



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE EPOPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des sciences appliquées
Département : Génie Civil et hydraulique

Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Hydraulique
Spécialité : Ressources en eau

Présenté Par :
KHERBACHE Douniaamat Rahmane

Thème

**ANALYSE INTELLIGENTE DES INONDATIONS EN REGIONS
ARIDES A L'AIDE DE LA PLATEFORME SCALGO LIVE**

Soutenu publiquement le: 07/06/2026

Devant le jury composé de :

Dr. OULHACI Dalila	MCA	UKM Ouargla	Présidente
Dr. MECHRI Laid	MCA	UKM Ouargla	Examineur
Dr. ZEGAIT Rachid	MCA	UKM Ouargla	Encadreur

Année Universitaire : 2025/2026

Résumé

Ce mémoire explore l'utilisation de la plateforme **Scalگو Live** comme outil d'analyse intelligente des risques d'inondation en milieu aride. Basée sur les Modèles Numériques de Terrain (MNT/DEM) et couplée aux outils SIG, cette approche permet de simuler le ruissellement de surface, d'identifier les zones vulnérables et d'évaluer différents scénarios pluviométriques. Les résultats démontrent l'efficacité de l'analyse numérique intelligente pour améliorer la compréhension des écoulements hydrologiques et soutenir la gestion préventive des risques d'inondation.

Mots Clés: Scalگو Live ; Analyse intelligente ; Risques d'inondation ; Simulation hydrologique ; SIG ;

Abstract

This thesis explores the use of the Scalگو Live platform as an intelligent analysis tool for flood risk assessment in arid environments. Based on Digital Elevation Models (DEM) and integrated with Geographic Information System (GIS) tools, this approach enables the simulation of surface runoff, the identification of vulnerable areas, and the evaluation of different rainfall scenarios. The results demonstrate the effectiveness of intelligent digital analysis in improving the understanding of hydrological flows and supporting preventive flood risk management.

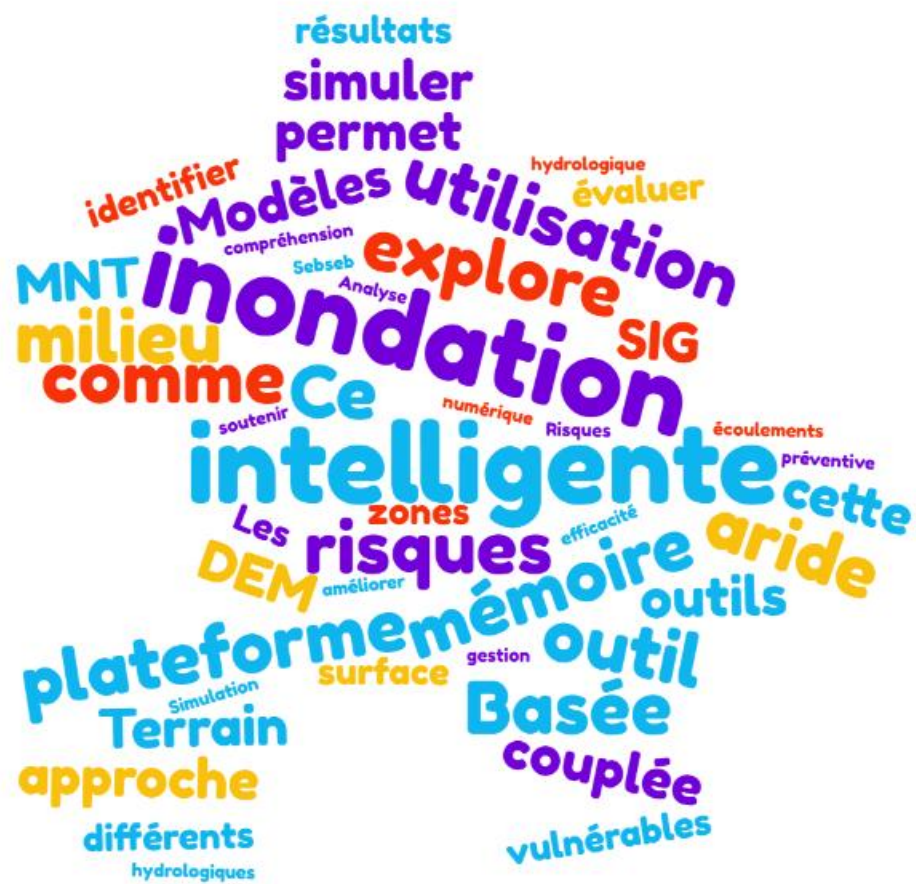
Keywords: Scalگو Live; Intelligent Analysis; Flood Risks; Hydrological Simulation; GIS (Geographic Information Systems).

المخلص

تدرس هذه المذكرة استخدام منصة Scalگو Live كأداة للتحليل الذكي لتقييم مخاطر الفيضانات في البيئات الجافة. وتعتمد هذه المقاربة على نماذج الارتفاعات الرقمية (DEM) المدمجة مع أدوات نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، مما يتيح محاكاة الجريان السطحي، وتحديد المناطق الهشة والمعرضة للخطر، وتقييم سيناريوهات مختلفة للهطول المطري. وتُظهر النتائج فعالية التحليل الرقمي الذكي في تحسين فهم التدفقات الهيدرولوجية ودعم الإدارة الوقائية لمخاطر الفيضانات.

الكلمات المفتاحية: Scalگو Live؛ التحليل الذكي؛ مخاطر الفيضانات؛ المحاكاة الهيدرولوجية؛ نظم المعلومات الجغرافية (GIS).

Nuage de mots Clés





إهداءات

{ وَقَلَّ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا }

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، و بفضلہ تتحقق الأمنيات، و بعونه تصل
الخطى إلى غاياتها. له الشكر أولاً وآخرًا، ظهراً و باطنًا.
بكل فخر أهدي تخري و فرحتي التي انتظرتها طويلاً إلى من كانوا الداعم و العطاء
دائماً .

إلى من كان الداعم الأول لتحقيق طموحاتي، إلى النور الذي اضاء دربي
إلى العزيز الذي حملت اسمه بكل فخر، إلى معلمي الأول الرجل الذي سعى طول
حياته لنكون الأفضل.

أبى الغالي.

إلى من كان ملجأى ويدي اليمنى في هذه المرحلة، إلى من أبصرت به طريق
الحياتي و اعتزازي بذاتي

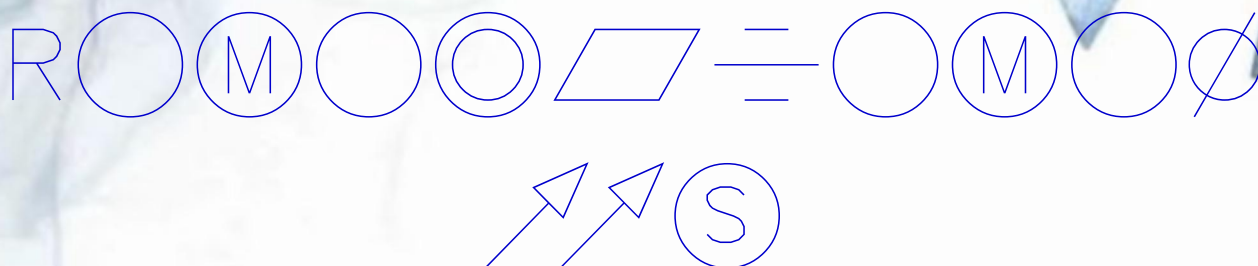
إلى القلب الحنون، إلى من كانت دعواته تحيطني
أمي الغالية.

إلى مصدر قوتي والداعمين و الساندين إلى خيرة أيامي و صفتها إلى ضلعي الثابت
وأمان أيامي
أخواتي الغاليين.

إلى من حبهم يعلو فوق كل حب، إلى نوري المضاء الذي لا ينطفئ
صديقاتي الغاليات.

دنيا آمة الرحمان





Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la santé et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

*Je tiens à exprimer à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Monsieur **ZEGAIT Rachid**, pour son suivi, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements aux **membres du jury** pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail.*

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants du Département d'Hydraulique pour les connaissances et la formation qu'ils nous ont apportées durant notre cursus universitaire.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à nos familles ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont soutenus, encouragés et aidés de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dounia Amatrahmane

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	i
Abstract.....	i
ملخص.....	i
Nuage de Mots Clés.....	ii
Dédicaces.....	iii
Remerciements.....	iv
Table des Matières.....	v
Liste des Figures.....	vii
Liste des Tableaux.....	viii

INTRODUCTION GENERALE..... 7

CHAPITRE I — INONDATIONS DANS LES ZONES ARIDES..... 8

Introduction.....	9
I.1.3 La crue saharienne : un phénomène à part entière.....	9
I.2 Caractéristiques des zones arides et semi-arides.....	9
I.2.1 Critères de classification.....	9
I.2.2 Caractéristiques hydrologiques des milieux arides.....	9
I.2.3 Le paradoxe des inondations en milieu aride.....	10
I.3 Facteurs générateurs des inondations dans le sud algérien.....	10
I.3.1 Facteurs climatiques et pluviométriques.....	10
I.3.2 Facteurs morphologiques et géomorphologiques.....	11
I.3.3 Facteurs anthropiques et urbanistiques.....	11
I.3.4 Changement climatique et nouvelles tendances.....	12
I.4 Inventaire des principales inondations dans le sud algérien.....	12
I.4.1 Bilan global des inondations en Algérie (1969–2022).....	12
I.4.2 Grandes inondations du sud algérien.....	12
I.6 Conséquences et impacts des inondations en zones arides.....	16
I.7.3 Défis spécifiques au contexte saharien.....	17
I.8 Synthèse sur les inondations dans les zones arides.....	17
Conclusion.....	18

CHAPITRE II — ÉTAT DE L'ART SUR LES INONDATIONS..... 19

Introduction.....	20
I.1.1 L'inondation et processus physique.....	20
I.1.2 Terminologie morphologique des lits fluviaux.....	21
I.2 Ruissellement, crue et résilience hydrologique.....	23
I.2.1 Le ruissellement.....	23
I.2.2 La notion de crue.....	24
I.2.3 La résilience hydrologique.....	24
I.3 Spécificités hydrologiques des zones arides et semi-arides.....	24
I.4 Approches classiques de modélisation des inondations.....	26

I.4.1	Modélisation hydrologique : transformation pluie-débit.....	26
I.4.2	Modélisation hydraulique : équations de Saint-Venant.....	27
I.4.3	Approches complémentaires.....	27
I.5	Outils numériques de modélisation et SIG.....	28
I.5.1	HEC-HMS.....	28
I.5.2	HEC-RAS.....	28
I.5.3	Rôle des SIG dans l'analyse spatiale du risque d'inondation.....	29
I.5.4	Apports des plateformes géospatiales.....	29
I.5.5	Intelligence artificielle et apprentissage automatique.....	30
I.6	Cartographie du risque d'inondation.....	30
I.7	Gestion du risque d'inondation : stratégies et outils.....	31
I.8	Bilan de l'état de l'art et lacunes identifiées.....	32
	Conclusion.....	33

CHAPITRE III — PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE & HYDRO-MORPHOLOGIQUE..... 34

III.1	Situation administrative.....	35
III.2	Situation de la commune de SEBSEB.....	35
III.3	Aspect climatique.....	37
III.4	Occupation du sol.....	39
III.5	Cadre géologique.....	40
III.5.1	Structure géologique.....	42
III.5.2	Litho-stratigraphie.....	42
III.6	Aspect hydrogéologique.....	42
III.7	Historique des crues à SEBSEB.....	44
IV.1	Délimitation de bassin versant.....	45
IV.2	Caractéristiques géométriques des bassins.....	47
IV.3	Caractéristiques hydro-morphologiques.....	47
IV.4	Caractéristiques Hydrographiques.....	48
IV.5	Caractéristiques physiographiques.....	52
IV.6	Temps de concentration.....	54
IV.7	Vitesse de ruissellement.....	57
	Conclusion.....	57

CHAPITRE IV — ANALYSE SPATIALE ET MODÉLISATION AVEC SCALGO LIVE 58

IV-1	Introduction.....	59
IV-2	Présentation de SCALGO Live.....	59
IV-2-1	Définition et positionnement.....	59
IV-2-2	Architecture et fonctionnement.....	60
IV-2-3	Avantages.....	60
IV-2-4	Limites.....	60
IV-3	Méthodologie.....	60
IV-3-1	Données utilisées.....	60
IV-3-2	Sélection de la zone d'étude et des scénarios pluviométriques.....	60
IV-3-3	Outils SCALGO Live utilisés.....	61
IV-4	Cartographie des bassins versants et du ruissellement.....	61

IV-5 Simulation comparative : état naturel vs. état modifié.....	64
IV-5-1 Bassin versant 1 — Scénarios comparatifs (10 à 100 mm).....	64
IV-5-2 Bassins versants 2, 3 et 4 — Scénarios comparatifs.....	67
IV-6 Analyse des profils topographiques.....	72
IV-7 Interprétation des résultats et synthèse.....	74
Conclusion.....	75

CONCLUSION GENERALE.....	77
---------------------------------	-----------

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	79
---	-----------

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I-1 : Crue de l'Oued Mzab le 01 octobre 2008.....	13
Figure I-2 : Inondations Bechar-2024.....	13
Figure I-2 : Inondations El Bayadh-2011.....	14
Figure I-1 : Inondations de Tamanrasset.....	15
Figure I-2 : Inondations In-Guezzam-2018.....	15

Chapitre II

Figure I.1 : Schéma conceptuel du cycle hydrologique et genèse des inondations.....	20
Figure II-2 : Topographie d'une plaine d'inondation et représentation des différents lits fluviaux.....	21
Figure I.3 : Schéma typologique des principaux mécanismes d'inondation.....	23
Figure I.4 : Représentation du processus de ruissellement et de ses deux principaux mécanismes.....	23
Figure I.5 : Carte de la distribution des zones sèches et arides en Algérie.....	25
Figure I.6 : Hydrogrammes typiques de crues éclairs.....	25
Figure I.8 : Représentation schématique de la modélisation hydraulique.....	27
Figure I.9 : Cartographie par télédétection SAR de l'étendue spatiale d'une inondation.....	28
Figure I.11 : Workflow SIG pour la production d'une carte de risque d'inondation.....	29
Figure I.12 : Cartographie de la fréquence d'inondation — Google Earth Engine.....	30
Figure I.15 : Principaux types d'ouvrages structurels de protection contre les inondations.....	32

Chapitre III

Figure III-1 : Situation de la wilaya de Ghardaïa.....	35
Figure III-2 : Situation de la zone d'étude.....	35
Figure III-3 : Vue globale de la ville de SEBSEB (Google Earth).....	36
Figure III-4 : Quartier Cité administratif à SEBSEB (vue général).....	36
Figure III-5 : Chronique des précipitations de 1990 à 2020 à SEBSEB.....	38
Figure III-6 : Morphologie de Sahara Septentrional (Glob Gis Afric_Esri).....	40
Figure III-7 : Couverture pédologique de Sahara Septentrional (BRL-C.D.A.R.S 1998).....	40
Figure III-8 : Carte géologique du M'Zab (extrait modifié G.Busson 1967).....	41
Figure III-9 : Domaine du Système d'Aquifère du Sahara Septentrional.....	43
Figure III-10 : Écoulement des eaux d'Oued SEBSEB 2017.....	44
Figure III-11 : Inondation de la cité El-Hrith 21/08/2018 — Oued SEBSEB 2018.....	44
Figure III-12 : Limites du sous bassin versant au niveau d'oued SEBSEB.....	45
Figure III-13 : Délimitation des sous bassins versants de la région de SEBSEB.....	46
Figure III-14 : Courbe hypsométrique du bassin versant d'oued SEBSEB.....	50
Figure III-15 : Carte hypsométrique du bassin versant d'oued SEBSEB.....	50
Figure III-16 : Réseau hydrographique BV SEBSEB.....	53

Chapitre IV

Figure n°(IV-04) : Interface SCALGO Live.....	59
Figure IV-1 : Trajectoires du ruissellement / Profondeur des inondations - SCALGO Live.....	59
Figure IV-2 : État du BV1 en conditions sèches (sans précipitations).....	61

Figure IV-3 : État du BV2 en conditions sèches (sans précipitations).....	62
Figure IV-4 : État du BV3 en conditions sèches (sans précipitations).....	62
Figure IV-5 : État du BV4 en conditions sèches (sans précipitations).....	62
Figure IV-6 : Simulation zones inondables BV1 sous précipitations extrêmes (100 mm).....	63
Figure IV-7 : Simulation zones inondables BV2 sous précipitations extrêmes (100 mm).....	63
Figure IV-8 : Simulation zones inondables BV3 sous précipitations extrêmes (100 mm).....	64
Figure IV-9 : Simulation zones inondables BV4 sous précipitations extrêmes (100 mm).....	64
Figure IV-10 : Carte comparative des inondations (10 mm) — BV1, scénarios (a) et (b).....	65
Figure IV-11 : Carte comparative de simulation des inondations (30 mm) — BV1.....	65
Figure IV-12 : Carte comparative de simulation des inondations (50 mm) BV1.....	66
Figure IV-13 : Carte comparative de simulation des inondations (80 mm) — BV1.....	66
Figure IV-14 : Carte comparative de simulation des inondations (100 mm) — BV1.....	67
Figure IV-15 : Carte comparative — BV2, 10 mm, scénarios (a) et (b).....	67
Figure IV-16 : Carte comparative — BV2, 30 mm, scénarios (a) et (b).....	67
Figure IV-17 : Carte comparative — BV2, 50 mm, scénarios (a) et (b).....	68
Figure IV-18 : Carte comparative — BV2, 80 mm, scénarios (a) et (b).....	68
Figure IV-19 : Carte comparative — BV2, 100 mm, scénarios (a) et (b).....	68
Figure IV-20 : Carte comparative — BV3, 10 mm, scénarios (a) et (b).....	69
Figure IV-21 : Carte comparative — BV3, 30 mm, scénarios (a) et (b).....	69
Figure IV-22 : Carte comparative — BV3, 50 mm, scénarios (a) et (b).....	69
Figure IV-23 : Carte comparative — BV3, 80 mm, scénarios (a) et (b).....	70
Figure IV-24 : Carte comparative — BV3, 100 mm, scénarios (a) et (b).....	70
Figure IV-25 : Carte comparative — BV4, 10 mm, scénarios (a) et (b).....	70
Figure IV-26 : Carte comparative — BV4, 30 mm, scénarios (a) et (b).....	71
Figure IV-27 : Carte comparative — BV4, 50 mm, scénarios (a) et (b).....	71
Figure IV-28 : Carte comparative — BV4, 80 mm, scénarios (a) et (b).....	71
Figure IV-29 : Carte comparative — BV4, 100 mm, scénarios (a) et (b).....	72
Figure IV-30 : Profils topographiques comparatifs — BV1, précipitation de 10 mm.....	72
Figure IV-31 : Profils topographiques comparatifs — BV1, précipitation de 100 mm.....	72
Figure IV-32 : Profils topographiques comparatifs — BV3, précipitation de 30 mm.....	73
Figure IV-33 : Profils topographiques comparatifs — BV3, précipitation de 80 mm.....	73
Figure IV-34 : Profils topographiques comparatifs — BV4, précipitation de 50 mm.....	73
Figure IV-35 : Profils topographiques comparatifs — BV4, précipitation de 100 mm.....	74

INTRODUCTION GENERALE



Introduction Générale

Les zones arides constituent des espaces géographiques particulièrement vulnérables aux phénomènes hydrologiques extrêmes. Paradoxalement, bien que ces régions soient caractérisées par une pluviométrie annuelle très faible, elles sont régulièrement frappées par des crues soudaines et violentes qui causent des dommages considérables aux populations et aux infrastructures. Ce phénomène, qualifié de « paradoxe des inondations en milieu aride », s'explique par la combinaison d'une faible capacité d'infiltration des sols, d'un couvert végétal réduit et de précipitations intenses concentrées sur de courtes durées.

L'Algérie saharienne, et plus particulièrement la région de Sebseb dans la wilaya de Ghardaïa, illustre parfaitement cette réalité. Cette région a connu plusieurs épisodes d'inondations, dont la catastrophe du 1er octobre 2008 qui a causé de nombreuses victimes et d'importants dégâts matériels.

La problématique de ce travail s'articule autour de la question suivante : comment les outils SIG modernes, et plus précisément la plateforme Scalgo Live, peuvent-ils contribuer à l'identification et à la caractérisation des zones vulnérables aux inondations dans la région de Sebseb, en tenant compte des spécificités hydrologiques des zones arides ?

Pour répondre à cette problématique, les hypothèses suivantes ont été formulées : (1) La topographie du terrain est le principal facteur déterminant la localisation des zones à risque d'inondation ; (2) Les modifications hydrologiques numériques de type Lower Path et Flatten permettent de réduire l'extension des zones inondables ; (3) La plateforme Scalgo Live constitue un outil pertinent et accessible pour l'analyse des risques d'inondation en contexte aride.

L'objectif principal de ce mémoire est d'analyser les risques d'inondation dans la région de Sebseb à travers la simulation du ruissellement de surface et la cartographie des zones vulnérables, en utilisant le Modèle Numérique de Terrain (MNT/DEM) et la plateforme Scalgo Live.

Les analyses réalisées ont permis d'identifier plusieurs zones potentiellement exposées aux inondations dans la région de Sebseb. Les simulations effectuées sous différents scénarios pluviométriques ont montré une augmentation progressive des surfaces inondables avec l'intensification des précipitations. Les résultats obtenus ont également mis en évidence l'intérêt des outils de modification hydrologique proposés par la plateforme SCALGO Live pour améliorer l'orientation des écoulements et réduire les accumulations d'eau dans certaines zones sensibles.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Chapitre I : Problématique des inondations en zones arides ; définitions, typologies, caractéristiques et cas réels en Algérie.
- Chapitre II : Cadre théorique et état de l'art ; concepts hydrologiques fondamentaux, approches

de modélisation et présentation de Scalgo Live.

- Chapitre III : Présentation de la zone d'étude ; caractéristiques géographiques, climatiques et hydrologiques de la région de Sebseb.
- Chapitre IV : Analyse spatiale et modélisation ; méthodologie, résultats des simulations et interprétation pour les différents bassins versants.

Chapiter I

Inondations dans les Zones Arides



Chapitre I -Inondations dans les Zones Arides

Introduction

Les inondations figurent parmi les catastrophes naturelles les plus destructrices à l'échelle mondiale. Contrairement aux idées reçues, les zones arides et semi-arides restent fortement exposées aux crues soudaines en raison de leur vulnérabilité hydrologique et urbaine. En Algérie, où une grande partie du territoire appartient au domaine saharien, plusieurs épisodes d'inondations ont marqué le sud du pays, causant d'importants dégâts humains et matériels. Ce chapitre vise à présenter une revue de littérature sur les inondations en zones arides, en abordant les principaux facteurs climatiques, hydrologiques et urbains, tout en s'appuyant sur les travaux scientifiques récents afin de fournir un cadre conceptuel à l'étude.

I.1.3 La crue saharienne : un phénomène à part entière

Remini (2023) propose une caractérisation spécifique de la « crue saharienne », qu'il distingue de la crue lente traditionnelle sur plusieurs critères fondamentaux. La crue saharienne se caractérise par son caractère boueux, avec une concentration en fines particules exceptionnellement élevée reflétant l'intensité de l'érosion dans les bassins versants peu végétalisés ; par son agressivité, liée à une force tractrice exceptionnelle capable d'emporter tous les obstacles sur son passage ; et par le transport d'objets flottants (carcasses d'animaux, troncs d'arbres) pouvant générer un phénomène de « vague » ou de coup de bélier hydraulique. L'auteur observe par ailleurs que ce type de crue, jadis confiné au Sahara, tend à « remonter » vers le nord de l'Algérie et les pays du bassin méditerranéen, sous l'effet conjugué du changement climatique et de la tropicalisation progressive du climat méditerranéen.

I.2 Caractéristiques des zones arides et semi-arides

I.2.1 Critères de classification

Les zones arides sont définies par un indice d'aridité (rapport précipitations annuelles / évapotranspiration potentielle annuelle) inférieur à 0,20, tandis que les zones semi-arides présentent un indice compris entre 0,20 et 0,50. Ces deux catégories couvrent ensemble environ 40 % des terres émergées du globe, et plus de 85 % du territoire algérien.

Le climat de ces zones est caractérisé par de faibles précipitations annuelles, généralement inférieures à 150 mm dans le Sahara algérien (et parfois inférieures à 30 mm dans les régions hyperarides comme In-Guezzam, où Zegait et al. (2022) rapportent une moyenne annuelle d'environ 30 mm). Les températures estivales sont extrêmes, dépassant régulièrement 40°C et pouvant atteindre 45 à 50°C. L'évaporation potentielle est considérable, Zegait et al. (2022) rapportent un taux d'évaporation de l'ordre de 6 621 mm/an à In-Guezzam, ce qui rend le bilan hydrique structurellement déficitaire.

I.2.2 Caractéristiques hydrologiques des milieux arides

Les particularités hydrologiques des zones arides engendrent des comportements de ruissellement radicalement différents de ceux observés en milieu tempéré :

- Sol encroûté et faible capacité d'infiltration : les sols arides, soumis à des cycles répétés de dessèchement intense, développent souvent une croûte superficielle imperméable (croûte de battance) qui réduit dramatiquement la capacité d'infiltration. Lors d'un épisode pluvieux intense, l'essentiel de la pluie s'écoule en surface, générant un ruissellement Hortonien quasi immédiat.

- Couverture végétale quasi inexistante : la faiblesse ou l'absence de végétation prive le sol de tout amortissement de l'impact des gouttes de pluie et supprime la résistance hydraulique naturelle au ruissellement. Elle favorise également l'érosion par splash et l'entraînement des fines particules.
- Réseaux hydrographiques endoréiques ou à faible densité de drainage : les oueds sahariens, à régime intermittent ou éphémère, restent secs la majeure partie de l'année. Lors d'un épisode de crue, leur section transversale, peu adaptée aux débits exceptionnels, est rapidement dépassée.
- Coefficient de ruissellement très élevé lors des épisodes intenses : alors qu'en temps normal le ruissellement est quasi nul, lors d'une précipitation intense, le coefficient de ruissellement peut atteindre des valeurs de 0,6 à 0,9, générant des débits de pointe d'une intensité comparable à celle de bassins beaucoup plus humides.

Ces caractéristiques confèrent aux crues sahariennes une dynamique extrêmement rapide. À In-Guezzam, Zegait et al. (2022) montrent que des précipitations de 53 mm tombées en quelques heures ont suffi, le 4 août 2018, à inonder 272 hectares de la ville, soit 41 % de la surface urbaine totale, provoquant l'effondrement de plus de 100 maisons et le déplacement d'environ 345 familles.

I.2.3 La paradoxe des inondations en milieu aride

La paradoxie fondamentale des inondations en milieu aride tient au fait que des régions structurellement déficitaires en eau peuvent connaître des épisodes de crues d'une violence extrême. Cette apparente contradiction s'explique par la conjonction de plusieurs facteurs : (i) la concentration temporelle des précipitations, qui tendent à tomber en quelques événements intenses au lieu d'être distribuées sur l'année ; (ii) la faible capacité de rétention du sol, qui transforme quasi instantanément la pluie en ruissellement ; et (iii) la morphologie des bassins versants sahariens, souvent à forte pente relative et à faible végétation, qui accélère la concentration des écoulements.

Comme le soulignent Hafnaoui et al. (2022), les régions arides et semi-arides ne sont nullement à l'abri du danger des inondations, bien qu'elles reçoivent peu de précipitations. Les crues éclairs qui y surviennent sont généralement caractérisées par des averses sporadiques, de courte durée et de forte intensité, dont les effets sont amplifiés par les spécificités physiques de ces milieux.

I.3 Facteurs générateurs des inondations dans le sud algérien

I.3.1 Facteurs climatiques et pluviométriques

Le régime pluviométrique du sud algérien se distingue par une irrégularité interannuelle et intra-annuelle extrême. Les précipitations, rares mais intenses, se concentrent principalement entre juillet et septembre dans l'extrême-sud (influence de la mousson africaine), et entre septembre et novembre dans les régions présahariennes (influence méditerranéenne).

L'analyse des données pluviométriques réalisée par Zegait et al. (2022) à In-Guezzam sur la période 1988-2018, à l'aide du test de Mann-Kendall et de l'estimateur de pente de Sen, révèle une tendance à l'augmentation des précipitations maximales journalières, cohérente avec les projections climatiques globales prévoyant une intensification des événements extrêmes dans les régions arides. Cette tendance est corroborée par Hafnaoui et al. (2022), qui, pour la région d'El Bayadh, notent que l'année 2008 a enregistré des précipitations annuelles de 484,4 mm, soit presque le double de la

moyenne interannuelle de 265,68 mm.

À Tamanrasset, Madi et al. (2023) rapportent une précipitation exceptionnelle de 79,7 mm en une seule journée (10 août 2016) à la station d'Assekrem, suffisante pour déclencher une crue importante dans la vallée. Pour les mois de juillet-août, qui concentrent l'essentiel des précipitations (respectivement 47,2 et 36 mm de moyenne mensuelle à Tamanrasset en 2016), le risque de crue est maximal.

I.3.2 Facteurs morphologiques et géomorphologiques

La morphologie des bassins versants du sud algérien joue un rôle déterminant dans la genèse et l'amplification des crues. Plusieurs caractéristiques morphométriques sont particulièrement défavorables :

- Pentcs élevées dans les secteurs montagneux (Hoggar, Tassili, Atlas saharien) générant des vitesses d'écoulement importantes et des temps de concentration courts ;
- Bassins versants à forme allongée ou ramifiée concentrant rapidement les eaux dans un axe principal ;
- Absence de zones de rétention naturelle (plaines d'inondation, zones humides) permettant de laminer les crues ;
- Lit majeur des oueds peu défini, avec des berges basses et instables facilitant les débordements latéraux ;
- Transport solide considérable lié à l'érodibilité élevée des sols désertiques et à l'absence de couverture végétale protectrice.

À titre d'exemple, Zegait et al. (2022) caractérisent le bassin versant d'In-Guezzam par un indice de Gravelius (KG) de 2,24 à 2,45 (forme très allongée), une pente moyenne de 0,35 % et une densité de drainage de 1,65 selon la loi de Horton. Ces paramètres induisent un comportement hydrologique de type « crue-décru » très rapide. À Béchar, Bekhira et al. (2019) rapportent une pente du bassin versant de 3,21 m/km et un temps de concentration de 26,5 heures, paramètres qui permettent à l'eau de se déplacer très rapidement vers la ville lors d'épisodes pluvieux intenses.

I.3.3 Facteurs anthropiques et urbanistiques

L'extension urbaine incontrôlée dans les lits majeurs des oueds est l'un des facteurs aggravants les plus documentés dans la littérature algérienne. Hafnaoui et al. (2022) soulignent que la constriction causée par l'expansion urbaine le long des berges de l'Oued Deffa à El Bayadh a considérablement réduit la section transversale du cours d'eau, augmentant d'autant le risque de débordement lors des épisodes de crue.

