



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
كلية علوم الأرض والكون
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
قسم الجغرافيا والتهيئة الإقليمية
Département de Géographie et de l'Aménagement du Territoire

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention de diplôme de Master en
Géographie et aménagement du territoire
Domaine : Sciences de la terre et de l'univers
Filière : Géographie et aménagement du territoire
Spécialité : Gestion des risques et sécurité civile

Titre du mémoire

La Résilience urbaine face au risque d'inondation Cas d'étude Ain Sefra

Réalisé et présenté par les étudiants :

Mechelloukh Safa & Mediouni Habib

Sous la direction de Mr :

ALLAL Nadir Elouassini

Devant le jury composé de :

Mr. Boutrid
Mohamed Lamine

Maitre de
conférences A

Université d'Oran 2 –
Mohamed Ben Ahmed

Président

Mr. Allal Nadir
Elouassini

Maitre-assistant
A

Université d'Oran 2 –
Mohamed Ben Ahmed

Encadreur

Mr. Belmahi Nadir

Maitre de
conférences A

Université d'Oran 2 –
Mohamed Ben Ahmed

Examineur

Année universitaire : 2025/2026

Résumé :

Les inondations constituent l'un des principaux risques naturels affectant les régions semi-arides d'Algérie. La ville d'Aïn Sefra, située dans la wilaya de Naâma, a connu le 08 septembre 2024 une crue exceptionnelle ayant provoqué d'importants dégâts humains et matériels. Ce mémoire vise à analyser le risque d'inondation dans le bassin versant d'Aïn Sefra à travers une approche intégrée combinant les Systèmes d'Information Géographique (SIG), la télédétection et la modélisation hydraulique sous HEC-RAS 2D. La méthodologie adoptée repose sur l'exploitation d'un Modèle Numérique de Terrain, des données d'occupation du sol, des traces de crue relevées sur le terrain et des images satellitaires afin de reconstituer la dynamique de l'événement de septembre 2024 et d'évaluer les zones exposées. Les résultats mettent en évidence une forte vulnérabilité des secteurs urbanisés situés à la confluence des oueds, caractérisés par des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement élevées. Les simulations réalisées démontrent également l'efficacité des aménagements hydrauliques proposés, notamment les bassins de rétention, le recalibrage des lits et les ouvrages de protection, qui permettent de réduire significativement les hauteurs d'eau et l'étendue des zones inondées. Cette étude constitue ainsi un outil d'aide à la décision pour la gestion durable du risque d'inondation et le renforcement de la résilience urbaine à Aïn Sefra.

Mots-clés

Aïn Sefra – Inondation – HEC-RAS 2D – SIG – Télédétection – Modélisation hydraulique – Risque d'inondation – Résilience urbaine.

المخلص

تُعد الفيضانات من أهم الأخطار الطبيعية التي تؤثر على المناطق شبه الجافة في الجزائر. وقد شهدت مدينة عين الصفراء، الواقعة بولاية النعامة، فيضاً استثنائياً يوم 08 سبتمبر 2024 تسبب في خسائر بشرية ومادية معتبرة. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل خطر الفيضانات في حوض عين الصفراء من خلال مقارنة متكاملة تجمع بين نظم المعلومات الجغرافية (SIG)، والاستشعار عن بعد، والنمذجة الهيدروليكية باستخدام برنامج HEC-RAS 2D. وتعتمد المنهجية المتبعة على استغلال نموذج الارتفاعات الرقمية (MNT)، وبيانات استعمالات الأراضي، وآثار الفيضانات المسجلة ميدانياً، إضافة إلى الصور الفضائية، من أجل إعادة بناء ديناميكية فيضان سبتمبر 2024 وتحديد المناطق الأكثر تعرضاً للخطر. وقد أبرزت النتائج هشاشة المناطق العمرانية الواقعة عند ملتقى الأودية، حيث سُجلت ارتفاعات كبيرة للمياه وسرعات عالية للجريان. كما أظهرت المحاكاة فعالية التهيئات الهيدروليكية المقترحة، خاصة أحواض الاحتجاز، وإعادة تهيئة مجاري الأودية، ومنشآت الحماية، في التقليل من ارتفاع المياه ومساحة المناطق المغمورة. وتُشكل هذه الدراسة أداة مهمة لدعم اتخاذ القرار في مجال التسيير المستدام لمخاطر الفيضانات وتعزيز القدرة على الصمود الحضري بمدينة عين الصفراء.

الكلمات المفتاحية: عين الصفراء – الفيضانات – HEC-RAS 2D – نظم المعلومات الجغرافية – الاستشعار عن بعد – النمذجة الهيدروليكية – مخاطر الفيضانات – المرونة الحضرية.

