contexte de changement climatique.

Face à l'intensification attendue des événements extrêmes liés aux dérèglements climatiques, l'analyse a été enrichie par l'intégration de l'historique des inondations

observées à Sebdou, ainsi que par l'exploitation de séries temporelles d'images satellitaires et de données climatiques via la plateforme Google Earth Engine (GEE). Ces traitements ont permis d'introduire une dimension temporelle à l'évaluation du risque, en mettant en évidence les tendances évolutives et la récurrence des épisodes critiques.

L'ensemble de ces éléments constitue une base analytique robuste qui permettra, dans le chapitre suivant, de présenter les résultats obtenus, d'en proposer une discussion approfondie et de formuler des recommandations opérationnelles pour une gestion durable et résiliente des risques d'inondation du réseau routier dans la commune de Sebdou.

Chapitre IV : Evaluation des inondations (risques et aléas)

1. Introduction

Ce chapitre vise à présenter la simulation des zones inondables et leur interaction avec les infrastructures routières dans la commune de Sebdou. Il s'appuie sur les données spatiales préalablement traitées et mobilise une approche méthodologique intégrée, combinant plusieurs outils de géomatique. Les logiciels SAGA GIS, QGIS et Global Mapper ont été utilisés respectivement pour la modélisation hydrologique, le traitement des modèles numériques de terrain (MNT), et l'analyse spatiale multicritère.

L'étude suit une démarche progressive structurée en plusieurs étapes clés :

- L'analyse des facteurs anthropiques influençant la dynamique des inondations.
- Le prétraitement des données via Google Earth Engine (occupation du sol, NDVI, historique des inondations).
- La modélisation hydrologique sous SAGA GIS.
- La simulation des crues avec Global Mapper.
- L'analyse multicritère de la vulnérabilité sous QGIS.
- L'élaboration de la carte finale de vulnérabilité.

Les simulations hydrauliques ont été menées à partir du MNT corrigé, du réseau hydrographique extrait et des sous bassins versants délimités. L'objectif principal est d'identifier les portions du réseau routier, en particulier les routes nationales (RN) et les chemins de wilaya (CW), exposées à un risque élevé d'inondation.

Afin de renforcer la robustesse de l'analyse, les zones inondées modélisées ont été croisées avec les limites historiques des événements passés. Par ailleurs, une classification de l'occupation du sol a été réalisée à partir des images Sentinel-2 sur la plateforme GEE, fournissant un contexte empirique pour valider les résultats obtenus.

Enfin, une analyse multicritère conduite sous QGIS a intégré plusieurs facteurs spatiaux (pente, occupation du sol, proximité des cours d'eau et du réseau routier) pour évaluer la vulnérabilité relative de chaque tronçon routier. Cette approche pondérée a permis une spatialisation fine du risque et l'identification des zones à prioriser en matière d'intervention et de prévention.

2. Interaction des facteurs anthropiques avec le risque d'inondation

Les activités humaines comme l'urbanisation, la déforestation et la mauvaise gestion des sols aggravent les inondations. En modifiant le paysage naturel, elles réduisent l'infiltration de l'eau et augmentent le ruissellement. En conséquence, des zones plus vulnérables face aux crues. Agir sur ces facteurs, c'est réduire efficacement le risque d'inondation.

2.1. Analyse de l'occupation du sol et intégration dans la modélisation hydro-géomatique des inondations

L'identification de l'occupation du sol (Figure 48) dans le bassin versant de Sebdoou, réalisée à partir des données Sentinel-2 (date d'acquisition : 4 mai 2024, résolution : 10 m) traitées sur Google Earth Engine (GEE), constitue une étape essentielle pour la modélisation des risques d'inondation. La carte obtenue met en évidence cinq grandes classes d'occupation du sol : forêt dense, zones boisées, agriculture, sol nu et zones urbaines. Ces classes ont été extraites selon une classification supervisée appuyée sur des échantillons d'entraînement et une validation visuelle par images composites en fausses couleurs.

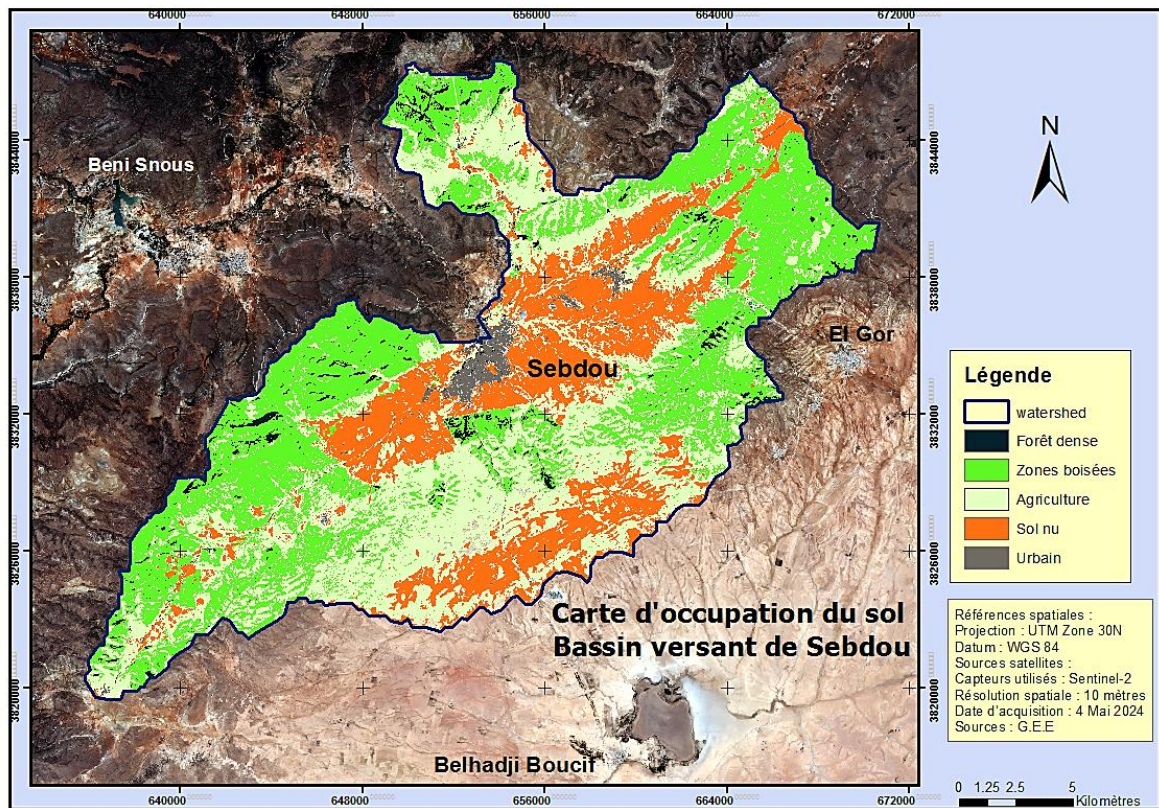


Figure 48 : Carte d'occupation du sol. Bassin versant de Sebdoou. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

2.2. Analyse de la couverture végétale à partir de l'indice NDVI et SAVI

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index) est un indicateur couramment utilisé en télédétection pour évaluer la densité et l'état de la végétation. Il est calculé à partir des bandes spectrales rouges (RED) et proche infrarouge (NIR) selon la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} + \text{RED}) / (\text{NIR} - \text{RED})$$

Les valeurs de NDVI varient entre -1 (absence de végétation ou surfaces artificielles, eau, etc.) et +1 (forte couverture végétale saine). Une valeur proche de 0 indique généralement un sol nu ou une végétation très clairsemée.

Dans le cadre de cette étude, une analyse temporelle du NDVI a été menée à partir des images Sentinel-2 acquises durant chaque saison estivale (de juin à août) entre 2015 et 2024, une période particulièrement sensible à la sécheresse. Cette analyse a été effectuée à l'aide de Google Earth Engine (GEE), en s'appuyant sur le script présenté en annexe 06.

2.2.1. Comparaison entre NDVI (2015–2024)

La différence de NDVI entre les deux dates a été calculée pixel par pixel :

$$\text{NDVI_Différence} = \text{NDVI 2024} - \text{NDVI 2015}$$

Le tableau 20 présente les statistiques zonales du NDVI calculées sur le bassin versant de Sebdoou entre deux dates d'observation (2015 et 2024). Les données ont été obtenues à l'aide de l'outil 'Statistiques de zone' dans QGIS.

Tableau 20 : Résultat de l'évolution du NDVI (2015–2024)

GID	Surface (m²)	Nombre de pixels (_diffcount)	Somme des différences (_diffsum)	Moyenne des différences (_diffmean)
1	432757570	5271900	-723403.17	- 0.1372

La carte de l'évolution du NDVI (Figure 49) a été visualisée à l'aide d'une palette red–white–green :

- **Rouge** : zones de diminution de la végétation.

- **Blanc** : stabilité de la végétation.
- **Vert** : zones d'augmentation de la végétation.

La moyenne des valeurs NDVI_Différence obtenue est de - 0.1372, soit environ - 13.72 %, ce qui, bien qu'en apparence modérée, représente une perte significative de la couverture végétale à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude

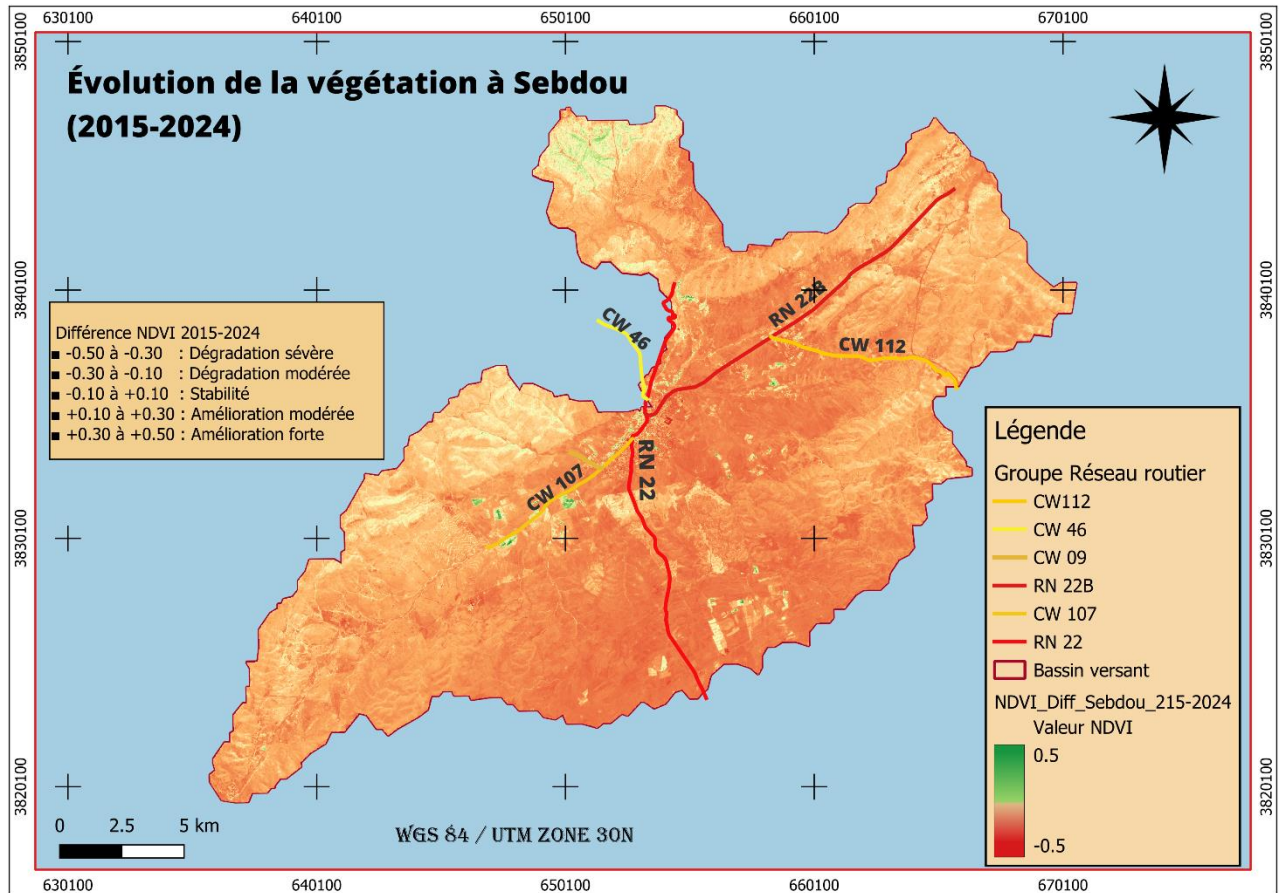


Figure 49 : Carte d'évolution de végétation à Sebdou entre 2015 et 2024. (*Source* : Réalisation des auteurs, 2025)

2.2.2. Interprétation des résultats

Cette baisse est attribuée à plusieurs facteurs :

- Conditions climatiques estivales marquées par des épisodes de sécheresse, particulièrement sensibles dans la région étudiée.
- L'amélioration de la résolution spatiale et spectrale des images Sentinel-2 (10 m) permet une détection plus précise des changements dans la végétation.
- Activités humaines telles que l'urbanisation, le surpâturage ou la déforestation.

Bien que la variation moyenne du NDVI soit de -0.1372, soit une diminution d'environ -13.72 % de la couverture végétale, ce recul traduit une tendance notable à la dégradation de la santé ou de la densité de la végétation entre 2015 et 2024. Cette perte est significative, notamment dans un contexte estival déjà sensible aux phénomènes de sécheresse. Elle mérite une attention particulière dans le cadre de la gestion environnementale, de la préservation des ressources naturelles et de l'adaptation aux effets du changement climatique.

En plus les graphiques (Figure 50) illustrent l'évolution temporelle des indices NDVI et SAVI pour la commune de Sebdou sur une période de 2015 à 2024. Ces indices, dérivés des images Sentinel-2, permettent de suivre l'état de la végétation en réduisant l'influence des variations saisonnières et de la couverture nuageuse.

Les courbes montrent des fluctuations saisonnières marquées, avec des pics de végétation en période printanière et des baisses durant les étés secs. Toutefois, une tendance générale à la baisse est clairement observable sur les deux graphiques, particulièrement à partir de l'année 2020. Cette dégradation progressive se traduit par :

- Une diminution des valeurs maximales de NDVI et SAVI, indiquant une perte de densité de la végétation,
- Une fréquence accrue des valeurs faibles, révélant une couverture végétale plus clairsemée,
- Des périodes de récupération végétative plus courtes et moins marquées.

Ces observations certifient parfaitement les analyses spatiales réalisées sous QGIS, où les cartes de différences NDVI et SAVI mettent en évidence des zones de régression végétale, notamment en périphérie urbaine et le long des oueds. Ainsi, cette dégradation de la couverture végétale peut contribuer à accroître la vulnérabilité de la zone face aux inondations, notamment par la réduction de la capacité d'interception et d'infiltration des sols.

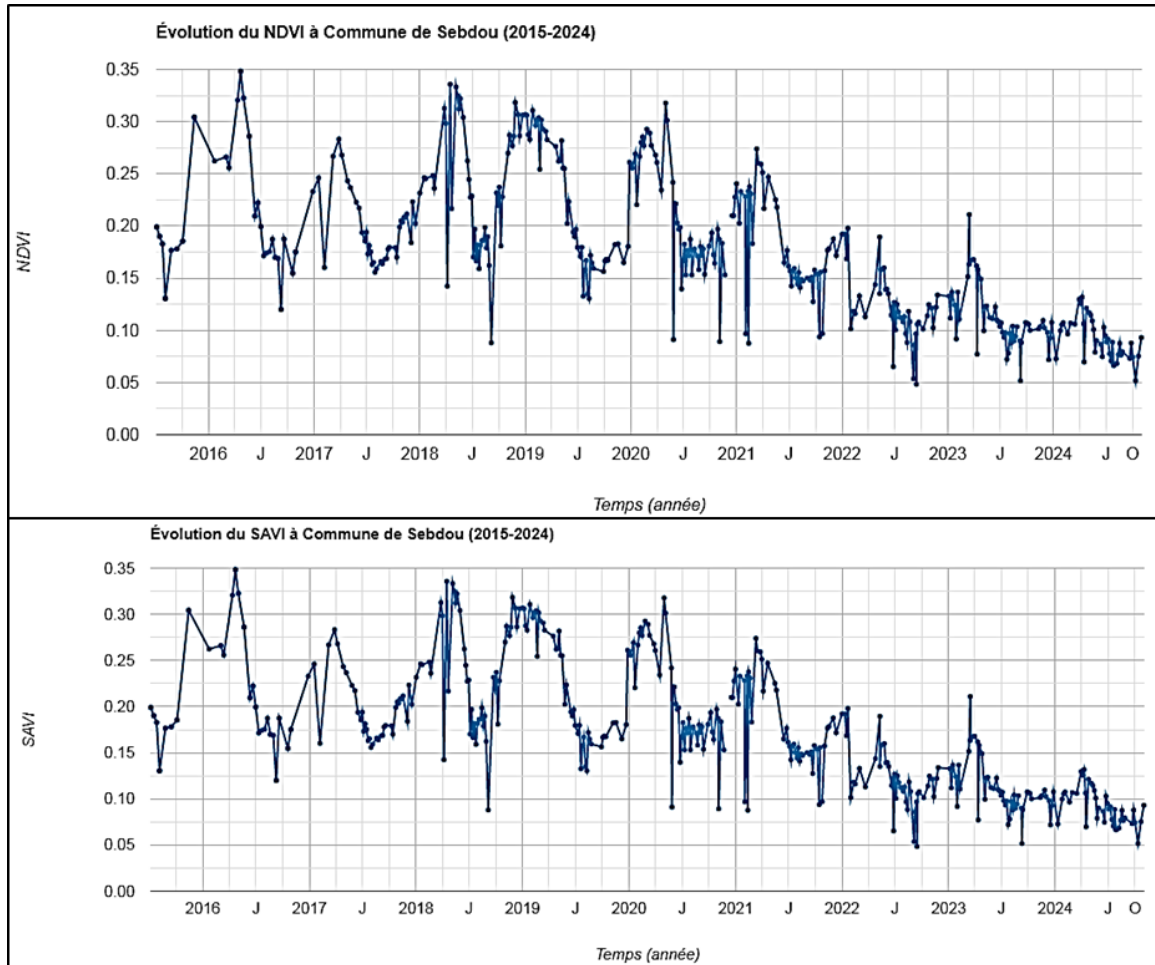


Figure 50 : Evolution des indices de la végétation NDVI et SAVI entre 2015 et 2024

2.3. Synthèse croisée QGIS–GEE : analyse de l'évolution spatio-temporelle de la végétation à Sebdou (2015–2024)

L'analyse comparative des résultats issus de QGIS (traitement local et cartographie spatiale) et de Google Earth Engine (analyse temporelle via séries d'indices de végétation) a permis de valider la cohérence des observations sur la dégradation progressive de la couverture végétale dans la commune de Sebdou entre 2015 et 2024.