À El Bayadh, la croissance démographique a été spectaculaire : la population est passée de 15 221 habitants en 1966 à 108 017 en 2015, soit une multiplication par sept en cinquante ans, avec un taux d'accroissement annuel moyen de 3,8 %. Cette urbanisation accélérée s'est accompagnée d'une imperméabilisation croissante des surfaces et d'une densification des constructions dans des zones naturellement inondables.

L'inadaptation des réseaux d'évacuation des eaux pluviales constitue un autre facteur aggravant majeur. Hafnaoui et al. (2023) notent que l'absence ou l'insuffisance des collecteurs d'eaux pluviales contribue à la stagnation des eaux de ruissellement et à l'amplification du risque d'inondation, même pour des précipitations d'intensité modérée. Remini (2023) observe que les systèmes d'évacuation des eaux pluviales (réseaux d'assainissement et exutoires de crue) sont actuellement sous-dimensionnés face aux nouvelles crues caractéristiques du changement climatique.

I.3.4 Changement climatique et nouvelles tendances

Le changement climatique constitue un facteur amplificateur de premier ordre dans l'évolution du risque d'inondation au Sahara algérien. Remini (2023) développe le concept de « nouveau climat méditerranéen », caractérisé par une longue période de sécheresse marquée par des températures record dépassant 40°C, suivie d'une courte période humide ponctuée de pluies violentes engendrant des crues torrentielles. Ce schéma, jadis propre au Sahara, tend à se généraliser à l'ensemble du bassin méditerranéen.

Sur le plan mécanistique, plusieurs processus contribuent à cette évolution : (i) l'augmentation des températures accroît l'évaporation et intensifie le cycle hydrologique, favorisant des précipitations plus intenses lors des épisodes convectifs ; (ii) le déplacement vers le nord de la Zone de Convergence Intertropicale expose des régions autrefois préservées à des pluies de mousson africaine ; (iii) la sécheresse prolongée induit une imperméabilisation accrue des sols, exacerbant le ruissellement lors des épisodes pluvieux.

Les projections climatiques pour l'Afrique du Nord convergent vers un scénario d'aggravation : augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes, prolongation des périodes de sécheresse, et augmentation des températures maximales. Selon les données de l'Organisation Météorologique Mondiale, l'Afrique s'est réchauffée à un rythme d'environ +0,3°C par décennie entre 1991 et 2023, soit légèrement plus rapidement que la moyenne mondiale.

I.4 Inventaire des principales inondations dans le sud algérien

I.4.1 Bilan global des inondations en Algérie (1969-2022)

L'étude de Hafnaoui et al. (2023), conduite sur la base des données de la Protection Civile, de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques et de la presse nationale, fournit un bilan quantitatif précieux des inondations en Algérie sur la période 1969-2022. Sur cette période, 191 événements d'inondation ont été répertoriés, ayant causé 2 098 décès.

L'analyse temporelle révèle deux sous-périodes distinctes : la première (1969-2009), caractérisée par la présence de crues dévastatrices à fort bilan humain (avec un pic exceptionnel en 2001 lors de la catastrophe de Bab El Oued, à Alger, qui a causé plus de 900 victimes) ; la seconde (2010-2022), marquée par une plus grande fréquence des événements (avec un maximum de 14 inondations en 2015) mais avec un nombre de victimes généralement moindre par événement, en lien probable avec l'amélioration des systèmes d'alerte et de la prise de conscience du risque.

L'analyse saisonnière montre que les mois d'août, septembre et octobre concentrent la majorité des événements sur la période 2010-2022. Ce résultat est cohérent avec les mécanismes physiques invoqués : les températures élevées de l'été augmentent l'imperméabilité des sols et, lors des premières pluies automnales, les coefficients de ruissellement sont maximum.

L'analyse spatiale révèle que les wilayas les plus affectées au cours de la période récente (2010-2022) incluent des entités du sud et du semi-aride : Djelfa, M'sila, Tamanrasset, Tiaret, Batna, Oran et Médéa. La présence de Tamanrasset dans ce classement illustre bien la vulnérabilité spécifique des régions sahariennes.

I.4.2 Grandes inondations du sud algérien

I.4.2.1 Ghardaïa — Crue de l'Oued M'Zab (Octobre 2008)

La crue de l'Oued M'Zab du 1er octobre 2008 reste l'une des catastrophes hydrologiques les plus marquantes de l'histoire récente du Sahara algérien. Hafnaoui et al. (2022) mentionnent un débit de

pointe estimé à 3 200 m³/s pour cet événement, ayant causé 47 décès et des dommages matériels considérables. L'événement a mis en évidence la vulnérabilité extrême de la ville de Ghardaïa, dont l'architecture traditionnelle en pisé, si bien adaptée au climat aride, est particulièrement sensible à l'action érosive des eaux de crue chargées de sédiments.

La région du M'Zab présente des caractéristiques géomorphologiques qui amplifient le risque : les populations se sont historiquement installées sur les rives des oueds pour bénéficier des ressources hydriques lors des épisodes pluvieux, sans anticiper la violence des crues occasionnelles. Des études ultérieures, dont celle de Benaouadj (2011) utilisant le logiciel HEC-RAS pour modéliser les écoulements dans l'Oued M'Zab, ont contribué à mieux caractériser le risque et à planifier des mesures de protection.



Figure I-1 : Crue de l'Oued Mzab le 01 octobre 2008

I.4.2.2 Béchar, Crues de 2008, 2012 et 2014

La ville de Béchar, située dans le sud-ouest algérien, a été frappée par des inondations significatives en 2008, 2012 et 2014. Bekhira et al. (2019) attribuent ces inondations à la conjonction de trois facteurs : l'intensité des précipitations, les spécificités morphologiques du bassin versant de l'Oued Béchar (superficie de 6 858 km², pente de 3,21 m/km, longueur du cours d'eau principal de 140 km, temps de concentration de 26,5 heures), et l'extension urbaine le long des berges de l'oued.

L'étude hydraulique menée par Bekhira et al. (2019) à l'aide du logiciel HEC-RAS, pour des périodes de retour de 25, 50 et 100 ans, a permis d'identifier les zones à risque d'inondation et de proposer des aménagements hydrauliques appropriés (rectification du profil en long, élargissement de la section transversale, construction de digues de protection) pour réduire le risque d'inondation centennale dans la ville.



Figure I-2 : Inondations Bechar-2014

I.4.2.3 El Bayadh ,Crue d'Octobre 2011

La crue d'El Bayadh du 1er octobre 2011 est l'une des inondations les plus documentées dans la littérature scientifique algérienne récente. Elle a causé 12 décès, des dizaines de blessés, l'effondrement de 2 ponts et la destruction de centaines de maisons. Hafnaoui et al. (2022) estiment le débit de la crue à 426,45 m³/s, sur la base d'une étude hydrologique fondée sur les précipitations enregistrées (60 mm) par la station météorologique d'El Bayadh.

L'analyse des facteurs causaux réalisée par Hafnaoui et al. (2022) met en évidence le rôle prépondérant de l'expansion urbaine dans l'étranglement de la section de l'Oued Deffa, qui traverse la ville. La réduction de la section hydraulique disponible augmente la vitesse d'écoulement et, par voie de conséquence, la hauteur d'eau pour un débit donné, multipliant les risques de débordement. L'étude propose une cartographie détaillée du risque d'inondation à partir d'une modélisation HEC-RAS couplée au SIG (ArcGIS), constituant un outil de référence pour la planification des aménagements de protection.



Figure I-2 : Inondations El Bayadh -2011

I.4.2.4 Tamanrasset ,Crues récurrentes (2015-2018)

La région de Tamanrasset est soumise à un risque d'inondation récurrent lié à la conjonction de facteurs hydrologiques, morphologiques et anthropiques. Le bassin versant de la vallée couvre une superficie de 489,87 km², s'étendant depuis les plateaux de l'Assekrem (2 800 m d'altitude) jusqu'à la ville de Tamanrasset (1 358 m), soit un dénivelé de près de 1 450 m sur une distance relativement courte, ce qui confère au cours d'eau une pente longitudinale élevée (environ 0,7 %) et une grande capacité de transport.

Madi et al. (2023) ont répertorié les principales crues de la dernière décennie : crue de 1977 (150 familles affectées, 25 maisons effondrées), crue de 1997 (600 familles affectées, tous les oueds de Tamanrasset touchés), crue d'août 2015 (13 décès, 52 maisons complètement détruites, 26 partiellement), et crue d'août 2018 (catastrophe majeure : 963 familles affectées, 519 maisons partiellement effondrées, 223 maisons complètement effondrées). L'étude hydraulique réalisée par Madi et al. (2023) à l'aide d'HEC-RAS 1D, couplé à HEC-GeoRAS en environnement SIG, a permis de cartographier les zones inondables pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans, fournissant une base scientifique solide pour la gestion du risque.



Figure I-1 : Inondations de Tamanrasset

I.4.2.5 In-Guezzam ,Crue catastrophique d'Août 2018

La crue d'In-Guezzam du 4 août 2018 constitue un cas d'étude remarquable pour l'analyse des inondations dans l'extrême-sud saharien algérien. Zegait et al. (2022) ont mené une étude hydrologique et hydraulique approfondie de cet événement, constituant ,selon les auteurs ,la première étude scientifique sur la situation hydrologique de cette région frontalière avec le Niger.

L'événement du 4 août 2018 s'est déclenché après des précipitations d'environ 53 mm tombées en quelques heures, sur une région recevant en moyenne 30 mm par an. Le bilan a été lourd : 272 hectares de la ville inondés (41 % de la surface urbaine), plus de 100 maisons effondrées, environ 345 familles déplacées. L'étude de Zegait et al. (2022) combine une analyse des tendances climatiques sur 30 ans (test de Mann-Kendall et estimateur de pente de Sen) et une modélisation hydraulique HEC-RAS, permettant à la fois de contextualiser l'événement dans l'évolution climatique à long terme et de cartographier les zones à risque pour différentes périodes de retour.

Les paramètres physiographiques du bassin versant d'In-Guezzam, déterminés par Zegait et al. (2022), révèlent une géométrie très allongée (indice de Gravelius $KG = 2,24$ pour le sous-bassin Sahb El-Rahala et 2,45 pour Adakh-Adakh) et une pente moyenne de 0,35 %, paramètres qui, combinés à la quasi-absence de végétation et à la géologie imperméable, expliquent la rapidité et la violence des réponses hydrologiques observées.



Figure I-2 : Inondations In-Guezzam-2018

I.6 Conséquences et impacts des inondations en zones arides

I.6.1 Pertes humaines et impacts sociaux

Les inondations dans les zones arides du sud algérien ont causé des pertes humaines significatives. L'analyse de Hafnaoui et al. (2023) sur la période 1969-2022 recense 2 098 décès pour 191 événements d'inondation sur l'ensemble du territoire algérien. Parmi les événements affectant le sud, la crue de Ghardaïa en 2008 (47 morts), celle de Laghouat en 1995 (40 morts), de Tamanrasset en 2015 (13 morts) et de Biskra en 1969 (28 morts) constituent les épisodes les plus meurtriers.

Au-delà du bilan direct en vies humaines, les impacts sociaux sont considérables : déplacements de populations, destruction de l'habitat (souvent construit en matériaux locaux traditionnels particulièrement sensibles à l'humidité, comme l'adobe ou la brique de terre crue), perturbations des activités économiques et agricoles, et traumatismes psychologiques durables. À Tamanrasset lors de la crue d'août 2018, pas moins de 963 familles ont été affectées, avec 223 maisons complètement effondrées, illustrant l'ampleur des conséquences sociales de ces événements.

I.6.2 Impacts sur les infrastructures

Les inondations dans les zones arides causent des dommages considérables aux infrastructures de communication et aux équipements urbains. Les routes et pistes, souvent non imperméabilisées, sont facilement emportées ou dégradées par les eaux de ruissellement et l'érosion. Les ponts, fréquemment sous-dimensionnés pour des débits de crue centennaux, sont exposés à l'affouillement de leurs fondations et à la rupture.

Les réseaux d'assainissement et d'eau potable, insuffisamment protégés contre les crues, sont également vulnérables. Les canalisations enterrées peuvent être exposées lors des crues à une pression hydrodynamique importante, conduisant à des ruptures et à des contaminations du réseau d'eau potable. Les stations de pompage situées en zone inondable peuvent être mises hors service, perturbant durablement l'approvisionnement en eau des populations.

Le paradoxe des crues sahariennes réside également dans leur impact sur les ressources en eau : d'un côté, elles constituent une source de recharge importante des nappes phréatiques et des foggaras ; de l'autre, elles provoquent l'envasement des barrages et des retenues collinaires, réduisant leur capacité de stockage. Remini (2022) souligne que les crues drainent des quantités considérables de boue qui se déposent dans les retenues, constituant un problème majeur pour la gestion à long terme des ouvrages hydrauliques.

I.6.3 Impacts environnementaux

Les conséquences environnementales des crues sahariennes sont à la fois destructrices et, paradoxalement, bénéfiques à certains égards. Sur le plan négatif, les crues provoquent une érosion intense des sols, la dégradation des berges des oueds, la perturbation des écosystèmes ripicoles et le transport de polluants potentiellement présents dans les zones urbaines traversées.

Cependant, dans le contexte hyperaride du Sahara algérien, les crues jouent également un rôle hydrologique essentiel en rechargeant les nappes phréatiques superficielles, alimentant les zones humides temporaires (dayas), et permettant la germination des espèces végétales adaptées aux épisodes pluvieux exceptionnels. Les « verdissements » du Sahara observés par satellite après des épisodes pluvieux exceptionnels illustrent cette capacité de régénération.

I.7.3 Défis spécifiques au contexte saharien

La gestion du risque d'inondation dans le sud algérien se heurte à des défis spécifiques liés aux conditions extrêmes de ce milieu :

- **Rareté et discontinuité des données hydro-climatologiques** : le réseau de stations météorologiques et hydrométriques est insuffisant dans les régions sahariennes, rendant difficile l'analyse fréquentielle des crues et le calage des modèles hydrologiques.
- **Intermittence des cours d'eau** : les oueds sahariens à régime éphémère ne permettent pas l'utilisation des méthodes classiques d'analyse fréquentielle des débits, nécessitant le recours à des approches alternatives (méthodes pluie-débit, analyses régionales).
- **Violence et rapidité des crues** : le temps de réaction extrêmement court entre la précipitation et la pointe de crue (parfois inférieur à une heure) laisse peu de temps pour la mise en alerte et l'évacuation des populations.
- **Vulnérabilité du bâti traditionnel** : les constructions en matériaux locaux traditionnels (pisé, adobe, banco) sont particulièrement sensibles à l'eau, s'effondrant rapidement lors des inondations. L'amélioration de la résistance du bâti aux crues constitue un enjeu majeur.
- **Ressources financières limitées** : les communes du sud algérien disposent souvent de ressources budgétaires insuffisantes pour réaliser les aménagements hydrauliques nécessaires à la protection des populations.

I.8 ,Synthèse sur les inondations dans les zones arides

La revue de la littérature présentée dans ce chapitre met en lumière plusieurs enseignements fondamentaux sur les inondations dans les zones arides et le sud algérien :

- **Un risque paradoxal mais réel** : les zones arides du Sahara algérien sont exposées à un risque d'inondation significatif, malgré ,et en partie à cause de ,leur aridité structurelle. La rareté des précipitations n'est pas synonyme d'absence de risque, bien au contraire.
- **Une aggravation sous l'effet du changement climatique** : les tendances climatiques observées convergent vers une intensification des précipitations extrêmes et une modification des régimes hydrologiques, augmentant la fréquence et la sévérité des crues soudaines dans les régions arides. Le concept de « nouveau climat méditerranéen » de Remini (2023) capture bien cette évolution.
- **Le rôle aggravant de l'urbanisation incontrôlée** : l'expansion urbaine dans les lits majeurs des oueds est documentée comme l'un des principaux facteurs aggravants dans toutes les villes du sud algérien étudiées (Tamanrasset, El Bayadh, Béchar, In-Guezzam). La réduction des sections hydrauliques et l'imperméabilisation des surfaces amplifient significativement le risque.
- **Des outils de modélisation disponibles et validés** : la combinaison HEC-HMS/HEC-RAS/SIG constitue aujourd'hui l'approche méthodologique standard pour l'analyse du risque d'inondation dans le contexte algérien. Son efficacité a été démontrée dans de nombreuses études sur des bassins versants sahariens et semi-arides.
- **Un déficit de données et d'études dans l'extrême-sud** : si les grandes villes du nord du pays et les régions semi-arides ont fait l'objet d'études relativement nombreuses, l'extrême-sud saharien reste largement sous-étudié. L'étude pionnière de Zegait et al. (2022) sur In-Guezzam illustre à la fois l'urgence et la faisabilité de telles analyses dans ces régions.

Conclusion

Ce chapitre a établi le cadre conceptuel et scientifique nécessaire à l'analyse des inondations dans les zones arides et le sud algérien. Il ressort de cette synthèse que les crues soudaines (flash floods) constituent un phénomène naturel majeur dans ces milieux, dont la compréhension exige une approche multidisciplinaire intégrant climatologie, hydrologie, hydraulique, géomorphologie et sciences de l'environnement urbain.

L'inventaire des principaux épisodes d'inondation dans le sud algérien ,de Ghardaïa à In-Guezzam, en passant par Tamanrasset, El Bayadh et Béchar ,révèle une tendance préoccupante à l'aggravation du risque, sous l'effet conjugué du changement climatique et de la pression anthropique. La communauté scientifique algérienne a développé, au cours de la dernière décennie, un corpus méthodologique solide fondé sur la modélisation hydraulique HEC-RAS couplée aux outils SIG, permettant de cartographier les zones à risque et de dimensionner des mesures de protection.

La présente étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux et ambitionne d'apporter une contribution originale à la caractérisation et à la gestion du risque d'inondation dans le contexte spécifique du sud algérien, avec les implications pratiques qui en découlent pour la protection des populations et le développement durable de ces territoires.

Chapiter II

État de l'Art sur les inondations

Chapitre II - État de l'Art sur les inondations

Introduction

Les inondations figurent parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus destructrices à l'échelle mondiale. En Algérie, notamment dans les zones arides et semi-arides du Sud, des pluies intenses et soudaines peuvent provoquer des crues dévastatrices. Ce chapitre présente un état de l'art sur les inondations, en abordant leurs concepts, les spécificités hydrologiques des milieux arides, les méthodes de modélisation, l'apport des SIG, la cartographie du risque et les stratégies de prévention.

I.1.1 L'inondation et processus physique

Une inondation correspond à une élévation temporaire du niveau de l'eau entraînant la submersion de zones habituellement sèches. Elle résulte d'une interaction complexe entre les précipitations, le ruissellement, les caractéristiques morphologiques du bassin versant et les facteurs anthropiques (imperméabilisation des sols, urbanisation des zones inondables, etc.).

D'après la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, une inondation se définit comme le débordement temporaire par l'eau de terres qui ne sont normalement pas couvertes par l'eau. Cette définition englobe les inondations causées par les cours d'eau, les lacs, les eaux souterraines ainsi que les eaux de ruissellement pluvial.

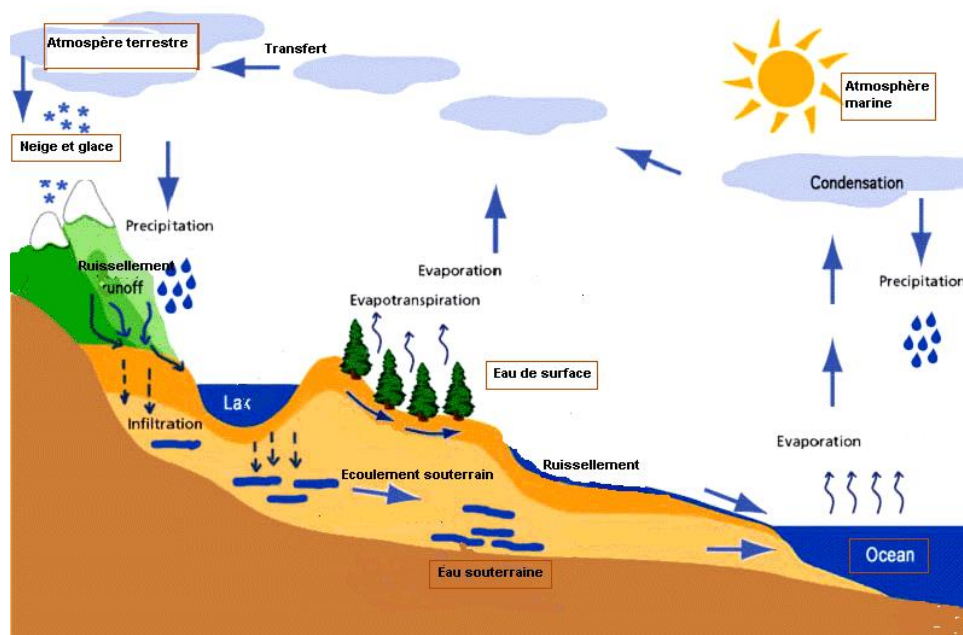


Figure I.1 : Schéma conceptuel du cycle hydrologique et genèse des inondations

Du point de vue physique, le processus d'inondation peut être décomposé en trois phases successives

- Phase de genèse : accumulation des précipitations et saturation du bassin versant
- Phase de propagation : transit de l'onde de crue dans le réseau hydrographique
- Phase de submersion : débordement du cours d'eau et expansion dans la plaine inondable

I.1.2 Terminologie morphologique des lits fluviaux

Terme	Définition
Lit mineur	Espace fluvial constitué d'un ou plusieurs chenaux, recouvert par les eaux lors des écoulements à plein bord, avant tout débordement. Le cours d'eau s'y écoule en période de basses eaux et de débit moyen annuel.
Lit moyen	Zone intermédiaire correspondant aux crues fréquentes (période de retour 1 à 10 ans), couverte par les eaux lors de crues modérées.
Lit majeur	Espace compris entre le lit mineur et la limite atteinte par la plus grande crue historique connue. Il constitue le champ d'expansion naturel des crues exceptionnelles.
Plaine inondable	Zone plate bordant un cours d'eau, susceptible d'être submergée lors de crues importantes et formée par les dépôts alluviaux successifs du fleuve.
Bassin versant	Aire géographique au sein de laquelle les eaux de ruissellement convergent vers un même exutoire (cours d'eau, lac ou mer).
Zone humide riveraine	Ecosystème de transition entre le milieu aquatique et terrestre, jouant un rôle tampon majeur lors des événements de crues.

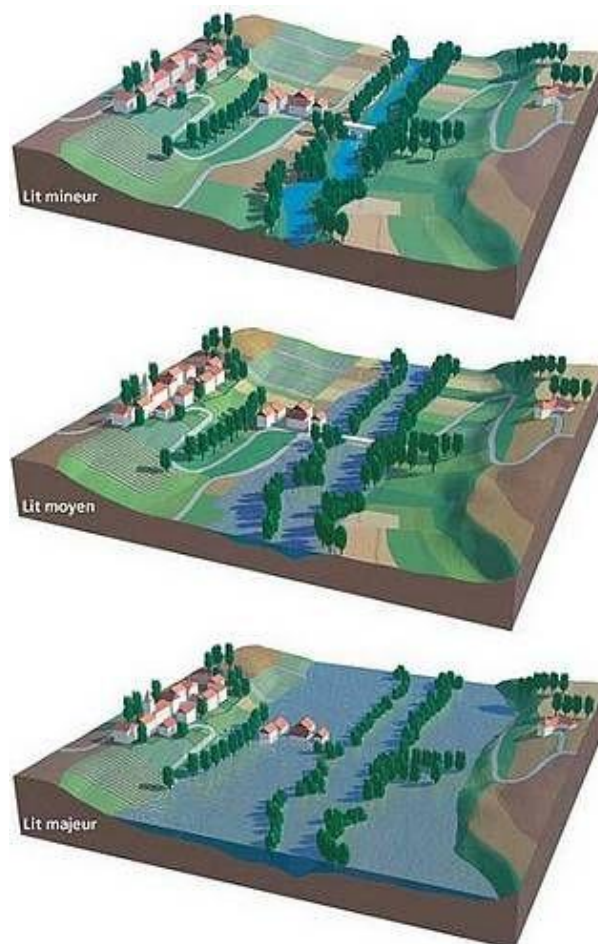


Figure II-2 : Topographie d'une plaine d'inondation et représentation des différents lits fluviaux

1.3 Types d'inondations selon le mécanisme de genèse

Les inondations peuvent être classées selon le mécanisme hydrologique à l'origine de leur formation. Cette classification est fondamentale pour orienter le choix des méthodes de modélisation et des mesures de protection adaptées.

a) Inondation par débordement direct (crue fluviale)

Ce type d'inondation se produit lorsque le débit du cours d'eau dépasse la capacité du lit mineur, entraînant le débordement dans le lit majeur. Il survient généralement après de fortes précipitations prolongées ou une fonte neigeuse importante. Les zones situées à proximité immédiate des cours d'eau sont les plus exposées. On distingue deux sous-types selon la dynamique temporelle :

- Crues océaniques (ou lentes) : montée progressive sur plusieurs jours, généralement prévisibles
- Crues torrentielles (flash floods) : développement en moins de 24 heures, particulièrement destructrices dans les zones de relief accidenté et les régions méditerranéennes ou arides

b) Inondation par remontée de nappe phréatique

Ce type d'inondation se produit lorsque le niveau de la nappe phréatique atteint la surface du sol, provoquant une saturation de la zone vadose. Ce phénomène est particulièrement insidieux car il peut toucher des zones éloignées des cours d'eau et persister longtemps après la fin des précipitations.

c) Inondation par ruissellement pluvial

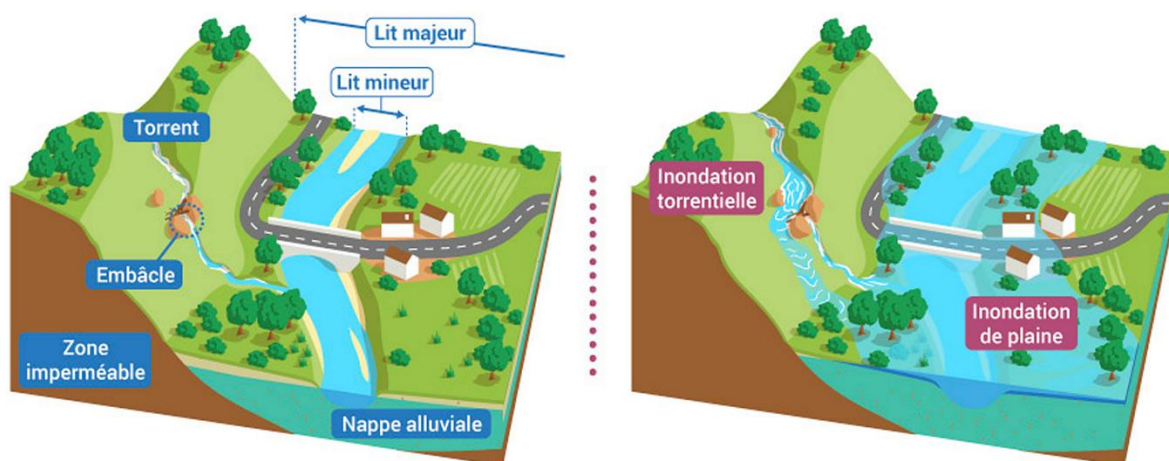
Ce type d'inondation se produit lorsque l'eau de pluie ne peut pas s'infiltrer ou être évacuée rapidement. Il est particulièrement fréquent en milieu urbain en raison de l'imperméabilisation des sols (bitume, toitures, trottoirs) et de l'insuffisance des réseaux de drainage.

d) Inondation par rupture d'ouvrage hydraulique

Ce type d'inondation résulte de la défaillance soudaine d'une digue, d'un barrage ou de tout ouvrage de protection hydraulique. Il se caractérise par une montée extrêmement rapide des eaux et une énergie destructrice considérable. La difficulté de prévision rend ce type d'inondation particulièrement dangereux pour les populations.

e) Inondation côtière

Provoquée par des tempêtes, des tsunamis ou une élévation du niveau marin, ce type d'inondation affecte les zones littorales et peut pénétrer profondément dans les terres estuariennes.



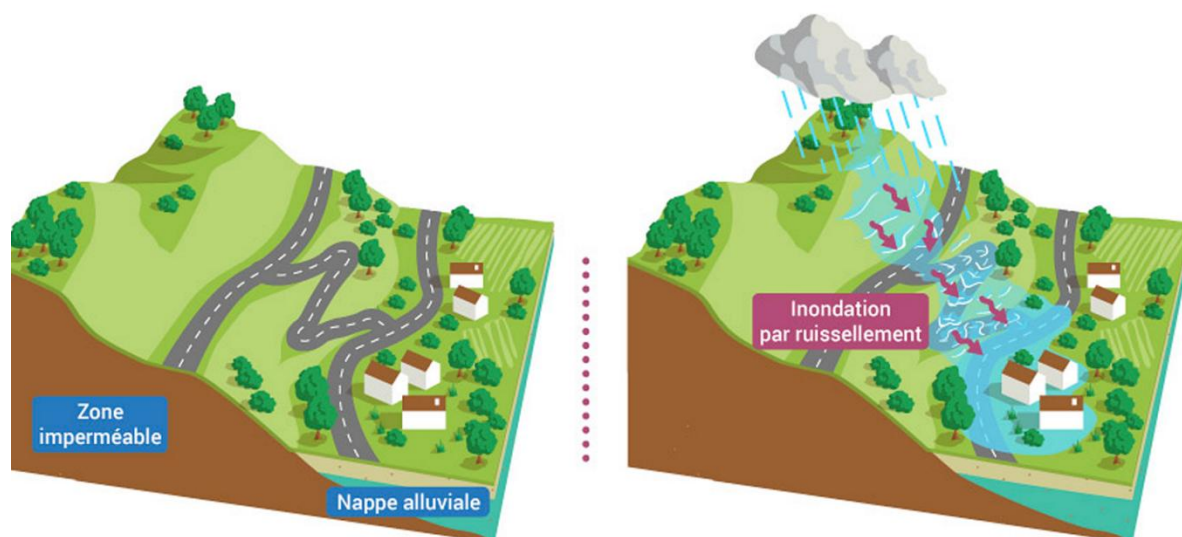


Figure I.3 : Schéma typologique des principaux mécanismes d'inondation

I.2 Ruissellement, crue et résilience hydrologique

I.2.1 Le ruissellement

Le ruissellement est défini comme la fraction des précipitations qui ne s'infiltre pas dans le sol et ne s'évapore pas, mais s'écoule à la surface vers les cours d'eau. Ce processus constitue le principal mécanisme de transfert des pluies vers le réseau hydrographique et donc le facteur déclenchant des inondations.

Théorie du ruissellement hortonien (Horton, 1933)

Le concept de ruissellement hortonien, développé par Robert E. Horton, postule que le ruissellement se déclenche lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol. Ce modèle est particulièrement pertinent dans les zones arides où les sols présentent une faible capacité d'infiltration initiale, puis une capacité croissante avec la durée de la pluie.