Abstract

Floods represent one of the major natural hazards affecting the semi-arid regions of Algeria. The city of Ain Sefra, located in Naâma Province, experienced an exceptional flood event on September 8, 2024, causing significant human and material losses. This study aims to analyze flood risk within the Ain Sefra watershed using an integrated approach that combines Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, and hydraulic modeling with HEC-RAS 2D. The adopted methodology relies on the use of a Digital Elevation Model (DEM), land-use data, flood marks collected in the field, and satellite imagery to reconstruct the dynamics of the September 2024 flood and identify vulnerable areas. The results highlight the high vulnerability of urban zones located at the confluence of the wadis, where water depths and flow velocities are particularly high. Furthermore, the simulations demonstrate the effectiveness of the proposed hydraulic measures, including retention basins, channel recalibration, and protection structures, which significantly reduce water levels and the extent of flooded areas. This study therefore provides a valuable decision-support tool for sustainable flood risk management and for strengthening urban resilience in Ain Sefra.

Keywords: Ain Sefra – Flood – HEC-RAS 2D – GIS – Remote Sensing – Hydraulic Modeling – Flood Risk – Urban Resilience.

Dédicace :

À ma sœur Amani

*« Une sœur est un trésor que le temps ne peut ni effacer ni remplacer. »
Avec toute mon affection et ma profonde gratitude.*

&

À mon cher voisin Riadh

*« Les bons voisins sont la famille que l'on choisit sans le savoir. »
Avec mes sincères remerciements pour ta gentillesse et ton soutien.*

Remerciements

﴿وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا﴾

Au terme de ce travail, il nous est particulièrement agréable d'exprimer notre profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire de master.

Nous remercions avant tout Allah le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, la volonté, la patience et le courage nécessaires pour accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

Nous adressons nos plus sincères et respectueux remerciements à notre encadrant, ALLAL Nadir Elouassini, pour son encadrement exemplaire, sa disponibilité constante, ses orientations pertinentes ainsi que pour la confiance qu'il nous a témoignée tout au long de cette étude. Ses conseils avisés, sa rigueur scientifique et son soutien précieux ont constitué une véritable source d'inspiration et ont largement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur l'ingénieur Sahraoui Omar pour son aide précieuse, son accompagnement technique, sa générosité ainsi que pour le temps qu'il nous a consacré. Ses remarques constructives et son soutien ont été d'une grande importance dans la réalisation de ce projet.

Nos pensées les plus reconnaissantes s'adressent à nos familles respectives, qui ont toujours été présentes à nos côtés. Nous leur exprimons toute notre gratitude pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leur patience, leurs encouragements permanents ainsi que leur soutien moral tout au long de notre parcours universitaire. Sans leur confiance et leurs prières, ce travail n'aurait pu voir le jour.

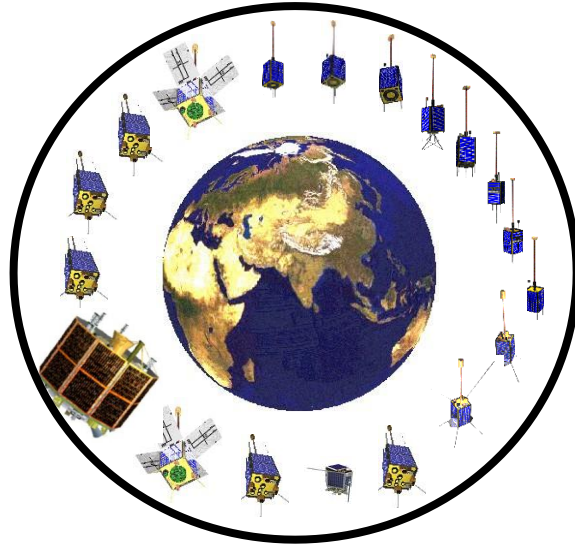
Nous adressons également nos remerciements à l'ensemble de nos enseignants et à tous ceux qui ont contribué à notre formation académique et professionnelle, en nous transmettant leur savoir et leur expérience.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce mémoire et ont contribué à faire de cette expérience une étape enrichissante de notre parcours.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : Description du phénomène d'inondation et problématique des crues en Algérie	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition et genèse du phénomène d'inondation.....	3
 La vallée fluviale	3
I.3.1 Le lit mineur	5
I.3.2 Le lit majeur.....	5
I.3.3 Lit moyen	5
I.4 L'aléa et la vulnérabilité des risques des inondations.....	5
I.5 Typologie des risques d'inondation.....	6
I.5.1 Le risque d'origine pluvial	7
I.5.2 Le risque fluvial	7
I.5.3 Le risque torrentiel.....	7
 Évaluation du risque d'inondation	7
I.7 Mesures de gestion du risque d'inondation	8
I.8 Caractérisation de risque d'inondation.....	8
I.8.1 L'approche historique.....	9
I.8.1.1 Les limnigrammes.....	9
I.8.1.2 Les "laisses" de crues.....	9
I.8.1.3 Les témoignages.....	9
I.8.2 L'approche hydrogéomorphologique	9
I.8.2.2 Informations requises	10
Résultats.....	11
I.8.3 L'approche par modélisation hydraulique.....	11
I.8.3.1 Performance d'un modèle hydraulique.....	12
I.8.3.2 Typologie des modèles utilisés en hydraulique fluviale	12
✓ Les modèles bidimensionnels	12
• Discrétisation spatiale et schémas de résolution.....	12
✓ Les modèles monodimensionnels.....	13
• Discrétisation spatiale et schémas de résolution.....	13
✓ Les modèles hybrides.....	14
• Hypothèses.....	15
I.9 Intérêts et limites de ces approches.....	15
I.9.2 Approche hydrogéomorphologique	15
I.9.3 Approche par modélisation hydraulique.....	16
I.10 Les inondations en Algérie	17
I.10.1 Perturbations météorologiques (origine et mécanisme de formation)	18
I.10.2 Causes et types des crues catastrophiques en Algérie	18
I.10.3 Quelques cas d'inondations catastrophiques en Algérie.....	19