La carte de différence NDVI produite sous QGIS a mis en évidence une perte spatialisée de la végétation, tandis que les graphes temporels NDVI/SAVI générés sur GEE ont confirmé cette tendance à l'échelle temporelle. Ces deux approches montrent des résultats similaires et complémentaires, renforçant la robustesse de l'interprétation.

Cette convergence méthodologique confirme une baisse significative de la densité végétale, pouvant être attribuée à des facteurs climatiques (sécheresse) et anthropiques (urbanisation, défrichement, surpâturage). Cette dégradation représente un facteur aggravant

des risques d'inondation, en réduisant la capacité naturelle d'absorption, d'infiltration et de stabilisation des sols.

2.3.1. Lien entre la dégradation de la couverture végétale et le risque d'inondation

La couverture végétale joue un rôle fondamental dans la régulation du cycle hydrologique et la protection contre les inondations. Les formations végétales, qu'elles soient naturelles ou cultivées, permettent de réduire significativement le ruissellement des eaux de pluie grâce à plusieurs mécanismes : interception des précipitations, augmentation de l'infiltration dans le sol, rétention de l'humidité et stabilisation des pentes. En agissant comme un tampon naturel, la végétation limite ainsi la vitesse et le volume de l'eau s'écoulant vers les cours d'eau.

Dans le cas de la commune de Sebdu, l'analyse évolutive de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (même résultats sont obtenus pour le SAVI), entre 2015 et 2024 révèle une diminution moyenne de - 0.1372, soit environ -13.72 %. Cette baisse (appuyée par le traitement GEE visualisé par les deux graphes NDVI et SAVI ci-dessus), bien qu'en apparence modérée, est significative d'une dynamique de dégradation de la végétation à l'échelle du bassin versant étudié. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette régression, notamment la sécheresse, la pression anthropique (déboisement, surpâturage) ou encore les changements d'usage du sol.

La réduction de la couverture végétale entraîne une augmentation directe du ruissellement de surface, particulièrement sur les versants pentus, et favorise ainsi la concentration rapide des eaux dans les talwegs et oueds. Ce phénomène amplifie la réponse hydrologique du bassin versant en période de fortes précipitations, accroissant la fréquence et l'intensité des crues. De plus, la perte de végétation favorise l'érosion des sols, le transport de sédiments, et la dégradation des infrastructures routières à proximité des zones inondables.

Par conséquent, la dégradation de la végétation observée à Sebdu constitue un facteur aggravant du risque d'inondation, en diminuant la résilience naturelle du territoire face aux événements hydro-climatiques extrêmes. Il est donc crucial d'intégrer cette variable dans l'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures routières dans le cadre d'une approche géomatique.

Donc, moins de végétation = plus de ruissellement = plus de risque d'inondations.

Tableau 21 : Interactions entre la couverture végétale et les phénomènes d'Inondation

Effet de la végétation	Impact sur les inondations
Absorption d'eau via les racines	Réduction du ruissellement
Interception des gouttes de pluie	Moins d'érosion des sols
Amélioration de l'infiltration dans le sol	Moins de concentration des eaux de surface
Stabilité des pentes et berges d'oued	Moins d'effondrements et de glissements

L'image (Figure 51), générée par le traitement des données sur Google Earth Engine (GEE) concernant l'historique des inondations de Sebdou entre 2015 et 2024, illustre clairement les interactions entre les axes routiers et les zones inondables. Les routes principales, la RN 22 et la RN 22B (en rouge), traversent des zones à risque d'inondation (en noir). On observe que les portions de ces routes situées dans des zones densément végétalisées (en vert) sont protégées des inondations, tandis que celles traversant des zones dépourvues de végétation sont plus exposées au risque d'inondation.

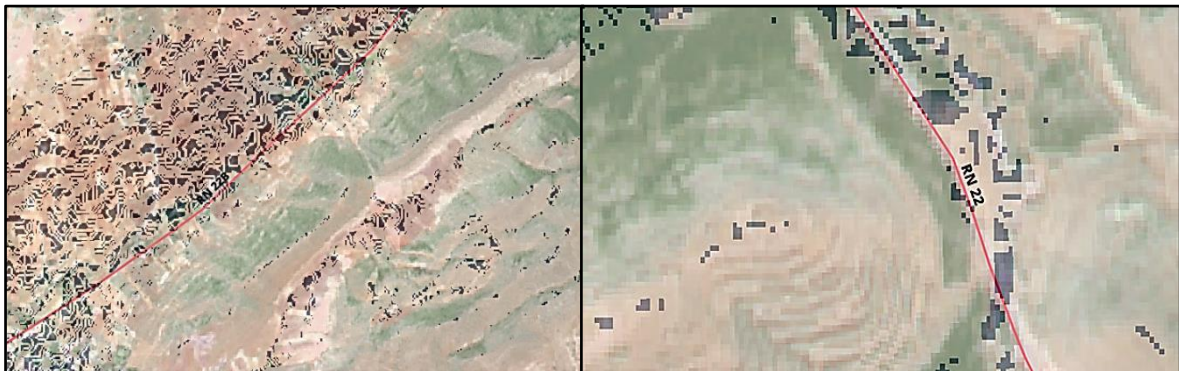


Figure 51 : Interaction entre l'inondation et la couverture végétale.

Ainsi, l'intégration de l'analyse évolutive de la végétation, des données morpho-topographiques et des simulations d'inondation offre une approche complète pour évaluer et anticiper les risques. Elle constitue une base solide pour orienter les recommandations en matière d'aménagement et de gestion des infrastructures routières exposées dans la commune de Sebdou.

3. Rôle des bermes en terre de protection et leur vulnérabilité

Les bermes de protection en terre implantées dans la commune de Sebdou, visibles sur la carte ci-dessus, constituent un dispositif d'atténuation essentiel contre les crues et le

ruissellement de surface. Leur fonction principale est de canaliser ou de dévier les eaux de ruissellement issues des talwegs et des versants vers des zones de moindre impact, afin d'éviter qu'elles ne submergent les infrastructures critiques, notamment les routes nationales (RN 22, RN 22B) et les chemins de wilaya (CW 09, CW 46, CW 107, CW 112).

Dans un contexte hydro-géomorphologique marqué par une concentration importante des flux de drainage, notamment dans les zones topographiquement basses ou à proximité des axes routiers majeurs, les bermes en terre jouent un rôle stratégique dans la protection contre les inondations. Ces structures, agissant comme des barrières naturelles, sont conçues pour intercepter, ralentir et détourner les eaux de ruissellement en provenance du bassin versant. Ce mécanisme permet non seulement de réduire la vitesse d'écoulement et de freiner la montée des eaux, mais aussi de limiter les phénomènes d'érosion qui menacent directement les accotements, les ouvrages d'art et les chaussées. En atténuant l'intensité des crues et en stabilisant les zones sensibles, les bermes contribuent ainsi à préserver l'intégrité des infrastructures routières les plus exposées.

Cependant, la durabilité de ces bermes est directement menacée par plusieurs facteurs:

- L'érosion hydrique due à la force des ruissellements concentrés, notamment en l'absence de revêtement ou de végétalisation protectrice.
- L'entretien insuffisant ou l'absence de maintenance régulière, qui peut conduire à la formation de brèches ou au colmatage des canaux de dérivation.
- La dégradation d'origine anthropique (circulation d'engins, dépôts de matériaux, urbanisation non contrôlée) qui affaiblit leur structure.
- L'intensification des épisodes pluviométriques extrêmes liée au changement climatique, qui met à l'épreuve leur capacité de rétention et de déviation.

En cas de défaillance ou de rupture, ces bermes peuvent exacerber le risque d'inondation en favorisant l'écoulement non maîtrisé vers les axes routiers, causant des dégâts importants, des interruptions de trafic, voire des situations dangereuses pour les usagers. L'étude géomatique, combinée aux simulations d'inondation sous Global Mapper, permet justement d'anticiper ces scénarios et de proposer des mesures d'entretien, de renforcement (ex. : enrochement, végétalisation, reprofilage) ou de redimensionnement des bermes existantes.

Ainsi, dans une approche intégrée de gestion des risques hydriques, les bermes de protection doivent être considérées comme des infrastructures stratégiques de mitigation,

nécessitant une surveillance régulière, une modélisation prospective, et une intégration dans les plans d'aménagement routier à l'échelle de la commune de Sebdou.

3.1. Impact de la Dégradation des Bermes sur le Réseau Routier : Cas de la RN 22B au PK 38+800

Les images (Figure 52) illustrent concrètement l'importance des bermes en terre dans la protection du réseau routier contre les inondations ainsi que les conséquences de leur dégradation.

Ces images extraites du travail de terrain mettent en lumière l'impact direct de la dégradation de ces bermes, notamment sur la RN 22B. Sous l'effet de l'érosion, du manque d'entretien ou de fortes précipitations, les bermes peuvent perdre leur capacité de protection. Cette dégradation favorise alors le débordement d'eaux chargées de boues et de débris sur la chaussée, créant des conditions de circulation dangereuses pour les usagers, telles que la perte d'adhérence et l'obstruction des voies. À moyen et long terme, la détérioration de ces structures accélère également l'usure de la chaussée, avec l'apparition de fissures, de nids-de-poule, et une multiplication des interventions de maintenance coûteuses.

Ainsi, l'état des bermes en terre joue un rôle déterminant dans la résilience du réseau routier face aux risques d'inondation. Leur entretien régulier, leur renforcement, voire leur redimensionnement selon les nouvelles conditions hydrologiques liées au changement climatique, apparaissent comme des priorités pour préserver la sécurité et la durabilité des infrastructures de transport.



Figure 52 : Dégradation des Bermes sur le Réseau Routier : Cas de la RN 22B au PK 38+800

4. Les résultats du croisement du réseau routier avec l'analyse morphologique issue de SAGA GIS

Le croisement spatial entre le réseau routier (RN et CW) et les cartes morphotopographiques générées dans SAGA GIS (pente, accumulation des flux, TWI, facteur LS) a permis d'identifier les tronçons les plus exposés aux risques hydro-géomorphologiques dans le bassin versant de Seb dou, en appliquant les seuils présentés dans le tableau 22.

Tableau 22 : Seuils de référence des principaux paramètres morphologiques

Paramètre	Plage de valeurs	Seuils critiques	Justification
TWI (Indice Topographique d'Humidité)	0–25+	>10 (risque élevé)	<ul style="list-style-type: none"> Valeurs >10 indiquent des zones de saturation (Beven & Kirkby, 1979). Corrélé aux inondations récurrentes dans les talwegs.
Pente	0°–90°	>15° (≈26.8%) (risque élevé)	<ul style="list-style-type: none"> Pentes >15° favorisent un ruissellement rapide (FAO, 2015). Augmentation de l'érosion hydrique.
Facteur LS (Longueur-Pente)	0–20+	>5 (risque élevé)	<ul style="list-style-type: none"> Combinaison de pentes longues/fortes → énergie érosive (Wischmeier & Smith, 1978). LS >5 = zones prioritaires pour anti-érosion.

Les résultats montrent que la majorité des segments du réseau routier, à l'exception notable du CW 46, traversent des zones marquées par une forte accumulation de flux et des pentes modérées à fortes, correspondant aux principaux talwegs du bassin versant. Ces secteurs sont particulièrement exposés à une concentration rapide des eaux de ruissellement, un risque accentué par des valeurs élevées du TWI, indicateur d'une saturation fréquente des sols.

De plus, les valeurs du facteur LS indiquent une prédisposition à l'érosion sur certains versants traversés ou bordés par les routes, particulièrement lorsque la végétation est dégradée. Ces zones combinent souvent plusieurs facteurs aggravants : forte pente, faible couverture végétale, et accumulation des eaux, ce qui fragilise la chaussée et les accotements.

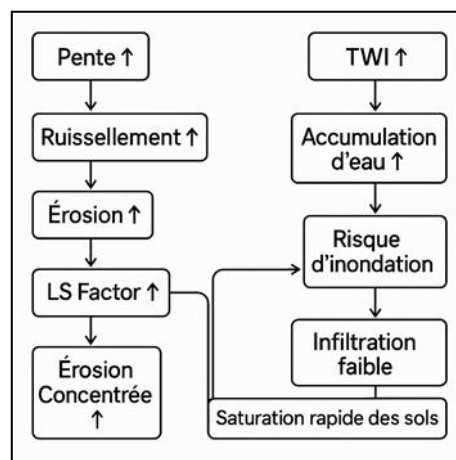


Figure 53 : Schéma relationnel : Pente, TWI, Facteur LS et risques

Les résultats de cette analyse sont visuellement exposés à travers les cartes clés (Figures 54 à 55), tandis qu'une quantification détaillée en est fournie dans le tableau analytique 23.

À partir des cartes générées dans le cadre de cette étude, des coupures ont pu être identifiées le long des axes routiers (Figure 54), lorsqu'on effectue un zoom sur ces portions à l'aide des outils cartographiques. Ces coupures, représentées par des interruptions sur les cartes, correspondent à des segments de routes situées dans des zones géomorphologiquement protégées contre les inondations, telles que des pentes plus élevées ou des positions géographiques à l'abri des écoulements directs d'eaux de crue. Elles permettent ainsi d'identifier les portions du réseau routier qui nécessitent moins d'interventions de protection, ainsi que celles qui pourraient bénéficier de renforcements spécifiques en fonction des risques hydrométéorologiques.

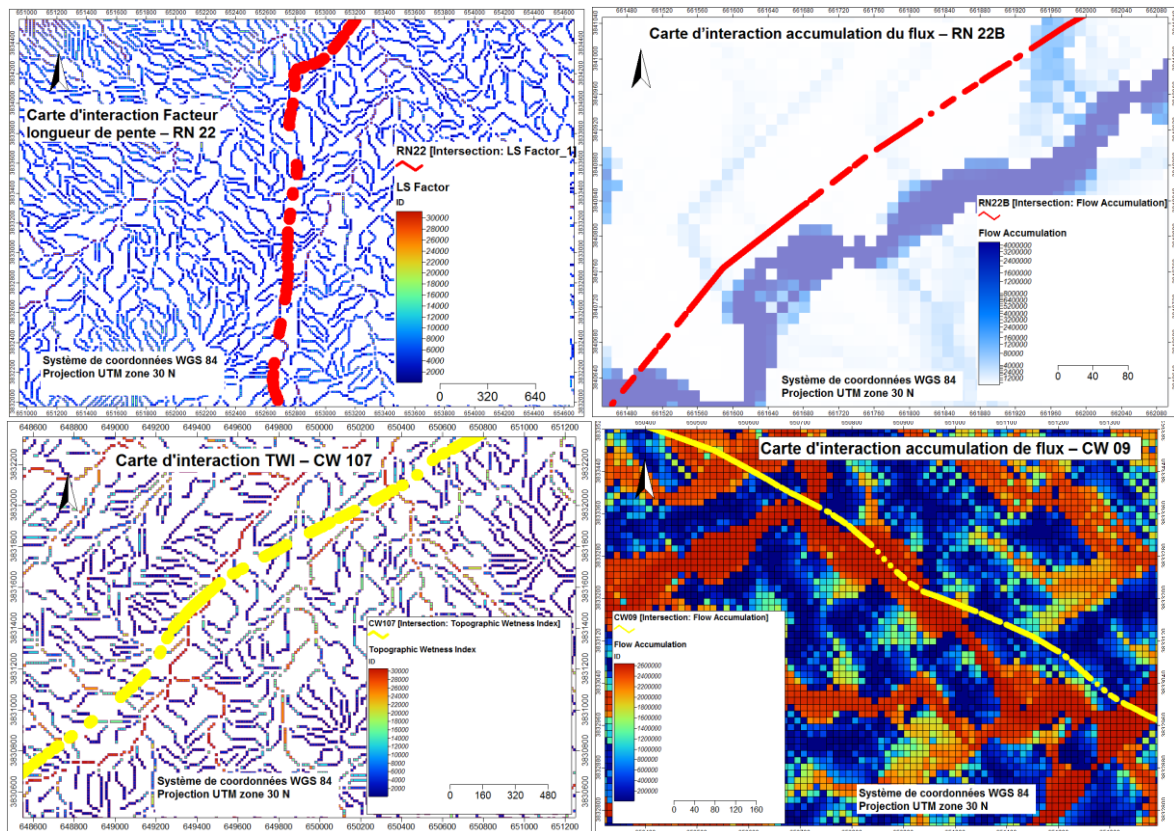


Figure 54 : Cartes détaillées montrent les intersections entre les paramètres morphologiques et le réseau routier. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

Cependant, bien que ces coupures indiquent des sections où les inondations n'ont pas été observées durant les périodes analysées, elles ne garantissent pas une sécurité totale. Ces zones ne sont pas exemptes de risques à long terme, notamment en raison de facteurs tels

que les événements climatiques extrêmes, l'érosion des sols ou la montée des eaux en amont ou en aval. Par conséquent, il est essentiel de considérer ces coupures comme des zones moins exposées aux inondations, tout en restant vigilant face aux risques hydrologiques potentiels qui pourraient affecter la sécurité des infrastructures à l'avenir.