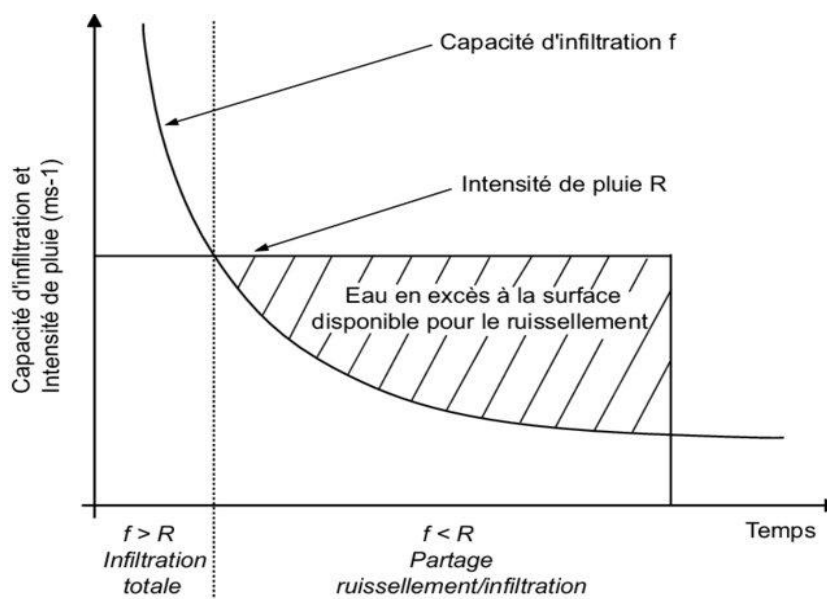


Figure I.4 : Représentation du processus de ruissellement et de ses deux principaux mécanismes de déclenchement

Le coefficient de ruissellement Cr est défini par la relation :

$$Cr = R / P \dots\dots\dots (II.1)$$

Où R représente le ruissellement (mm) et P les précipitations totales (mm). Dans les zones arides, ce coefficient est particulièrement variable, oscillant entre 0,05 et 0,80 selon la nature du sol, la pente et le couvert végétal.

I.2.2 La notion de crue

Une crue est une élévation temporaire et notable du niveau d'un cours d'eau, accompagnée d'une augmentation de son débit, pouvant conduire au débordement dans le lit majeur. Les crues sont caractérisées par les paramètres suivants :

Paramètre	Symbole	Unité	Description
Débit de pointe	Q_p	m^3/s	Débit maximal atteint lors de la crue
Temps de montée	t_m	heures	Durée entre le début et le pic de crue
Temps de base	t_b	heures	Durée totale de l'hydrogramme de crue
Volume de crue	V	m^3	Intégrale de l'hydrogramme de crue
Coefficient de crue	K	—	Rapport Q_{max} / Q_{moyen} annuel

I.2.3 La résilience hydrologique

La résilience hydrologique désigne la capacité d'un système hydrologique (bassin versant, réseau de drainage, écosystème) à absorber une perturbation telle qu'une inondation et à retrouver son état fonctionnel initial dans un délai raisonnable. Ce concept, introduit par C. S. Holling (1973) dans le champ de l'écologie, a été progressivement étendu au domaine de la gestion du risque d'inondation.

Composantes de la résilience hydrologique
Efficacité des infrastructures de drainage (capacité hydraulique des réseaux)
Capacité d'infiltration des sols (déterminée par la texture, la structure et la couverture végétale)
Présence de zones naturelles d'expansion des crues (plaines inondables, zones humides)
Systèmes d'alerte précoce et protocoles d'évacuation
Planification territoriale durable intégrant les contraintes hydrologiques
Mémoire collective et culture du risque auprès des populations exposées

I.3 Spécificités hydrologiques des zones arides et semi-arides

I.3.1 Définition et cadre géographique

Les zones arides et semi-arides se caractérisent par des conditions climatiques contraignantes, marquées principalement par une faible pluviométrie annuelle (inférieure à 400–500 mm) et une forte irrégularité temporelle et spatiale des précipitations. Ces zones couvrent approximativement 40 % de la surface émergée de la planète et abritent plus d'un tiers de la population mondiale.

En Algérie, ces zones s'étendent au-delà de l'Atlas saharien et représentent plus de 85 % du territoire national. Le sud algérien reçoit en moyenne moins de 50 mm de pluie par an dans les régions désertiques profondes, avec une variabilité interannuelle extrêmement élevée (coefficient de variation dépassant souvent 100 %).

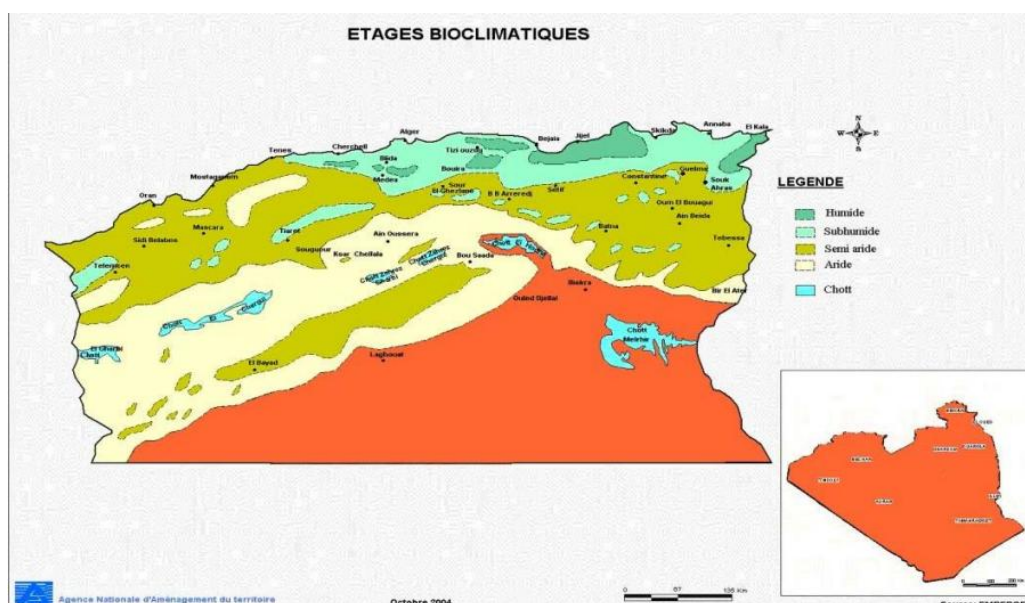


Figure I.5 : Carte de la distribution des zones sèches et arides en Algérie

I.3.2 Caractère éphémère des écoulements et crues soudaines

L'une des principales particularités hydrologiques des zones arides réside dans le caractère temporaire, localisé et imprévisible des écoulements de surface. Les cours d'eau y sont généralement à écoulement intermittent (oueds), alternant de longues périodes d'assèchement et de brusques épisodes de crue.

Ces crues soudaines (flash floods) se caractérisent par :

- Une montée extrêmement rapide du débit (quelques dizaines de minutes à quelques heures)
- Une durée totale brève (de quelques heures à deux jours)
- Une charge sédimentaire considérable (boues, blocs rocheux, arbres déracinés)
- Des débits spécifiques très élevés pouvant dépasser 5 à 10 m³/s/km² dans les petits bassins

Le débit de pointe peut être estimé à partir de la formule rationnelle :

$$Q_p = C \times I \times A / 3,6 \dots \dots \dots (II.2)$$

Où Q_p est le débit de pointe (m³/s), C le coefficient de ruissellement (sans dimension), I l'intensité de la pluie pour la durée égale au temps de concentration (mm/h), et A la superficie du bassin versant (km²).

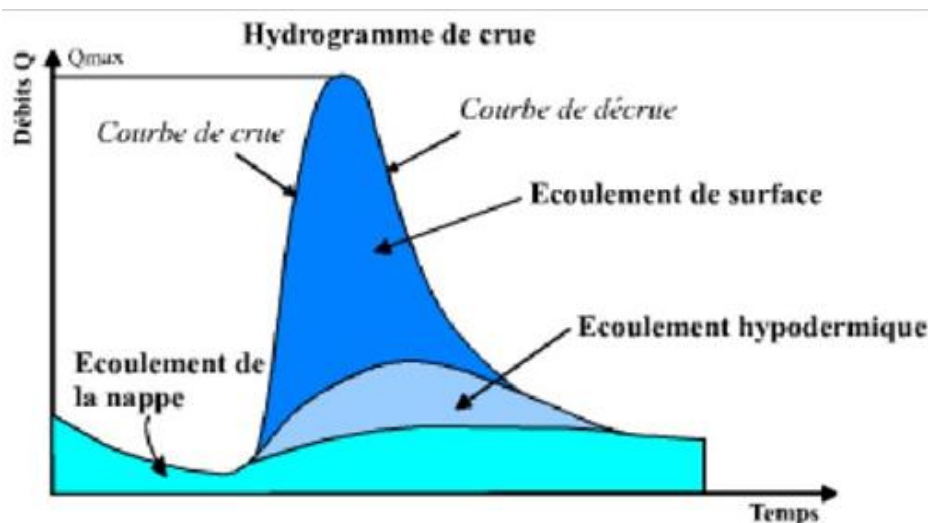


Figure I.6 : Hydrogrammes typiques des crues soudaines

I.3.3 Bilan hydrique et dominance de l'évapotranspiration

Dans les zones arides, le bilan hydrique est structurellement déficitaire. L'équation du bilan hydrique annuel s'écrit :

$$P = E + R + \Delta S \dots \dots \dots (II.3)$$

Où P représente les précipitations, E l'évapotranspiration réelle, R le ruissellement de surface et ΔS la variation du stockage (sol, nappe phréatique). Dans les milieux désertiques, on observe $E \gg R$, signifiant que la quasi-totalité des précipitations est perdue par évaporation avant de contribuer au ruissellement ou à la recharge des aquifères.

I.3.4 Difficultés de modélisation hydrologique en zones arides

Les approches hydrologiques classiques, développées dans des contextes tempérés à pluviométrie régulière, montrent des limites importantes lorsqu'elles sont appliquées aux bassins versants arides. Parmi les principales difficultés identifiées dans la littérature scientifique :

- Rareté et discontinuité des données hydrométriques (courte durée de mesure, lacunes, jaugeages en crue manquants)
- Forte variabilité spatiale des précipitations (orages convectifs localisés, gradient pluviométrique marqué)
- Non-stationnarité des séries hydrologiques liée aux changements climatiques
- Pertes par infiltration dans le lit des oueds (transmission losses), réduisant significativement le débit vers l'aval
- Inadaptation des lois statistiques classiques (Gumbel, Pearson III) à des séries courtes et hétérogènes

I.4 Approches classiques de modélisation des inondations

I.4.1 Modélisation hydrologique : transformation pluie-débit

La modélisation hydrologique vise à représenter la transformation des précipitations en débit à l'exutoire d'un bassin versant. Elle repose sur le principe fondamental de conservation de la masse appliqué au bassin versant, exprimé par l'équation du bilan hydrique :

$$P = Q + I + ET + \Delta S \dots \dots \dots (II.4)$$

Les modèles pluie-débit sont classés selon leur degré de représentation spatiale et physique du bassin versant :

Type de modèle	Caractéristiques principales
Modèles globaux (conceptuels)	Traitent le bassin versant comme une unité homogène. Adaptés aux bassins de grande superficie avec données limitées.
Modèles semi-distribués	Découpent le bassin en sous-bassins homogènes. Exemple : HEC-HMS. Équilibre entre complexité et précision. Couramment utilisés en Algérie.
Modèles distribués (physiques)	Discretisent spatialement tous les processus sur une grille. Exemples : MIKE-SHE, VIC. Demandent des données exhaustives mais très précis.
Modèles empiriques	Basés sur des relations statistiques ou empiriques (formule rationnelle, SCS-CN). Simples et rapides, adaptés aux petits bassins en données limitées.

I.4.2 Modélisation hydraulique : équations de Saint-Venant

Les modèles hydrauliques permettent de simuler la propagation des écoulements en surface libre à partir des équations de Saint-Venant. Ces équations, établies en 1871 par Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant, sont dérivées des lois fondamentales de la mécanique des fluides (conservation de la masse et de la quantité de mouvement).

a) Équation de continuité (conservation de la masse)

$$\partial h / \partial t + \partial(hu) / \partial x + \partial(hv) / \partial y = 0 \dots \dots \dots (\text{II.5})$$

Cette équation exprime que toute variation du niveau d'eau h dans une zone est liée à la divergence des flux de vitesse (u, v) dans les deux directions de l'espace.

b) Équations de quantité de mouvement

$$\partial(hu) / \partial t + \partial(hu^2) / \partial x + \partial(huv) / \partial y = -gh \cdot \partial z / \partial x - \tau_x$$

$$\partial(hv) / \partial t + \partial(huv) / \partial x + \partial(hv^2) / \partial y = -gh \cdot \partial z / \partial y - \tau_y$$

Les termes τ_x et τ_y représentent les forces de frottement de fond, généralement modélisées par la loi de Manning-Strickler :

$$u = (1/n) \times R^{(2/3)} \times S^{(1/2)} \dots \dots \dots (\text{II.6})$$

Où n est le coefficient de rugosité de Manning ($\text{s/m}^{(1/3)}$), R le rayon hydraulique (m) et S la pente de la ligne d'énergie. Le débit Q est ensuite calculé par : $Q = A \times u$, où A est la section mouillée.

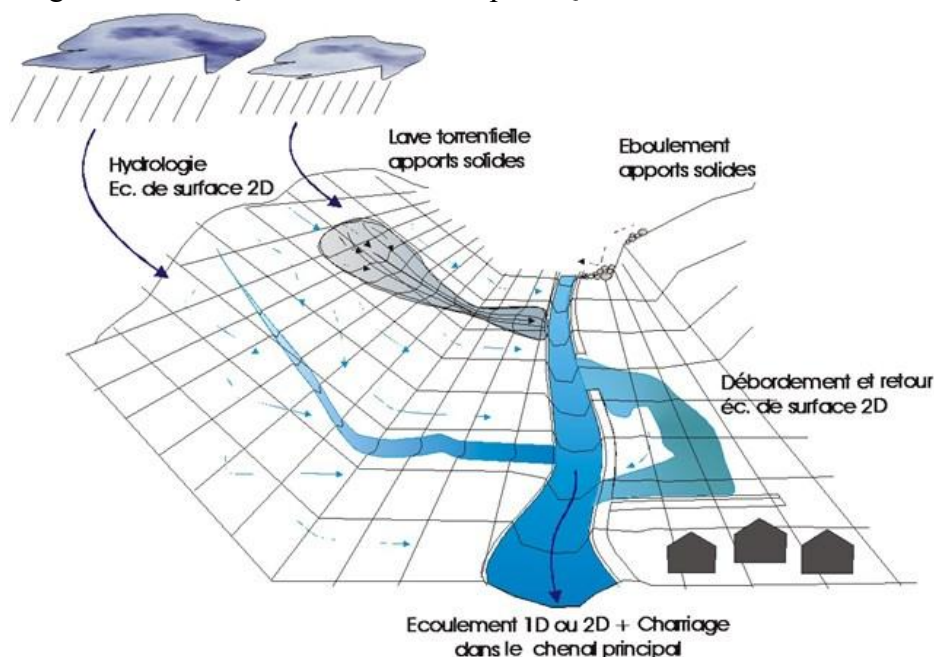


Figure I.8 : Représentation schématique de la modélisation hydraulique

I.4.3 Approches complémentaires

a) Approche hydrogéomorphologique

L'approche hydrogéomorphologique repose sur l'analyse des formes du relief pour délimiter les zones inondables sans nécessiter de modélisation numérique complexe. Elle permet d'identifier et de différencier le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur à partir de l'interprétation de photographies aériennes, d'images satellitaires et de levés topographiques. Cette méthode, peu coûteuse en données, est particulièrement pertinente dans les régions à données limitées.

b) Approche statistique et analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle des débits de crue vise à estimer, pour différentes périodes de retour T (10,

20, 50, 100 ans), les débits de pointe susceptibles de se produire. Elle repose sur l'ajustement de lois statistiques aux séries hydrométriques observées. Les distributions les plus utilisées en hydrologie algérienne sont la loi de Gumbel (valeurs extrêmes), la loi log-normale, la loi de Pearson type III et la distribution de Pareto généralisée (GPD).

c) Approche basée sur la télédétection

La télédétection satellitaire permet de cartographier l'étendue des inondations en temps quasi-réel et d'évaluer les dégâts post-crise. Les images radar (SAR) sont particulièrement adaptées car elles peuvent acquérir des données de nuit comme de jour et à travers les nuages. Les capteurs Sentinel-1 (ESA), RADARSAT et ERS-2 ont été largement utilisés pour le suivi des inondations en Afrique du Nord et au Moyen-Orient.

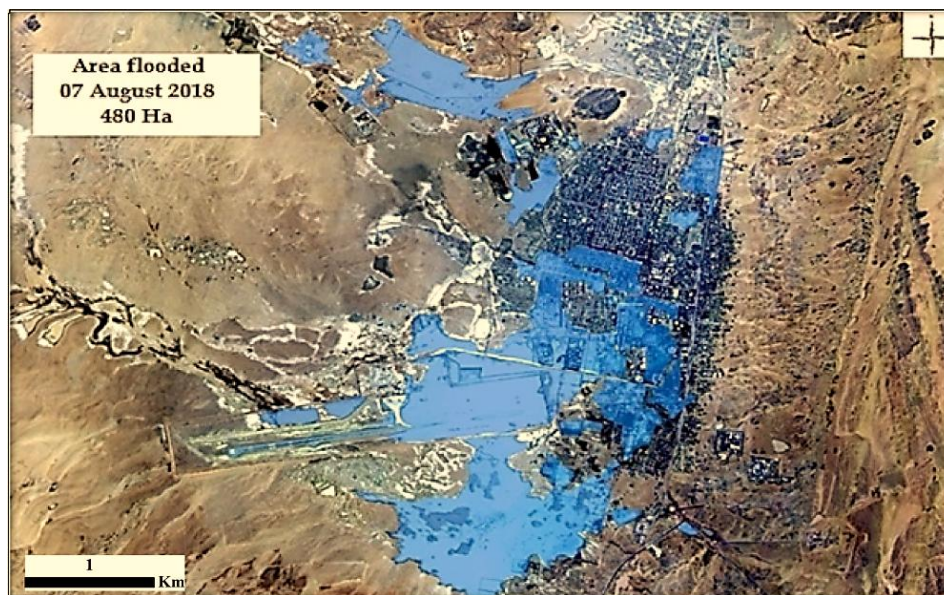


Figure I.9 : Cartographie par télédétection SAR de l'étendue spatiale d'une inondation

I.5 Outils numériques de modélisation et Systèmes d'Information Géographique

I.5.1 Le logiciel HEC-HMS : modélisation hydrologique

HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), développé par l'US Army Corps of Engineers (USACE), est aujourd'hui l'un des logiciels de modélisation hydrologique les plus utilisés à l'échelle mondiale pour la simulation des événements de crue. Il permet de représenter l'ensemble du processus de transformation pluie-débit sur un bassin versant, depuis l'interception des précipitations jusqu'à la génération des hydrogrammes à l'exutoire.

Les principales fonctionnalités de HEC-HMS incluent la modélisation des pertes par interception et infiltration (méthodes SCS-CN, Green-Ampt, Horton), la transformation pluie-débit (hydrogramme unitaire SCS, Clark, Snyder), le routage hydrologique (Muskingum, Muskingum-Cunge) et la modélisation des bassins de rétention.

I.5.2 Le logiciel HEC-RAS : modélisation hydraulique

HEC-RAS (River Analysis System), également développé par l'USACE, est le logiciel de référence mondial pour la modélisation hydraulique des rivières et des plaines inondables. Il est documenté dans l'ensemble des études scientifiques algériennes récentes traitant de la modélisation des crues (Bekhira et al., 2019 ; Hafnaoui et al., 2022 ; Madi et al., 2023 ; Zegait et al., 2022).

Le modèle 1D de HEC-RAS résout l'équation de l'énergie entre les sections transversales successives du cours d'eau par la méthode des pas standard (Standard Step Method). La version 2D, basée sur la résolution des équations de Saint-Venant sur un maillage non structuré, offre une précision nettement supérieure pour la simulation des écoulements dans les plaines inondables

complexes.

I.5.3 Rôle des SIG dans l'analyse spatiale du risque d'inondation

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) jouent un rôle central dans la chaîne de traitement des données nécessaire à l'évaluation du risque d'inondation. Ils permettent d'intégrer des données de nature hétérogène (topographie, occupation du sol, réseau hydrographique, données socio-économiques) dans un référentiel spatial commun.

Les fonctionnalités analytiques des SIG pertinentes pour l'étude des inondations comprennent :

- Analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT) : extraction du réseau de drainage, délimitation des bassins versants, calcul des pentes et des courbes de niveau
- Superposition cartographique : croisement des cartes d'aléa et de vulnérabilité pour la production de cartes de risque
- Analyse de proximité : identification des enjeux exposés selon leur distance aux cours d'eau
- Visualisation 3D et simulation de scénarios de crue

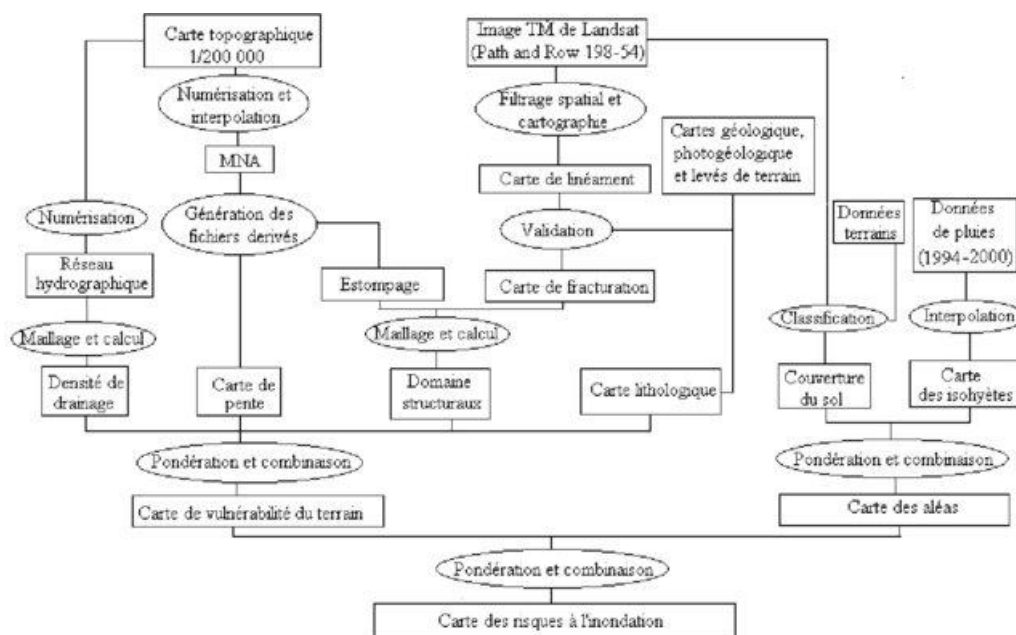


Figure I.11 : Workflow SIG pour la production d'une carte de risque d'inondation

I.5.4 Apports des plateformes géospatiales

Avec l'avènement du Big Data et l'explosion du volume des données géospatiales issues des satellites d'observation de la Terre, des plateformes de traitement cloud ont émergé comme des outils incontournables de l'analyse spatiale environnementale.

Google Earth Engine (GEE) est la plateforme cloud la plus utilisée dans la communauté scientifique pour le traitement d'archives satellitaires massives. Elle permet d'exécuter des analyses sur des pétaoctets d'images à l'échelle planétaire directement dans le navigateur, sans nécessiter d'infrastructure informatique locale.

Les avantages des plateformes cloud pour l'analyse du risque d'inondation incluent :

- Accès instantané à des archives satellitaires pluridécennales (Landsat, Sentinel, MODIS)
- Capacité de traitement massivement parallèle pour les analyses à grande échelle
- Automatisation des processus géospatiaux et reproductibilité des analyses
- Partage et collaboration facilitée autour des données et des résultats

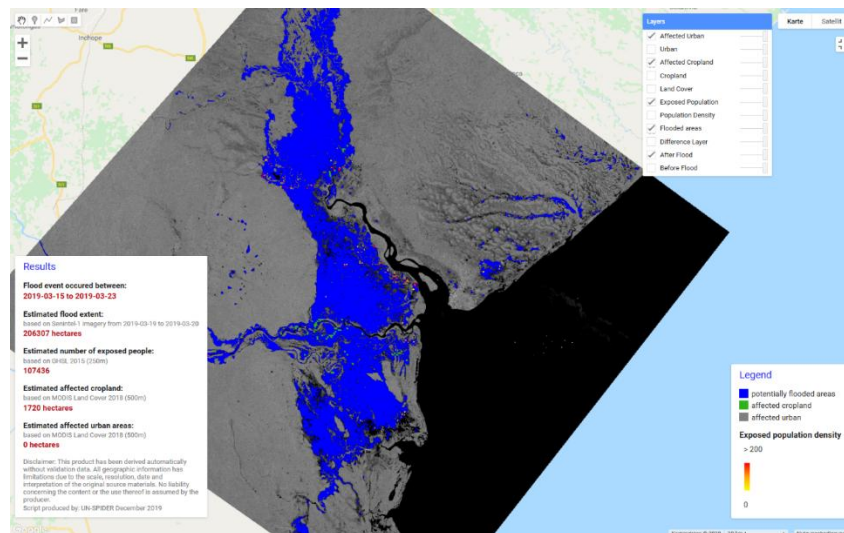


Figure I.12 : Cartographie de la fréquence d'inondation à partir de séries temporelles satellitaires traitées sur plateforme Google Earth Engin

I.5.5 Intelligence artificielle et apprentissage automatique en hydrologie

L'intégration des techniques d'intelligence artificielle (IA) et d'apprentissage automatique (machine learning) dans la modélisation hydrologique constitue l'une des avancées les plus significatives de la dernière décennie. Ces approches offrent une alternative ou un complément aux modèles physiques traditionnels, particulièrement dans les contextes à données limitées.

Méthode IA	Application en hydrologie	Avantages	Limites
Réseaux de neurones (ANN)	Prévision des débits, relation pluie-débit	Non-linéaire, adaptable	Boîte noire, surapprentissage
LSTM (Deep Learning)	Prévision de séries temporelles hydrologiques	Mémoire à long terme	Demande beaucoup de données
Random Forest	Cartographie de susceptibilité aux inondations	Robust, peu de paramètres	Non extrapolable
SVM (Support Vector)	Classification des images de crues	Efficace pour peu de données	Sensible au choix du noyau
Réseaux convolutifs (CNN)	Analyse d'images satellitaires de crues	Extraction auto de features	Requiert GPU et big data

I.6 Cartographie du risque d'inondation

I.6.1 Approche méthodologique générale

La cartographie du risque d'inondation constitue l'outil de base de la gestion préventive du risque. Elle repose sur le croisement de deux composantes fondamentales : l'aléa (probabilité d'occurrence d'un événement de crue d'une intensité donnée) et la vulnérabilité (dommages potentiels sur les enjeux exposés).

$$\text{RISQUE} = \text{ALÉA} \times \text{VULNÉRABILITÉ} \times \text{EXPOSITION}$$

L'approche méthodologique standard comprend les étapes suivantes : (1) analyse hydro-climatologique du bassin versant ; (2) modélisation hydrologique pour l'estimation des débits de pointe pour différentes périodes de retour ; (3) modélisation hydraulique pour la simulation des profils en long de la surface de l'eau ; (4) exportation des résultats dans un environnement SIG pour la production des cartes d'inondation.

I.6.2 Méthode AHP couplée au SIG

La méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), développée par Saaty (1980), est une technique de décision multicritère permettant d'intégrer des paramètres hétérogènes dans un indice composite de vulnérabilité aux inondations. Couplée au SIG, elle permet de prendre en compte simultanément de nombreux facteurs de susceptibilité :

- Altitude et pente du terrain (modèle numérique de terrain)
- Distance aux cours d'eau
- Lithologie et perméabilité des formations géologiques
- Utilisation et occupation des sols (urbain, agricole, forestier)
- Densité du réseau de drainage
- Pluviométrie et intensités de référence
- Densité de population et densité du bâti

Cette approche a été abondamment utilisée dans les études algériennes récentes (Roukh & Nadji, 2018 ; Faregh & Benkhalel, 2021 ; Hamlat et al., 2021 ; Hallil & Redjem, 2022) en complément ou en substitution à la modélisation hydraulique, particulièrement dans les régions à données hydrométriques limitées.

I.7 Gestion du risque d'inondation : stratégies et outils

I.7.1 Mesures structurelles de protection

Les mesures structurelles visent à modifier physiquement le comportement hydrologique et hydraulique du bassin versant pour réduire le risque. Dans le contexte du sud algérien, plusieurs types d'aménagements sont documentés dans la littérature scientifique récente :

a) Recalibrage des lits d'oueds

L'élargissement et/ou l'approfondissement du lit mineur permettent d'augmenter la capacité hydraulique du cours d'eau. Des études récentes (Bekhira et al., 2019) proposent plusieurs variantes d'aménagement incluant des profils en travers trapézoïdaux revêtus en béton, permettant de réduire significativement la hauteur de débordement lors des crues centennales.

b) Dignes et remblais de protection

La construction de levées de terre ou de murs en béton armé le long des berges protège les zones urbanisées contre les débordements. Ces ouvrages doivent être dimensionnés pour résister aux forces érosives considérables des crues sahariennes, chargées en sédiments et en blocs rocheux.

c) Bassins de rétention et ouvrages écrêteurs de crues

Les bassins de rétention permettent de laminer le débit de pointe des crues en stockant temporairement les excédents d'eau. Zegait et Pizzo (2023) ont développé un programme de dimensionnement en VBA permettant d'optimiser la géométrie de ces ouvrages dans le contexte des villes sahariennes.

d) Seuils de recharge dans les oueds

Dans le contexte saharien, les seuils implantés dans les lits des oueds constituent une mesure à double bénéfice : ralentissement des écoulements et favorisation de l'infiltration vers les nappes

phréatiques sous-jacentes (aquifères libres et nappe alluviale).

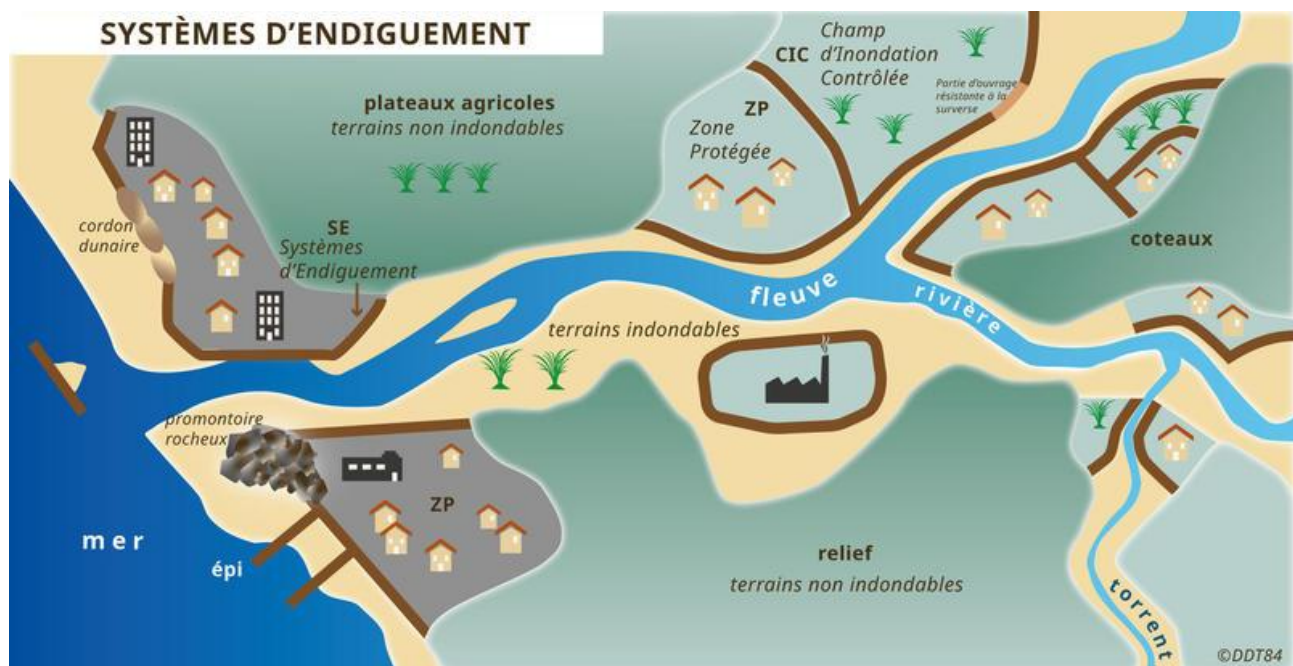


Figure I.15 : Principaux types d'ouvrages structuraux de protection contre les inondations

1.7.3 Les changements climatiques et évolution de la dangerosité

Les projections climatiques disponibles pour le pourtour méditerranéen et le Maghreb indiquent une tendance à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements précipitants extrêmes, malgré une diminution globale des cumuls pluviométriques annuels. Ce paradoxe apparent — moins de pluie globalement mais des pluies plus intenses et plus concentrées — amplifie considérablement le risque d'inondation soudaine dans les zones arides.

Les modèles climatiques régionaux (RCM) appliqués à l'Algérie (projections CORDEX-Africa, SimMED) projettent pour la fin du XXI^e siècle :

- Une augmentation des températures de +2,5 à +4°C selon le scénario d'émission
- Une réduction des précipitations annuelles de 10 à 25 % dans le nord du pays
- Une augmentation de la fréquence des événements de précipitations intenses (retour 100 ans ramené à 50 ou même 20 ans)
- Une aggravation des phénomènes de sécheresse, réduisant la capacité d'infiltration des sols lors des pluies intenses

1.8 Bilan de l'état de l'art et lacunes identifiées

1.8.1 Synthèse des avancées scientifiques récentes

L'analyse de la littérature scientifique récente sur les inondations dans les zones arides et semi-arides algériennes permet de dégager plusieurs tendances majeures :

- Généralisation des approches couplées HEC-HMS/HEC-RAS pour la modélisation des crues dans les oueds sahariens, avec une transition progressive vers les modèles 2D offrant une meilleure représentation des dynamiques d'inondation dans les plaines.
- Développement de méthodologies hybrides intégrant la modélisation hydraulique, les SIG et la télédétection pour la cartographie du risque, avec des applications documentées dans de nombreuses wilayas du Sud.

- Émergence des approches d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, LSTM, Random Forest) comme outils complémentaires aux modèles physiques, offrant des performances prédictives intéressantes même avec des données limitées.
- Reconnaissance croissante de la nécessité d'intégrer les impacts des changements climatiques dans les études de risque hydrique, avec l'adoption progressive des scénarios RCP dans les analyses fréquentielles.

I.8.2 Lacunes et problèmes non résolus

Malgré ces avancées, plusieurs lacunes importantes subsistent dans la connaissance et la gestion du risque d'inondation dans les zones arides algériennes :

Lacune identifiée	Impact sur la gestion du risque
Insuffisance des réseaux de mesure hydrométriques	Difficultés de calage et de validation des modèles, incertitudes sur les estimations de débit
Absence de bases de données historiques consolidées sur les inondations passées	Impossibilité d'analyses fréquentielles fiables, sous-estimation des aléas extrêmes
Faible intégration des approches hydrologiques dans la planification urbaine	Urbanisation non contrôlée des zones inondables, aggravation de l'exposition au risque
Manque d'outils d'alerte précoce opérationnels dans les zones isolées	Absence de délai suffisant pour l'évacuation lors des crues soudaines
Inadaptation des méthodes hydrologiques classiques aux bassins arides	Surestimation ou sous-estimation des débits de pointe, erreurs de dimensionnement

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter un état de l'art sur les inondations en mettant en évidence leur complexité, liée à l'interaction entre les précipitations, les caractéristiques des bassins versants et les facteurs anthropiques. Il ressort que les zones arides présentent des particularités hydrologiques, telles que les crues soudaines et la forte variabilité spatio-temporelle, rendant l'évaluation du risque plus complexe. Les approches de modélisation couplées, notamment HEC-HMS et HEC-RAS intégrées aux SIG, constituent aujourd'hui des outils de référence pour la cartographie du risque d'inondation, tandis que les avancées de la télédétection et de l'intelligence artificielle offrent de nouvelles perspectives d'amélioration des analyses. Enfin, une gestion efficace du risque repose sur une approche intégrée combinant prévention, aménagement territorial, ouvrages de protection et systèmes d'alerte, formant ainsi la base scientifique et méthodologique de cette étude.

CHAPITRE III

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE & HYDRO- MORPHOLOGIQUE



III. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

III.1. Situation administrative

La wilaya de Ghardaïa se situe au Sahara septentrional algérien. Elle se situe à 600 km au sud de la capitale Alger elle s'étend sur plus de 24 395 km² et est bordée, au Nord par les wilayas de Laghouat et de Djelfa, à l'Est par la wilaya de Ouargla, à l'Ouest par les wilayas d'Adrar et d'El Bayadh et au Sud par la wilaya de Meniaa.

La wilaya se compose de neuf (07) daïras et de treize (09) communes selon la dernière organisation administrative de 2021.



Figure III-1 : Situation de la wilaya de Ghardaïa

III.2. Situation de la commune de SEBSEB

La commune de SEBSEB se situe à environ 20 km de Metlili, chef-lieu daïra et 63 km de Ghardaïa, chef-lieu wilaya, elle s'étend sur une superficie de 5 640 Km² avec un pourcentage de 23% d'occupation des sols de la wilaya de Ghardaïa ;



Figure III- 2 : Situation de la zone d'étude

Le paysage de **Sebseb** est celui d'une oasis saharienne, où le couvert végétal est plus ou moins concentré grâce aux cultures, la plus marquante étant la phoeniciculture. Comme la plupart des oasis du M'Zab, elle se situe sur une vallée bordée d'escarpements rocheux de la Chebka.

La population est estimée à environ **trois milles habitants**, ceci la classe parmi les agglomérations les moins peuplées. Cette situation s'explique en partie par l'inexistence d'une diversité de ressources, le travail de la terre est l'activité et le mode de vie quasi unique.



Figure III-3 : Vue globale de la ville de SEBSEB (Google Earth)



Figure III-4 : Quartier Cité administratif à SEBSEB (vue général)

III.3. Aspect climatique

Le climat de la région de Ghardaïa est typiquement Saharien, se caractérise par deux saisons : une saison chaude et sèche (d'avril à septembre) et une autre tempérée (d'octobre à mars) et une grande différence entre les températures de l'été et de l'hiver. On enregistre une moyenne annuelle de 24°C, avec une évaporation de l'ordre de 2600 mm/an et une faible hauteur de pluies avec une moyenne de précipitations de 71 mm/an (ANRH 2020).

Tableau 1 : Caractéristiques de la station pluviométrique de Ghardaïa

Code de	Coordonnées GEO		Altitude (m)	Mise en service	Années d'Observations
13 04 27	X (degré)	Y (degré)	493	Depuis 1914	100
	03° 41' 14"	32° 29' 30'			

Tableau 2 : Données climatiques de la région de Ghardaïa (1989-2020) (ANRH, 2020).

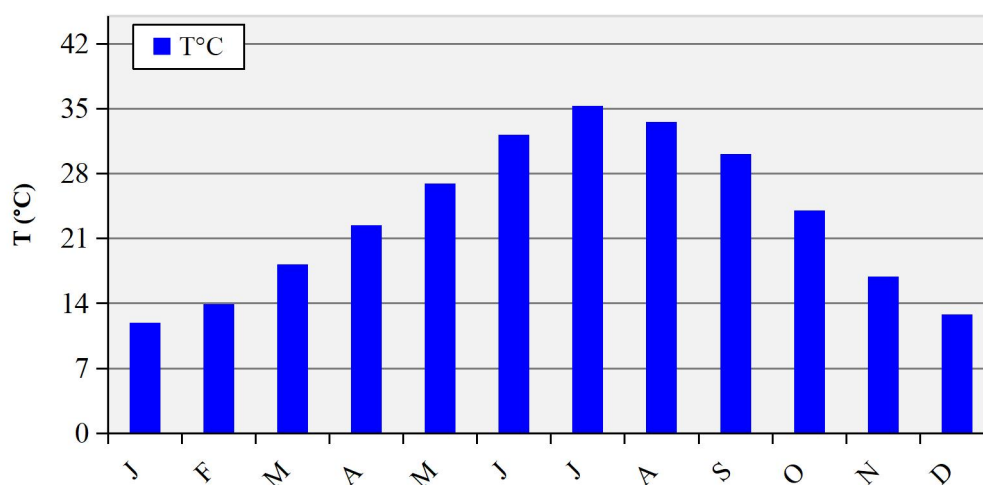
paramètres Mois	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmoy (°C)	P (mm)	Insolation (h/mois)	Vent (m/s)	Evap. (mm)	H (%)
Janvier	24,05	2,7	11,9	7,52	250	5,04	111	55,5
Février	24,65	2,7	13,9	1,89	252	4,5	133,5	45,4
Mars	30	4,1	18,2	14,50	252	6,1	167,5	39,8
Avril	34,95	10,25	22,4	6,31	301	6,5	204,5	34,5
Mai	40,4	14,05	26,9	2,27	341	6,4	225	30,1
Juin	42,35	15,95	32,2	3,75	351	6,2	360	26,2
Juillet	35,15	23,4	35,3	0,41	357	4,7	387	22
Août	43,5	23,25	33,6	1,56	345	3,1	324,5	25,3

Septembre		42,65	18,75	30,1	14,92	265	3,4	327,5	36,1
Octobre		34,45	13,45	24	5,22	292	4,7	164	45,3
Novembre		28,29	6	16,9	6,17	265	3,1	123,5	49,2
Décembre		21,5	3,25	12,8	6,78	259	3,5	68	54,9
Année	Moy	33,5	11,5	23,2	5,95	294,2	4,7	216,33	38,7
	Total	-	-	-	70,38	3824	-	2596	-

Remarque : Les données climatiques couvrent théoriquement la période 1989–2020. Toutefois, trois années ne disposent pas de données exploitables dans les archives de l'ANRH. Par conséquent, l'analyse a été réalisée sur une série effective de 29 années d'observation.

a- Température

L'analyse d'une série d'observations statistique enregistrée au niveau de la station de Ghardaïa, sur une période d'observations de 29 ans, a fait ressortir que la température moyenne mensuelle enregistrée est de 23,2°C ; avec 43,5°C pour le mois le plus chaud (août) et 2,7°C pour le mois le plus froid (janvier).



b-Précipitation

Les précipitations sont faibles et irrégulières, de 0 à 250 mm/an, la moyenne pluviométrique étant de 93,3 mm/an. Elles tombent essentiellement sous la forme de pluies d'orage, en automne et au printemps, ou septembre (19,52mm) le mois le plus pluvieux, juillet (0,53mm) mois le plus sec, durant la période d'enregistrement de 1989-2020.

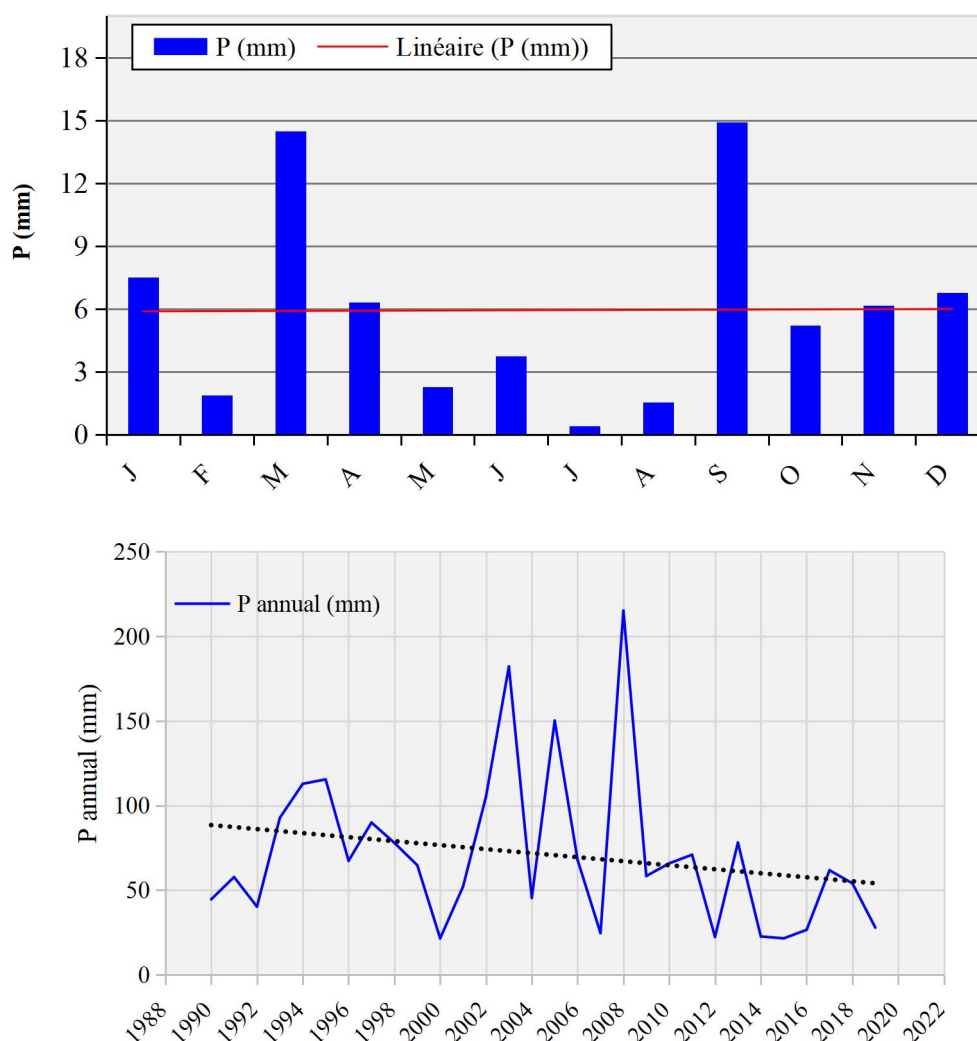


Figure III-5 : Chronique des précipitations de 1990 à 2020 à SEBSEB

c- L'insolation:

Dans la région de SEBSEB, la durée maximale d'insolation est de 357 heures enregistrée pour le mois de juillet et un minimum de 250 heures au mois de janvier. La moyenne annuelle est de 294,2 heures.

d- Les Vents

Les vents dominants d'été sont forts et chauds tandis que ceux d'hiver sont froids et humides avec une vitesse de 6,5 m/s.

Pour ce qui est du Sirocco dans la zone de SEBSEB, on note une moyenne annuelle de 11 jours/an pendant la période qui s'étend du mois de Mai à septembre.

e- L'évaporation

L'évaporation est très importante surtout lorsqu'elle est renforcée par les vents chauds. Le cumul est de l'ordre de 2596 mm/an avec un maximum mensuel de 387 mm au mois de juillet et un minimum de 68 mm au mois de décembre.

f- L'humidité

L'air à SEBSEB est très sec. L'humidité moyenne annuelle est de 38,7 %. Le taux d'humidité varie d'une saison à une autre. Le maximum d'humidité étant de 55,5 % pour le mois de janvier, le minimum est de 22 % pour le mois de juillet à cause des fortes évaporations et des vents chauds durant ce mois.

III.4.Occupation du sol

La région d'étude est particulièrement pauvre en sol agricole, c'est une chebka rocheuse, avec seulement le réseau hydrographique qui présente des alluvions, plutôt grossières, de type calcaire et très filtrant et généralement apte à l'agriculture, et ce, en tenant compte des travaux d'aménagement et d'amélioration (engrais verts, aménagements minéraux, organiques et argileux.). Seul le système d'épandage de crues peut assurer l'amélioration de façon économiquement favorable, garantissant une agriculture durable.

Les propriétés physiques des sols sont généralement aptes à toutes les cultures, et ce, en tenant compte des travaux d'aménagement et d'amélioration (engrais verts, aménagements minéraux, organiques et argileux, brise-vent.).

Les **Sbasbas**, sont donc en majorité des cultivateurs qui exploitent à peu près 3300 hectares dans des productions diverses, la répartition de la surface globale est représentée dans le tableau n°3

Tableau 3 : Répartition et superficie de la commune de Sebseb.

Désignation	Surface (hectares)	Pourcentage
Terrains improductifs	449.000	79,60 %
Terrains de parcours	111.700	19,80 %
Dont susceptibles d'être mis en valeur	22.000	3,90 %
Surface agricole utile	3.300	0,60 %
Surface totale de la commune	564.000	100 %

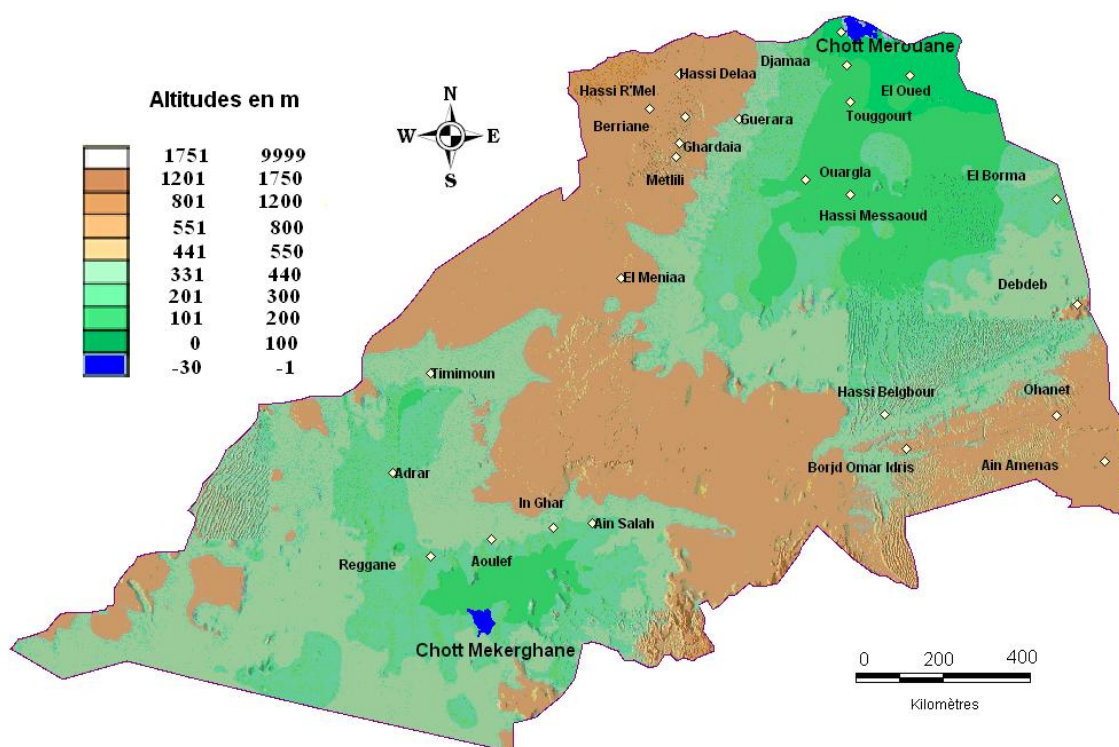


Figure III-6 : Morphologie de Sahara Septentrional source :Glob Gis Afric_ Esri

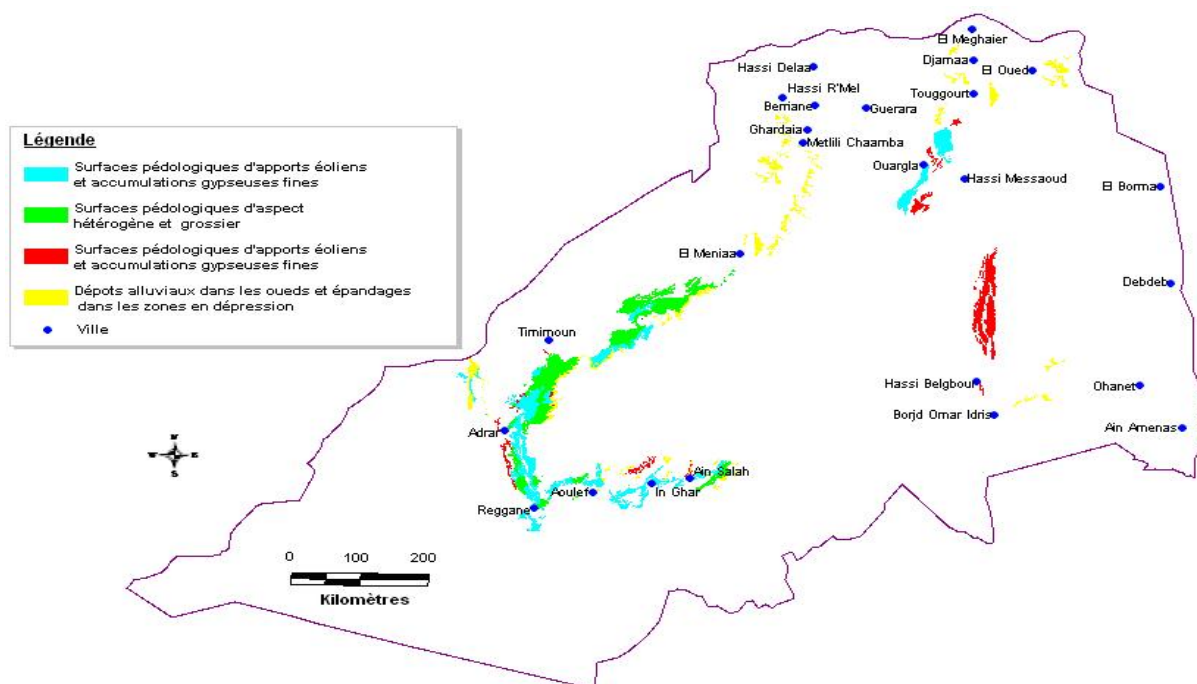


Figure III-7 : Couverture pédologique de Sahara Septentrional Source : BRL-C.D.A.R.S-1998

III.5. Cadre géologique

La carte géologique du bassin du Sahara établie par le Service de la Carte géologique de l'Algérie (SCG) 1951 montre que la dorsale du M'Zab correspond aux affleurements des formations du Crétacé supérieur (Cénomano-turonniennes et sénoniennes), dessinant ainsi une lanière allongée sur une direction subméridienne, laquelle est entourée par de dépôt continental d'âge Mio-pliocène. Les immenses dunes de l'Erg occidental recouvrent en grande partie la dorsale au Sud-ouest. Ces assises carbonatées et marneuses du Crétacé supérieur s'épaississent et s'approfondissent progressivement vers l'Est, et se couvrent par des couches plus récentes d'âge tertiaire (Mio-pliocène et Pontien)

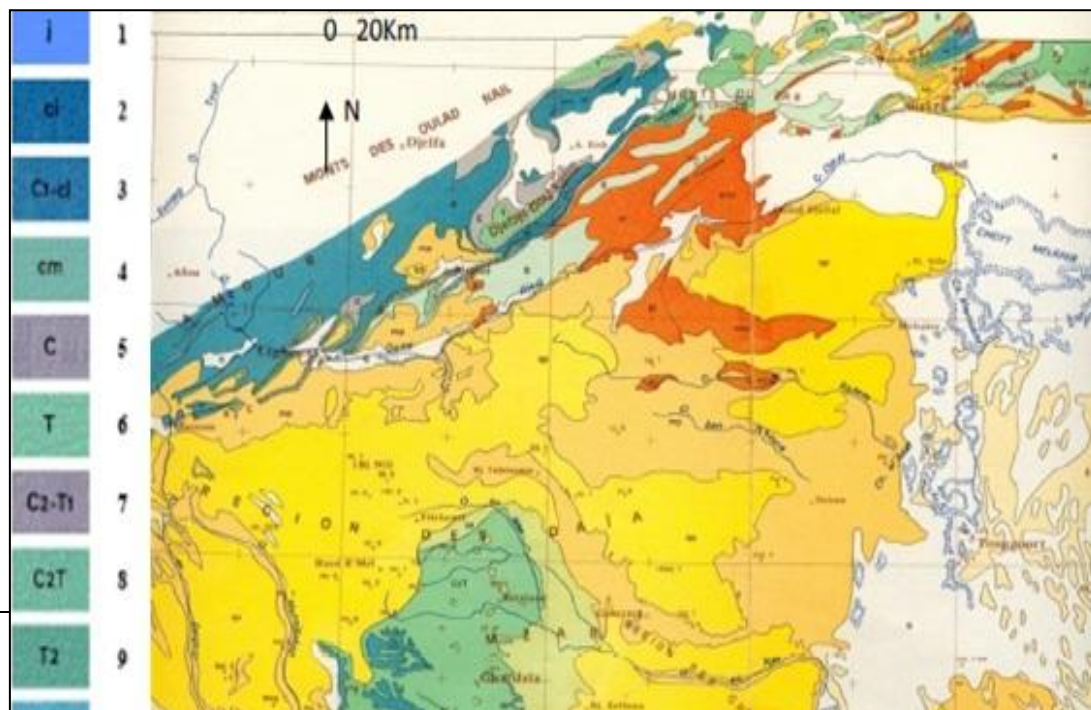


Figure III-8 : Carte géologique du M'Zab (extrait modifié G.Busson 1967)

III.5.1. Structure de géologique

La dorsale du M'Zab constituée par des couches argilo-marneuses d'âge Cénomaniens surmontées par une importante couche de calcaires dolomitiques massifs, correspond à un pli anticlinal d'un très grand rayon de courbure. Elle consiste selon G.B.M. Flamond (J. Fabre, 1976) à une ondulation de quelques mètres d'amplitude et de 50 à 100 mètres de large, imitant en surface l'écho de rejeux des accidents du socle primaire fracturé du bassin Sahara lors de la phase de l'orogénèse atlasique. Les assises de la dorsale présentent des pendages modestes (30° à 20°) vers l'Est (centre du bassin).

III.5.2. Litho-stratigraphie

La zone d'étude présente à l'affleurement une succession de formations géologiques allant du Cénomaniens au Mio-pliocène continental. Le Quaternaire correspond au dépôt de recouvrement alluvionnaire de la plupart des vallées des oueds de la dorsale du M'Zab. Cette recherche se réfère aux travaux de (G. Busson ; 1970) et aux travaux de l'ANRH de Ghardaïa.

- **Le Barrémien** : caractérisé par des formations détritiques du Crétacé inférieur sous forme
- de grès fins ou grossiers et d'argiles avec des intercalations carbonatées peu nombreuses.

- **L'Aptien** : renferme 30m en moyen de dolomies avec d'intercalation d'anhydrite et d'argile, c'est un bon repère lithologique pour les sondages.
- **L'Albien** : est déterminé en général par des grès argileux, grès rouges et sables moyens à fins argileux avec une épaisseur de 200 à 300m.
- **Le Cénomani** : environ 260m d'épaisseur, caractérisé par des argiles sableuses à la base, d'une série gypso-argileux au milieu et d'une trentaine de mètres a dominance carbonatée vers le sommet.
- **Le Turonien** : essentiellement carbonaté, il est constitué de calcaire dolomitique massif et marne jaune à la base et de calcaire grisâtre à blanc au sommet.
- **Le Sénonien** : représenté généralement par une série argilo-gypseuse à la base et de calcaire dolomitique au sommet.
- **L'Eocène** : d'une épaisseur de 26m au nord de Hassi R'mel, caractérisé par des calcaires blancs à silex et a passées plastiques azoïques.
- **Quaternaire alluvionnaire** : constitué de sables et des alluvions, son épaisseur peut arriver jusqu'à 45m.

III.6. Aspect hydrogéologique

Les principales ressources en eau de la région de SEBSEB sont d'origine souterraine. Elles sont contenues dans deux types d'aquifères ; la nappe phréatique superficielle d'Infero flux et la nappe profonde captive du Continental Intercalaire dite albienne (ANRH, 2011).

- **La nappe phréatique**

Elles sont abritées dans les alluvions d'Oued SEBSEB. L'alimentation et le comportement hydrogéologique sont étroitement liés à la pluviométrie. La profondeur du niveau d'eau varie entre 20 a 40m. Leur recharge est assurée grâce à l'infiltration des pluies. Les crues des oueds jouent un rôle primordial dans le régime de ces puits. Lors de chaque crue, le niveau de l'eau s'élève dans les puits. Il s'abaisse ensuite plus ou moins lentement, pour arriver à son minimum. Parfois même, l'eau disparaît complètement. Tous les puits du SEBSEB ne se comportent d'ailleurs pas de la même manière après la crue ; la nappe souterraine n'est pas absolument homogène. Cette nappe est captée par des centaines de puits traditionnels, et destinés essentiellement, pour irriguer les palmeraies et les cultures intercalaires avec un débit de l'ordre de 1 à 3 l/s, un temps de pompage arrive à 8h/j.

- **La nappe du Continental Intercalaire (CI)**

Elle recouvre une superficie d'environ 1100000 km² (Algérie, Tunisie et Libye) et fut « progressivement reconnu et délimité entre 1940 et 1960 » (Dubost, 1991). Elle représente la principale ressource en eau de la région. L'aquifère est composé de sables, grès et d'argiles sableuses d'âge Albien., elle est captée à une profondeur 400 m et 1000 m environ (Côte, 1996). Suivant l'altitude de la zone et la variation de l'épaisseur des formations postérieures au CI, elle est exploitée par pompage à des profondeurs variant de 5m à 140m dans la zone de SEBSEB. La nappe du continental intercalaire est exploitée par des forages ont des débits unitaires moyens de l'ordre de 40 à 80 l/s, peuvent s'élever jusqu'à 100 l/s.