Chapitre IV : Evaluation des inondations (risques et aléas)

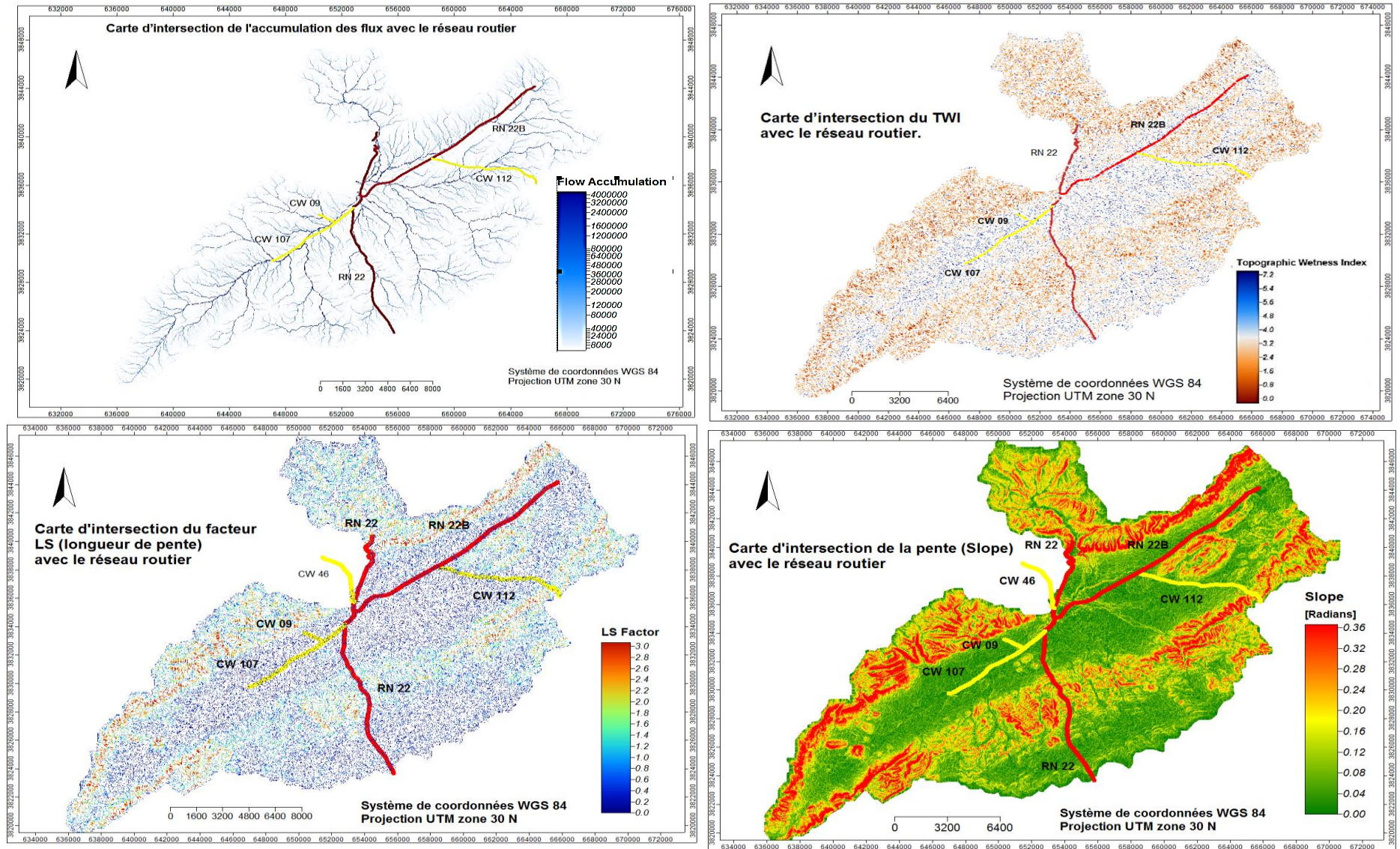


Figure 55 : Carte de l'intersection entre les paramètres morphologiques et le réseau routier. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

4.1. Exploitation des cartes d'intersection des facteurs hydro-géomorphologiques avec le réseau routier

L'analyse multicritère du réseau routier de la commune de Sebdou repose sur la superposition des principaux paramètres hydro-géomorphologiques (L'accumulation des flux, l'indice topographique d'humidité (TWI), le facteur LS ainsi que la pente ont été calculés et présentés dans le sous-chapitre 3) avec les axes de transport stratégiques, à savoir les routes nationales (RN 22, RN 22B) et les chemins de wilaya (CW 09, CW 46, CW 107, CW 112). Cette approche permet d'identifier les tronçons vulnérables face aux aléas liés au ruissellement et à l'érosion, dans un contexte de changement climatique.

4.1.1. Carte d'accumulation des flux (Flow Accumulation)

Cette carte met en évidence les zones de concentration des écoulements de surface, indiquées par des valeurs élevées (en bleu foncé). Ces zones correspondent aux talwegs et aux axes préférentiels de ruissellement.

L'intersection avec le réseau routier révèle plusieurs points critiques, notamment au niveau des CW 107 et CW 09, où les voies croisent des lignes de flux importantes, augmentant ainsi leur exposition au risque d'inondation directe. À l'inverse, la RN 22B traverse majoritairement des zones à faible accumulation, traduisant un moindre potentiel de ruissellement concentré.

4.1.2. Carte du Topographic Wetness Index (TWI)

Le TWI permet d'évaluer la propension d'un site à accumuler de l'eau en fonction de la topographie. Les zones où l'indice dépasse le seuil critique de **10** indiquent une forte probabilité de saturation du sol et de stagnation des eaux pluviales.

Les chemins CW 107 et CW 09 traversent plusieurs de ces zones saturées, confirmant leur vulnérabilité hydrologique. En revanche, les sections de la RN 22 et du CW 112 apparaissent partiellement dans des secteurs à faible TWI, suggérant une capacité de drainage plus favorable.

4.1.3. Carte du facteur LS (Longueur-Pente)

Le facteur LS d'érosion, évalue l'impact combiné de la pente et de sa longueur sur le risque d'érosion. Les valeurs supérieures à 5 sont considérées critiques en raison de l'intensification de l'érosion potentielle.

Les cartes montrent des pics importants du facteur LS au niveau de la RN 22 et du CW 112, en particulier sur les bordures de versants. Ces zones peuvent connaître des phénomènes d'instabilité des talus, de ravinement ou de colmatage des dispositifs de drainage, nécessitant ainsi des aménagements de protection.

4.1.4. Carte de pente (Slope)

La carte des pentes, exprimée en radians, distingue les zones à pentes abruptes (en rouge) des zones plus planes (en vert). Le seuil critique de 15° ($\approx 0,26$ rad) marque un niveau à partir duquel le ruissellement devient rapide et difficile à infiltrer ce qui augmente significativement le risque d'érosion des sols et la saturation rapide des dispositifs de drainage en aval.

La RN 22 traverse plusieurs zones au-delà de ce seuil, notamment dans le sud-ouest du bassin, où les risques de ruissellement intense et d'érosion sont accrus. De leur côté, les CW 09 et CW 107 se situent globalement en terrain à pente modérée, mais sont ponctuellement exposés à des ruptures de pente pouvant amplifier localement les effets de l'eau en mouvement.

Synthèse : L'interprétation croisée de ces quatre paramètres révèle plusieurs secteurs critiques :

- **RN 22** affiche une variabilité spatiale importante. Certaines sections, notamment en zones à forte pente et à fort facteur LS, nécessitent des mesures spécifiques, tandis que d'autres peuvent être considérées comme fortement exposées à l'érosion.
- **RN 22B** se trouve dans une configuration topographique relativement favorable, traversant des zones à faible ruissellement et humidité réduite, ce qui limite les besoins en intervention.
- **CW 107 et CW 09** sont les tronçons qui combinent par section une forte accumulation de flux, TWI élevé et pente modérée.
- **CW 112** présente un risque localisé lié à la pente et au facteur LS, notamment sur ses sections en versant, ce qui justifie l'application de techniques de stabilisation des talus et aménagement de fossés.
- **CW 46** se situe en dehors des limites du bassin versant et n'a pas été affecté par les événements de crue selon les données historiques disponibles.

Ces résultats obtenus, indiquent que 80 % du réseau est exposé au risque d'inondation. Afin de consolider ces résultats, une analyse multicritère a été conduite dans QGIS, en

s'appuyant sur des paramètres morphologiques du terrain, préalablement calculés à l'aide du logiciel SAGA GIS.

Le tableau analytique (Tableau 23) présente les résultats de l'analyse morphologique réalisée sous SAGA GIS, permettant d'identifier avec précision les sections du réseau routier les plus exposées au risque d'inondation.

Chapitre IV : Evaluation des inondations (risques et aléas)

Tableau 23 : Synthèse des caractéristiques morphologiques calculées sous SAGA GIS

Axe routier	Localisation	Zone Traversée	Pente (%)	Accumulation des Flux	TWI	Facteur LS	Niveau de vulnérabilité	Observations
RN 22	Du Pk 100+000 au Pk 106+000	Urbain, oued Taoudlala, oued El Guettara El Hassel	5	Très forte	Élevé	Moyen	Très élevé	Risque d'érosion accru. Débordement des eaux pluviales au niveau des ouvrages hydraulique traversant les oueds (Pk 102+400)
	Du Pk 106+000 au Pk 115+000	Zone montagneuse, oued Kikol	8 – 12	Faible	Faible	Élevé	Élevé	Débordement des eaux pluviales au niveau des ouvrages hydraulique traversant les oueds (Pk 109+000), risque d'érosion accru
RN 22B	Du Pk 34+000 au Pk 42+000	Urbain, zones agricoles	2 – 4	Très forte	Élevé	Élevé	Moyen	Bermes en état bonne, risque d'érosion, Débordement des eaux pluviales au niveau des ouvrages hydraulique traversant oued El Fessouane (Pk 44+000)
	Du Pk 42+000 au Pk 44+500	Semi urbain, oued El Fessouane	4– 5	Moyen	Élevé	Faible		Crues destructrices. Ouvrages au PK 44+000 grièvement atteint
	Du Pk 44+500 au Pk 46+500	Urbain	6	Forte	Très élevé	Moyen		***
CW 09	Du Pk 13+000 au Pk 15+900	Semi urbain, Oued Sebdou	< 3	Très forte	Très élevé	Moyen	Moyen	Bermes en état moyenne, risque d'érosion, Débordement des eaux pluviales au niveau des ouvrages hydrauliques traversant oued Sebdou (Pk15+800). Crues destructrices
CW 107	Du Pk 00+000 au Pk 02+500	Urbain	< 3	Très forte	Très élevé	Faible	Moyen	***
	Du Pk 02+000 au Pk 07+500	Zones agricoles, Oued Sebdou	3 - 5	Très forte	Très élevé	Faible		Bermes en état moyenne, Débordement des eaux pluviales au niveau des ouvrages hydraulique traversant oued Sebdou (Pk 04+070)
CW 112	Du Pk 00+000 au Pk 05+000	Urbain, zones agricoles	3 - 5	Très forte	Très élevé	Faible	Moyen	Débordement des eaux pluviales. Au niveau d'ouvrage hydraulique au Pk 03+900. Crues destructrices.
	Du Pk 05+000 au Pk 10+000	Zones agricoles	8 – 12	Moyen	Moyen	Très élevé	Élevé	Instabilité des talus, risque élevé d'érosion.

5. Croisement du réseau routier avec les données historiques d'inondations issues de Google Earth Engine

Dans cette étape, une analyse spatiale a été réalisée afin de croiser le tracé du réseau routier avec les zones historiquement affectées par des inondations. Ces données d'inondation ont été obtenues à partir d'images satellitaires traitées sur la plateforme Google Earth Engine, en exploitant notamment les indices d'humidité (NDWI) et les variations spectrales liées à la présence d'eau de surface.

L'objectif de cette opération est de localiser précisément les segments routiers ayant été exposés à des événements d'inondation au cours des dernières années. Ce croisement permet non seulement d'identifier les zones de vulnérabilité récurrentes, mais aussi de valider, par des données empiriques, les résultats issus des analyses morphologiques et multicritères précédentes.

5.1. Cartographie des zones inondables et vulnérables à Sebdou (2015-2024) : Analyse à l'aide de Google Earth Engine

La carte "Historique des inondations à Sebdou (2015-2024)" (Figure 56), présente les zones inondables de la commune, en se basant sur les données historiques traitées via Google Earth Engine. Les zones inondables, indiquées en noir sur la carte, correspondent à des secteurs régulièrement touchés par les crues, notamment le long des cours d'eau (oueds) et dans les dépressions topographiques, des caractéristiques typiques des crues rapides en milieu semi-aride. Ces zones sont particulièrement vulnérables en raison de la morphologie du bassin versant, qui comprend des pentes accentuées et une faible capacité d'infiltration des sols en raison de la nature géologique de Sebdou et dans les zones urbaines. La réduction de la couverture végétale dans ces secteurs aggrave également la situation en réduisant la rétention d'eau et en accélérant le ruissellement.

Le traitement a permis d'identifier les zones inondables à Sebdou (Figure 57 et 58) en utilisant des images satellites Sentinel -2 et des analyses temporelles couvrant la période de 2015 à 2024. Cette analyse géospatiale a révélé les tendances et répétitions des inondations, fournissant des informations essentielles pour identifier les sections vulnérables du territoire, en particulier les infrastructures routières exposées aux risques d'inondation. Le script GEE utilisé pour l'extraction de l'historique des inondations sur la période 2015–2024 est présenté en annexe 07.

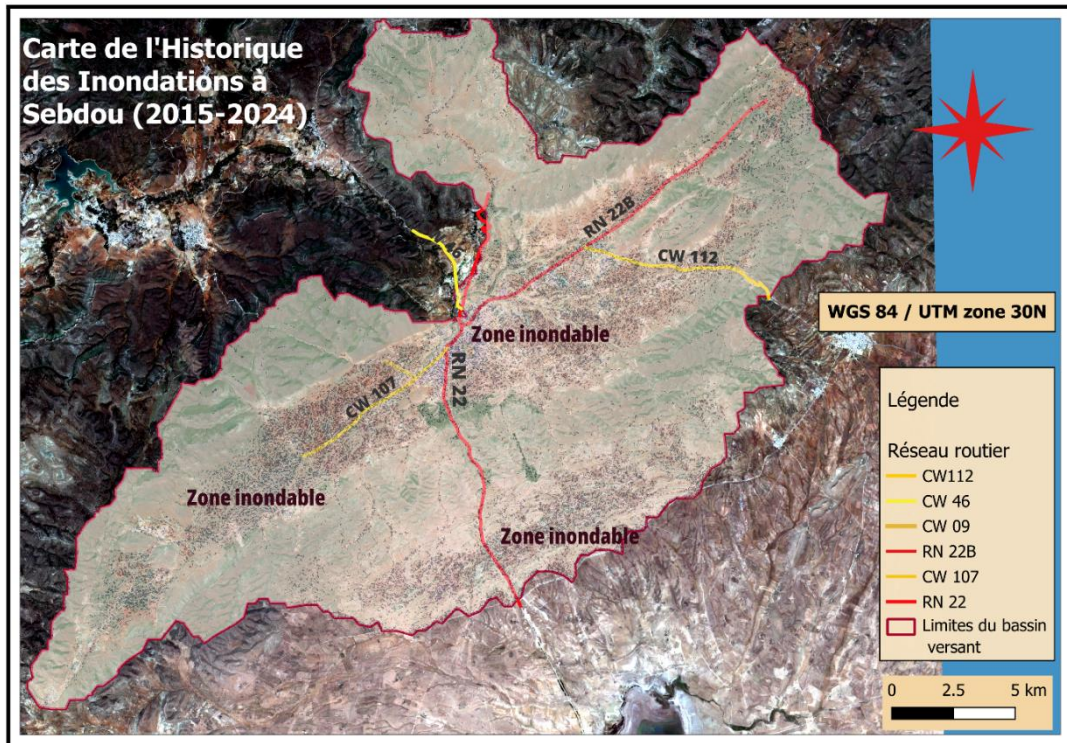


Figure 56 : Carte de l’historique des inondations à Sebdu entre 2015 et 2024. (Source : *Réalisation des auteurs, 2025*)

Les routes principales, la RN 22, RN 22B, CW 112, CW 09 et CW 107, traversent des zones inondables, ce qui les rend particulièrement vulnérables aux crues. Les sections de la RN 22 et RN 22B qui croisent ces zones inondables sont des points critiques à risque élevé, avec des impacts possibles sur la mobilité et la sécurité. Les chemins communaux (CW112, CW09 et CW 07) sont également exposés, pouvant subir des dommages répétés, tels que l'érosion ou des coupures dues aux crues.

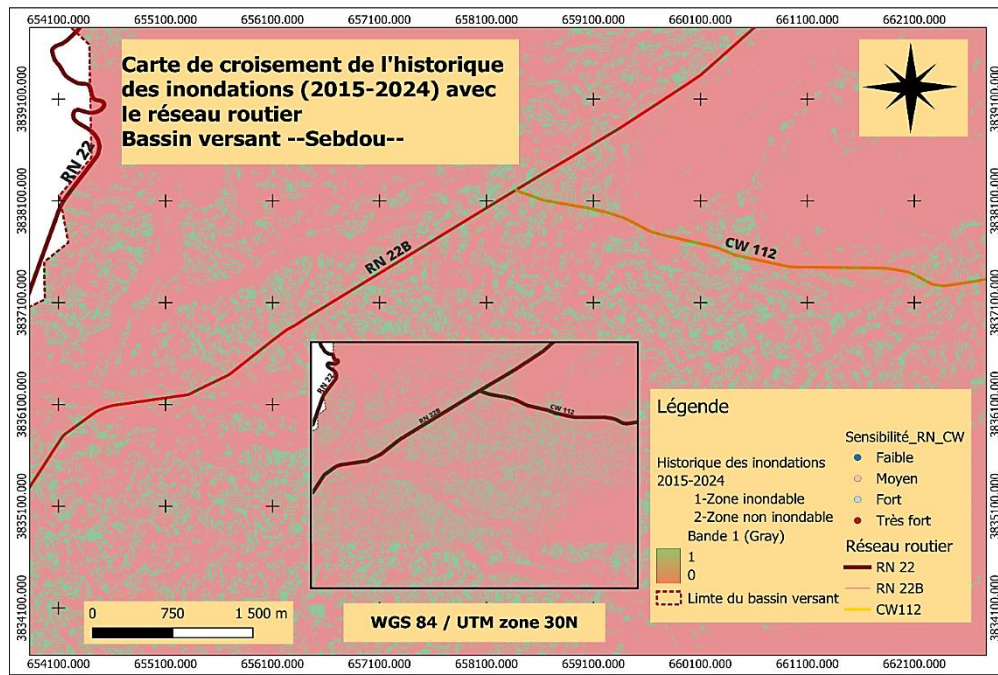


Figure 57 : Carte 1 de croisement de l'historique des inondations (2015-2024) avec le réseau routier. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

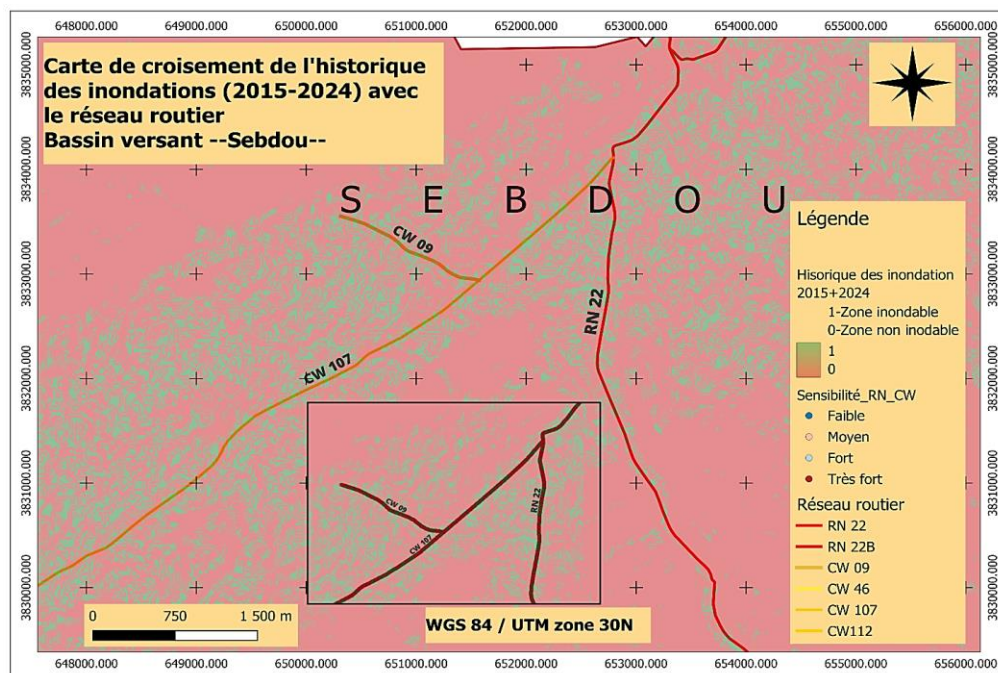


Figure 58 : Carte 2 de croisement de l'historique des inondations (2015-2024) avec le réseau routier. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

Le croisement avec les événements réels survenus dans la commune. En effet, des photos prises lors des inondations passées ont permis de valider et d'affiner ces résultats obtenus à partir des données satellitaires, offrant ainsi une perspective concrète des zones touchées. Ces sections de routes sont détaillées dans le tableau 24 qui résume l'interaction

entre les données de l'analyse géo-spatiale et les observations réelles issues des photos prises lors des événements d'inondation, en détaillant les sections du réseau routier les plus exposées.

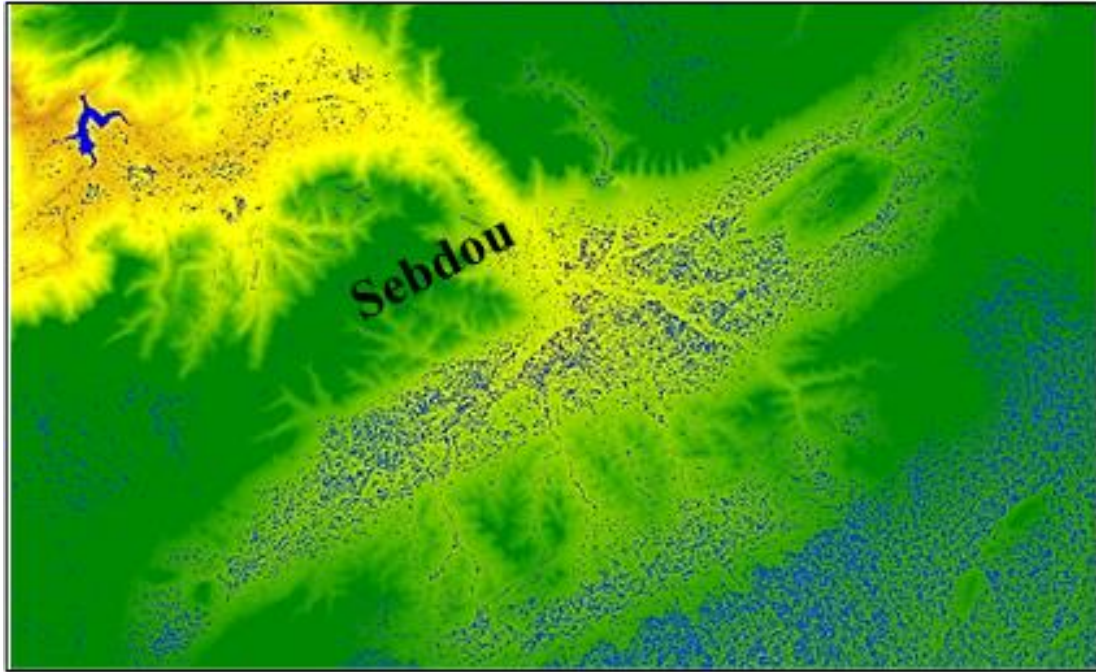


Figure 59 : Capture d'écran de l'historique des inondations (2015–2024) – Source : GEE.

Tableau 24 : Vulnérabilité des routes aux inondations selon la localisation, les impacts observés et la présence de dalots

Secteur Routier	Localisation (PK)	Zone Inondable Identifiée (GEE)	Impact des Inondations (Photos)	Présence de Dalots	Remarques
RN22	PK 100+000 à PK 115+000	Zone vert (Secteur critique)	Routes submergées, érosion visible, zones coupées, affouillement des accotements	Oui (06 Dalots)	La présence des dalots atténue partiellement l'impact, mais les sections restent vulnérables aux crues.
RN 22B	PK 36+000 à PK 46+000	Zone vert (Secteur critique)	Endommagements fréquents, zones coupées. Dalot sévèrement atteint	Oui (02 Dalots)	Les dalots sont présents, mais insuffisants pour gérer l'écoulement excessif d'eau.
CW09	PK 13+000 à PK 15+900	Zone vert (Secteur critique)	Routes submergées, affouillement des accotements	Oui (01 dalot)	Dalot présent, mais l'efficacité est réduite lors de crues exceptionnelles.
CW46	PK 0+000 à PK 3+000	Route située en dehors du bassin versant : aucune influence des inondations.			
CW107	PK 0+000 à PK 07+500	Zone vert (Secteur critique)	Routes submergées Problèmes d'écoulement d'eau, érosion	Oui (01 dalot)	Le nombre des dalots et insuffisant pour gérer l'écoulement excessif d'eau.
CW112	PK 0+000 à PK 10+000	Zone vert (Secteur critique)	Erosion des fossés en terre et des accotements. Route partiellement submergée	Oui (01 dalot)	Le nombre des dalots et insuffisant pour gérer l'écoulement excessif d'eau.

Ce croisement a permis d'identifier avec précision les tronçons de route ayant été affectés par des crues au cours des dernières années. Les résultats obtenus confirment les conclusions issues des deux analyses précédentes, à savoir l'analyse morphologique (réalisée sous SAGA GIS) et l'analyse multicritère (effectuée sous QGIS), qui indiquaient que près de 80 % du réseau présente un niveau de vulnérabilité très élevé aux inondations.

6. Simulation d’inondations des sections critiques du réseau routier sur global mapper

Dans la continuité de l’analyse, une simulation d’inondation, en ciblant spécifiquement les sections routières identifiées comme fréquemment et sévèrement affectées lors des événements d’inondation passés (recensées dans le 1^{er} chapitre), a été réalisée à l’aide du logiciel Global Mapper,

La simulation prend en compte les projections climatiques associées au scénario RCP 6.0 (Tableau 25), en intégrant une hausse modérée de l’intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes. Ce scénario permet de modéliser l’évolution potentielle des niveaux d’eau et du ruissellement de surface dans un contexte de changement climatique à moyen terme. Les paramètres hydrologiques tels que la capacité d’infiltration, le taux de ruissellement, et la rugosité du sol ont été ajustés en conséquence pour refléter des conditions climatiques plus humides et instables.

Tableau 25 : Ajustement des seuils topographiques selon les projections climatiques RCP 6.0

Paramètre	Impact Climatique (RCP 6.0)	Seuil Ajusté	Variation Climatique Estimée	Source
TWI	Augmentation modérée de la saturation des sols	TWI > 9	+10 à +15 % des précipitations extrêmes	IPCC AR6 / CORDEX-Africa
Pente	Ruissellement accru sur terrains inclinés	Pente > 8°	Hausse de l’intensité des pluies soudaines	IPCC AR6 (2021), SSP2-4.5 proche
LS	Érosion hydrique plus fréquente, surtout en zones à végétation dégradée	LS > 4.5	Fréquence accrue des épisodes pluvieux à forte intensité	GIEC, données régionales (Afrique du Nord)

Cette étape vise à simuler les dynamiques d’écoulement sur les zones les plus vulnérables du réseau routier, afin d’anticiper les impacts futurs, orienter les mesures de protection et renforcer la résilience des infrastructures face aux risques hydrométéorologiques croissants.

6.1. Justification du choix du scénario RCP 6.0

Le scénario RCP 6.0 constitue un compromis pertinent entre réalisme scientifique et prudence dans la projection des impacts climatiques. Il représente une trajectoire d'émissions modérées, sans intervention climatique ambitieuse, mais évitant les extrêmes du scénario RCP 8.5. Ce choix permet d'évaluer des impacts cohérents avec les tendances actuelles, en intégrant un niveau de risque raisonnable pour les infrastructures.

Il se distingue également par sa compatibilité avec les études hydrologiques récentes, notamment dans les régions semi-arides où les politiques d'adaptation sont encore limitées. Par ailleurs, il facilite une comparaison pertinente avec les données historiques, en offrant une continuité crédible dans l'évolution des précipitations extrêmes.

6.2. Estimation de la hauteur d'eau pour la simulation d'inondation sous le scénario RCP 6.0

La simulation de l'inondation dans Global Mapper repose sur la proposition d'une hauteur d'eau représentative d'un scénario pluviométrique extrême. Cette hauteur d'eau est estimée par interpolation linéaire entre les hauteurs d'eau observées entre 2015 et 2024 et les précipitations futures projetées de 50 mm, selon le scénario RCP 6.0. Ce calcul permet d'introduire une valeur cohérente dans le modèle de simulation, facilitant ainsi l'évaluation de l'étendue des zones inondées et de leur impact sur les infrastructures routières locales dans un contexte de changement climatique.

La hauteur d'eau pour le scénario RCP 6.0 a été estimée à l'aide de la formule d'interpolation linéaire suivante :

$$H_{rcp} = H_{obs} \times (P_{rcp} / P_{obs})$$

Où

- H_{rcp} : Hauteur d'eau simulée (cm)
- H_{obs} : Hauteur d'eau observée (cm)
- P_{obs} : Précipitation observée (mm)
- P_{rcp} : Précipitation simulée sous le scénario RCP 6.0 (50 mm)

Cette méthode suppose une relation linéaire entre la hauteur d'eau et l'intensité des précipitations, ce qui est une hypothèse couramment admise dans les premières approches hydrologiques régionales.

(Sources : - Scénario RCP 6.0 : (GIEC/IPCC), et méthode d'interpolation linéaire : Concepts de base en hydrologie (Chow et al. 1988)).

Tableau 26 : Évaluation de l'impact climatique futur (RCP 6.0) sur les tronçons routiers inondables (2015–2024)

Axe routier	Inondation enregistrée de 2015----2024				Simulation Inondation RCP 6.0		
	Localisation	Hauteur d'eau (cm)	Précipitation (mm)	Longueur de la section inondée	Précipitation (mm)	Hauteur d'eau (cm)	Longueur de la section inondée (issue de la simulation)
RN 22	Pk 102+400	30	30	65	50	50	117
	Pk 109+000	40	22	100	50	90.9	400
RN 22 B	Pk 44+000	45	30	100	50	75	210
CW 09	Pk 15+800	35	33	40	50	53	59
CW 107	Pk 04+070	20	25	183	50	40	625
CW 107	Pk 07+300	25	25	74	50	50	110
CW 112	Pk 03+900	30	30	47	50	50	68

NB : La longueur des sections inondées sous le scénario RCP 6.0 a été mesurée à l'aide du logiciel Global Mapper et est représentée sur les cartes de simulation présentées ci-dessous.

6.2.1. Courbe d'interpolation :

La figure 60 montre la relation entre les précipitations observées et la hauteur d'eau, ainsi que la projection de cette dernière sous le scénario RCP 6.0.

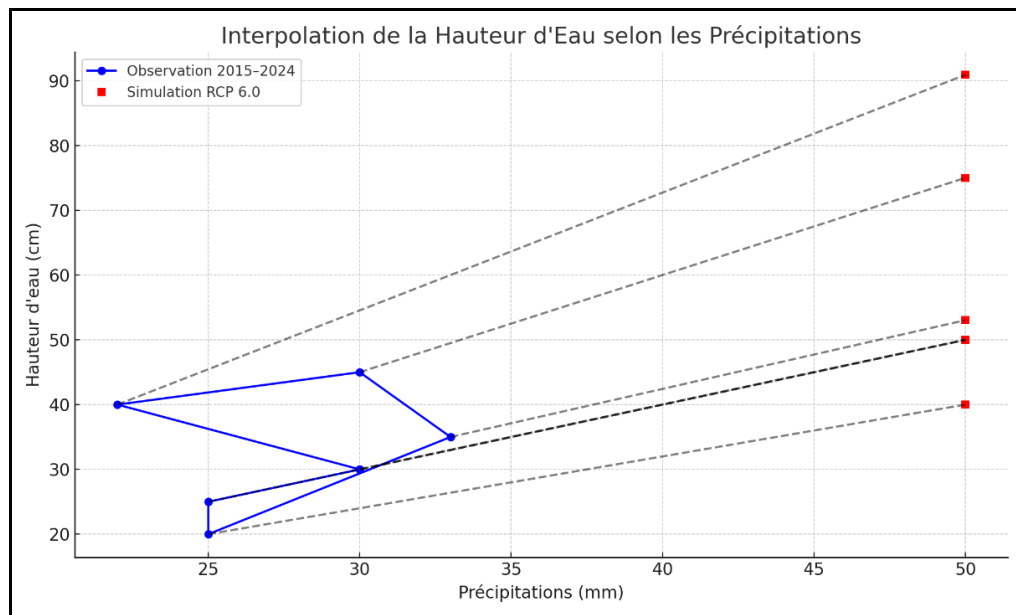


Figure 60 : Courbe d'interpolation de la hauteur d'eau selon RCP 6.0

La courbe obtenue illustre la relation linéaire entre les précipitations et la hauteur d'eau au niveau des sections routières analysées. Les points bleus représentent les hauteurs d'eau observées entre 2015 et 2024, tandis que les points rouges indiquent les hauteurs projetées sous le scénario climatique RCP 6.0 (50 mm de précipitations). Les lignes d'interpolation montrent une augmentation proportionnelle de la hauteur d'eau avec l'intensification des précipitations. Cette tendance met en évidence une vulnérabilité accrue des infrastructures routières en cas de pluies plus intenses, soulignant l'importance de l'adaptation des ouvrages hydrauliques dans un contexte de changement climatique.

6.2.2. Validation des Résultats de Simulation (Scénario RCP 6.0)

La validation de la simulation d'inondation réalisée sous le scénario climatique RCP 6.0 dans Global Mapper a été effectuée par comparaison avec les données d'inondations observées sur le terrain entre 2015 et 2024 et de l'historique issue de GEE. Bien que ce scénario représente une projection future dans un contexte de changement climatique, cette comparaison permet de vérifier la cohérence et la robustesse du modèle à partir d'événements historiques documentés.

Afin d'évaluer la performance du modèle, une analyse de classification binaire a été appliquée à chaque tronçon routier étudié. L'indicateur utilisé est le F1-score, largement employé dans la validation de modèles prédictifs environnementaux, notamment en détection de zones inondées (Pérez-Molina et al. 2019).

Formules utilisées

Le F1-score est défini comme la moyenne harmonique entre la précision et le rappel :

$$\text{F1-score} = 2 \times (\text{Précision} \times \text{Rappel}) / (\text{Précision} + \text{Rappel})$$

Avec :

- Précision = $VP / (VP + FP)$. (Proportion des zones simulées inondées qui le sont effectivement sur le terrain)
- Rappel = $VP / (VP + FN)$. (Proportion des zones réellement inondées détectées par la simulation)

Où :

- VP (Vrai Positifs) : zones inondées à la fois dans la simulation et dans les données terrain.

- FP (Faux Positifs) : zones inondées dans la simulation mais non observées sur le terrain.
- FN (Faux Négatifs) : zones inondées observées mais non simulées.

Les résultats de calcul de F1-score sont représentés dans le tableau 27.

Tableau 27 : Évaluation de la performance des simulations d’inondation par comparaison avec les observations de terrain

Axe routier	Localisation	Longueur terrain (m)	Longueur simulée (m)	VP (m)	FP (m)	FN (m)	Précision	Rappel	F1-score
RN 22	Pk 102+400	65	117	58.5	58.5	6.50	0.50	0.90	0.64
	Pk 109+000	100	400	90.0	310.0	10.0	0.22	0.90	0.36
RN 22 B	Pk 44+000	100	210	90.0	120.0	10.0	0.43	0.90	0.58
CW 09	Pk 15+800	40	59	36.0	23.0	4.00	0.61	0.90	0.73
CW 107	Pk 04+070	183	625	164.7	460.3	18.3	0.26	0.90	0.41
CW 107	Pk 07+300	74	110	66.6	43.4	7.40	0.61	0.90	0.72
CW 112	Pk 03+900	47	68	42.3	25.7	4.70	0.62	0.90	0.74

Interprétation des résultats

Les résultats montrent que la simulation capte bien les zones à risque réel, comme en témoignent les rappels constants et élevés (~0.90) sur l’ensemble des tronçons étudiés. Cela signifie que toutes les zones ayant été réellement inondées sont également simulées comme telles.

Cependant, la précision varie fortement selon les segments. Les faibles précisions observées sur certains tronçons, comme le Pk 109+000 (RN 22), indiquent une surestimation des zones inondées, ce qui peut être attribué :

- Aux hypothèses pessimistes du scénario RCP 6.0.
- MNT ALOS PALSAR avec une résolution de 12.5.

- Ou encore à une simplification du modèle hydraulique.

Les F1-scores les plus élevés ($> 0,70$), observés notamment sur les CW 09, CW 107 (Pk 07+300) et CW 112, traduisent une bonne concordance entre les zones simulées et observées. Ces tronçons peuvent être considérés comme des références fiables pour les études de vulnérabilité future.

En conséquence la simulation RCP 6.0 est considérée réussie. Elle parvient à identifier efficacement les zones exposées à un risque d'inondation.

6.3. Présentation des résultats de la simulation d'inondation sous Global Mapper

Les résultats de la simulation d'inondation, obtenus sous le scénario RCP 6.0, sont présentés sur les cartes figure 61 et 62. Ces cartes illustrent l'étendue des zones inondées en fonction des précipitations projetées, mettant en évidence les sections du réseau routier susceptibles d'être affectées. Elles permettent d'évaluer visuellement les impacts des événements extrêmes de précipitations sur l'infrastructure routière et de mieux comprendre les risques associés à ces phénomènes dans le contexte du changement climatique. Chaque carte présente en superposition :

- La simulation des zones inondées (en bleu) issue du modèle numérique dans Global Mapper.
- Les infrastructures routières (routes nationales et chemins de wilaya).
- Les zones réellement inondées identifiées à partir des données terrain (2015–2024).
- Historique des inondations entre (2015–2024) obtenu à partir de Google Earth Engine.

Ces visualisations permettent une lecture rapide des secteurs vulnérables à l'échelle locale, en croisant les données hydrologiques projetées avec la distribution spatiale du réseau routier. On constate plusieurs axes stratégiques, tels que la RN 22 et les CW 09 et CW 107, sont partiellement ou totalement impactés selon les scénarios simulés.

La confrontation entre les données observées et les résultats simulés, appuyée par des métriques comme le F1-score, confirme que les reproduisent fidèlement les phénomènes passés. Ces cartes (Figures 61 et 62) constituent donc des supports essentiels pour la planification territoriale, la priorisation des interventions d'entretien et la conception de mesures d'adaptation aux aléas futurs.

Les cartes présentées illustrent les principaux résultats de l'analyse spatiale multicritère menée sur le bassin versant de Sebdoou. Elles mettent en évidence la superposition entre les zones d'inondation (historique et simulées) et le tracé des infrastructures routières, permettant ainsi de localiser les sections les plus vulnérables. Ces représentations graphiques offrent une lecture visuelle claire de l'intensité des impacts, de la distribution spatiale des risques et des facteurs physiques ou anthropiques qui contribuent à la dégradation du réseau en période de crue.