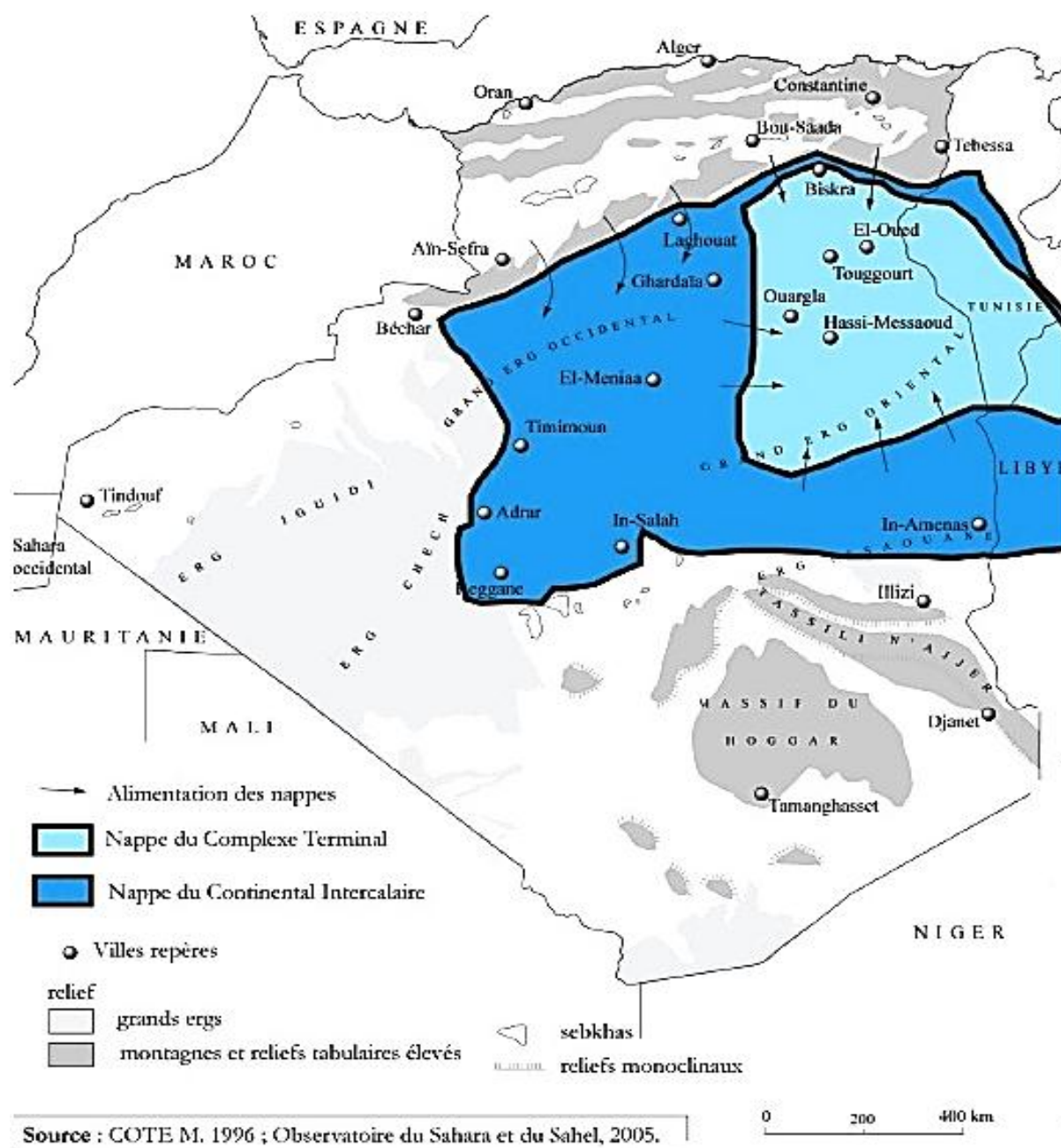


Figure III-9 : Domaine du Système d'Aquifère du Sahara Septentrional

III.7. Historique des crues à SEBSEB

Sur les Oueds sahariens n'existe pas de mesures ou observations continues jamais réalisées, vu les conditions climatiques, Néanmoins des observations descriptives des crues ou leur trace ont depuis longtemps fait l'objet de plusieurs notes.

Cause de manque des données de la région des anciennes crues, nous avons prendre en considération seulement les crues enregistré au niveau de L'ANRH de Ghardaïa.

Durant certaines années le cumul annuel est plus important et dépasse parfois les **180 mm** comme en 2003 (**182,2 mm**) et 2008 (**215,2 mm**)

Le maximum absolu en 24 heures observé à ce jour est de **48 mm** enregistré en **janvier 2005** et **40,5 mm** en 2008 en quelques heures et qui a engendré **des dégâts important**

Les pluies se produisent en général tard l'après-midi et durant la nuit et peuvent être de quantités importantes en un minimum de temps sous formes d'averses avec orage violents.



Figure III-10 : Ecoulement des eaux d'Oued SEBSEB 2017



Figure III-11 : Inondation des de la cité El-Hrith 21/08/2018- Inondation des d'Oued SEBSEB 2018

I. ETUDE HYDRO-MORPHOLOGIQUE

L'étude hydrologique et hydro-morphologique pour la réalisation des projets de protection contre les inondations révèle d'une importance considérable. Le but est donc de mettre en évidence les paramètres hydrologiques des talwegs qui traversent l'oued tels que les débits des crues, les apports des micros bassins (apports liquides et solide) qui constituent la base de dimensionnement des ouvrages constituant l'aménagement.

IV.1.Délimitation de bassin versant

La délimitation de bassin versant et les sous bassins versants des Chaabat au niveau de SEBSEB ont été extraits en utilisant le logiciel Arc GIS. La figure 42 montre la zone d'étude et les sous bassins délimité.

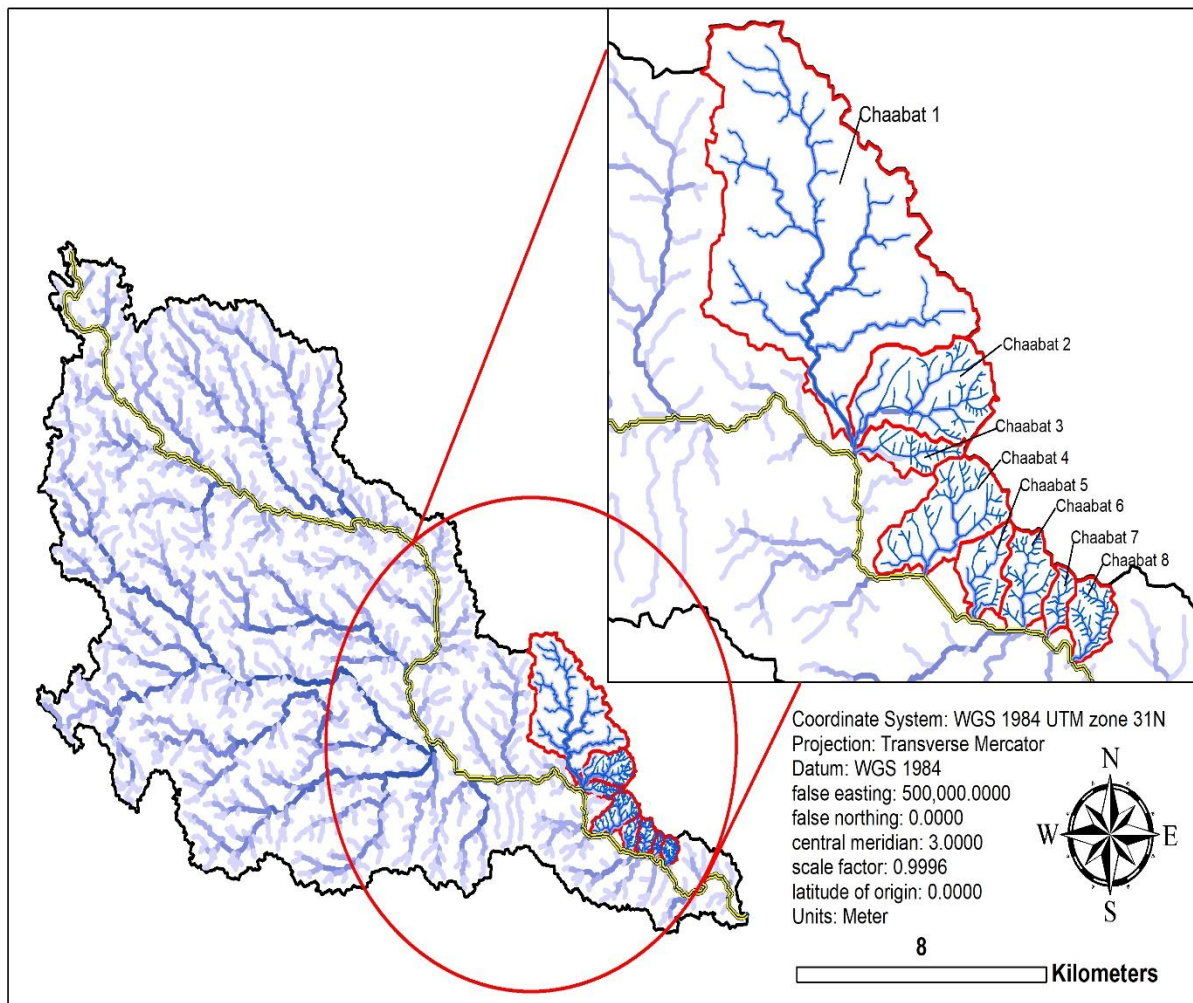


Figure III.12 : Limites du sous bassin versant au niveau d'oued SEBSEB.

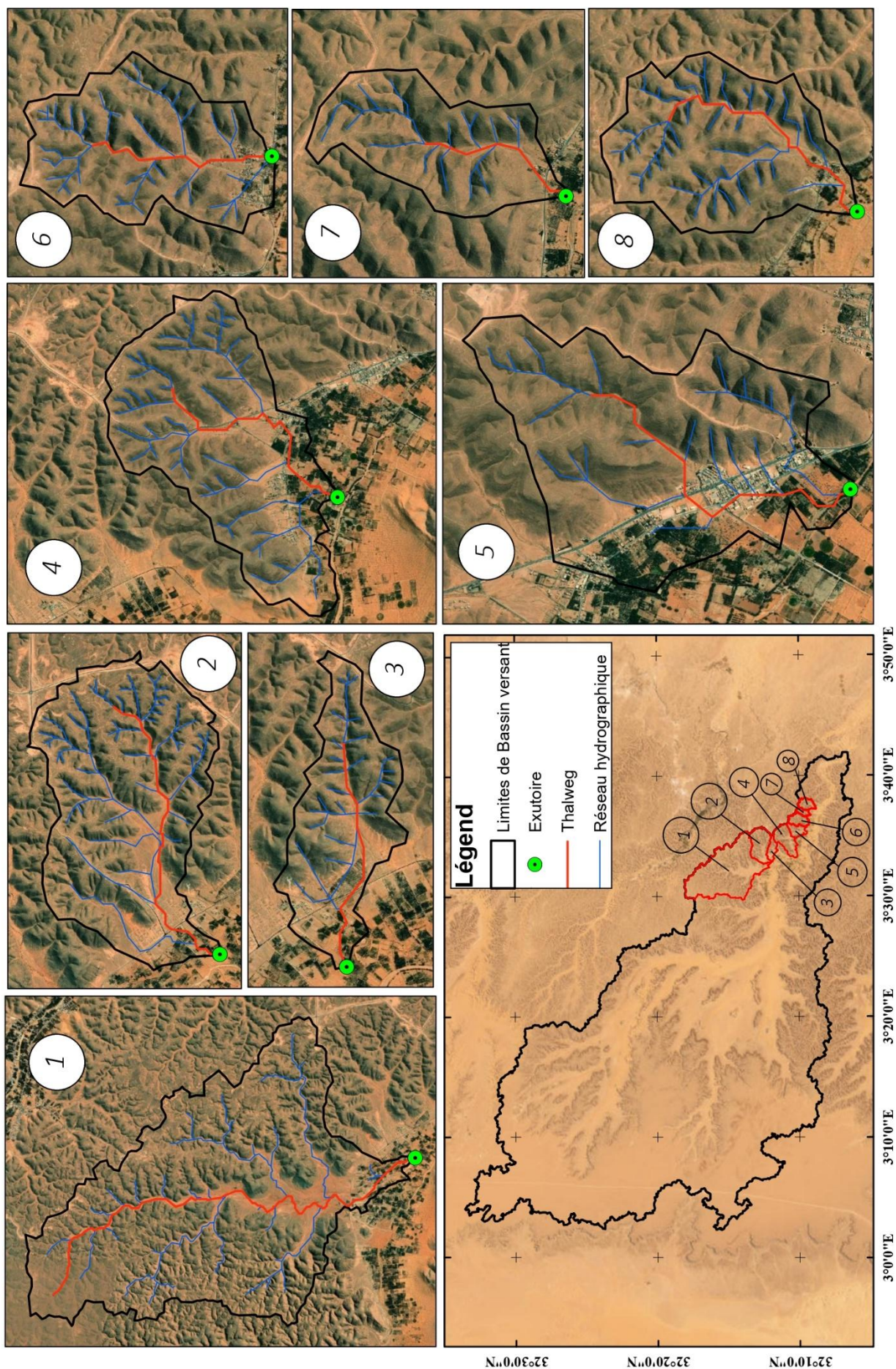


Figure 1313 : Délimitation des sous bassins versants de la région de SEBSEB

IV.2. Caractéristiques géométriques des bassins

Les surfaces, les périmètres et les longueurs des thalwegs principales des bassins versants sont déterminées avec logiciel Arc Gis 10.2.2, elles sont déterminées à partir de la surface obtenue de la projection horizontale du territoire délimité par la ligne de partage superficielle.

Les caractéristiques des bassins sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Caractéristiques géométriques des bassins versant.

ZONE	Bassin versant	Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	Thalweg (Km)
SEBSEB	SEBSEB	1512.94	313.46	112.08
	Sous-bassin 1	51.70	41.39	14.74
	Sous-bassin 2	9.76	14.94	5.07
	Sous-bassin 3	2.76	9.14	2.72
	Sous-bassin 4	7.57	13.23	3.54
	Sous-bassin 5	3.06	8.60	2.48
	Sous-bassin 6	3.37	8.31	2.17
	Sous-bassin 7	1.22	5.14	1.23
	Sous-bassin 8	2.54	6.86	2.46

IV.3. Caractéristiques hydro-morphologiques

IV.3.1. Indice de compacité de Gravelius Kc

C'est le rapport du périmètre du bassin sur la circonférence du cercle de rayon R ayant la même superficie S que le bassin, cet indice exprime la forme du bassin versant, il est en fonction de la surface du bassin et de son périmètre. Son expression est comme suite :

$$K_c = \frac{P_{BV}}{2 \sqrt{\pi S_{BV}}} \dots\dots\dots (III.1)$$

- P : périmètre du bassin versant (Km).
- S : surface du bassin versant (Km²).

Le bassin versant est dit :

- Circulaire si Kc = 1
- Carré si Kc = 1.12
- Allongé si Kc > 1.12

IV.3.2. Coefficient d'allongement(Ca)

Ce coefficient est obtenu par la relation :

$$C_a = \frac{L^2}{S} \dots\dots\dots (III.2)$$

- L : la longueur du talweg principal en Km.

- **S** : la superficie du bassin versant en Km².

IV.3.3. Rectangle équivalent

C'est une transformation purement géométrique en un rectangle de dimensions L, l'ayant la même surface que le bassin versant. Il permet de comparer les bassins Entre eux du point de vue de l'écoulement. Les courbes de niveau sont des droites parallèles aux petites côtes du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petites cotes.

Le rectangle équivalent est caractérisé par la longueur « L » et la largeur « l » définit respectivement par les formules suivantes :

- La longueur du rectangle équivalent :

$$L = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{Kc} \right)^2} \right) \dots\dots\dots (III.3)$$

- La largeur du rectangle équivalent :

$$l = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{Kc} \right)^2} \right) \dots\dots\dots (III.4)$$

Avec :

- **L**: Longueur du rectangle équivalent en (Km).
- **l**: Largeur du rectangle équivalent en (Km).

Les caractéristiques hydro-morphologiques des bassins versant sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 5: Longueurs et largeurs des rectangles équivalents.

ZONE	Bassin versant	K _G	C _a	Rectangle équivalent	
				I	L
SEBSEB	SEBSEB	2.26	8.30	10.42	145.20
	Sous-bassin1	1.61	4.20	2.94	17.61
	Sous-bassin 2	1.34	2.63	1.71	5.71
	Sous-bassin 3	1.54	2.68	0.72	3.81
	Sous-bassin 4	1.35	1.65	1.49	5.08
	Sous-bassin 5	1.38	2.01	0.91	3.36
	Sous-bassin 6	1.27	1.39	1.12	3.00
	Sous-bassin 7	1.30	1.24	0.64	1.91
	Sous-bassin 8	1.21	2.38	1.10	2.31

D'après le tableau 6 , on note que les bassins versants étudiés sont allongés.

IV.4. Caractéristiques Hydrographiques

IV.4.1. Paramètres du relief

Le relief et les caractéristiques physiques d'un bassin versant ont une forte influence sur

l'hydrogramme de crue. Car une forte pente occasionne un écoulement aussi rapide en un temps de concentration très courte et donc montée plus rapide.

Le relief se détermine à partir des indices ou des caractéristiques tels que :

- Courbe hypsométrique.
- Altitude moyenne.
- Indice de pente globale I_g .
- Indice de pente roche I_p .

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications. Les indices de pente se déterminent à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin.

IV.4.2. Courbe Hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de l'altitude. Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.

De la courbe hypsométrique du bassin versant on peut déduire, l'altitude $H_{5\%}$, l'altitude $H_{95\%}$, l'altitude médiane et l'altitude moyenne.

L'altitude médiane C'est l'ordonnée de la courbe hypsométrique correspondante à la surface 50%. C'est l'altitude médiane.

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum S_i H_i}{S} \dots\dots\dots(\text{III.5})$$

Avec :

- H_{moy} : Altitude moyenne du bassin (m).
- S_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau successifs (km^2).
- H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m).
- S : Superficie totale du bassin versant (km^2).

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques. Le tableau 5 présente les tranches d'altitude de bassin versant d'oued SEBSEB.

Tableau 6: Tranches d'altitudes et surface partielle de bassin versant d'oued SEBSEB.

Altitudes (m)		Surface partielle (Km ²)	Surfaces cumulées (Km ²)	Surface partielle (%)	% des surfaces cumulées
441	495	55.67	55.67	3.68	3.68
495	528	123.75	179.42	8.18	11.86
528	557	177.97	357.39	11.76	23.62
557	586	155.64	513.03	10.29	33.91
586	615	190.37	703.40	12.58	46.50
615	643	175.40	878.81	11.59	58.09
643	668	222.42	1101.22	14.70	72.79
668	691	192.79	1294.02	12.74	85.54
691	716	136.42	1430.44	9.02	94.56
716	793	82.37	1512.81	5.44	100

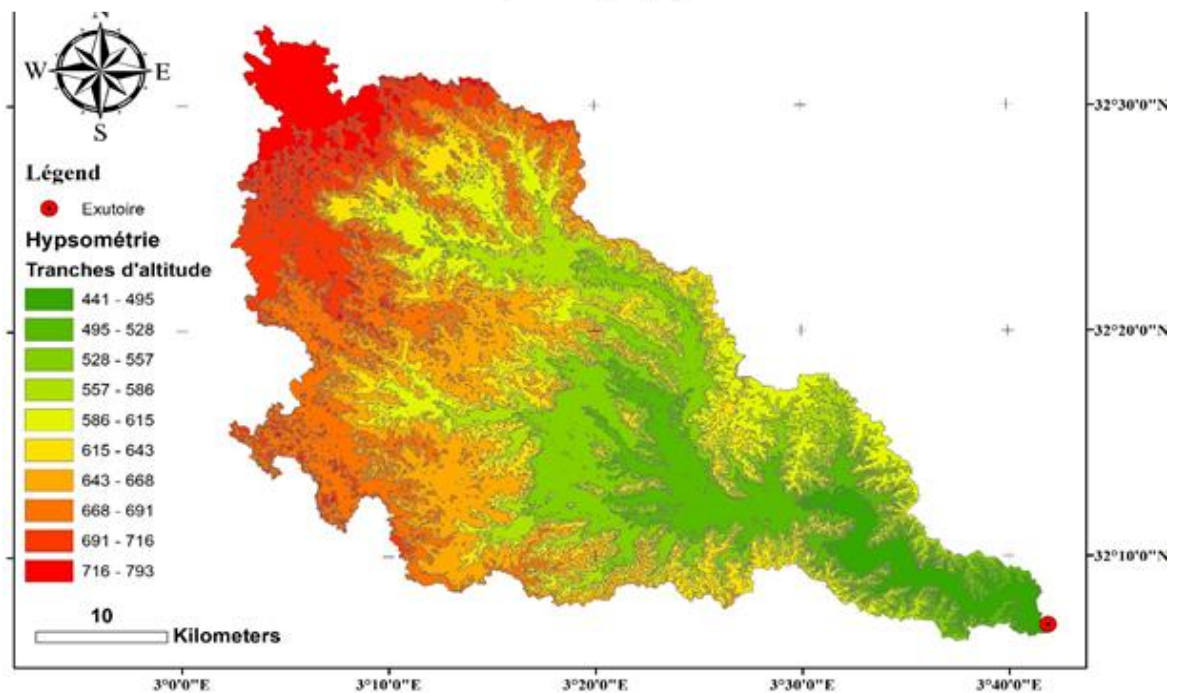
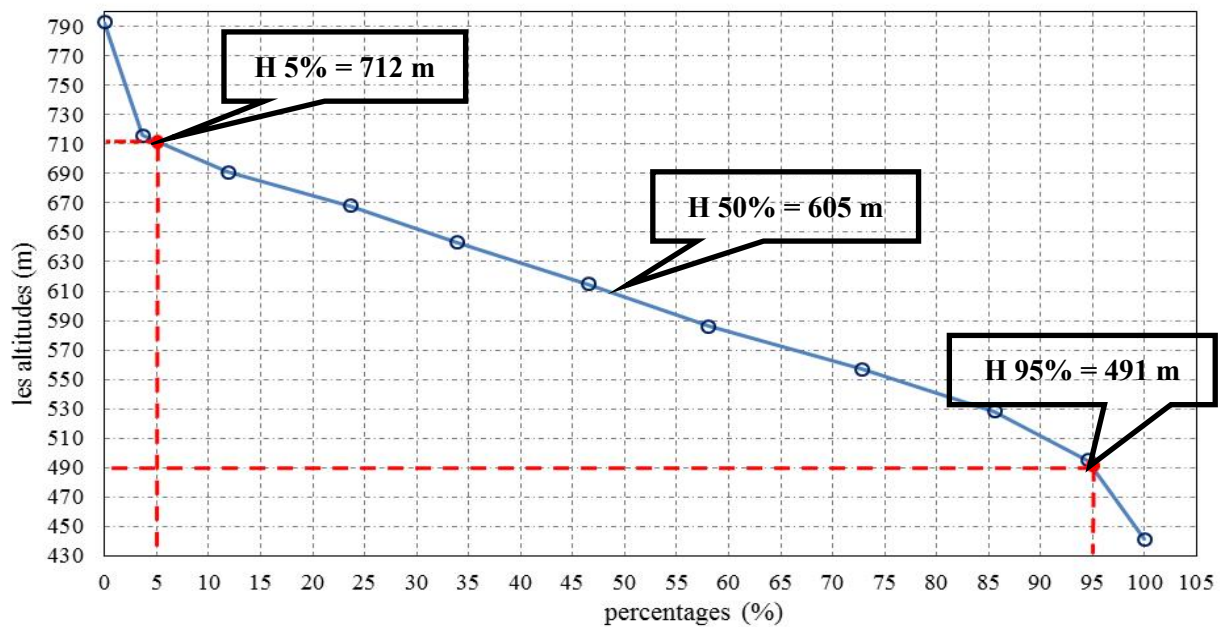


Figure 1514: Carte hypsométriques de de bassin versant d'oued SEBSEB.

Les altitudes spécifiques des sous bassins versant sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 7: Altitudes caractéristiques des bassins versant.

ZONE	Bassin versant	H _{moy}	H médian	H 95 %	H 5%	H max	H min
SEBSEB	SEBSEB	617.61	605	491	712	793	441
	Sous-bassin 1	569.37	581	504	601	613	487
	Sous-bassin 2	557.67	567	492	600	611	487
	Sous-bassin 3	535.50	532	488.5	596	606	487
	Sous-bassin 4	531.20	538	472	588	604	471
	Sous-bassin 5	520.67	521	471	579	593	466
	Sous-bassin 6	546.47	547	472	579	592	464
	Sous-bassin 7	531.73	542	469	569	576	461
	Sous-bassin 8	517.44	523.5	462	561.5	574	458

IV.4.3. Pente moyenne Im

C'est le rapport entre la dénivelée totale et la longueur du rectangle équivalent

$$I_m = \frac{D}{L} \dots\dots\dots(III.5)$$

Où

- D : Dénivelée totale du bassin versant.
- L : Longueur du rectangle équivalent du bassin versant.

IV.4.4. Dénivelée spécifique Ds

La dénivelée spécifique permet de définir les différents types de relief des bassins versant suivant la classification de (ORSTOM : Office de Recherche Scientifique d'OutreMer) .

$$D_s = \frac{I_g}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots(III.6)$$

Où :

- Ig : indice de pente global.
- S : superficie du bassin versant (m²).

IV.4.5. Indice de pente de Roche Ip

Ip est la somme de la racine carrée des pentes mesurées sur la racine de longueur de rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre deux courbes de niveau Hi et Hi-1. Il est donné par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{S_i d_i} \dots\dots\dots(III.7)$$

- L : Longueur de rectangle équivalent (Km).
- Si : Surface partielle correspondante (%).
- di : Déniveler entre deux courbes de niveau

IV.4.6. Indice de pente globale Ig

L'indice global de pente évalue le relief. De la courbe hypsométrique, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la superficie du bassin. On déduit les altitudes H5% et H95% entre lesquelles s'inscrit 90% de l'aire du bassin.

Est égal à :

$$I_g = \frac{D}{L} \dots\dots\dots(III.8)$$

Où :

- D : Dénivelée entre H5% et H95% (m). $D = H_{5\%} - H_{95\%}$
- L : la longueur du rectangle équivalent (km).

Les résultats de calcul de I_p et I_g sont présenter dans le tableau suivant :

Tableau 8: Indices de pentes des bassins versant.

ZONE	SBV	Im	Ds	H5% – H95%	Ip	Ig
SEBSEB	SEBSEB	0.0024	59.20	221	1.79	0.0015
	Sous-bassin 1	0.0072	39.60	97	2.79	0.0055
	Sous-bassin 2	0.0217	59.13	108	3.79	0.0189
	Sous-bassin 3	0.0312	46.85	107.5	4.79	0.0282
	Sous-bassin 4	0.0262	62.85	116	5.79	0.0228
	Sous-bassin 5	0.0378	56.21	108	6.79	0.0322
	Sous-bassin 6	0.0426	65.48	107	7.79	0.0356
	Sous-bassin 7	0.0602	57.80	100	8.79	0.0523
	Sous-bassin 8	0.0503	68.69	99.5	9.79	0.0431

IV.5. Caractéristiques physiographiques

IV.5.1. Densité de Drainage D_d

C'est le rapport entre la longueur total de tous les talwegs « L_i » du bassin versant, et la surface « S » Elle reflète la dynamique du bassin, la stabilité du chevelu hydrographique et le type de ruissellement de surface. Elle est exprimée en Km/Km².

$$D_d = \frac{\sum L_i}{S} \dots\dots\dots(III.9)$$

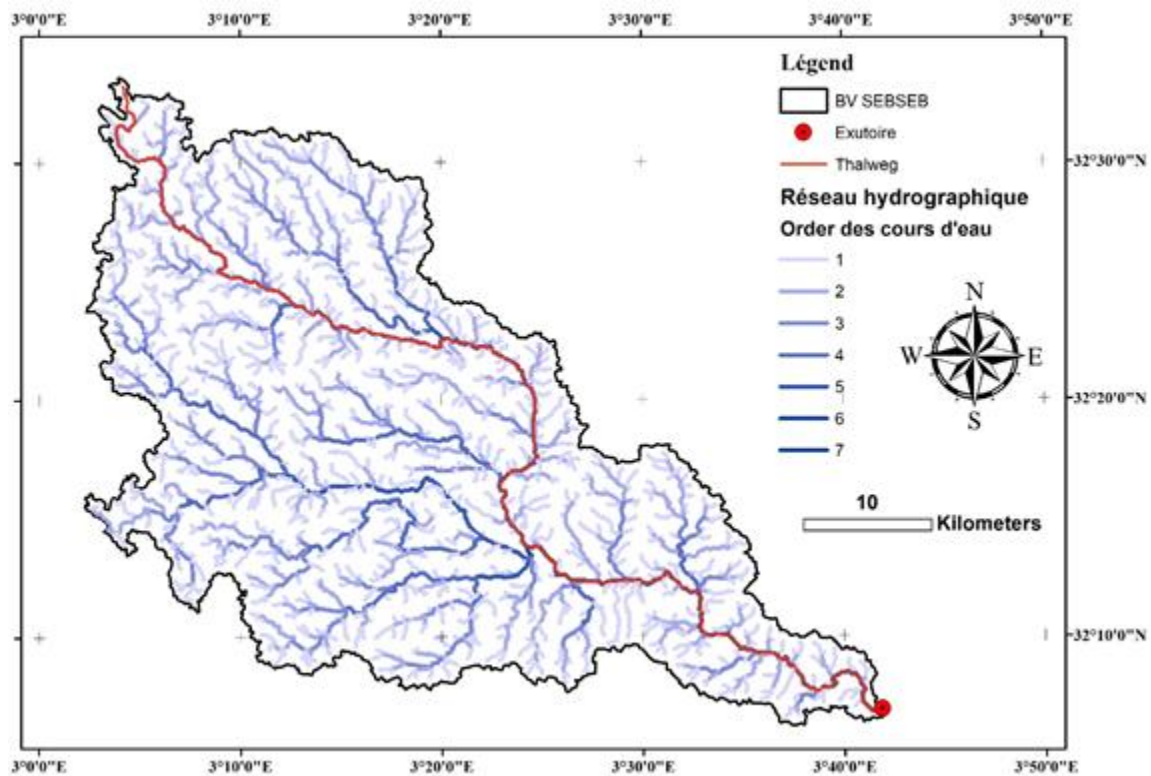
Avec :

- **Li** : Longueur totale de tous les cours d'eau. (Km).
- **S** : Superficie du bassin versant en km².