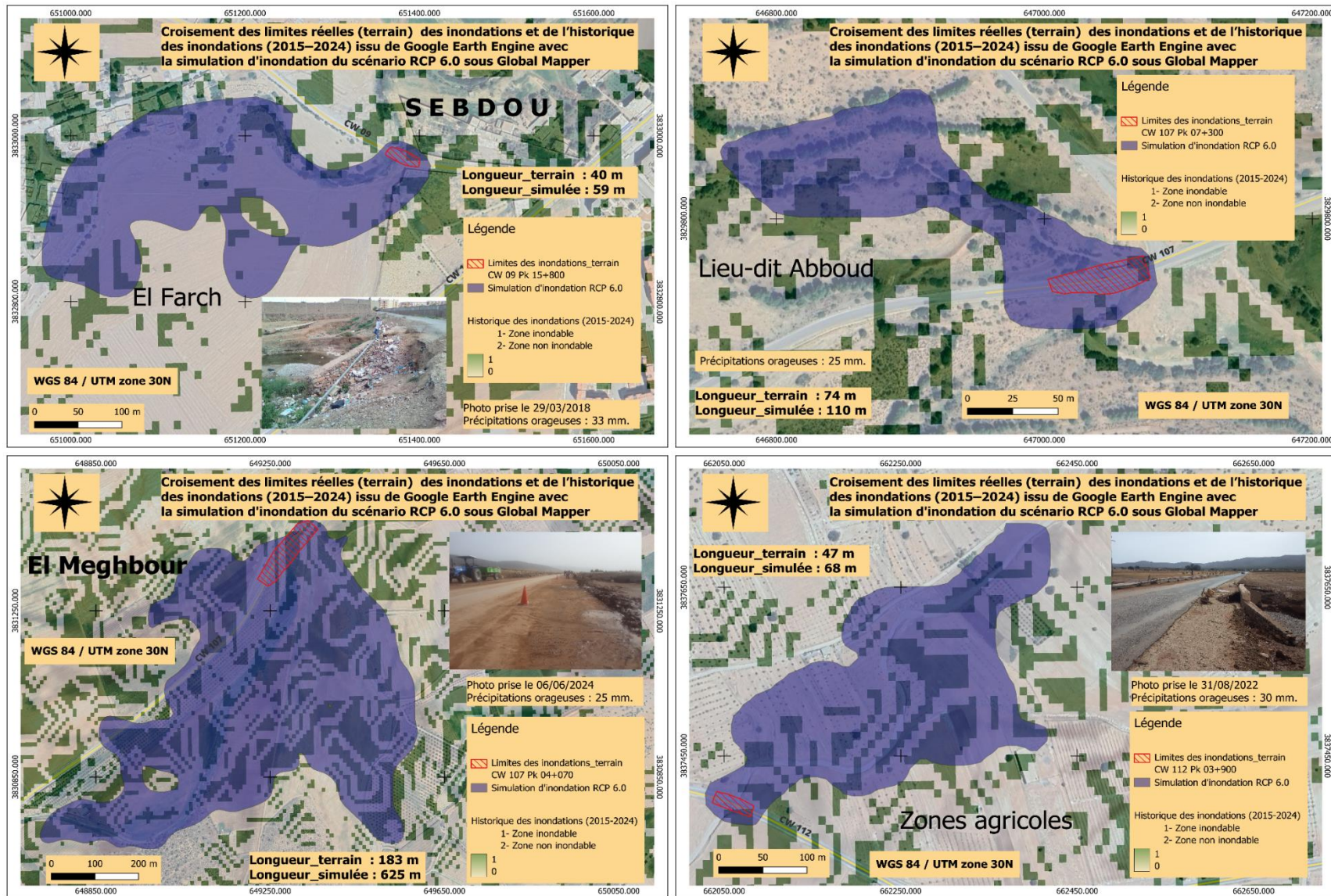


Figure 61 : Carte 1, croisement des variables multicritère avec le réseau routier. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

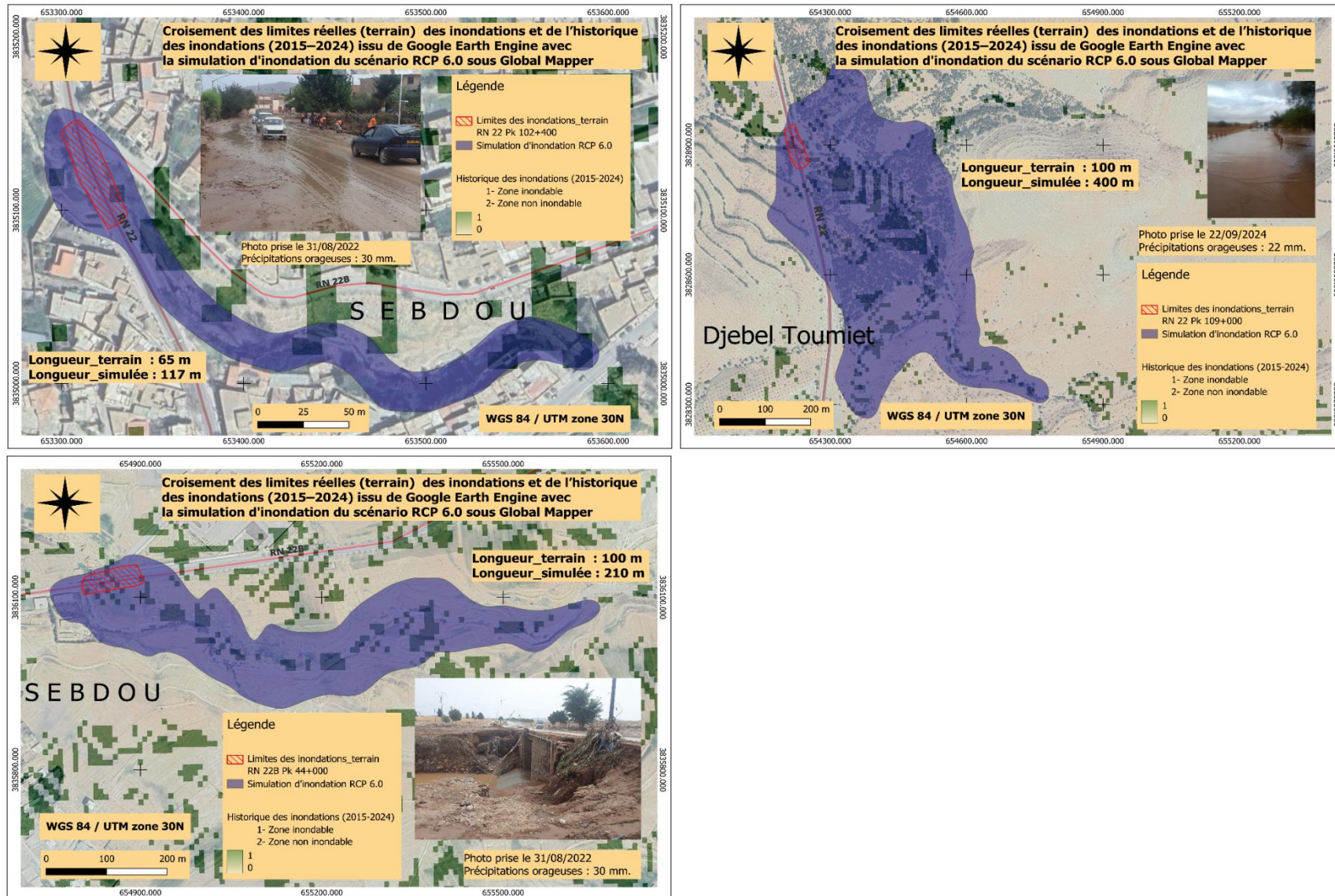


Figure 62 : Carte 2, croisement des variables multicritère avec le réseau routier. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

7. Analyse multicritère par intégration des paramètres morpho-topographiques sous QGIS

L'évaluation de la vulnérabilité du réseau routier face aux inondations repose sur une approche multicritère intégrée sous QGIS. Deux niveaux d'analyse sont développés : la sensibilité, déterminée à partir de facteurs physiques comme la pente, l'occupation du sol ou la végétation, puis l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC), combinant sensibilité, exposition aux aléas et capacité d'adaptation. Cette méthode spatialisée permet de cartographier les zones les plus vulnérables et d'orienter les actions de prévention et d'adaptation des infrastructures.

7.1. Analyse multicritère de la sensibilité du réseau routier face aux inondations

Des couches thématiques telles que l'occupation du sol, le NDVI et l'accumulation de flux ont été intégrées à l'analyse. Une pondération empirique, basée sur la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) (voir annexe 10), a été utilisée pour évaluer la sensibilité aux inondations. Ce cadre rigoureux et flexible, largement utilisé dans les études environnementales (Chen et al., 2011), permet d'intégrer des critères variés de manière transparente. Il a ainsi permis de générer une carte de sensibilité globale (Figure 63), identifiant les tronçons routiers les plus exposés aux risques d'inondation.

Calculs : réalisés par le calculateur du champ sous QGIS.

Classification paramètres morpho-topographiques :

- LS Factor, Pente, TWI, Occupation du sol, NDVI, Accumulation de flux classés en 3 niveaux : 1 = Faible, 2 = Moyen, 3 = Très fort.

Les différentes classes de valeurs, les niveaux associés et leur interprétation sont présentés dans le tableau 28.

- Pondération appliquée (score total) : Les paramètres morpho-topographiques classés (NDVI_Class, Slope_Class, LC_Class, Accum_Class) ont été pondérés à l'aide de la méthode AHP. Cette attribution pondérée a permis d'établir la classification de la sensibilité, présentée dans le tableau 28.

Tableau 28 : Pondération des critères et classification du niveau de sensibilité aux inondations

Critère	Poids (%)	Score total	Classe de sensibilité
NDVI	20	0.00 – 1.50	Faible
Pente (Slope)	15	1.51 – 2.50	Moyenne
Occupation du sol	15	2.51 – 4.00	Très fort
Accumulation	20	Classification du niveau de la sensibilité (Détails en annexe 08)	
LS factor	15		
TWI	15		
Total	100		

Les résultats du calcul de la sensibilité figurent en annexe 09, qui synthétise une partie de l'analyse réalisée à partir d'un grand volume de points.

Tableau 29 : Catégorisation des paramètres topographiques en fonction du niveau de risque d'inondation

Paramètres	Plage de Valeurs	Classes de Risque	Justification Scientifique	Signification	Accumulation de flux
TWI	0–25+	Faible : 0–6	- <10 : Zones drainées (Beven & Kirkby, 1979).	Zones sèches, faible accumulation d'eau.	Négligeable
		Moyen : 6–10		Zones modérément humides, équilibre infiltration-ruisellement.	Localisée (dépressions)
		Élevé : 10–15	- >10 : Saturation des sols (talwegs inondables).	Zones saturées, forte probabilité d'inondation.	Importante
		Très élevé : >15	- >15 : Zones marécageuses/fonds de vallée critiques.	Indique des zones où probabilité d'inondation est extrême.	extrême
Pente	0°–90°	Faible : 0–5° (0–9%)	- <5° : Accumulation d'eau (FAO, 2015).	Terrain plat, infiltration élevée, faible ruisellement.	Maximale
		Moyen : 5–15° (9–26.8%)		Pente modérée, écoulement progressif, infiltration possible.	Modérée
		Élevé : 15–30° (26.8–57.7%)	- >15° : Ruissellement rapide + érosion.	Forte pente, écoulement rapide, risque d'érosion accru.	Faible

		Très élevé : >30° (>57.7%)	- >30° : Risque de glissements de terrain.	Zones présentent des caractéristiques critiques.	quasi-nulle
Facteur LS	0–20+	Faible : 0–2	- <2 : Érosion négligeable (Wischmeier & Smith, 1978).	Faible érosion potentielle, écoulement diffus.	Négligeable
		Moyen : 2–5		Érosion modérée possible, écoulement accentué.	Localisée (dépôts fins)
		Élevé : 5–10	- >5 : Ruissellement concentré (ravinement).	Fort potentiel d'érosion concentrée.	Importante (sables/graviers)
		Très élevé : >10	- >10 : Dépôts sédimentaires bloquant les drains.	Potentiel d'érosion exceptionnelle.	Massive (blocs/galets)

7.1.1. Résultats de l'évaluation de la sensibilité du réseau routier aux inondations

Le croisement des différents indicateurs montre que la totalité du réseau routier étudié présente une vulnérabilité très élevée aux inondations, en particulier dans les zones où :

- La pente dépasse 15 %,
- La couverture végétale est quasi absente (NDVI < 0.2),
- Les indices TWI et accumulation de flux indiquent un fort potentiel de stagnation ou de ruissellement,
- L'occupation du sol est dominée par des surfaces artificialisées ou dénudées.

Ces résultats mettent en évidence une forte sensibilité du réseau routier aux événements hydrométéorologiques extrêmes, confirmant les conclusions de l'analyse morphologique réalisée sous SAGA GIS, qui a révélé que 80 % du réseau est vulnérable aux inondations. La cartographie produite constitue une base essentielle pour prioriser les interventions, renforcer la résilience des infrastructures et adapter les aménagements futurs dans une logique de gestion intégrée des risques climatiques.

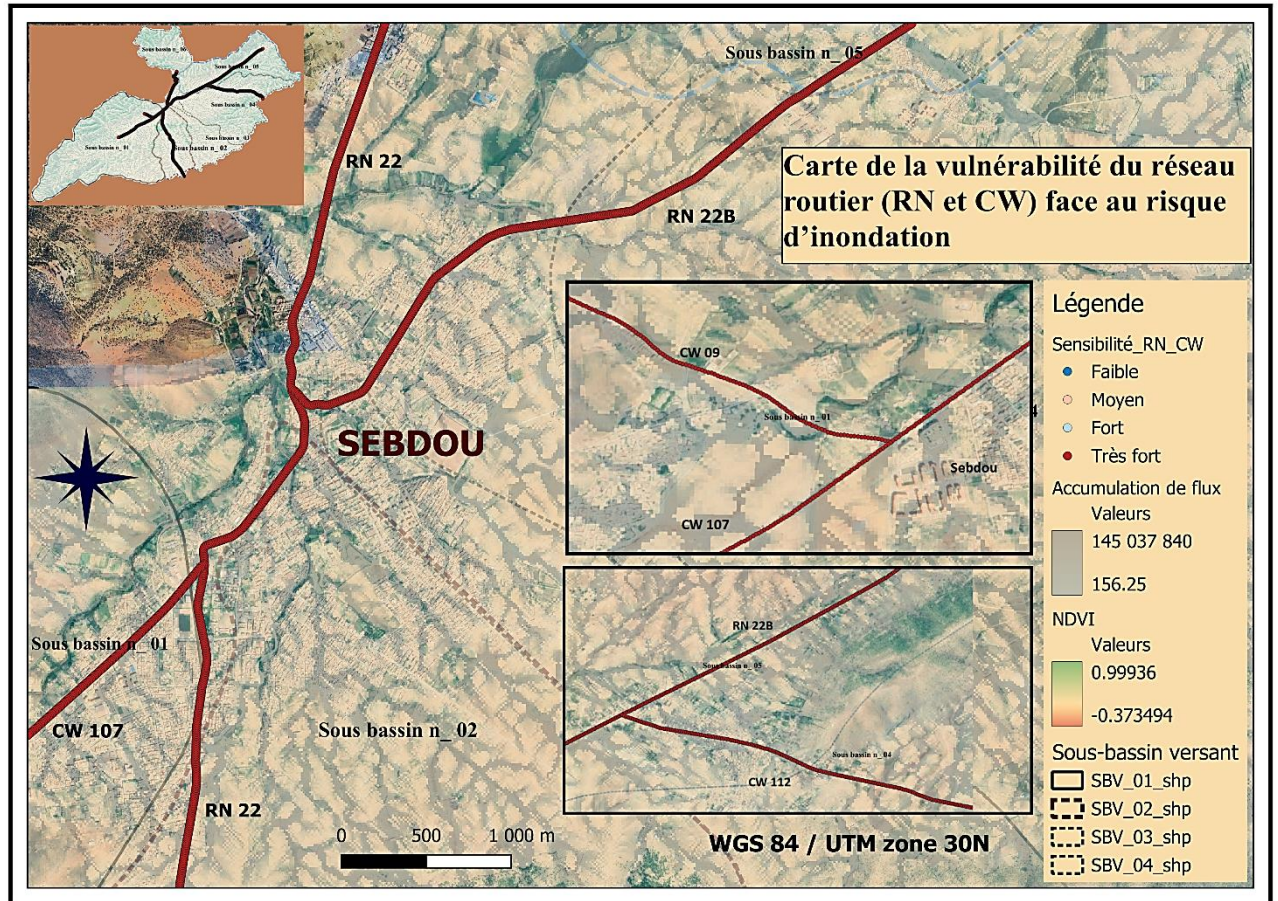


Figure 63 : Carte de la vulnérabilité (sensibilité) du réseau routier (RN et CW) face au risque d'inondation. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

L'analyse de sensibilité du réseau routier aux inondations constitue une étape fondamentale pour comprendre la vulnérabilité des infrastructures. Pour obtenir une évaluation plus complète, cette sensibilité est intégrée, avec d'autres critères, dans l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC).

L'IVC permet ainsi de synthétiser plusieurs dimensions du risque, offrant une cartographie précise de la vulnérabilité et facilitant la prise de décision pour la gestion et la prévention des inondations.

7.2. Analyse multicritère de la vulnérabilité du réseau routier aux inondations via l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC)

Les résultats finaux de l'analyse multicritère (Figure 63) révèlent une vulnérabilité élevée du réseau routier de Sebdou face aux inondations, notamment sur les tronçons traversant des zones à forte pente, faible couverture végétale et accumulation importante des eaux. Des axes comme la RN 22B, le CW 107 et le CW 09 nécessitent des interventions prioritaires.

Dans un contexte de changement climatique et d'intensification des crues, les simulations réalisées confirment l'extension future des zones inondables. Ces constats appellent à des mesures d'aménagement ciblées : renforcement des bermes et dalots, reprofilage des talus, restauration de la végétation et amélioration du drainage. Ces actions sont essentielles pour réduire les risques, protéger les usagers et assurer la résilience du réseau routier local.

7.2.1. Résumé synthétique de la justification de l'IVC

L'indice de vulnérabilité combiné (IVC) est utilisé dans cette étude pour évaluer, de manière intégrée, la vulnérabilité des infrastructures routières face aux inondations. Il repose sur une analyse multicritère combinant des facteurs topographiques, hydrologiques, environnementaux et anthropiques, chacun étant normalisé et pondéré selon son importance. Cette méthode permet de spatialiser les niveaux de vulnérabilité de façon objective et comparable, facilitant la hiérarchisation des zones à risque. L'approche est fondée sur des travaux reconnus (Adger, 2006 ; Fernández & Lutz, 2010 ; PNUD, 2010) et s'inscrit dans une perspective de gestion durable et d'adaptation au changement climatique.

7.2.1.1. Résumé du Calcul de l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC)

- Formule Générale : L'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC) est calculé selon une méthode de pondération linéaire :

$$IVC = \sum^n (X_{norm} \times W)$$

Où :

- X_{norm} : valeur normalisée du critère
- W : poids du critère
- n : nombre de critères

Poids des Critères

Tableau 30 : Critères et poids appliqués dans l'élaboration de l'Indice de Vulnérabilité Combiné

Critère	Abréviation	Type	Poids (W)
Pente (%)	P	Topographique	0.15
TWI	TWI	Hydrologique	0.20
Facteur LS	LS	Érosif	0.20
NDVI	NDVI	Environnemental	0.15
État des bermes	B	Infrastructure	0.15
Scénario climatique	CC	Climatique	0.15
Total			1.00

Normalisation des Critères

La normalisation permet de rendre les critères comparables :

$$X_{norm} = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$$

Formule de Calcul de l'IVC

$$IVC = (Pente_{norm} * 0.15) + (TWI_{norm} * 0.20) + (LS_{norm} * 0.20) + (NDVI_{norm} * 0.15) + (Bermes * 0.15) + (Climat * 0.15)$$

Classification de l'IVC

Tableau 31 : Seuils de classification de l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC)

IVC	Niveau de Vulnérabilité
0.00 – 0.33	Faible
0.34 – 0.66	Moyenne
0.67 – 1.00	Élevée

7.2.1.2. Résultats de l'Analyse de IVC

Les résultats montrent une variabilité importante de l'IVC (Tableau 32) selon les segments routiers analysés, en lien avec les caractéristiques locales telles que la pente, l'humidité relative du sol (TWI), l'érosion potentielle (LS), la couverture végétale (NDVI), l'état des bermes, ainsi que l'intensité projetée du changement climatique.

Les routes les plus vulnérables

Les segments présentant les niveaux de vulnérabilité les plus élevés sont localisés sur la RN 22 :

- Du Pk 100+000 au Pk 106+000 : IVC = 0.6608 (vulnérabilité élevée),
- Du Pk 106+000 au Pk 115+000 : IVC = 0.6878 (vulnérabilité élevée).

Ces tronçons cumulent plusieurs facteurs aggravants, notamment des pentes supérieures à 30 %, des indices LS élevés (forte érosion potentielle), une végétation faible (NDVI bas), et une intensification prévue des précipitations.

Les zones à vulnérabilité moyenne

Les autres segments se situent en vulnérabilité moyenne, notamment sur :

- La RN 22B, avec des valeurs d'IVC allant de 0.4268 à 0.6073,
- Le CW 112, dont le segment supérieur (Pk 05+000 à Pk 10+000) atteint un IVC de 0.6475, proche du seuil de vulnérabilité élevée.

Ces zones présentent des combinaisons intermédiaires de pente, de couverture végétale et de TWI, nécessitant une surveillance régulière et des mesures de renforcement ciblées.

Les routes les moins vulnérables

Enfin, les tronçons les moins exposés au risque climatique sont situés sur :

- Le CW 09 (Pk 13+000 au Pk 15+900) avec un IVC de 0.2911.
- Le CW 107 (Pk 00+000 au Pk 02+500) avec un IVC de 0.2611.

Ces sections se caractérisent par de faibles pentes, un LS quasi nul, et une relative stabilité topographique. Toutefois, la faible végétation (NDVI négatif) pourrait constituer un facteur aggravant en cas de modification du régime hydrologique.

7.3. Résultats finaux de l'analyse multicritères de la vulnérabilité du réseau routier aux inondations à travers l'indice de sensibilité et l'IVC

Les résultats finaux de l'analyse multicritère de la vulnérabilité du réseau routier face aux inondations sont présentés à travers une carte synthétique et un tableau analytique (Tableau 32), fruits du croisement spatial de l'indice de sensibilité et de l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC) élaborés sous QGIS. Cette approche permet de localiser, de

classer et de hiérarchiser les tronçons routiers en fonction de leur niveau de vulnérabilité, dans une logique d'aide à la décision territorialisée.

La carte de vulnérabilité finale (Figure 64) met en évidence les zones à risque élevé, modéré ou faible selon une classification par classes (faible, moyenne, très forte), obtenue par agrégation pondérée des critères retenus. Cette représentation cartographique permet d'identifier les secteurs les plus sensibles du réseau, en particulier ceux situés à proximité des zones d'accumulation, des pentes fortes ou des espaces à faible couverture végétale.

Les tableaux analytiques (Tableaux 32 et 33) associés fournissent une lecture quantitative et comparative des résultats. Ces tableaux présentent les résultats détaillés de l'analyse multicritère de la vulnérabilité du réseau routier face aux inondations, sur la base de l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC). Chaque tronçon routier est évalué selon des critères physiques (pente, TWI, LS), environnementaux (NDVI), techniques (état des bermes) et climatiques (scénario RCP 6.0).

Ces résultats apportent un éclairage précis sur la structure spatiale de la vulnérabilité routière à l'échelle du bassin étudié, et constituent un support stratégique pour la priorisation des interventions, la planification des aménagements hydrauliques ou encore l'intégration de critères de résilience dans la gestion des infrastructures.

Chapitre IV : Evaluation des inondations (risques et aléas)

Tableau 32 : Évaluation de la vulnérabilité des tronçons routiers selon l'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC)

Axe routier	Localisation	Pente (%)	TWI	LS	NDVI	Bermes (état)	Climat (scénario RCP 6.0)	P_norm	TWI_norm	LS_norm	NDVI_norm	B_norm	CC_norm	IVC	Niveau de vulnérabilité
RN 22	Du Pk 100+000 au Pk 106+000	31	7	13	0.25	Moyen	+20 % pluie	1.55	0.1429	0.6111	0.25	1	0.6	0.6608	Élevée
	Du Pk 106+000 au Pk 115+000	30	5	18	0.3	-	+20 % pluie	1.5	0.0000	0.8889	0.3	1	0.6	0.6878	Élevée
RN 22B	Du Pk 34+000 au Pk 42+000	15	6	2	0.4	Bon	+20 % pluie	0.75	0.0714	0.0000	0.4	1	0.6	0.4268	Moyenne
	Du Pk 42+000 au Pk 44+500	25	7.2	14	0.1	Bon	+20 % pluie	1.25	0.1571	0.6667	0.1	1	0.6	0.6073	Moyenne
	Du Pk 44+500 au Pk 46+500	3	7.2	18	-0.2	-	+20 % pluie	0.15	0.1571	0.8889	-0.2	1	0.6	0.4417	Moyenne
CW 09	Du Pk 13+000 au Pk 15+900	5	7	2	-0.1	Moyen	+20 % pluie	0.25	0.1429	0.0000	-0.1	1	0.6	0.2911	Faible
CW 107	Du Pk 00+000 au Pk 02+500	3	7	2	-0.2	Moyen	+20 % pluie	0.15	0.1429	0.0000	-0.2	1	0.6	0.2611	Faible
	Du Pk 02+000 au Pk 07+500	11	7	1	0.1	Moyen	+20 % pluie	0.55	0.1429	-0.0556	0.1	1	0.6	0.3550	Moyenne
CW 112	Du Pk 00+000 au Pk 05+000	17	3.2	12	0.4	Moyen	+20 % pluie	0.85	-0.1286	0.5556	0.4	1	0.6	0.5129	Moyenne
	Du Pk 05+000 au Pk 10+000	34	7	14.5	-0.1	-	+20 % pluie	1.7	0.1429	0.6944	-0.1	1	0.6	0.6475	Moyenne

Chapitre IV : Evaluation des inondations (risques et aléas)

Tableau 33 : Synthèse multicritère de la vulnérabilité des axes routiers face aux inondations

Axe routier	Localisation	NDVI	Occupation du sol	Paramètres morphologiques (SAGA GIS)			Historique d'inondation (GEE)		Sensibilité (QGIS multicritère)	Niveau de Vulnérabilité Global	Simulation Inondation (Global Mapper) scénarios RCP 6.0		
				Pente (%)	TWI	LS	Niveau de Vulnérabilité	Niveau de Vulnérabilité			Localisation du Dalot	Longueur_terrain	Longueur_simulée
RN 22	Du Pk 100+000 au Pk 106+000	0.25	Urbain, oued Taoudellala, oued El Guettara	31	7	13	Très élevé	Élevé	Très élevée	Élevée	PK 102+400	65	117
	Du Pk 106+000 au Pk 115+000	0.3	Zone montagneuse, oued Kikol	30	5	18	Élevé	Élevé		Élevée	PK 109+000	100	400
RN 22B	Du Pk 34+000 au Pk 42+000	0.4	Urbain, zones agricoles	15	6	2	Moyenne	Élevé	Très élevée	Moyenne	PK 44+000	100	210
	Du Pk 42+000 au Pk 44+500	0.1	Semi urbain, oued El Fessouane	25	7.2	14		Élevé		Moyenne			
	Du Pk 44+500 au Pk 46+500	-0.2	Urbain	3	7.2	18		Élevé		Moyenne			
CW 09	Pk 13+000 au Pk 15+900	-0.1	Semi urbain, Oued Sebdou	5	7	2	Moyenne	Élevé	Très élevée	Faible	PK 15+800	40	59
CW 107	Du Pk 00+000 au Pk 02+500	-0.2	Urbain	3	7	2	Moyenne	Élevé	Très élevée	Faible	PK 04+070	183	625
	Du Pk 02+000 au Pk 07+500	0.1	Zones agricoles, Oued Sebdou	11	7	1		Élevé		Moyenne	PK 07+300	74	110
CW 112	Du Pk 00+000 au Pk 05+000	0.4	Urbain et zones agricoles	17	3.2	12	Moyenne	Élevé	Très élevée	Moyenne	PK 03+900	47	68
	Du Pk 05+000 au Pk 10+000	-0.1	zones agricoles	34	7	14.5	Élevé	Élevé		Moyenne			

Chapitre IV : Evaluation des inondations (risques et aléas)

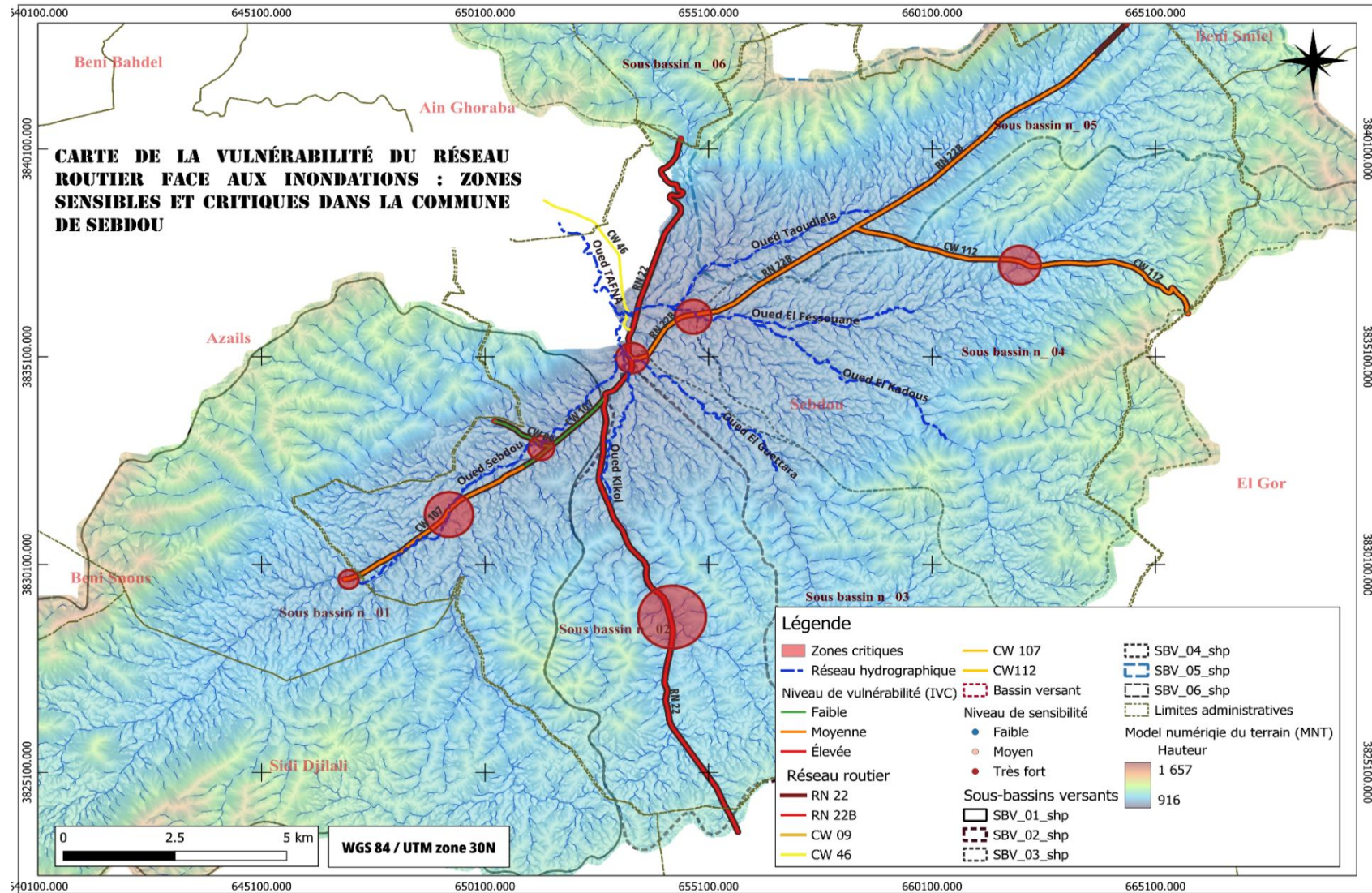


Figure 64 : Carte finale de l'évaluation géomatique de la vulnérabilité du réseau routier (RN et CW) face aux inondations. (Source : Réalisation des auteurs, 2025)

8. Recommandations pour la gestion et la réduction de la vulnérabilité du réseau routier face aux inondations

À la lumière des résultats obtenus par l'analyse multicritère de la vulnérabilité des axes routiers face aux inondations dans la commune de Sebdou, plusieurs recommandations peuvent être formulées afin de renforcer la résilience du réseau routier local et de limiter les dommages futurs liés aux événements hydrométéorologiques extrêmes :

➤ **Prioriser les interventions sur les segments les plus vulnérables**

- Les tronçons de la RN 22 entre les PK 100+000 et 115+000 présentent un niveau de vulnérabilité élevé, en raison de fortes pentes, de valeurs élevées du facteur LS et d'une faible couverture végétale.
- Il est impératif d'y mettre en œuvre des travaux d'aménagement hydrotechnique, tels que la création de fossés de drainage, la stabilisation des talus et la réhabilitation des bermes.

➤ **Renforcer la végétation dans les zones sensibles**

- L'analyse du NDVI indique que plusieurs tronçons (par exemple, RN 22, CW 112) souffrent d'un déficit de couverture végétale, ce qui accroît le ruissellement et l'érosion.
- Des actions de reboisement ciblé, de plantation d'espèces locales et de lutte contre le surpâturage doivent être engagées pour améliorer l'infiltration des eaux et réduire les écoulements de surface.

➤ **Protéger et valoriser les bermes routières**

- Encadrer juridiquement les bermes en les intégrant aux réglementations locales (code routier, plans d'aménagement).
- Planter des arbres et arbustes autochtones le long des bermes pour améliorer l'infiltration, réduire l'érosion et favoriser la résilience écologique.
- Améliorer l'entretien et la surveillance des bermes
- L'état des bermes est jugé moyen ou inconnu sur plusieurs tronçons, en particulier ceux classés à vulnérabilité élevée.
- Il est recommandé d'établir un programme d'inspection régulier des ouvrages de bordure (bermes, fossés, caniveaux) et de les remettre à niveau là où nécessaire afin d'assurer un écoulement contrôlé des eaux de pluie.

➤ **Intégrer les scénarios climatiques dans la planification routière**

- Le scénario RCP 6.0 (+20 % de précipitations) accentue la charge hydrologique sur les infrastructures.
- Il est crucial d'adapter les normes de conception routière (dimensionnement des ouvrages de drainage, matériaux de revêtement) aux projections climatiques futures, notamment pour les axes classés vulnérables.

➤ **Mettre en place un système d'alerte et de gestion de crise**

- Pour les zones critiques, un dispositif d'alerte précoce en cas de précipitations extrêmes permettrait de limiter les pertes humaines et matérielles.
- L'installation de stations météorologiques locales couplées à des capteurs hydrologiques permettrait une meilleure prévision et un déclenchement rapide des interventions.
- Renforcer la collaboration entre acteurs locaux
- La résilience des infrastructures routières nécessite une coordination entre les services techniques des collectivités, la Direction des Travaux Publics (DTP), les agences hydrauliques et les organismes de recherche.
- La mise en place de plans d'action concertés à l'échelle du bassin versant est essentielle pour gérer les risques de manière intégrée.

Ces recommandations s'appuient sur les indices analysés (pente, TWI, LS, NDVI, etc.) et les niveaux de vulnérabilité identifiés, afin d'orienter des actions concrètes en matière d'aménagement, de prévention et de résilience du réseau routier face aux impacts du changement climatique

9. Conclusion

L'évaluation multicritère de la vulnérabilité des axes routiers de la commune de Sebdoou face aux inondations, intégrant des indicateurs topographiques, hydrologiques, climatiques et anthropiques, a permis de caractériser les niveaux de vulnérabilité selon une approche quantitative et spatialisée. Cette analyse s'est appuyée sur des critères normés tels que la pente, l'indice topographique d'humidité (TWI), le facteur LS de l'érosion, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'état des bermes, ainsi qu'un scénario climatique RCP 6.0 (augmentation de 20 % des précipitations).

Les résultats obtenus révèlent une variabilité significative du niveau de vulnérabilité selon les tronçons analysés :

- Les segments les plus vulnérables, classés à un niveau élevé, se trouvent essentiellement sur la RN 22, notamment entre les PK 100+000 et 115+000. Cette vulnérabilité élevée est attribuée à une combinaison de fortes pentes (>30 %), de valeurs élevées du facteur LS (>13), d'un NDVI faible (<0.3) traduisant une végétation clairsemée ou absente, ainsi qu'à un état des bermes moyen voire inconnu, accentuant l'exposition au ruissellement intense.
- Les tronçons à vulnérabilité moyenne sont répartis sur la RN 22B, CW 09, CW 107 et CW 112. Ils présentent des conditions modérées en termes de pente, d'érosion potentielle et de couverture végétale, et bénéficient globalement d'un meilleur état des bermes, jouant un rôle atténuateur vis-à-vis de l'impact des eaux pluviales.
- À l'opposé, les tronçons les moins vulnérables, localisés notamment sur les premiers segments de la CW 107 et CW 09, présentent des pentes faibles (<5 %), une érosion potentielle quasi nulle, une vulnérabilité climatique modérée et une meilleure résilience liée à la couverture végétale ou aux aménagements de protection existants.
- L'Indice de Vulnérabilité Combiné (IVC), agrégateur des variables normées, confirme ces observations en indiquant des valeurs maximales supérieures à 0.66 pour les segments les plus à risque, contre des valeurs inférieures à 0.3 pour les plus résilients.