Tableau 9: Densités de drainage des différents sous bassins

ZONE	Bassin versant	$\sum_{i=1}^n L_i$ (Km)	S (km ²)	Dd (Km/Km ²)
SEBSEB	SEBSEB	1727.19	1512.94	1.14
	Sous-bassin 1	53.49	51.70	1.03
	Sous-bassin 2	29.07	9.76	2.98
	Sous-bassin 3	10.09	2.76	3.65
	Sous-bassin 4	24.55	7.57	3.24
	Sous-bassin 5	10.82	3.06	3.54
	Sous-bassin 6	13.69	3.37	4.06
	Sous-bassin 7	5.63	1.22	4.61
	Sous-bassin 8	13.52	2.54	5.33

Le réseau hydrographique de bassin versant d'oued SEBSEB est présenté dans la figure 47

**Figure 1615 : Réseau hydrographique BV SEBSEB.**

IV.5.2. Coefficient de torrentialité

Il est défini comme suite :

$$C_t = D_d \times F_1 \dots \dots \dots (III.10)$$

$$F_1 = N_1 / S \dots \dots \dots (III.11)$$

Avec :

- **D_r**: Densité de drainage.

- **N1**: Nombre des talwegs d'ordre 1.
- **S**: Surface du bassin versant.

IV.5.3. Pente moyenne du cours d'eau principale

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc sur le débit maximal observé, Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol. Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{\text{moy}} = \frac{\Delta H}{\Delta L} \dots\dots\dots(\text{III.12})$$

Avec :

- P_{moy} : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;
- ΔH : dénivellation entre deux points suffisamment distance [m]
- L : longueur du cours d'eau principal [km].

Les résultats de calcul sont présenter dans le tableau suivant :

Tableau 10: Ct et Pmoy des différents sous-bassins versant.

ZONE	SBV	N1	S (Km ²)	F1 (1/km ²)	Ct (Km ⁻³)	P _{moy} (m/m)
SEBSEB	SEBSEB	1635	1512.94	1.08	1.23	0.0024
	Sous-bassin 1	38	51.70	0.73	0.76	0.0072
	Sous-bassin 2	46	9.76	4.71	14.02	0.0217
	Sous-bassin 3	24	2.76	8.69	31.74	0.0312
	Sous-bassin 4	41	7.57	5.41	17.55	0.0262
	Sous-bassin 5	19	3.06	6.22	22.02	0.0378
	Sous-bassin 6	34	3.37	10.08	40.89	0.0426
	Sous-bassin 7	15	1.22	12.29	56.67	0.0602
	Sous-bassin 8	36	2.54	14.20	75.72	0.0503

IV.6. Temps de concentration

Le temps de concentration t_c des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier, Il est composé de trois termes différents :

- T_h : Temps d'humectation c'est le temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.

- T_r : Temps de ruissellement ou d'écoulement c'est le temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur).
- T_a : Temps d'acheminement c'est le temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration t_c est donc égal au maximum de la somme de ces trois termes, soit :

$$T_c = \max(\sum(T_h + T_r + T_a)) \dots\dots\dots(III.13)$$

Théoriquement on estime que t_c est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques.

Dans cette étude, Cinque formules empirique ont été utiliser pour calculer le temp de concentration correspond au chaque sous-bassin.

IV.6.1. Formule de GIANDOTTI

Développé pour les bassins versants agricoles en centre et nord de l'Italie pour les bassains versants allant 170 jusqu'70 000 Km².

$$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}} \dots\dots\dots(III.14)$$

Avec :

- T_c : tempe de concentration en heurs
- S : Surface du bassin versant en [Km²]
- L : longueur du talweg principale en [Km]
- H_{moy} , H_{min} : respectivement la hauteur moyenne et minimale du B.V en [m]

IV.6.2. Formule de VENTURA

Développé pour les bassins versants ruraux en Italie

$$T_c = 7,62 \sqrt{\frac{S}{P}} \dots\dots\dots(III.15)$$

Avec :

- T_c : tempe de concentration en minutes
- S : Surface du bassin versant en [Km²]
- P : la pente moyenne de bassin en [m/m]

IV.6.3. Formule de TURAZZA

Parmi les formules les plus utilisées par les hydrologue du nord d'Afrique, nous citerons spécialement celle de Turazza: (formule Italienne) :

$$T_c = 65,1\sqrt{S} \dots\dots\dots(III.16)$$

Avec :

- T_c : temps de concentration en minutes
- S : Surface du bassin versant en $[Km^2]$

IV.6.4. Formule de CALIFORNIA

Développé pour les petites montagnes bassins versants en Californie

$$T_c = \left(\frac{0,87 \cdot L^3}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^{0,386} \dots\dots\dots(III.17)$$

Avec :

T_c : temps de concentration en minutes

- L : longueur du talweg principale en $[Km]$
- $H_{\max}$, $H_{\min}$: dénivellation detalweg principale $[m]$

IV.6.4. Formule de PASINI

C'est une formule développée spécialement pour les bassins versants ruraux en Italie et donner comme suite :

$$T_c = 0,108(S.L)^{0,333} .P^{-0,5} \dots\dots\dots(III.18)$$

- S : Surface du bassin versant en $[Km^2]$
- L : longueur du talweg principale en $[Km]$
- P : la pente moyenne de bassin en $[m/m]$

L'utilisation des plusieurs formules empiriques nous permette de détecter la marge de temps de concentration réel. En adopte les valeurs de la formule plus proche à la moyenne calculée. Les valeurs en gras ont été utilisé dans le calcul de la moyenne, par contre les valeurs normales ont était éliminer.

Tableau 11: Temps de concentration des différents sous-bassins versant.

ZONE	BV	Giandoti	California	Ventura	Passini	Turraza	Tc moy (h)	Tc adopter
SEBSEB	SEBSEB	30.45	23.10	100.33	121.36	42.20	31.92	30.45
	Sous-bassin 1	7.01	3.30	10.80	11.66	7.80	9.32	10.80
	Sous-bassin 2	2.99	0.97	2.69	2.69	3.39	2.94	2.99
	Sous-bassin 3	1.93	0.48	1.19	1.20	1.80	1.53	1.80
	Sous-bassin 4	2.63	0.62	2.16	2.00	2.99	2.44	2.63
	Sous-bassin 5	1.81	0.42	1.14	1.09	1.90	1.48	1.81
	Sous-bassin 6	1.46	0.36	1.13	1.01	1.99	1.40	1.46
	Sous-bassin 7	0.93	0.19	0.57	0.50	1.20	0.80	0.93
	Sous-bassin 8	1.63	0.43	0.90	0.89	1.73	1.29	1.63

IV.7. Vitesse de ruissellement

La vitesse moyenne de ruissellement donné par la formule suivante :

$$V_R = \frac{L}{T_c} \dots\dots\dots(III.19)$$

Où :

- V_r : Vitesse moyenne de ruissellement (m/s)
- L : Longueur de cours d'eau principal (m)
- T_c : Temp de concentration (s)

Tableau 12 : Vitesses moyenne de ruissellement.

BV	L (km)	Tc (h)	L(m)	Tc (s)	V(m/s)
SEBSEB	112.08	30.45	112077.19	109609.09	1.022517
Sous-bassin 1	14.74	10.80	14743.87	38869.66	0.379316
Sous-bassin 2	5.07	2.99	5068.65	10760.64	0.471037
Sous-bassin 3	2.72	1.80	2718.51	6491.46	0.418782
Sous-bassin 4	3.54	2.63	3536.95	9460.64	0.37386
Sous-bassin 5	2.48	1.81	2475.45	6515.62	0.379925
Sous-bassin 6	2.17	1.46	2166.63	5251.42	0.412581
Sous-bassin 7	1.23	0.93	1230.00	3352.01	0.366944
Sous-bassin 8	2.46	1.63	2455.94	5867.91	0.418537

Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un portrait détaillé de la zone d'étude. L'analyse climatique et géologique souligne l'extrême aridité de la commune de Sebseb, où la rareté des ressources hydriques et la nature rocheuse du sol imposent une gestion rigoureuse des eaux souterraines.

L'étude hydro-morphologique approfondie, conduite par des outils géomatiques, a mis en évidence le comportement spécifique des bassins versants. La configuration allongée des *Chaabat* et les indices de drainage calculés confirment une vulnérabilité réelle face aux épisodes pluvieux intenses, expliquant ainsi les inondations récurrentes observées dans la région.

En somme, ces données constituent une base technique solide. Elles mettent en lumière la nécessité d'interventions ciblées pour la protection contre les crues, tout en soulignant l'importance d'une gestion durable pour préserver les activités agricoles locales dans ce milieu saharien fragile.

CHAPITRE IV

ANALYSE SPATIALE ET MODELISATION AVEC SCALGO LIVE



Scalgo
Live™

Chapitre IV : Analyse Spatiale et Modélisation Hydrologique avec SCALGO Live

IV-1. Introduction

Ce chapitre présente l'analyse spatiale et la modélisation hydrologique de la région de Sebseb à l'aide de la plateforme SCALGO Live. L'approche repose sur l'exploitation du Modèle Numérique de Terrain (MNT/DEM) pour simuler le comportement des eaux de ruissellement, délimiter les bassins versants, identifier les chemins d'écoulement et cartographier les zones exposées aux inondations. Plusieurs scénarios pluviométriques ont été testés, permettant de comparer l'état naturel des bassins versants à des états modifiés par des interventions hydrologiques numériques.

IV-2. Présentation de SCALGO Live

IV-2-1. Définition et positionnement

SCALGO Live est une plateforme en ligne développée par une entreprise danoise, dédiée à la cartographie et à la simulation des risques d'inondation pluviale. Elle exploite des données topographiques (MNT/DEM) pour analyser les écoulements de surface, identifier les zones d'accumulation et estimer l'étendue des surfaces submersibles, à l'échelle d'une parcelle, d'un quartier ou d'une ville. Dans cette étude, l'outil est appliqué exclusivement à l'analyse des inondations par ruissellement pluvial dans la région de Sebseb.

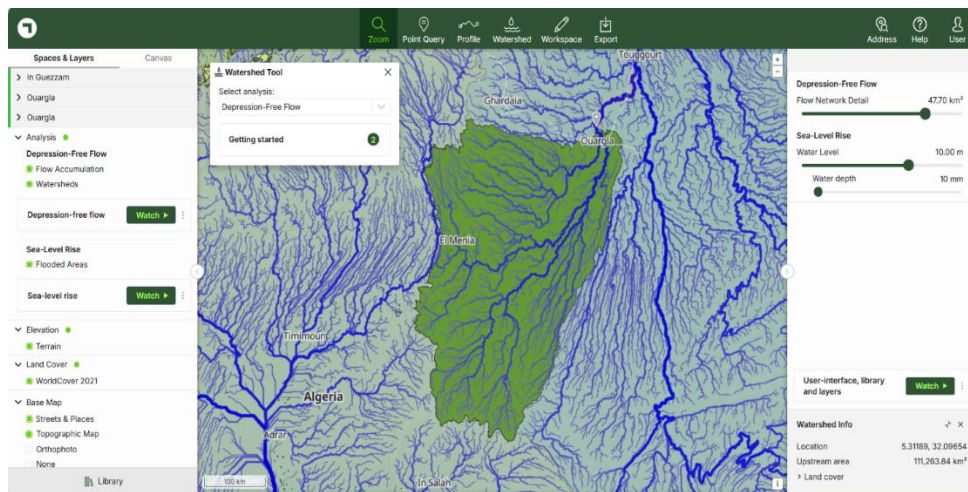


Figure n°(IV-04) : Interface SCALGO Live

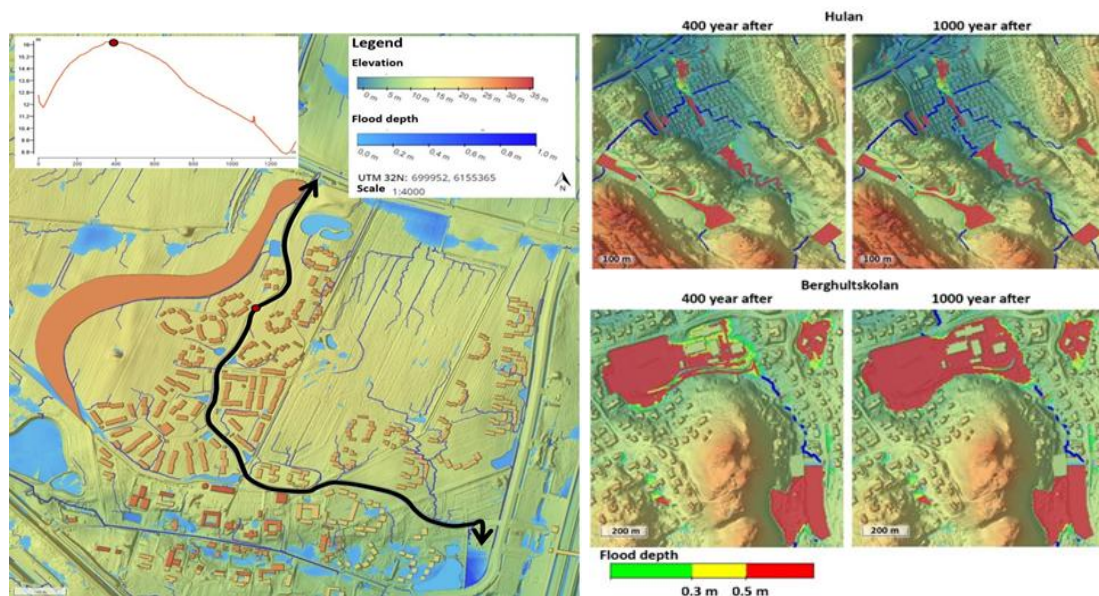


Figure IV-1 : Trajectoires du ruissellement / Profondeur des inondations -SCALGO Live.

IV-2-2. Architecture et fonctionnement

SCALGO Live utilise une méthode statique simplifiée basée sur le remplissage progressif des dépressions topographiques : l'eau s'accumule d'abord dans les zones basses, puis déborde vers les secteurs adjacents plus bas lorsque la capacité de rétention est atteinte, jusqu'à la propagation complète sur le terrain. La plateforme calcule ainsi la profondeur de l'eau, les trajectoires de ruissellement, les zones d'accumulation et l'étendue des surfaces inondées. Elle peut intégrer des MNT nationaux à haute résolution (jusqu'à 2×2 m) ou des données topographiques importées par l'utilisateur.

IV-2-3. Avantages

- Traitement rapide de grandes quantités de données topographiques.
- Simulation et analyse de multiples scénarios pluviométriques simultanément.
- Production de cartes des zones inondables avec visualisation des profondeurs d'eau.
- Identification des zones à risque pour les populations et les infrastructures.
- Interface accessible en ligne, sans installation logicielle.

IV-2-4. Limites

La principale limite est l'approche statique qui ne prend pas en compte l'évolution temporelle de l'écoulement : le logiciel ne permet pas de déterminer le temps nécessaire pour que l'eau atteigne les zones inondées. De plus, la précision des résultats est tributaire de la qualité et de la résolution du MNT utilisé. La plateforme requiert une connexion internet permanente et présente des contraintes de superficie pour le chargement des données.

IV-3. Méthodologie

IV-3-1. Données utilisées

Les données mobilisées pour cette étude sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau IV-1 : Données collectées et sources utilisées dans l'étude.

N°	Données	Source	Objectif
1	Modèle Numérique de Terrain (MNT/DEM)	Open Topography	Analyse du relief et du ruissellement
2	Scénarios de précipitations	SCALGO Live	Simulation des inondations
3	Cartes hydrologiques	QGIS	Analyse spatiale et hydrologique
4	Articles scientifiques et mémoires	Google Scholar	Acquisition des informations théoriques
5	Données topographiques et simulations	SCALGO Live	Identification des zones vulnérables aux inondations

IV-3-2. Sélection de la zone d'étude et des scénarios pluviométriques

La zone d'étude est la région de Sebseb, exposée aux écoulements de surface en raison de son relief. Quatre bassins versants ont été délimités à partir du MNT/DEM chargé depuis Open Topography et traité sous QGIS. Cinq scénarios pluviométriques uniformes ont été retenus : 10, 30, 50, 80 et 100 mm, représentatifs d'une gamme d'intensités allant de la pluie modérée à l'événement extrême.

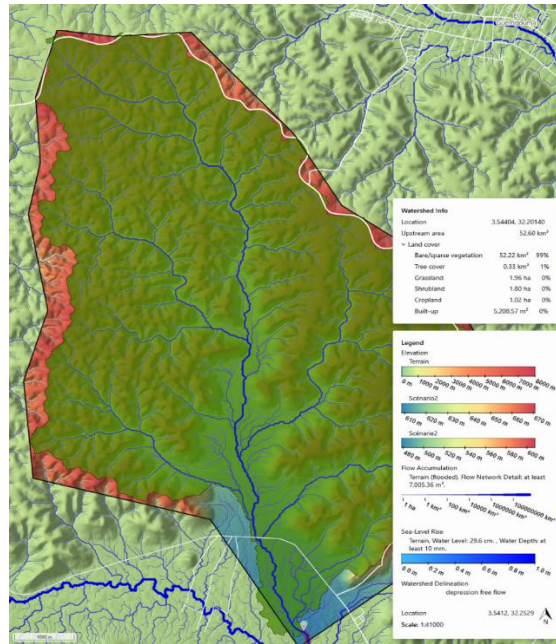


Figure IV-3 :: État du BV2 en conditions sèches (sans précipitations).

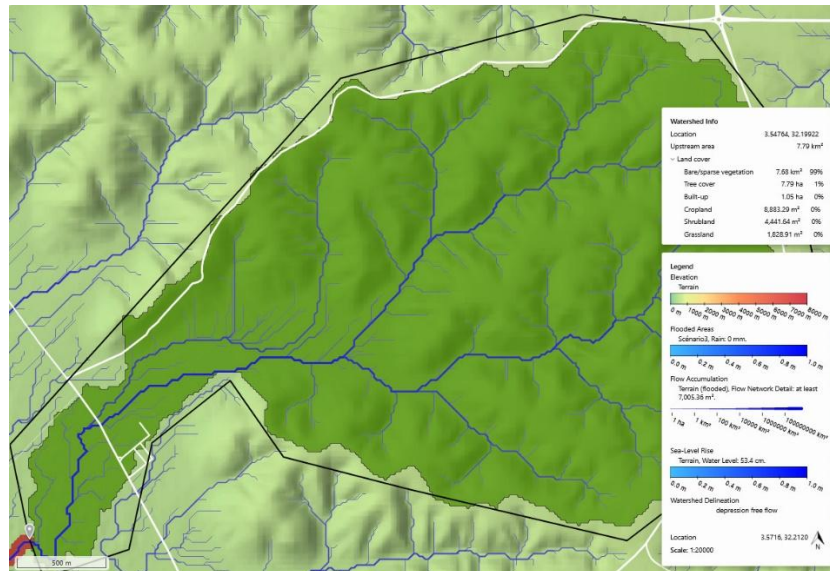


Figure IV-4 :: État du BV3 en conditions sèches (sans précipitations).



Figure IV-5 :: État du BV4 en conditions sèches (sans précipitations).

IV-4-3. Simulation sous précipitations extrêmes (100 mm) — état naturel

Sous un scénario de 100 mm, les trois bassins montrent une extension significative des zones inondables. Les accumulations se concentrent dans les secteurs de basse altitude et le long des axes d'écoulement principaux. Les profondeurs d'eau variables sont représentées par une échelle de bleus sur les cartes.

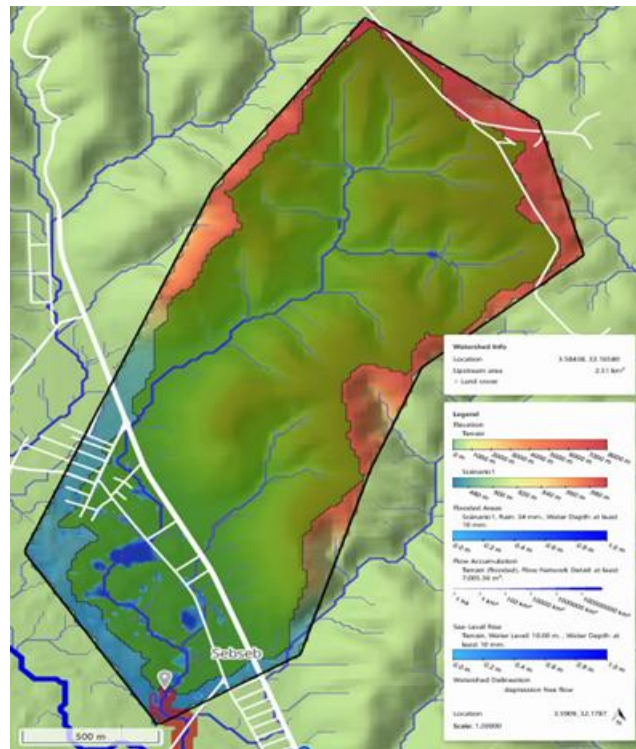


Figure IV-6 :: Simulation des zones inondables du BV1 sous précipitations extrêmes (100 mm).

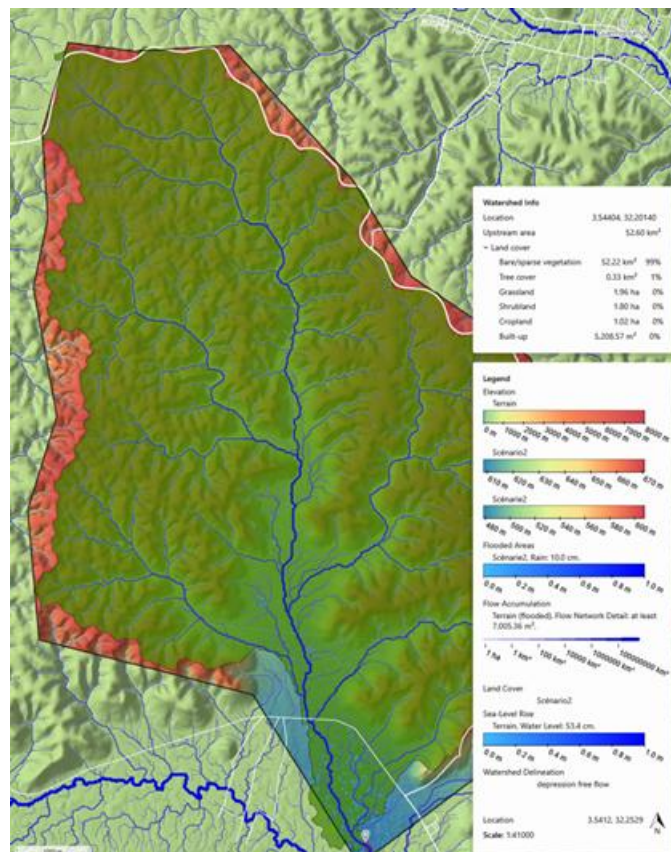


Figure IV-7:: Simulation des zones inondables du BV2 sous précipitations extrêmes (100 mm).

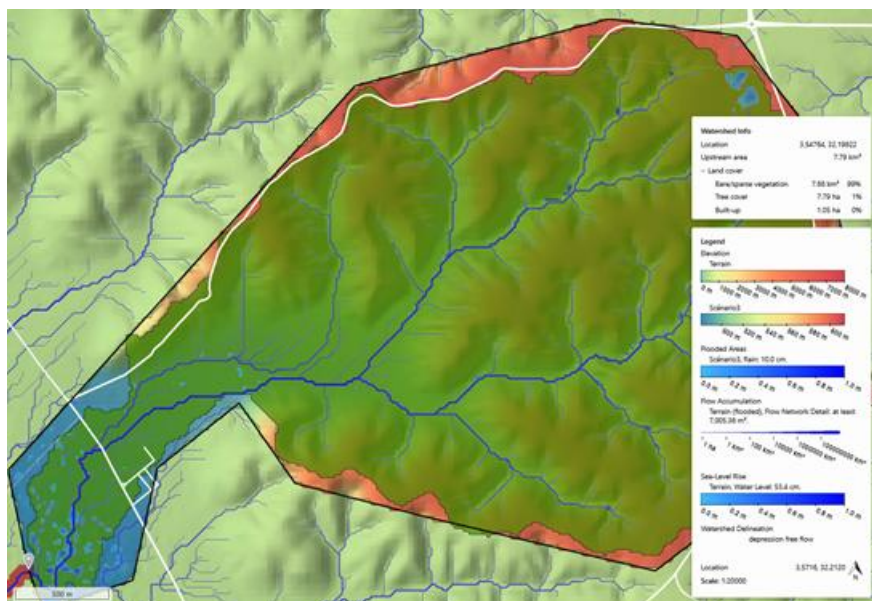


Figure IV-8 :: Simulation des zones inondables du BV3 sous précipitations extrêmes (100 mm).

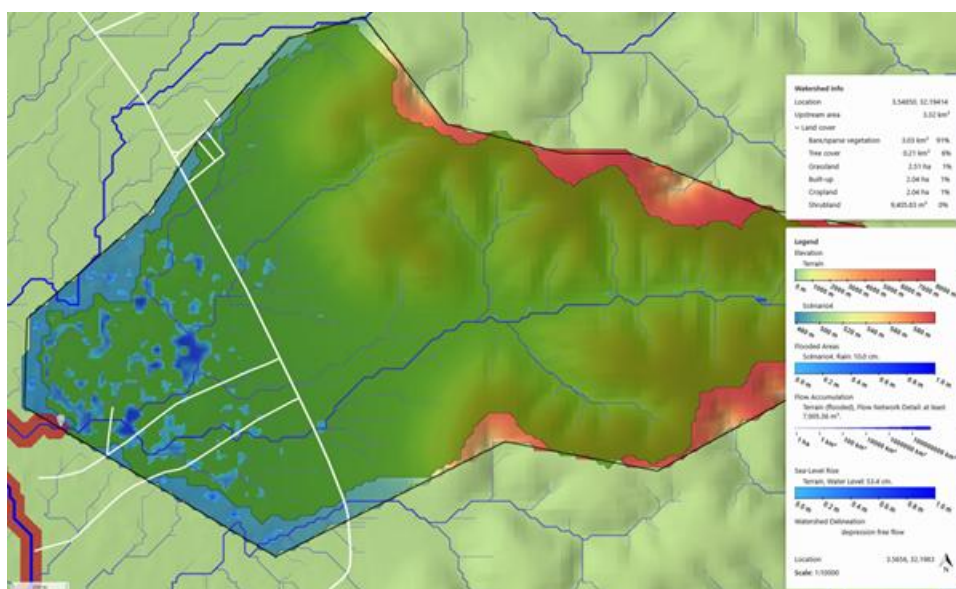


Figure IV-9 :: Simulation des zones inondables du BV4 sous précipitations extrêmes (100 mm).

IV-5. Simulation comparative des zones inondables : état naturel vs. état modifié

IV-5-1. Bassin versant 1 — Scénarios comparatifs (10 à 100 mm)

Pour chaque intensité pluviométrique, deux situations sont comparées : (a) état naturel sans intervention et (b) état après modifications hydrologiques (Lower Path et/ou Flatten).

Analyse — 10 mm

Pour une pluie de 10 mm, l'état naturel (a) montre une accumulation modérée dans les zones de faible altitude. Les surfaces inondées restent limitées. Après application du Lower Path (b), les écoulements sont mieux orientés vers les axes de drainage naturels, réduisant la concentration des eaux dans les zones sensibles.

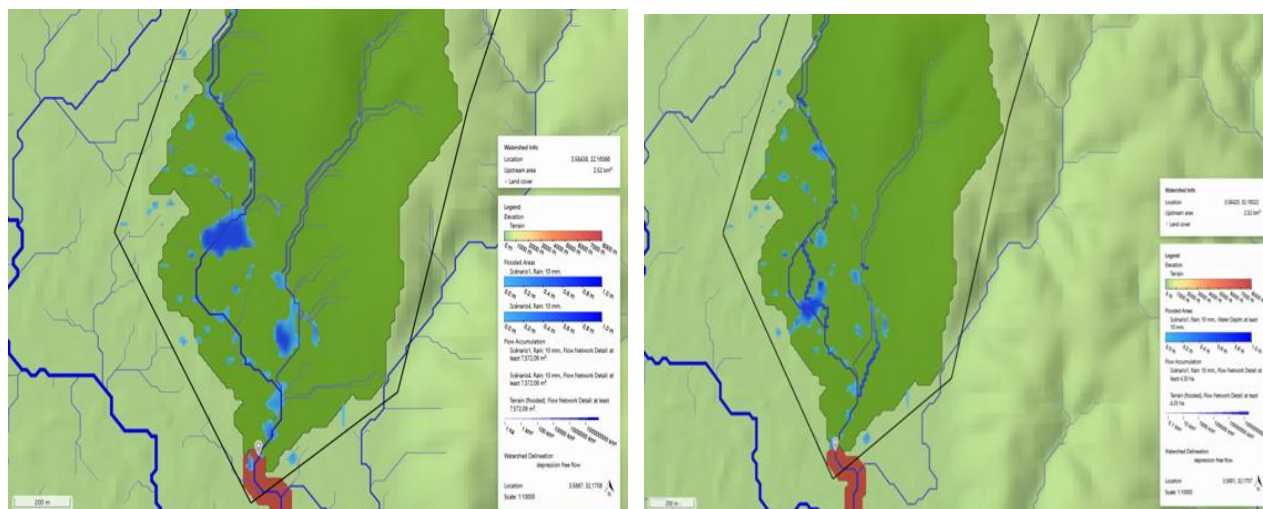


Figure IV-10 :: Carte comparative des inondations (10 mm) — BV1, scénarios (a) et (b).

Analyse — 30 mm

À 30 mm, les zones inondables s'étendent davantage dans l'état naturel, la topographie jouant un rôle déterminant dans la convergence des flux. Après modification (b), les écoulements sont mieux canalisés vers des chenaux définis, réduisant la dispersion des eaux et les surfaces submersibles.

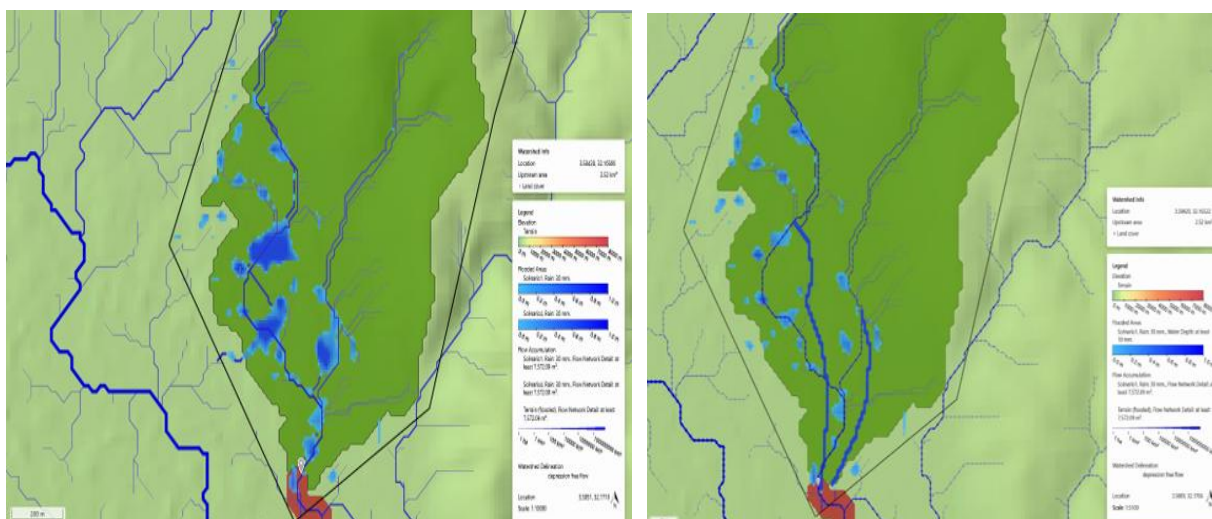


Figure IV-11 :: Carte comparative de simulation des inondations (30 mm) — BV1, scénarios (a) et (b).