Ces résultats soulignent l'importance d'une gestion différenciée des infrastructures routières selon leur niveau d'exposition au risque d'inondation. Ils appellent à des mesures ciblées, telles que :

- L'amélioration de l'état des bermes sur les tronçons critiques,
- La restauration ou la protection de la couverture végétale,
- Et l'intégration systématique des projections climatiques dans la planification routière.

En somme, cette analyse multicritère basée sur une approche géomatique constitue un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires du réseau routier et les autorités locales dans un contexte de changement climatique. Elle permet non seulement d'identifier les points névralgiques à traiter en priorité, mais aussi de prévenir les dysfonctionnements futurs liés aux événements hydrométéorologiques extrêmes.

Conclusion générale

Ce travail a permis d'évaluer avec précision la vulnérabilité du réseau routier (RN et CW) de la commune de Sebdou face au risque d'inondation dans un contexte de changement climatique. Grâce à une approche géomatique intégrée mobilisant SAGA GIS, QGIS et Global Mapper, les principaux paramètres morpho-topographiques (pente, TWI, LS), environnementaux (NDVI) et climatiques (scénario RCP 6.0) ont été croisés pour simuler les impacts potentiels des crues et identifier les zones les plus sensibles.

Les résultats mettent en évidence une vulnérabilité généralisée du réseau routier. Les analyses montrent que 80 % du réseau routier est exposé au risque d'inondation, avec des tronçons critiques clairement localisés sur la RN 22 (PK 96+000 à 115+000), le CW 107 et le CW 112, fortement exposés aux risques de débordement, d'érosion, voire de coupure de circulation. La carte finale de vulnérabilité illustre également la distribution de ces segments critiques à travers l'ensemble du réseau, traversant des sous-bassin versants caractérisés par une forte concentration de flux et une faible capacité d'infiltration.

Ces zones, identifiées en rouge sur la carte, coïncident avec les intersections entre le réseau routier et les axes hydrographiques principaux (Oued Sebdou, Oued Taoudlala, Oued El Fessouane...), confirmant le rôle aggravant de la morphologie locale et de la perte de couverture végétale. En période de crue, ces secteurs compromettent gravement la sécurité des usagers et la continuité du trafic, soulignant l'urgence d'une intervention ciblée.

Les résultats obtenus soulignent la nécessité :

- De renforcer les ouvrages de drainage (dalots, fossés, bermes) dans les zones critiques,
- De restaurer la couverture végétale en amont pour limiter le ruissellement,
- Et d'intégrer systématiquement le risque d'inondation dans la planification routière locale, conformément aux orientations du premier rapport biennal algérien sur le changement climatique, qui souligne l'importance d'adapter les infrastructures aux aléas hydrométéorologiques dans les zones sensibles.

En conclusion, cette étude, fondée sur une approche géomatique, montre que les infrastructures routières de la commune de Sebdou sont directement menacées par les effets du changement climatique. Une stratégie d'adaptation territoriale, appuyée sur des outils géo-spatiaux et une planification hydrologique rigoureuse, s'avère essentielle pour renforcer la résilience du réseau routier et assurer durablement la sécurité des usagers.

Bibliographie

Ouvrages

- Livre, « Climat : comment éviter un désastre ». Bill Gates. Du 16/02/2021.
- Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples. Bibliothèque de Canada.
- Premier rapport biennal actualisé de l'Algérie. A la convention cadre des nations unies sur le changement climatique. Octobre 2023.
- Changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante – GIEC. 9 août 2021
- Ministère de la Transition Écologique (2017). Guide méthodologique pour la cartographie des aléas d'inondation dans le cadre des PPRI. Version 2, France. Disponible en ligne : <https://www.ecologie.gouv.fr> .
- **Bouramtane et al. (2020)** - "*Assessment of Soil Erosion Risk in a Mediterranean Semi-Arid Catchment Using SAGA GIS*" (Journal of African Earth Sciences).
- **Lien** : [DOI:10.1016/j.jafrearsci.2020.103869](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103869)
- **Conrad et al. (2015)** - "*System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4*" (Geoscientific Model Development).
- **Lien** : [DOI:10.5194/gmd-8-1991-2015](https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015)
- **El Jazouli et al. (2019)** - "*Remote Sensing and GIS for Drought Monitoring in Mediterranean Regions*" (Remote Sensing).
- **Lien** : [DOI:10.3390/rs11020176](https://doi.org/10.3390/rs11020176).
- **Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978)**. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (Agricultural Handbook No.537). U.S. Department of Agriculture (USDA).
<https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>
- **FAO (2015)**
- *Titre* : "World Reference Base for Soil Resources 2014" (Update 2015)
- *Relevant* : Classification des sols hydro-morphes dans les pentes <2-5%
- *Lien* : [FAO WRB 2014](#) (Annexe sur les contraintes de drainage).
- Adger, W.N., Arnell, N.W. and Tompkins, E.L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15, 77-86.

- CEREMA. Plan National d'Adaptation au changement climatique, volet infrastructures et systèmes de transport, action. : 1511w – ISRN : CEREMA-DTecITM-2015-009 -1-FR.
- ANRH. (2019). Rapport sur les ressources hydriques en Algérie. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Alger.

Thèses et mémoires

- Thèse no 5611 (2013). « Impact du changement climatique sur les infrastructures routières – Analyse de risque et mesures d'adaptation ». Patrick Rychen.

Site web

- https://www.researchgate.net/publication/228356045_Tropical_Mangrove_Mapping_Using_Fully-Polarimetric_Radar_Data
- Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*.
- FAO (1998). *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*.
- USGS, NRCS et manuels SCS Curve Number Method.
- <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2022/4-panorama-mondial-des-emissions-de>.
- Plateforme de calcul des bassins versant: <https://mghydro.com/watersheds/>.
- Fick, S.E., and R.J. Hijmans. 2017. “WorldClim 2: New 1-km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas.” *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302–15. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P. et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data* 7, 109 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X.-P., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A. (2022) The global 2000-2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results. *Frontiers in Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903>

- Save, H., 2020, "CSR GRACE and GRACE-FO RL06 Mascon Solutions v02." <https://doi.org/10.15781/cgq9-nh24>
- Siebert, S., M. Kummu, M. Porkka, P. Döll, N. Ramankutty, and B. R. Scanlon. "A Global Data Set of the Extent of Irrigated Land from 1900 to 2005." *Hydrology and Earth System Sciences* 19, no. 3 (March 25, 2015): 1521–45. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1521-2015>.

Revues et Articles

- Les apports de la géomatique à la reconstitution des dynamiques fluviales de la Loire moyenne et des interactions sociétés -milieux fluviaux tardiglaciaires et holocènes (Val d'Orléans, Loiret). Cyril Castanet. HAL Id: hal-02235847. 01 Aug 2019.
- Chinowsky, P. & Arndt, C. (2012). Climate change and roads: A dynamic stressor-response model. *Review of Development Economics* 16(3) 448–462.
- Le Roux, A., Makhanya, S., Arnold, K. and Roux, M. (2019). Climate Adaptation: Risk Management and Resilience Optimisation for Vulnerable Road Access in Africa: Climate Risk and Vulnerability Assessment Guidelines, GEN2014C. London: ReCAP for DFID.
- Adaptation au climat : Gestion des risques et optimisation de la résilience pour les accès routiers vulnérables en Afrique, Manuel d'adaptation au climat, GEN2014C. Londres : ReCAP for DFID.
- Runoff Estimation for an Urban Area using SCS-CN Method, Remote Sensing and Geographic Information Systems Approach: A Case Study of Mavoko Municipality, Kenya.
- International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). ISSN: 2278-0181, Vol. 9 Issue 04, April-2020.
- Changement climatique généralisé et rapide, d'intensité croissante – GIEC. 9 août 2021.
- National Library of Australia Cataloguing-in-Publication data: Impact of Climate Change on Road Infrastructure. ISBN 0 85588 692 7. 2024.
- Sustainability 2022, 14, 8864. Climate Change Impacts on the Road Transport Infrastructure: A Systematic Review on Adaptation Measures. Victor Hugo Souza de Abreu 1, Andrea Souza Santos and Thaís Guedes Máximo Monteiro.

Annexes

Annexe 1 : Sources et caractéristiques des données utilisées (lié au Chapitre 1 & 3)

Type de donnée	Source	Format	Résolution / Date	Utilisation principale
MNT ALOS-2	JAXA / ASF	GeoTIFF	12,5 m / 20-10-2018	Analyse topographique et modélisation
Sentinel-2	Google Earth Engine	Raster	10 m / 2020-2024	Occupation du sol / NDVI / SAVI
Données climatiques	Météoblue / GEE	CSV / JSON	1979-2024	Analyse des précipitations extrêmes
Bassins versants GRACE	Global Watersheds	Shapefile	2024	Délimitation automatique
Données routières (OSM)	OpenStreetMap	Shapefile	2024	Numérisation réseau routier Sebdou
Photos terrain	Services techniques Sebdou	JPEG	2015-2024	Localisation zones sinistrées

Annexe 2 : Configurations techniques (Chapitre 1 & 4)

Logiciels utilisés :

- QGIS 3.34 (cartographie, MCE, numérisation)
- SAGA GIS 9.6.2 (hydrologie, morphométrie)
- Global Mapper 18 (simulation inondation)
- Google Earth Engine (données NDVI, précipitations, historique des inondations)

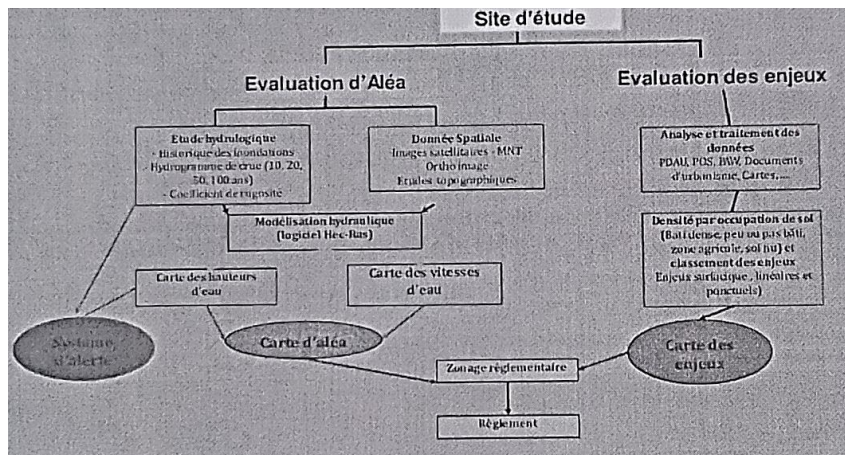
Configuration de modélisation 3D :

- MNT : ALOS-2
- Exagération verticale : 1.8x
- Vue QGIS 3D : Orientation Nord-Est, fond d'ombrage activé

**Annexe 3 : PLAN DE PRÉVENTION DES RISQUES D'INONDATIONS (PPRI)
PLAN D'ACTION POUR SEBDOU (CONSORTIUM, 2014)**

En application des mesures préconisées par la stratégie de lutte contre les inondations et dans l'optique du renforcement de la gestion préventive des risques, 16 Plans de Prévention des Risques d'inondations (PPRI) ont été élaborés par le Groupement AGIRE – ASAL, dont celui de Sebdoou.

1. Objectifs du PPRI : Le plan de prévention du risque inondation PPRI est un document réglementaire destiné à :
 - Orienter les choix d'aménagement vers les territoires non exposés, ou éventuellement les moins exposés.
 - Réglementer l'utilisation des sols en tenant compte du niveau du risque identifié.
 - Faire connaître les zones à risques aux populations et aux aménageurs.
 - Protection des Personnes et des Biens
2. Démarche d'élaboration d'un PPRI :



3. Caractéristiques générales de la ville de Sebdoou :

ARPSI code	ARPSI.13.003
Surface urbaine exposée	59,5 ha
Population	32 570 hab.
Surface inondable	213 ha
Population exposée	5 611 hab.

4. Zones identifiées comme risque :

Surface inondable (ha)	Oued associé	Typologie d'inondation	Population affectée	Transport solide significatif
84	Oued Sidi Moussa	Crue rapide	788	NON
36	Oued El Guettara	Crue rapide	1113	OUI
42	Oued Kicole	Crue rapide	1505	OUI
25	Oued Kadous	Crue rapide	1505	OUI
26	Oued Guettara Hassel	Crue rapide	700	OUI

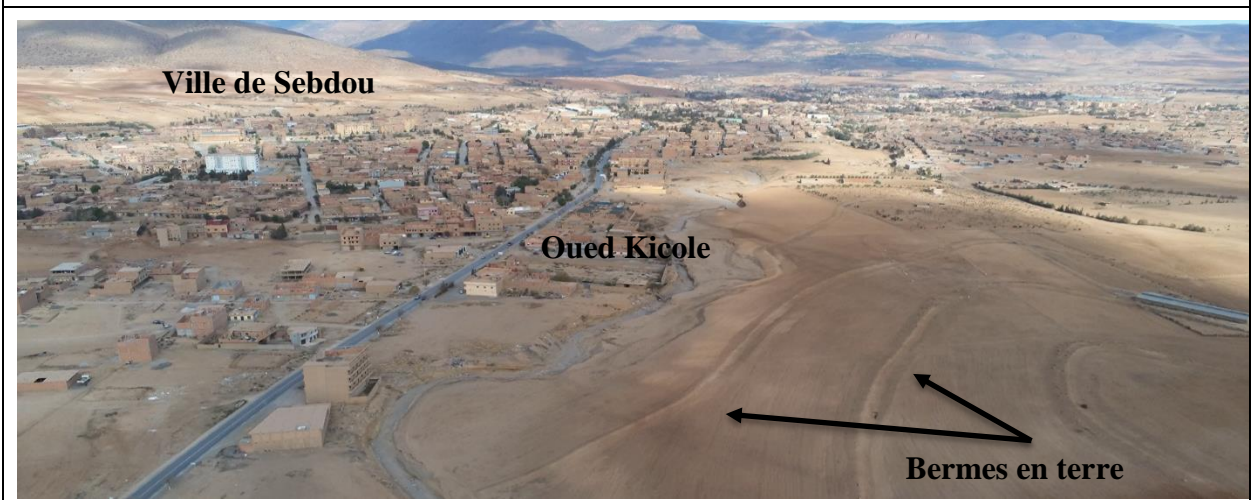
RISQUE TRÈS HAUT

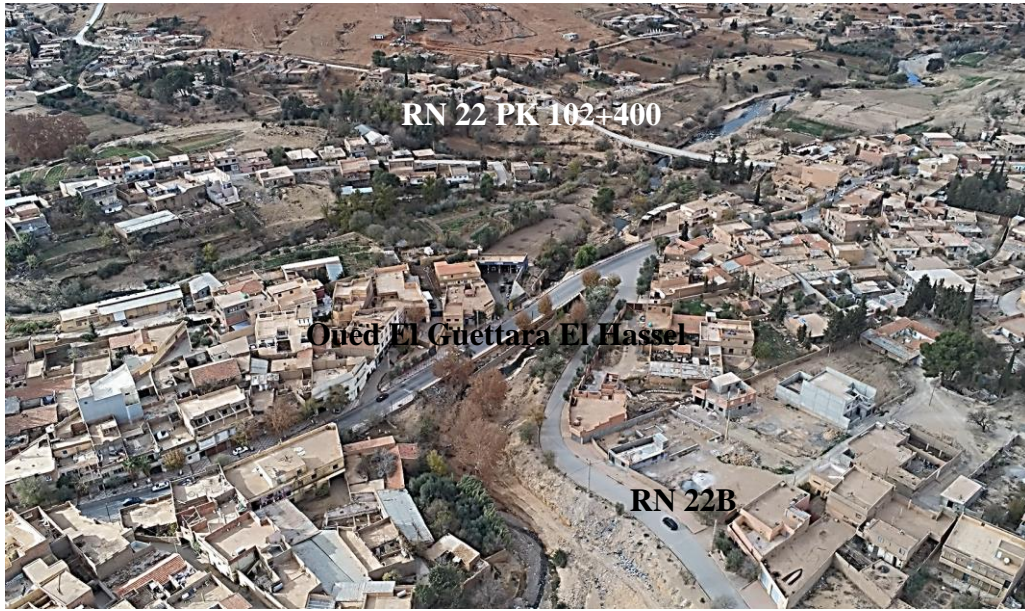
Au vu de la surface inondable globale évaluée à 213 ha, de la typologie des inondations (crue rapide) et de l'impact sur la population touchée (17%), la vulnérabilité du risque d'inondation de la ville de Sebdou est jugée à **risque très haut**.

5. Problèmes rencontrés

Problématique	Oui	Non	Commentaires	Orientation à développer
Réseau de stations hydrométéorologiques insuffisant dans le sous-bassin versant	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Selon les recommandations de l'OMM, le SBV n'a pas la densité appropriée.	Amélioration de la connaissance du risque
Problèmes relatifs à l'aménagement du territoire (PDAU, etc.)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	L'urbanisation de la ville est anarchique.	Réduction de la vulnérabilité
Occupation des zones inondables	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Les habitations se situent en zones proches aux oueds (DPH).	Amélioration de la connaissance du risque
Domaine Public Hydraulique défini	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Certains ouvrages présentent des problèmes de capacité hydraulique.	Il est nécessaire de construire de nouveaux ouvrages de protection
Problèmes d'entretien des cours d'eau, du réseau d'assainissement et des eaux pluviales	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	L'entretien du système doit être fait régulièrement. Les déchets ménagers bloquent le système.	Renforcement de la politique des mesures structurelles
Réalisation d'aménagements d'ouvrages préalables de qualité	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Plus d'ouvrages nécessaires pour contrer le risque.	Amélioration de la connaissance du risque
Problèmes relatifs à la conservation du bassin, dépourvu de végétation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	L'érosion et les sédiments posent problème.	Aménagement durable des territoires
Perception inadéquate du risque d'inondation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Manque de sensibilisation.	Amélioration de la connaissance du risque
Manque d'instruments pour la gestion de crise (plan ORSEC)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Instruments en cas d'alerte, selon les prévisions de l'ONM.	Réduction de la vulnérabilité

Annexe 4 : Photographies aériennes des cours d'eau (oueds) de la commune de Sebdo







Annexe 5 : Script Google Earth Engine (GEE) d'extraction des précipitations annuelles sur la commune de Seb dou (2015–2024)

```

var region = geometry
var CHIRPS= ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/PENTAD');
var precip = CHIRPS.filterDate('2015-01-01', '2024-12-31');
var TS5 = ui.Chart.image.series(precip, geometry, ee.Reducer.mean(),1000,
'system:time_start').setOptions({
  title: 'Precipitation Full Time Series Seb dou',
  vAxis: {title: 'mm/pentad'},
});
print(TS5);
var precip1year=CHIRPS.filterDate('2022-01-01', '2022-12-31');
var TS1 = ui.Chart.image.series(precip1year, geometry,ee.Reducer.mean(),1000,
'system:time_start').setOptions({
  title: 'Precipitation 1-Year Time Series Seb dou',
  vAxis: {title: 'mm/pentad'},
});
print(TS1);
var geometryPrecip = precip1year.mean().clip(geometry);
var geometryPrecip1=precip.mean().clip(geometry);
Map.addLayer(geometryPrecip, {'min': 0, 'max': 40, 'palette':"CCFFCC,00CC66,006600"});
Map.addLayer(geometryPrecip1, {'min': 0, 'max': 40, 'palette':"CCFFCC,00CC66,006600"});

```

Annexe 6 : Code GEE utilisé pour l'analyse de l'évolution de la végétation (NDVI) à Seb dou entre 2015 et 2024

```

// =====
// VEGETATION COVER CHANGE ANALYSIS IN SEBDOU
// 2014-2024 COMPARISON
// =====
// 1. Define the study area (Seb dou, Algeria)

```

```
var sebdou = ee.Geometry.Polygon([
  [-1.5619, 34.4697],
  [-1.1169, 34.4697],
  [-1.1169, 34.7737],
  [-1.5619, 34.7737]
]);

// 2. Define time periods (same season comparison)
var startDate2014 = '2014-06-01';
var endDate2014 = '2014-08-31';
var startDate2024 = '2024-06-01';
var endDate2024 = '2024-08-31';

// 3. Function to calculate NDVI and mask clouds
function processImage(image) {
  // Calculate NDVI
  var ndvi = image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI');

  // Cloud masking using SCL band
  var scl = image.select('SCL');
  var cloudMask = scl.neq(8).and(scl.neq(9)); // Mask clouds (8) and cirrus (9)
  return image.addBands(ndvi).updateMask(cloudMask);
}

// 4. Get Landsat 8 data for 2014
var landsat2014 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
  .filterBounds(sebdou)
  .filterDate(startDate2014, endDate2014)
  .map(function(image) {
    // Scale Landsat bands and calculate NDVI
    var opticalBands = image.select(['SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B6', 'SR_B7'])
      .multiply(0.0000275).add(-0.2);
```

```
var ndvi = image.normalizedDifference(['SR_B5', 'SR_B4']).rename('NDVI');
return opticalBands.addBands(ndvi);
});
// 5. Get Sentinel-2 data for 2024
var sentinel2024 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
  .filterBounds(sebdou)
  .filterDate(startDate2024, endDate2024)
  .map(processImage);
// 6. Create median composites
var composite2014 = landsat2014.median();
var composite2024 = sentinel2024.median();
// 7. Calculate NDVI difference
var ndvi2014 = composite2014.select('NDVI');
var ndvi2024 = composite2024.select('NDVI');
var ndviDifference = ndvi2024.subtract(ndvi2014).rename('NDVI_Difference');
// 8. Visualization parameters
var ndviParams = {min: -0.2, max: 0.8, palette: ['brown', 'yellow', 'green']};
var diffParams = {
  min: -0.5,
  max: 0.5,
  palette: ['red', 'white', 'green']
};
// 9. Display results in main map
Map.centerObject(sebdou, 10);
Map.addLayer(ndvi2014, ndviParams, 'NDVI 2014 (Landsat)');
Map.addLayer(ndvi2024, ndviParams, 'NDVI 2024 (Sentinel)');
Map.addLayer(ndviDifference, diffParams, 'NDVI Difference (2024-2014)');
// 10. PROPERLY IMPLEMENTED Split-panel comparison
// Create two separate map objects
```

```
var leftMap = ui.Map();
leftMap.addLayer(ndvi2014, ndviParams, '2014 NDVI (Landsat)');
leftMap.centerObject(sebdou, 10);
var rightMap = ui.Map();
rightMap.addLayer(ndvi2024, ndviParams, '2024 NDVI (Sentinel)');
rightMap.centerObject(sebdou, 10);
// Create the split panel
var splitPanel = ui.SplitPanel({
  firstPanel: leftMap,
  secondPanel: rightMap,
  orientation: 'horizontal',
  wipe: true
});
// Clear the default map and add the split panel
ui.root.clear();
ui.root.add(splitPanel);
// 11. Calculate statistics
var stats2014 = ndvi2014.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  geometry: sebdou,
  scale: 30,
  maxPixels: 1e9
});
var stats2024 = ndvi2024.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  geometry: sebdou,
  scale: 10,
  maxPixels: 1e9
});
```

```

print('Mean NDVI 2014:', stats2014);
print('Mean NDVI 2024:', stats2024);
// 12. Export results
Export.image.toDrive({
  image: ndviDifference,
  description: 'NDVI_Difference_Sebdou_2014_2024',
  scale: 30,
  region: sebdou,
  fileFormat: 'GeoTIFF',
  maxPixels: 1e13
});

```

Annexe 7 : Script GEE pour extraction de l'historique des inondations du 2015 au 2024

```

// =====
// DÉTECTION D'INONDATION À SEBDOU – 2015-2024
// =====
// 1. DÉFINIR LA ZONE D'ÉTUDE (SEBDOU)
var sebdou = ee.Geometry.Polygon([
  [-1.5619, 34.4697],
  [-1.1169, 34.4697],
  [-1.1169, 34.7737],
  [-1.5619, 34.7737],
  [-1.5619, 34.4697]
]);
// 2. PARAMÈTRES D'ANALYSE (2022)
var dateDebut = '2015-01-01';
var dateFin = '2024-12-31';
var seuilEau = 0.2; // Seuil optimal pour MNDWI
// 3. FONCTION DE TRAITEMENT SENTINEL-2 (HARMONISÉ)
function preprocessImage(image) {

```

```

// Masque de nuages utilisant la bande de probabilité
var cloudProb = image.select('MSK_CLDPRB');
var mask = cloudProb.lt(30); // <30% de probabilité de nuages

// Calcul des indices (normalisation incluse)
var mndwi = image.normalizedDifference(['B3', 'B11']).rename('mndwi')
    .updateMask(mask);
return image.addBands(mndwi);
}

// 4. IMPORT ET FILTRAGE DES IMAGES 2022
var collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
    .filterBounds(sebdou)
    .filterDate(dateDebut, dateFin)
    .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
    .map(preprocessImage);

// Vérification du nombre d'images disponibles
print('Nombre d\'images disponibles:', collection.size());

// 5. CRÉATION DE COMPOSITES TEMPORELLES
var compositeSec = collection.filterDate('2022-06-01', '2022-08-31').median(); // Période sèche
var compositeHumide = collection.filterDate('2022-11-01', '2022-12-31').median(); // Période humide

// 6. DÉTECTION DES ZONES INONDÉES
var eauSec = compositeSec.select('mndwi').gt(seuilEau);
var eauHumide = compositeHumide.select('mndwi').gt(seuilEau);
var inondation = eauHumide.subtract(eauSec).gt(0).selfMask();

// 7. VISUALISATION AMÉLIORÉE
Map.centerObject(sebdou, 12);

// Faux-couleur pour distinction eau/végétation
var visFauxCouleur = {
    bands: ['B8', 'B4', 'B3'],
    min: 0.05,
    max: 0.35,

```

```
gamma: 1.3
};
Map.addLayer(compositeSec, visFauxCouleur, 'Période sèche (été 2022)');
Map.addLayer(compositeHumide, visFauxCouleur, 'Période humide (hiver 2022)');
Map.addLayer(inondation, {palette: ['red'], opacity: 0.7}, 'Zones inondées potentielles');

// 8. EXPORT DES RÉSULTATS
Export.image.toDrive({
  image: inondation,
  description: 'Inondation_Sebdou_2022',
  scale: 10,
  region: sebdou,
  fileFormat: 'GeoTIFF',
  maxPixels: 1e13
});

// 9. STATISTIQUES DÉTAILLÉES
var stats = inondation.multiply(ee.Image.pixelArea()).reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: sebdou,
  scale: 10,
  maxPixels: 1e13
});
print('Superficie inondée estimée (m²):', stats);
```

Annexe 8 : Démarche de spatialisation de la sensibilité du réseau routier aux inondations par approche multicritère sous QGIS

Étape	Description	Méthode utilisée	Paramètres / Poids	Exemple ou expression QGIS
1. Classification des paramètres	Reclassification des couches raster (LS Factor, pente, TWI, NDVI, etc.) en classes de sensibilité.	Calculatrice de champ	4 classes : 1 = Faible 2 = Moyenne 3 = Élevée 4 = Très élevée	CASE WHEN "LS" < 2 THEN 1 WHEN "LS" < 5 THEN 2 WHEN "LS" < 10 THEN 3 ELSE 4 END
2. Pondération des critères	Attribution de poids aux paramètres selon leur influence sur le risque d'inondation.	Méthode AHP ou pondération experte	TWI : 25% Pente : 15% LS : 15% Occupation : 10% NDVI : 5% Accumulation : 30%	("TWI_class" * 0.25) + ("Slope_class" * 0.15) + ("LS_class" * 0.15) + ("Accflux_class" * 0.30)
3. Calcul du score total	Somme pondérée des classes pour obtenir un score global par pixel.	Calculatrice de champ	Score continu entre 1 et 4	score_total
4. Reclassification finale	Transformation du score en classes de sensibilité intégrée.	Reclassification par seuils	1 = Faible (≤ 1.75) 2 = Moyenne (≤ 2.5) 4 = Très Fort (> 2.51)	CASE WHEN "score_total" <= 1.75 THEN 1 WHEN "score_total" <= 2.5 THEN 2 WHEN "score_total" >= 2.51 THEN 3 ELSE 3 END
5. Visualisation cartographique	Représentation des classes de sensibilité sur la carte finale.	Symbologie graduée (QGIS)	Palette : Vert → Rouge Classification : Quantile/Manuel	Légende : 1 = Faible 2 = Moyenne 3 = Très élevée

Annexes

Annexe 9 : Tableaux synthétiques du calcul de la sensibilité – un total de 31 116 points d'évaluation ont été analysés.

1	id	NOM	distance	X	Y	Accum_1	Lc_1	LS_1	NDVI_22	Pente(rad)	TWI_1	Accum_1_Cl	Pente_Cl	TWI_class	NDVI_class	LC_class	LS_Class	Sensibilit
137	135	CW 09	1350	650381.88	3833530.5	476.52594	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0
138	136	CW 09	1360	650372.34	3833533.5	642.39673	0	0	0	0	0	2	0	0	5	0	0	0
139	137	CW 09	1370	650362.81	3833536.5	642.39673	0	0	0	0	0	2	0	0	5	0	0	0
140	138	CW 09	1380	650353.27	3833539.5	30903.113	0	0	0	0	0	4	0	0	5	0	0	0
141	139	CW 09	1390	650343.73	3833542.5	18755.207	0	0	0	0	0	4	0	0	5	0	0	0
142	140	CW 09	1400	650334.19	3833545.5	3641.4658	0	0	0	0	0	3	0	0	5	0	0	0
143	141	CW 09	1410	650324.65	3833548.5	347.35471	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0
144	142	CW 09	1420	650315.12	3833551.6	4261.9077	0	0	0	0	0	3	0	0	5	0	0	0
145	0	CW 107	0	652794.7	3834110.7	356.11407	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0
146	1	CW 107	10	652785.52	3834106.7	43556.164	0	0	0	0	0	4	0	0	5	0	0	0
147	2	CW 107	20	652777.43	3834101	43556.164	0	0	0	0	0	4	0	0	5	0	0	0
148	3	CW 107	30	652770.43	3834093.9	76676.813	0	0	0	0	0	4	0	0	5	0	0	0
149	4	CW 107	40	652764.02	3834086.2	194.11534	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0
27214	1001	RN 22	10010	652730.29	3832703.4		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
27215	1002	RN 22	10020	652731.95	3832713.2		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
27216	1003	RN 22	10030	652733.61	3832723.1		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
27217	1004	RN 22	10040	652735.27	3832733		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
27218	1005	RN 22	10050	652736.93	3832742.8		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
27219	1006	RN 22	10060	652738.59	3832752.7		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
27220	1007	RN 22	10070	652740.25	3832762.5		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
27221	1008	RN 22	10080	652741.91	3832772.4		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
27222	1009	RN 22	10090	652743.57	3832782.3		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30068	734	CW 107	7340	646999.89	3829746.7		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30069	735	CW 107	7350	646989.95	3829745.6		0	30	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30070	736	CW 107	7360	646980.01	3829744.4		0	30	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30071	737	CW 107	7370	646970.08	3829743.3		0	30	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30072	738	CW 107	7380	646960.14	3829742.2		0	30	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30073	0	CW 112	0	658378.65	3838209.9		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30074	1	CW 112	10	658385.77	3838202.9		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30075	2	CW 112	20	658393.87	3838197.1		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30076	3	CW 112	30	658402.86	3838192.9		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8
30077	4	CW 112	40	658412.26	3838189.5		0	50	0	0	0	6	0	0	5	4	0	2.8

Annexe 10 – Méthode AHP appliquée à l'évaluation de la sensibilité
1. Introduction à la méthode AHP

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), développée par Thomas Saaty, est une méthode d'aide à la décision multicritère permettant de structurer un problème complexe en une hiérarchie de critères. Elle facilite l'attribution de poids relatifs aux critères influençant un phénomène, à partir de comparaisons par paires fondées sur des jugements d'experts ou sur des références scientifiques.

Dans ce mémoire, la méthode AHP a été utilisée pour pondérer les principaux facteurs de sensibilité aux inondations dans la commune de Sebdou. Ces poids ont ensuite servi à calculer un indice de sensibilité spatialisé.

2. Structure hiérarchique du problème

- **Objectif** : Évaluer spatialement le niveau de sensibilité du réseau routier et de son environnement aux inondations.
- **Critères retenus** :
 1. NDVI (indice de végétation)
 2. Pente (Slope)
 3. Occupation du sol
 4. Accumulation de flux (écoulement)
 5. Facteur LS (longueur-pente)
 6. TWI (Topographic Wetness Index)

3. Pondérations issues de l'analyse AHP

Les poids suivants ont été attribués aux critères sur la base de leur importance relative dans le phénomène d'inondation :

Critère	Poids (%)
NDVI	20 %
Pente (Slope)	15 %
Occupation du sol	15 %
Accumulation (écoulement)	20 %
Facteur LS	15 %
TWI	15 %
Total	100 %

Ces poids reflètent l'importance prioritaire de l'humidité et de l'écoulement concentré (NDVI et accumulation), tout en tenant compte de la topographie, de la couverture terrestre et du potentiel érosif.

4. Démarche AHP suivie

1. **Comparaison par paires** des critères sur la base de connaissances scientifiques et d'observations de terrain.
2. **Construction de la matrice AHP** selon l'échelle de Saaty (1 à 9).
3. **Calcul des poids normalisés** par moyenne des colonnes de la matrice normalisée.
4. **Vérification de la cohérence** : le rapport de cohérence (CR) a été vérifié et est **inférieur à 0,10**, ce qui garantit la fiabilité du jugement.

5. Formule de la sensibilité (S)

La sensibilité finale a été calculé selon une formule pondérée :

$$S=0,20 \cdot NDVI+0,15 \cdot Slope+0,15 \cdot Occupation+0,20 \cdot Accumulation+0,15 \cdot LS+0,15 \cdot TWI$$

Chaque couche a été normalisée (valeurs entre 0 et 1) avant l'agrégation. Le calcul a été effectué dans QGIS à l'aide de l'outil Raster Calculator.

6. Classification finale : L'indice obtenu a été reclassé en **trois classes de sensibilité** selon le score total :

Score total	Classe de sensibilité
0,00 – 1,50	Faible
1,51 – 2,50	Moyenne
2,51 – 4,00	Très forte

Cette classification a été utilisée pour produire les cartes thématiques de sensibilité, intégrées à l'analyse géomatique dans ce mémoire.

6. Étapes de la méthode AHP appliquées

6.1 Comparaison par paires des critères

La méthode AHP commence par une comparaison de chaque critère avec les autres, deux à deux, pour évaluer leur importance relative par rapport à l'objectif général : évaluer la sensibilité du réseau routier aux inondations.

Ces comparaisons reposent à la fois sur :

- des connaissances scientifiques (études hydrologiques, facteurs aggravants du ruissellement et de l'érosion, etc.),
- et des observations de terrain dans la commune de Sebdou (état de la végétation, zones d'accumulation d'eau, fortes pentes, etc.).

Échelle fondamentale de Saaty (1 à 9) :

Valeur	Interprétation
1	Importance égale entre les deux critères
3	Importance modérée d'un critère sur l'autre
5	Importance forte
7	Importance très forte
9	Importance extrême
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires

Exemple : Si "l'accumulation" est jugée fortement plus importante que "la pente", on attribue une valeur de 5 à la case correspondante. L'inverse donne 1/5.

6.2 Construction de la matrice AHP

On construit une matrice carrée où les critères sont comparés entre eux. Si l'on a 6 critères (NDVI, pente, occupation du sol, accumulation, LS, TWI), la matrice est de taille 6×6.

Chaque élément a_{ij} de la matrice représente le degré de préférence du critère i sur le critère j . Par définition :

$$a_{ji} = 1/a_{ij} \quad \text{et} \quad a_{ii} = 1$$

Une fois les comparaisons effectuées, on construit une matrice carrée où chaque critère est comparé avec tous les autres.

- La diagonale contient des valeurs de 1 (car un critère comparé à lui-même est égal).
- Les valeurs sont réciproques : si $a_{ij} = x$, alors $a_{ji} = 1/x$.

6.3 Calcul des poids (normalisation)

Après avoir rempli la matrice :

1. On somme chaque colonne.
2. On divise chaque valeur de la matrice par la somme de sa colonne (matrice normalisée).
3. On calcule la moyenne de chaque ligne : ce sont les poids finaux de chaque critère.

Ces poids reflètent l'importance relative de chaque facteur dans l'évaluation de la sensibilité.

Poids utilisés dans cette étude :

Critère	Poids (%)
NDVI	20
Pente	15
Occupation du sol	15
Accumulation	20
Facteur LS	15
TWI	15

6.4 Vérification de la cohérence (CR)

Pour s'assurer que les comparaisons ne sont pas arbitraires, on évalue la cohérence logique de la matrice.

On calcule :

- L'indice de cohérence (CI) : $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$, où λ_{max} est la valeur propre maximale de la matrice, et n le nombre de critères.

- Le rapport de cohérence (CR) : $CR = CI / RI$, avec RI un indice aléatoire connu (ex. : RI = 1.24 pour n = 6). avec RI un indice aléatoire connu (par exemple, RI = 1.24 pour n = 6).

Condition de validité : Si $CR < 0,10$, alors la cohérence du jugement est acceptable.

Dans cette étude, le CR a été vérifié et s'est avéré inférieur à 0,10, ce qui garantit la fiabilité des jugements effectués.

NB : Les calculs relatifs à la méthode AHP ont été réalisés à l'aide d'un modèle prédéfini sous Excel. Ce modèle inclut la matrice de comparaison par paires, la normalisation, le calcul automatique des poids, ainsi que la vérification de la cohérence via le rapport de cohérence (CR). La cohérence des jugements a été vérifiée et jugée acceptable ($CR < 0,10$), garantissant la fiabilité des pondérations appliquées aux critères de vulnérabilité.