Analyse — 50 mm

Pour 50 mm, le ruissellement est important dans l'état naturel et les accumulations s'étendent aux points de convergence. L'application combinée du Lower Path et du Flatten (b) améliore significativement le drainage : les zones inondées deviennent moins diffuses et davantage concentrées le long des chenaux principaux.

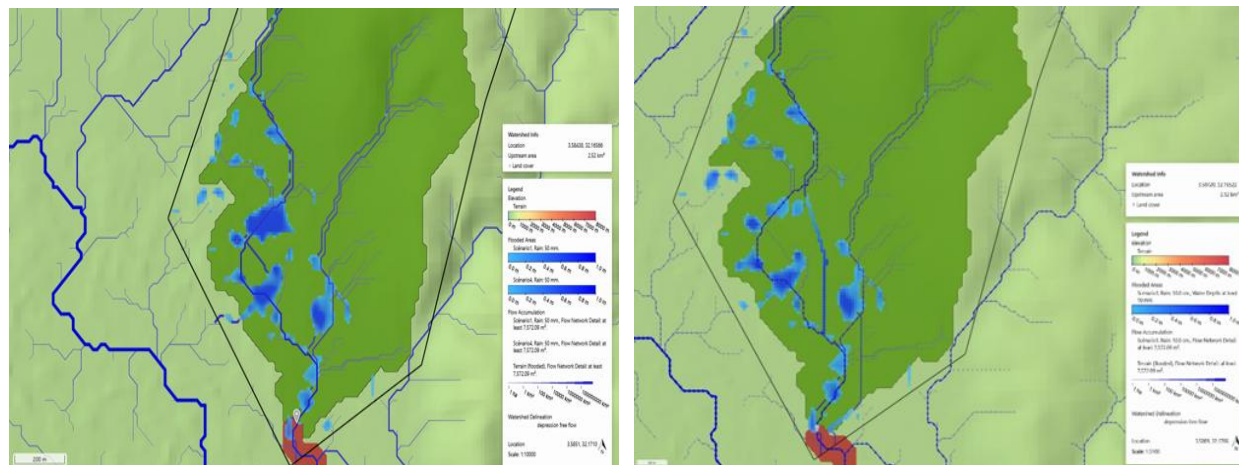


Figure IV-12:: Carte comparative de simulation des inondations (50 mm) BV1 (a) et (b).

Analyse — 80 mm

À 80 mm, le scénario naturel présente une extension marquée des zones submersibles avec forte accumulation dans les dépressions. Les outils Lower Path et Flatten contribuent à réorganiser les trajectoires d'écoulement et à réduire les accumulations locales, bien que les volumes importants génèrent toujours des zones inondées résiduelles.

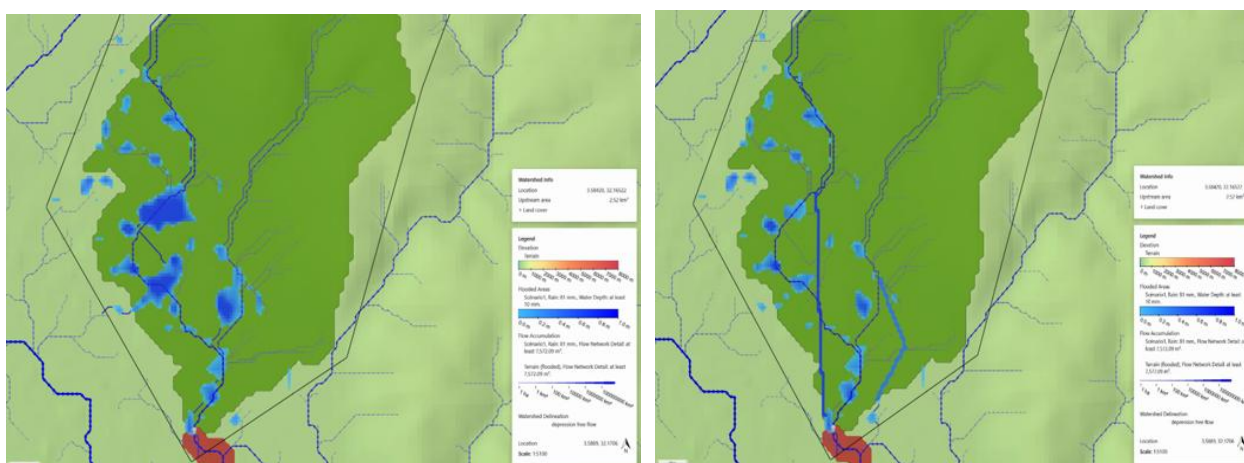
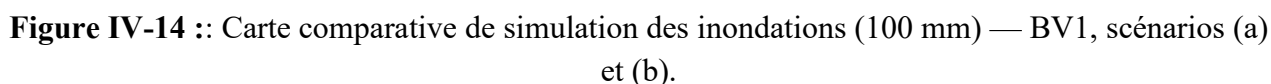


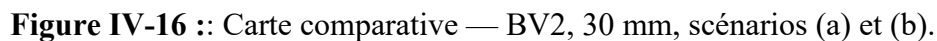
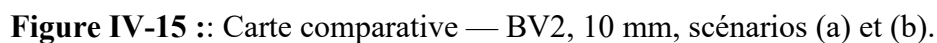
Figure IV-13 :: Carte comparative de simulation des inondations (80 mm) — BV1, (a) et (b).

Analyse — 100 mm

Sous 100 mm, l'état naturel présente les inondations les plus importantes, avec une forte concentration dans les zones basses. Le Lower Path améliore la canalisation des eaux vers les axes principaux de drainage. Les zones inondées restent présentes, mais sont moins dispersées et plus concentrées le long des chenaux par rapport à l'état naturel.



Les mêmes scénarios (10, 30, 50, 80 et 100 mm) ont été appliqués aux bassins versants 2, 3 et 4. Les résultats confirment les tendances observées sur le BV1 : progression systématique des zones inondées avec l'intensité pluviométrique et amélioration du drainage après application des modifications hydrologiques.



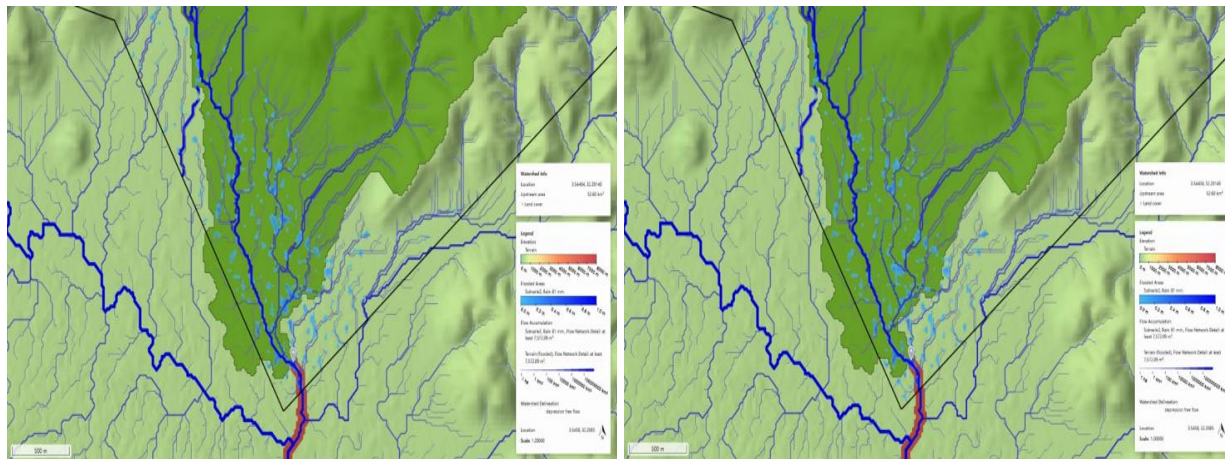


Figure IV-17 :: Carte comparative — BV2, 50 mm, scénarios (a) et (b).

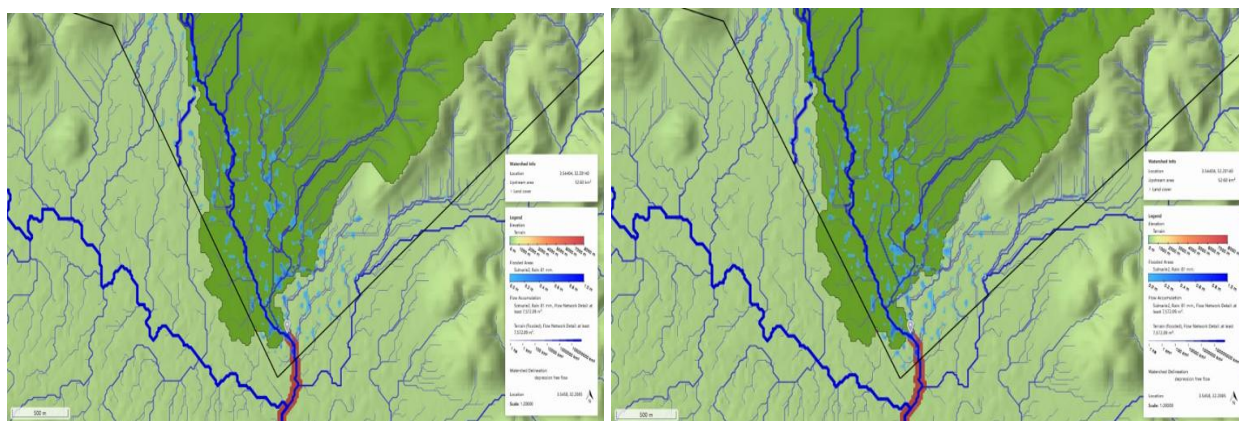


Figure IV-18 :: Carte comparative — BV2, 80 mm, scénarios (a) et (b).

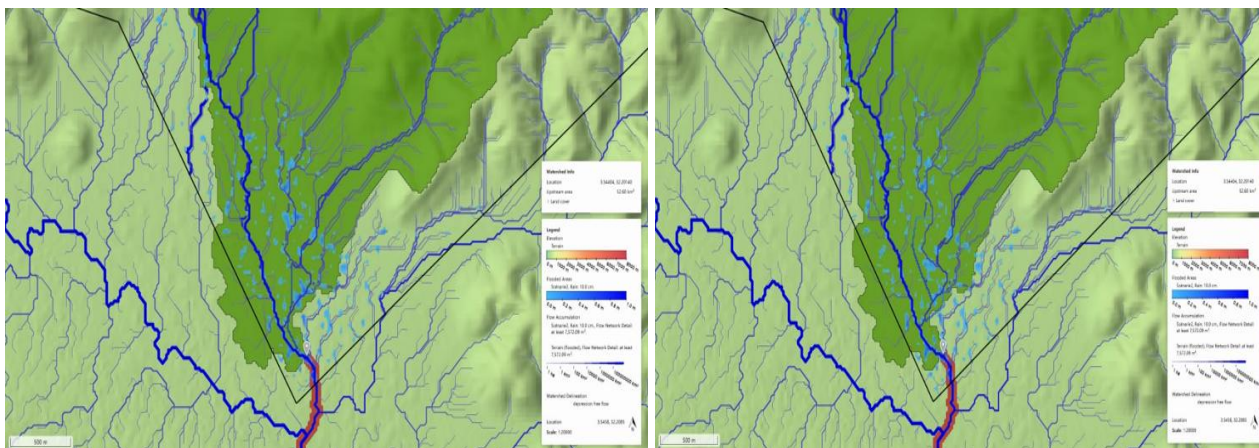


Figure IV-19 : Carte comparative — BV2, 100 mm, scénarios (a) et (b).

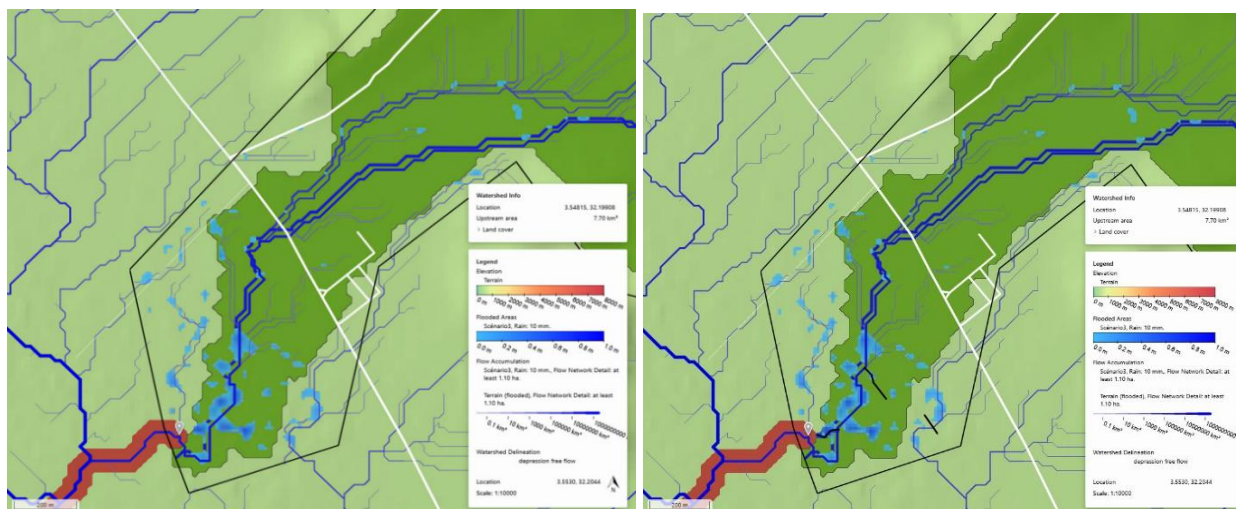


Figure IV-20: Carte comparative — BV3, 10 mm, scénarios (a) et (b).

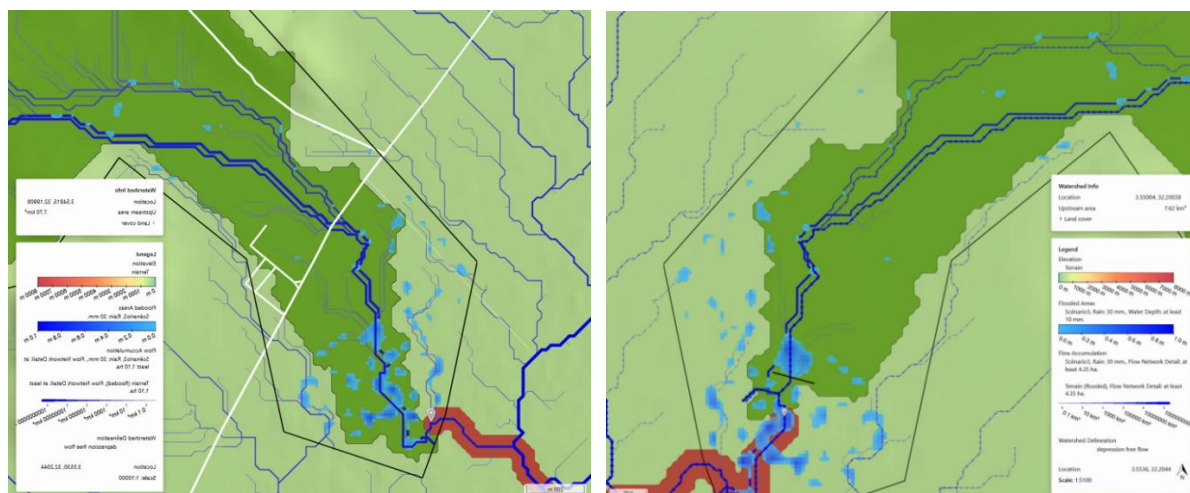


Figure IV-21: Carte comparative — BV3, 30 mm, scénarios (a) et (b).

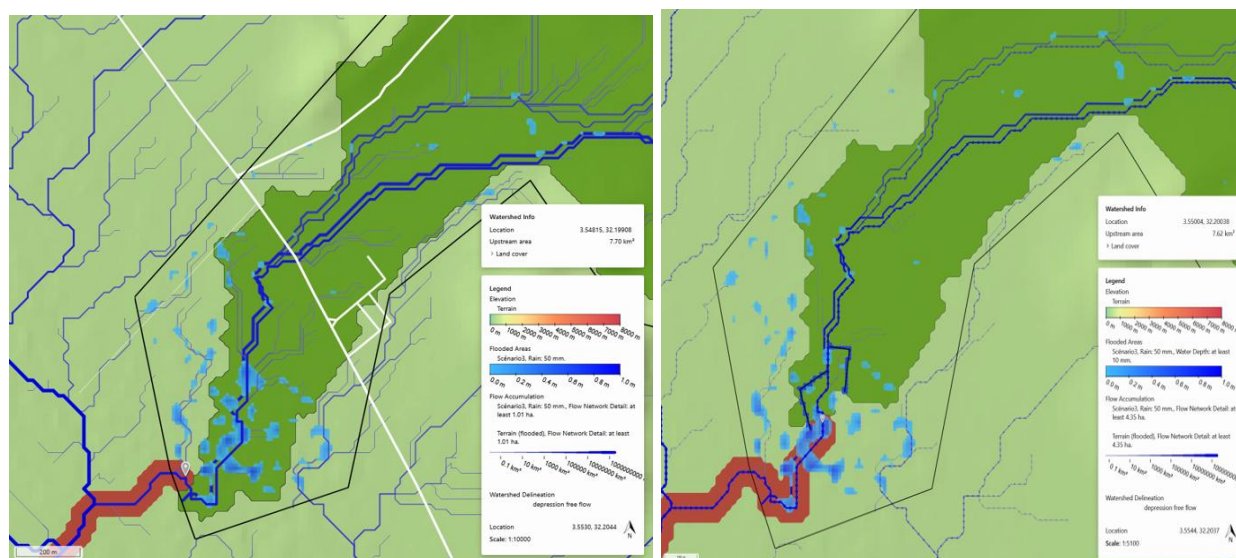


Figure IV-22: Carte comparative — BV3, 50 mm, scénarios (a) et (b).

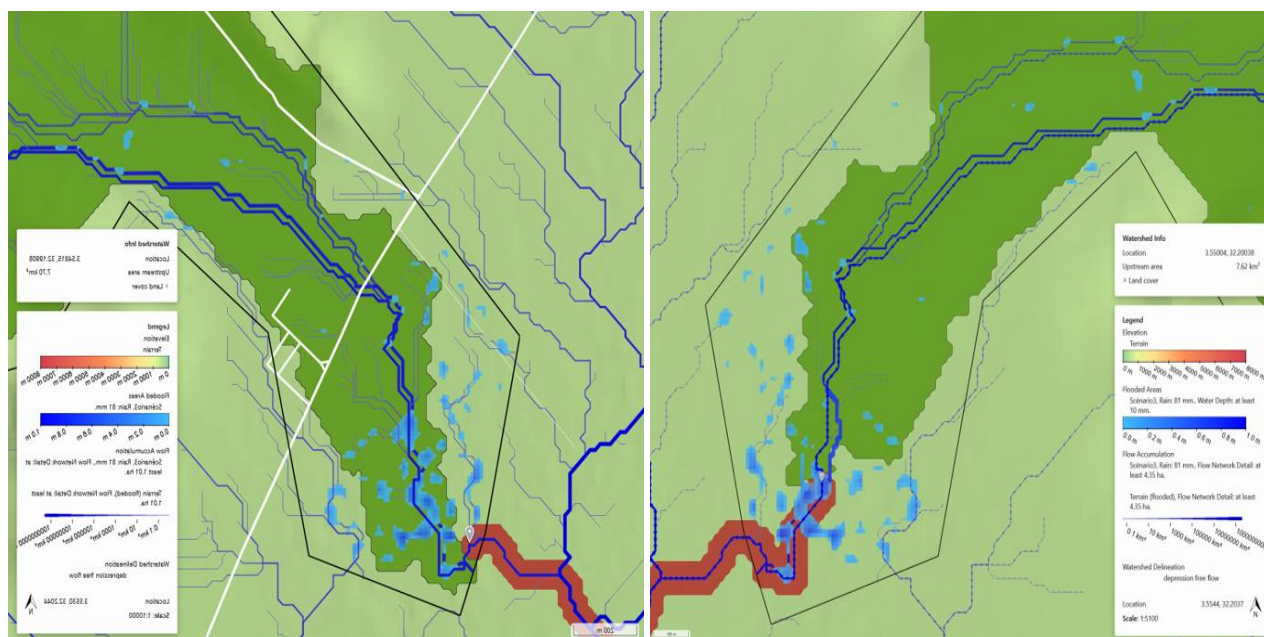


Figure IV-23: Carte comparative — BV3, 80 mm, scénarios (a) et (b).

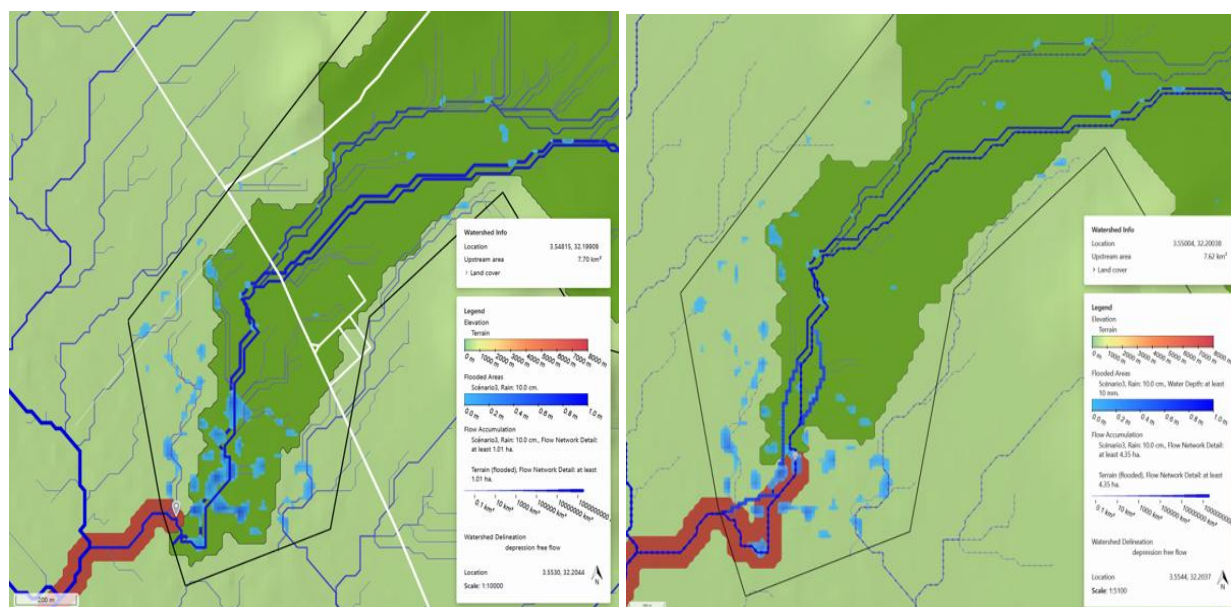


Figure IV-24: Carte comparative — BV3, 100 mm, scénarios (a) et (b).

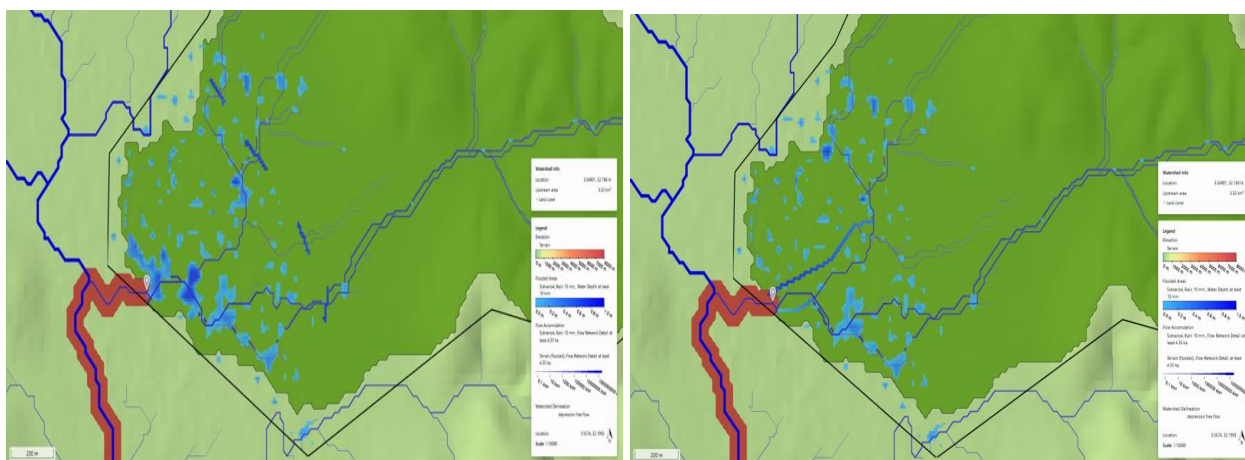


Figure IV-25: Carte comparative — BV4, 10 mm, scénarios (a) et (b).

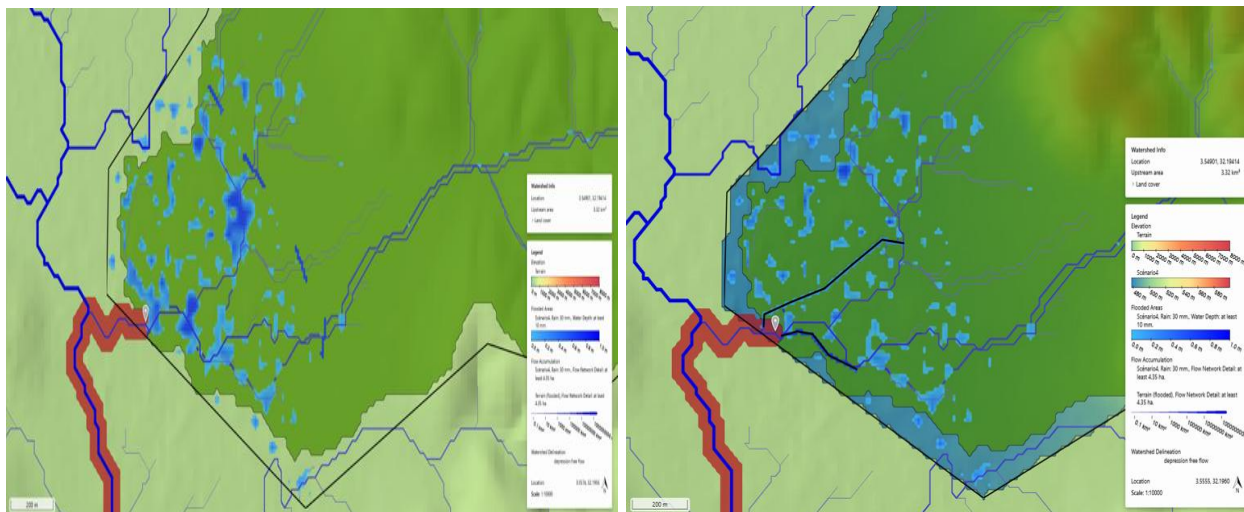


Figure IV-26: Carte comparative — BV4, 30 mm, scénarios (a) et (b).

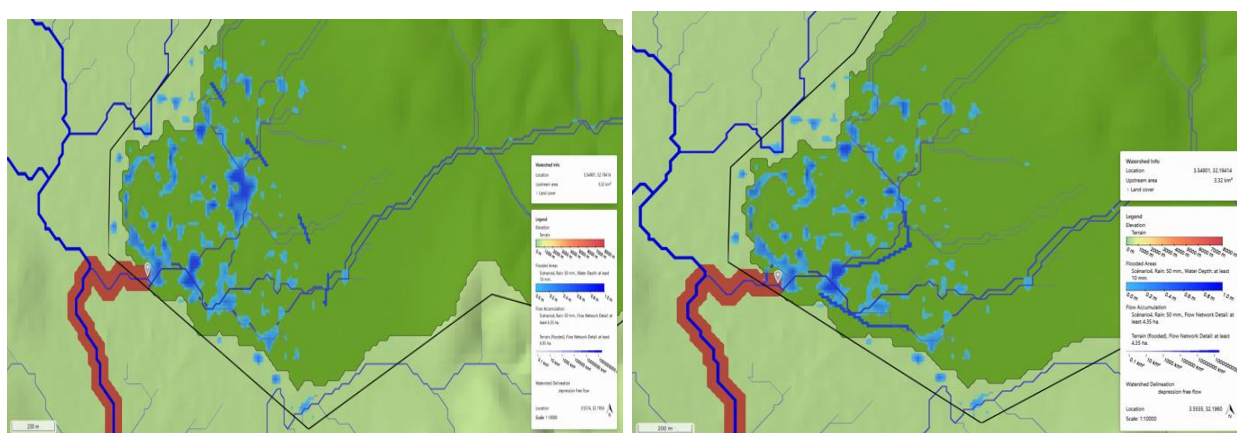


Figure IV-27: Carte comparative — BV4, 50 mm, scénarios (a) et (b).

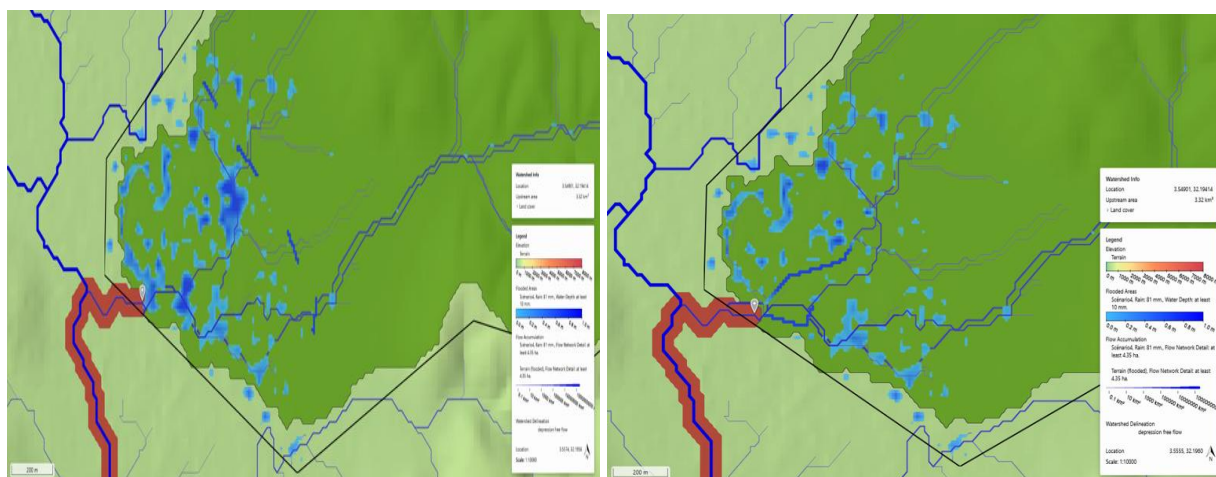


Figure IV-28: Carte comparative — BV4, 80 mm, scénarios (a) et (b).

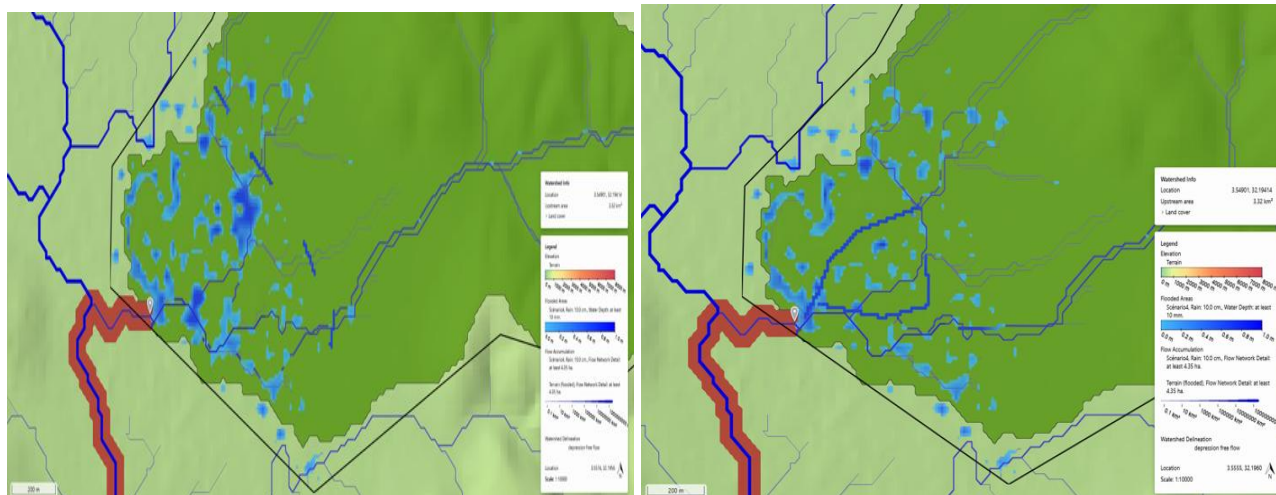


Figure IV-29: Carte comparative — BV4, 100 mm, scénarios (a) et (b).

IV-6. Analyse des profils topographiques

Des profils topographiques ont été extraits pour chaque scénario afin de visualiser l'effet des modifications hydrologiques sur la morphologie apparente du terrain et sur la dynamique du ruissellement de surface.

IV-6-1. Bassins versants 1 et 2

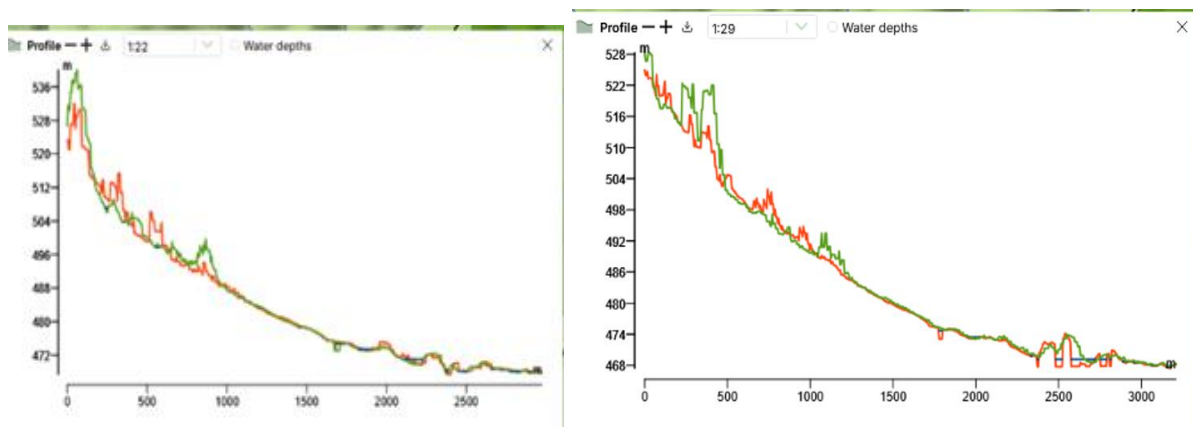


Figure IV-30: Profils topographiques comparatifs — BV1, précipitation de 10 mm.

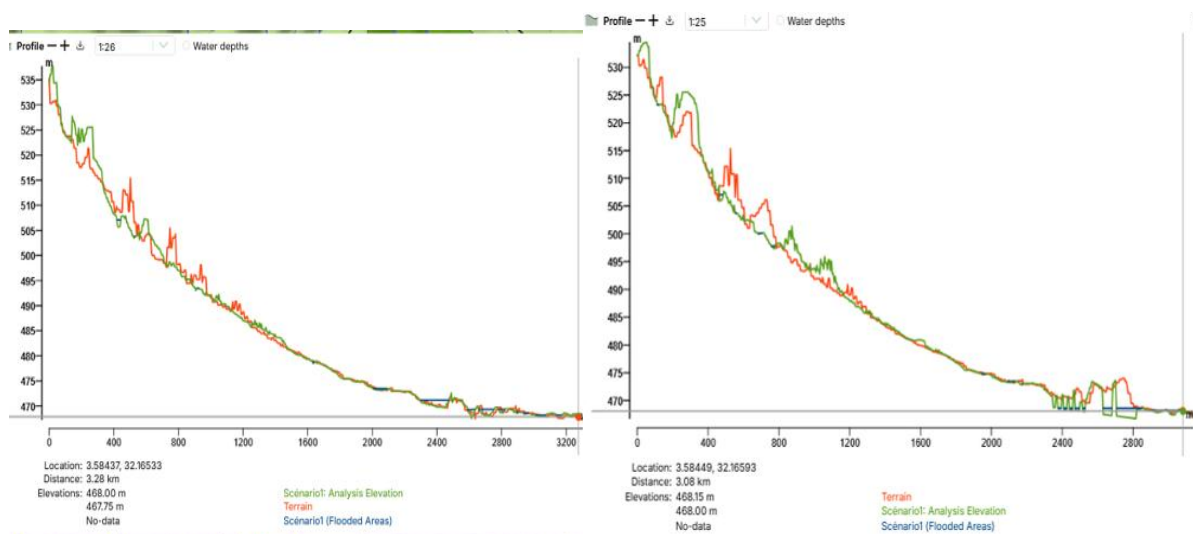


Figure IV-31 : Profils topographiques comparatifs — BV1, précipitation de 100 mm.

IV-6-2. Bassins versants 3 et 4

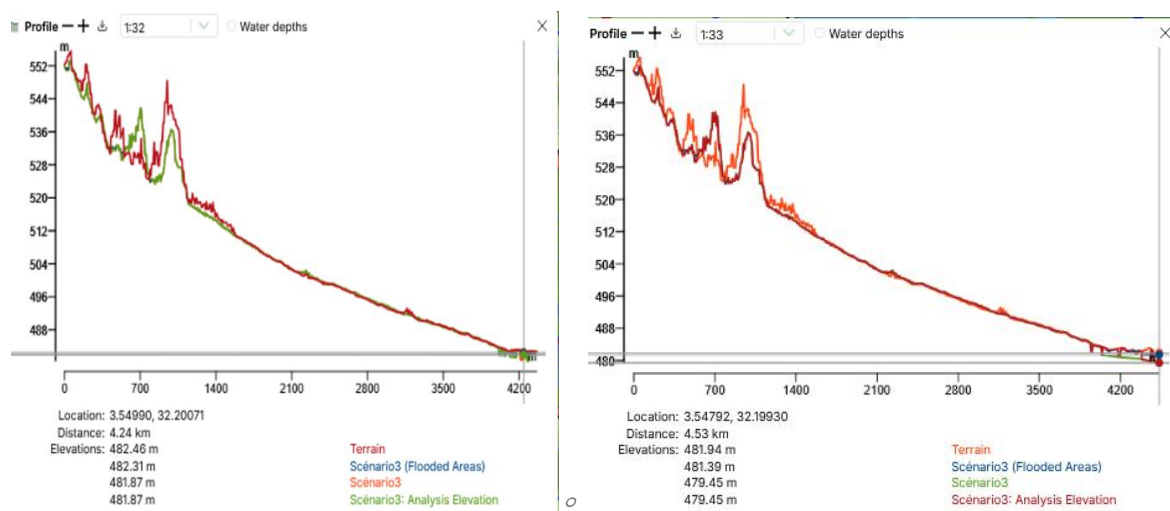


Figure IV-32 : Profils topographiques comparatifs — BV3, précipitation de 30 mm.

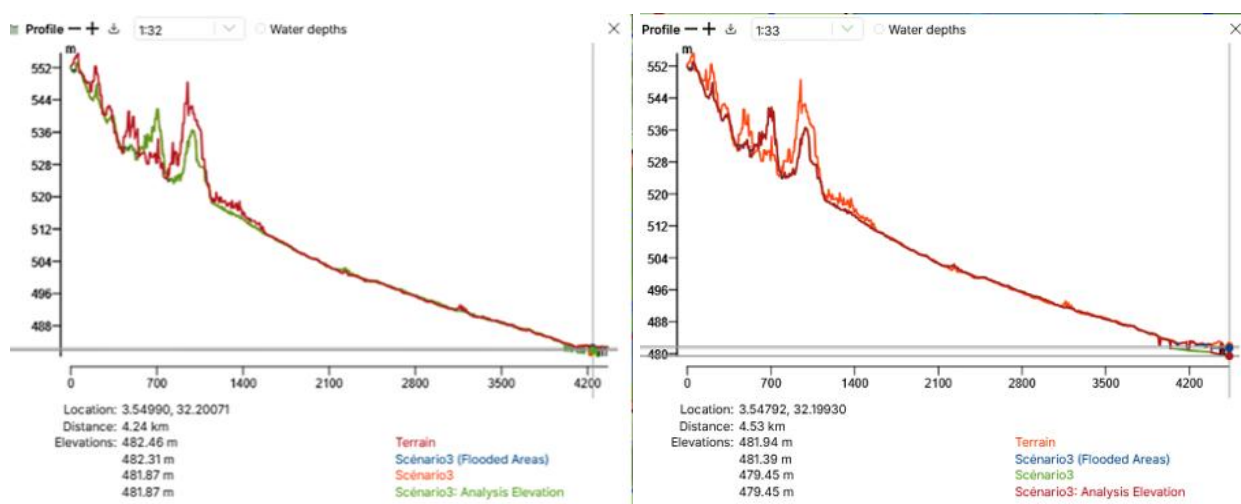


Figure IV-33: Profils topographiques comparatifs — BV3, précipitation de 80 mm.

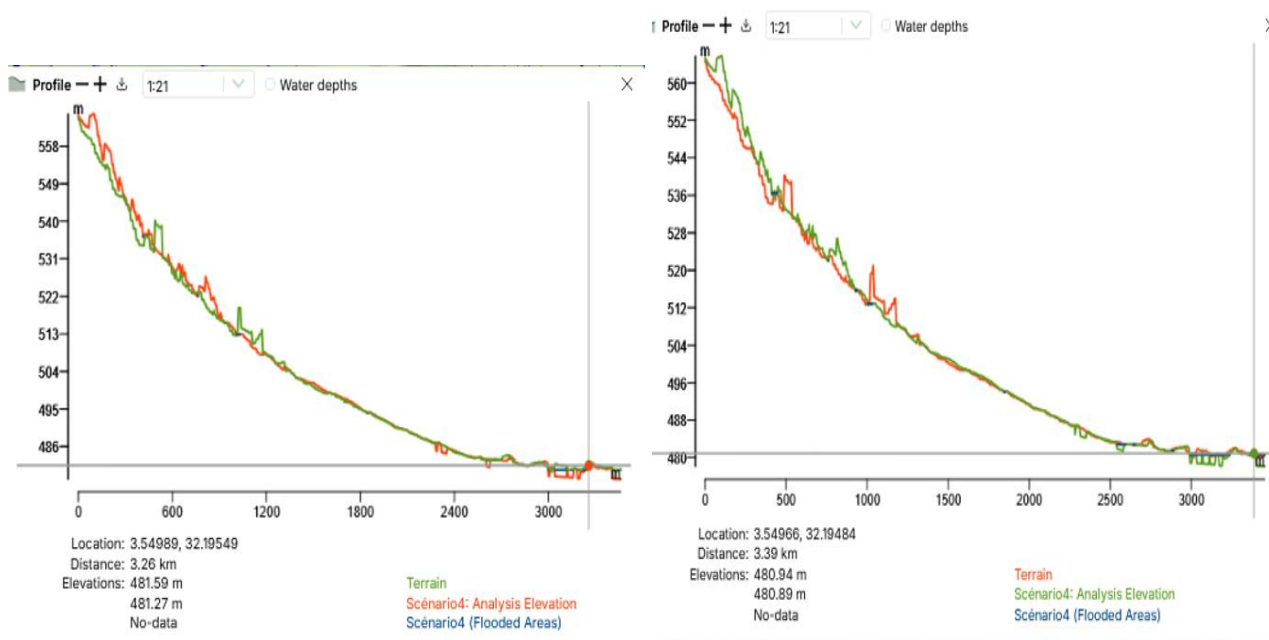


Figure IV-34: Profils topographiques comparatifs — BV4, précipitation de 50 mm.

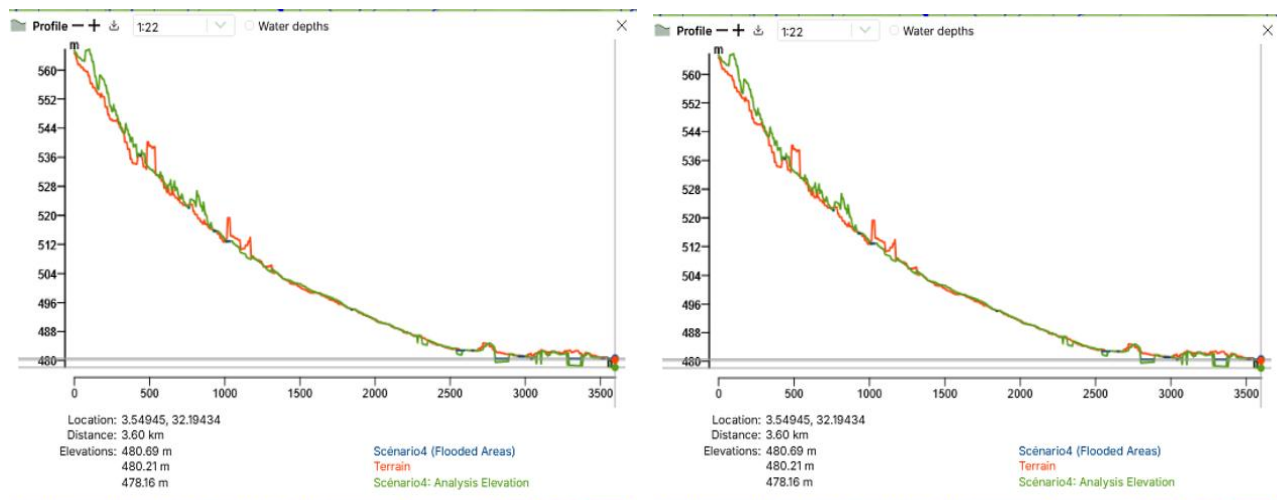


Figure IV-35: Profils topographiques comparatifs — BV4, précipitation de 100 mm.

IV-6-3. Interprétation générale des profils

Dans tous les bassins versants et pour toutes les intensités testées, l'analyse comparative des profils révèle que les modifications hydrologiques (Lower Path, Flatten) n'affectent pas significativement la morphologie générale du terrain, mais améliorent l'orientation et la régularité des écoulements de surface. Une diminution relative de l'accumulation des eaux dans les zones basses est systématiquement observée dans l'état modifié (b) par rapport à l'état naturel (a). L'effet est d'autant plus marqué que l'intensité des précipitations est élevée.

IV-7. Interprétation des résultats et synthèse

IV-7-1. Influence des précipitations sur le ruissellement

Les simulations montrent une relation directe entre l'intensité des précipitations et l'extension des zones inondables. Pour les faibles intensités (10 mm), les accumulations restent localisées. Dès 50 mm, les zones inondables s'étendent significativement, et à 100 mm, elles atteignent leur extension maximale avec une forte dispersion le long des axes d'écoulement et dans les dépressions topographiques.

IV-7-2. Influence des caractéristiques des bassins versants

La superficie, la pente et la forme des bassins conditionnent directement la vitesse du ruissellement et l'accumulation des eaux. Le BV1, de grande superficie (52,60 km²), génère des volumes de ruissellement plus importants, tandis que les bassins plus petits (BV3 : 3,32 km²) montrent une réponse plus rapide mais des surfaces inondées plus limitées.

IV-7-3. Efficacité des modifications hydrologiques numériques

La comparaison systématique entre les scénarios naturels (a) et modifiés (b) met en évidence l'efficacité des outils Lower Path et Flatten. Ces interventions permettent de mieux orienter les flux hydriques vers les axes de drainage, de réduire la concentration des eaux dans les dépressions sensibles et de diminuer l'extension des surfaces submersibles. Ces effets positifs sont cohérents sur l'ensemble des bassins versants et des scénarios testés.

Le tableau ci-dessous synthétise les principaux résultats par bassin versant et par scénario :

Tableau IV-2 : Synthèse des résultats de simulation — état naturel vs. état modifié.

Scénario (mm)	Bassin versant	État naturel (a)	Après modification (b)	Outils appliqués
10	BV 1 (52,60 km ²)	Accumulation modérée dans les zones basses	Réduction de la dispersion, meilleur drainage	Lower Path
30	BV 1	Extension des zones inondables, convergence hydrologique	Zones inondables moins étendues, chenaux mieux définis	Lower Path
50	BV 1	Fort ruissellement, accumulation aux points de convergence	Amélioration du drainage, réduction des inondations	Lower Path + Flatten
80	BV 1	Augmentation importante des zones submersibles	Meilleure organisation des écoulements, zones concentrées	Lower Path + Flatten
100	BV 1	Inondation maximale, forte dispersion	Réduction relative des zones inondées, chenaux mieux structurés	Lower Path
10–100	BV 2 (7,79 km ²)	Même tendance : accumulation progressive selon intensité	Amélioration systématique du drainage	Lower Path + Flatten
10–100	BV 3 (3,32 km ²)	Même tendance : accumulation progressive selon intensité	Amélioration systématique du drainage	Lower Path + Flatten
10–100	BV 4	Même tendance : accumulation progressive selon intensité	Amélioration systématique du drainage	Lower Path + Flatten

IV-7-4. Apport de SCALGO Live

La plateforme SCALGO Live a démontré son utilité pour une analyse hydrologique préliminaire en zone aride. Son interface simple, l'absence d'installation logicielle et la rapidité de simulation sont des atouts majeurs. Elle permet de visualiser clairement les directions d'écoulement, les zones d'accumulation et l'impact des aménagements, constituant ainsi un outil de décision opérationnel pour la gestion du risque inondation.

Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse spatiale et hydrologique complète de la région de Sebseb à l'aide de SCALGO Live. La délimitation de quatre bassins versants, la simulation de cinq scénarios pluviométriques (10 à 100 mm) et la comparaison entre états naturels et modifiés ont permis d'identifier les zones les plus exposées aux inondations et d'évaluer l'efficacité des interventions

hydrologiques numériques.

Les résultats montrent que les zones basses des bassins versants sont systématiquement les plus vulnérables, et que l'intensité des précipitations est le facteur déterminant de l'extension des surfaces inondables. Les modifications de type Lower Path et Flatten contribuent de manière significative à améliorer le drainage et à réduire les risques, sans modifier la morphologie générale des bassins. Ces enseignements constituent une base solide pour les recommandations de gestion présentées au chapitre suivant.

CONCLUSION GENERALE



Conclusion Générale

Ce mémoire a porté sur l'analyse spatiale et la modélisation hydrologique du risque d'inondation dans la région de Sebseb, zone aride du sud algérien, en exploitant la plateforme SCALGO Live. Le travail s'est articulé autour d'une progression logique : un état de l'art sur les inondations en milieu aride, une caractérisation de la zone d'étude, une méthodologie fondée sur des données topographiques librement accessibles, puis une modélisation comparative entre état naturel et état modifié sur quatre bassins versants.

Les résultats obtenus révèlent une sensibilité marquée de la région au risque inondation, notamment dans les zones basses et aux points de convergence hydrologique. L'intensité pluviométrique s'est confirmée comme le facteur déterminant de l'extension des surfaces inondables : dès 50 mm de précipitations, les zones submersibles s'étendent significativement, et à 100 mm elles atteignent leur maximum spatial. Les bassins versants, bien que de superficies variables (3,32 à 52,60 km²), présentent tous un comportement à ruissellement rapide lié à la prédominance des surfaces naturelles peu végétalisées et à la faible capacité d'infiltration des sols.

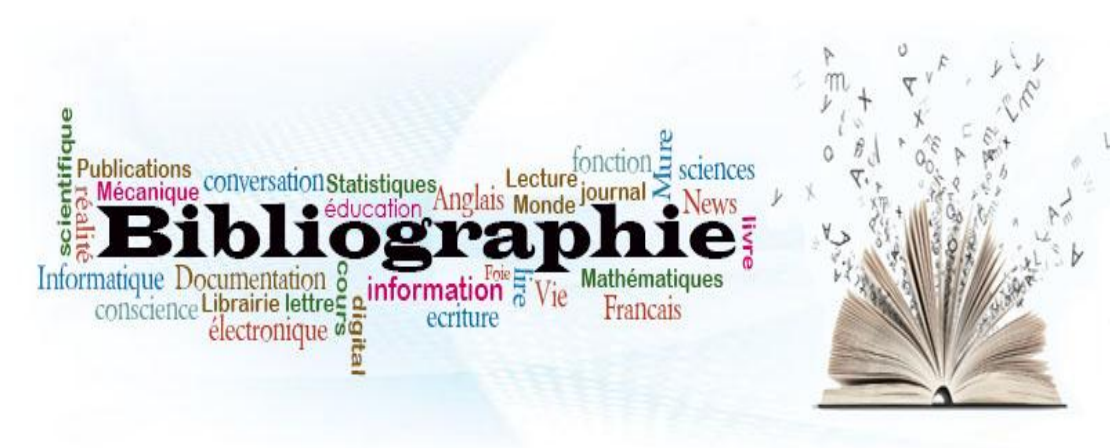
La comparaison systématique entre les scénarios naturels et modifiés a démontré l'efficacité des outils de modification topographique numérique Lower Path et Flatten, qui permettent de mieux orienter les flux hydriques vers les axes de drainage principaux et de réduire l'accumulation des eaux dans les dépressions sensibles, sans altérer la morphologie générale du terrain. Ces résultats sont cohérents sur l'ensemble des bassins et des intensités testées, ce qui renforce leur fiabilité qualitative.

L'analyse réalisée sur les quatre bassins versants a également permis d'identifier les zones les plus exposées aux accumulations d'eau et aux écoulements concentrés. Les cartes produites sous SCALGO Live ont montré que les secteurs situés en aval et au niveau des points de convergence hydrologique présentent les niveaux de vulnérabilité les plus élevés. Les simulations effectuées pour différents scénarios pluviométriques ont confirmé une augmentation progressive de l'étendue des zones inondables avec l'accroissement des précipitations, mettant en évidence la forte sensibilité hydrologique de la région de Sebseb.

Sur le plan méthodologique, ce travail démontre qu'une analyse préliminaire rigoureuse du risque inondation est réalisable dans un contexte de données rares, en combinant un MNT issu d'Open Topography, un traitement sous QGIS et la plateforme SCALGO Live. Cette approche, accessible et peu coûteuse, constitue une alternative pragmatique aux modélisations hydrauliques lourdes, particulièrement adaptée aux régions arides algériennes encore peu instrumentées.

En perspective, les résultats produits gagneraient à être approfondis par un couplage avec un modèle hydraulique dynamique tel que HEC-RAS 2D, permettant d'intégrer la dimension temporelle des crues. L'acquisition d'un MNT à haute résolution et l'installation de stations de mesure hydrométrique renforceraient la précision et la validabilité des simulations futures. Les cartes d'aléa issues de cette étude peuvent d'ores et déjà servir de base à la planification urbaine locale et à l'orientation des décisions en matière de protection contre les inondations dans la région de Sebseb.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



Références Bibliographiques

- [1] Adhikari, U. (2020). Vulnerability assessment of urban flooding in Lerum Municipality and study of effectiveness of blue-green mitigation measures using software MIKE 21 and SCALGO Live. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [2] Aoulmit, F., & Chabour, N. (2014). Apport du modèle numérique de terrain (MNT) dans la compréhension du comportement hydrologique du sous-bassin versant d'Oued Djendjen. Mémoire, Université de Constantine, Algérie.
- [3] Azioune, R., Tatar, H., & Nouaceur, Z. (s.d.). Pluies extrêmes et risque d'inondation dans la ville de Biskra (Algérie).
- [4] Bekhira, A., Habi, M., & Morsli, B. (2019). Application des modèles HEC-HMS et HEC-RAS dans l'analyse des inondations des bassins versants arides — cas de l'Oued Béchar (Algérie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(2), 153–174.
- [5] Berdane, K. (2016). Crues et inondations en zone aride : Cas du bassin de l'oued Deffa dans le sud-ouest algérien. Mémoire de Magister, Option : Génie de l'eau, Algérie.
- [6] Bouamer, L. (2016). Contrôle de variation de la qualité des eaux des deux nappes phréatique et albienne de la région Sebseb. Mémoire, Algérie.
- [7] Boutaghane, H., Boulmaiz, T., Lameche, E. K., Lefkir, A., Hasbaia, M., Abdelbaki, C., Moulahoum, A. W., Keblouti, M., & Bermad, A. (s.d.). Flood Analysis and Mitigation Strategies in Algeria.
- [8] Bouthiba, F. (s.d.). Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant semi-aride (Cas des bassins versants du Rouina, Ouahrane, Tighazel). Mémoire de Magister, Spécialité : Hydraulique, Option : Ouvrage hydraulique, Algérie.
- [9] Faregh, N., & Benkhalel, A. (2021). Cartographie des zones inondables dans les régions arides par approche multicritère SIG. *Revue Algérienne de l'Eau*, 8(1), 45–62.
- [10] Giangola-Murzyn, A. (2013). Modélisation et paramétrisation hydrologique de la ville, résilience aux inondations. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre, Université Paris-Est, France.
- [11] Hafnaoui, M. A., Menani, M. R., & Hamimed, A. (2022). Flood Hazard Mapping in an Arid Watershed Using HEC-HMS/HEC-RAS Models Integrated with GIS. *Natural Hazards*, 112, 2451–2475.
- [12] Hallil, D., & Redjem, A. (2022). GIS-Based Multi-Criteria Approach for Flood Susceptibility Mapping in the Saharan Atlas Mountains. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 1024–1048.
- [13] Hamlat, A., Guidoum, A., & Koulagi, E. (2021). Flood Risk Assessment Using GIS-Based Analytic Hierarchy Process in North-Western Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 534.
- [14] Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*, 14, 446–460.
- [15] Karibi, K., & Messous, O. (s.d.). Les documents d'urbanisme à l'épreuve de la gestion des risques d'inondations : Étude de cas du Grand Kénitra au Maroc.
- [16] Khelifa, A., & Remini, B. (s.d.). The Sharing of Flood Waters in the Ksours of Ghardaïa and Berriane (Algeria) : Hydraulic Study.
- [17] Khene, B. (2013). Dynamique des systèmes de production phoénicoles et promotion de la filière « dattes » : Perspectives de développement (Cas de la région de Ghardaïa). Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Algérie.
- [18] Khenfer, Z. E., & Douachi, D. E. (s.d.). Protection de la ville de Ouargla contre les inondations. Mémoire, Spécialité : Ressources hydriques, Algérie.
- [19] Latreche, M. S., & Abdelhai, Z. (s.d.). Mise en place de stratégies intelligentes de résilience face aux risques d'inondations – Cas de la ville de Jijel. Mémoire, Algérie.
- [20] Madi, M., Bouzeria, H., & Remini, B. (2023). Flood Risk Mapping Using Coupled Hydrological-Hydraulic Modeling in the Arid Tamanrasset Watershed (Southern Algeria). *Natural Hazards Research*, 3(1), 89–104.
- [21] Redjem, A., Nouibat, B., & Naghel, M. (2020). Pour des villes résilientes aux inondations : Cas de la ville de M'sila, Algérie. *Sciences & Technologie D*, 51, 33–42.

- [22] Remini, B. (2023). Flash floods in Algeria. *Larhyss Journal*, 56, 267–307.
- [23] Remini, B. (s.d.). Les foggaras de l'oasis de Ghardaïa (Algérie) : Le partage des eaux de crues.
- [24] Roukh, A., & Nadji, A. (2018). Étude du risque d'inondation par modélisation hydraulique à Ain Témouchent. *Larhyss Journal*, 33, 181–197.
- [25] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- [26] Sahli, M. (s.d.). Les enjeux de la gestion collective des eaux de crues et des inondations dans la vallée du M'zab.
- [27] World Meteorological Organization. (2020). *State of Climate Services 2020: Risk and Early Warning Systems*. WMO-No. 1252. Geneva.
- [28] Yamani, K., Hazzab, A., Sekkoum, M., & Slimane, T. (s.d.). Mapping of vulnerability of flooded area in arid region : Case study of Ghardaia (Algeria).
- [29] Zegait, R. (s.d.). Étude de protection contre les inondations de la ville de Sebseb. Mémoire, Algérie.
- [30] Zegait, R., & Pizzo, P. (2023). Flood control reservoir sizing using VBA programming for Saharan urban areas. *Water Practice & Technology*, 18(3), 675–690.
- [31] Zegait, R., Şen, Z., Pulido-Bosch, A., Madi, H., & Hamadeh, B. (s.d.). Flash Flood Risk and Climate Analysis in the Extreme South of Algeria (Case of In-Guezzam City).
- [32] Zegait, R., Toumi, S., Halouane, M., & Meddi, M. (2022). Flash Flood Modeling and Risk Assessment of In-Guezzam Watershed Using HEC-HMS, HEC-RAS and Alsat Imagery. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 2026–2048.
- [33] Zerfaoui, A. (2008). Étude de protection de la ville de Sidi Ghiles (W. Tipaza) contre les inondations. Mémoire, Algérie.
- [34] Ziane, A. (s.d.). Cartographie des états de surface et évaluation des risques de la salinisation des sols de la plaine du Bas Cheliff par couplage entre la télédétection et le Modèle Numérique de Terrain. Mémoire de Magister, Option : Écopédologie, Eau et Environnement, Algérie.