I.10.4	Analyse de l'événement pluvieux du 08 septembre 2024 dans la région de Naâma	20
I.10.5	Étude synoptique et caractérisation météorologique.....	21
I.10.6	Impacts immédiats des inondations du 08 septembre 2024 dans la région de Naâma :	23
I.10.7	Conséquences principales et implications pour la gestion du risque :	24
Conclusion		25
Chapitre 02 : Description des éléments du milieu physique de la région d'Ain sefra.....		21
Introduction :		21
II.1.	Évolution de l'Adaptation humaine face aux Aléas de la Nature	24
II.2.	Différents types d'inondations	25
II.3.	Les inondations dans les zones arides et semi-arides.....	25
II.5.	Présentation générale de la wilaya de Naama	27
II.6.	Le grand bassin versant d'Ain Sefra.....	37
Conclusion		59
Chapitre 03 : Cartographie des risques et réévaluation post-aménagement.....		59
III.1.	Évolution de l'occupation du sol.....	59
III.1.1	Cartographie de l'occupation du sol	61
III.2.	Impact hydrologique	63
III.2.1.	Pluviométrie et variabilité	66
III.2.2.	Contexte climatique.....	67
III.2.3.	Variabilité temporelle :	67
III.2.4.	Variabilité spatiale :	67
III.2.5.	Limites du réseau ONM et méthodes de substitution.....	68
III.3.	Cartographie de la Crue du 08 septembre 2024.....	69
III.3.1.	Objectif.....	70
III.3.2.	Méthodologie de la régénération de la Crue 8 Sept 2024 :	72
III.3.3.	Zones inondées	72
III.3.3.1.	Levé des hauteurs de la crue 2024	73
III.3.3.2.	Analyse détaillée de la crue du 8 septembre 2024.....	72
III.4.	Modélisation Hydraulique	74
III.4.1.	Méthodologie proposée :	74
1.	Calage et validation du modèle hydraulique	116
1.	Interprétation scientifique :	117
III.5.3.	Cartes de calage « hauteurs simulées / observées » :	119
III.5.4.	Cartographie du risque hydraulique « Risque Min & Risque Max » :	120
1-	Ain Sefra	120
III.5.5.	Analyse comparative inter-sites	122
III.5.6.	Analyse du champ d'écoulement à l'aide des vitesses statiques et du suivi des particules	124
2-	Cartographie de l'aléa d'inondation	127
1.	Mécanisme de croisement des couches	128
2.	Établissement des cartes de l'aléa :	130
Conclusion générale.....		135



Introduction

Les cours d'eau représentent, pour les populations riveraines, à la fois une ressource essentielle et une source potentielle de danger [Bravard et Petit, 1997]. Cette dualité, longtemps perçue comme globalement bénéfique, tend aujourd'hui à se déséquilibrer sous l'effet des mutations environnementales et anthropiques.

Selon les données de l'International Disaster Database (IDD) du Centre de Recherche sur l'Épidémiologie des Désastres (CRED), les inondations et les tempêtes occupent, au cours des dernières décennies, le premier rang des catastrophes naturelles à l'échelle mondiale, représentant près de 60 % des événements recensés entre 1990 et 2007. Ces phénomènes soulèvent des interrogations quant à leur caractère exceptionnel ou à leur lien avec les changements climatiques en cours. Toutefois, il est clairement établi que l'ampleur des dégâts est souvent liée à l'occupation humaine de zones vulnérables, urbanisées sans planification adéquate sous la pression démographique.

En Algérie, la gestion du risque d'inondation devient de plus en plus complexe. L'urbanisation croissante des lits majeurs des oueds, ainsi que la réalisation d'aménagements parfois inadaptés, contribuent à accentuer la vulnérabilité face aux crues exceptionnelles. De nombreuses régions du pays sont ainsi exposées à ces aléas hydrologiques.

La ville d'Aïn Sefra, située au sud-ouest de l'Atlas saharien, constitue un exemple représentatif de cette problématique. Implantée dans une zone à caractère semi-aride, elle est régulièrement exposée aux crues soudaines des oueds qui traversent son territoire. Ces épisodes, souvent violents et rapides, engendrent des pertes matérielles importantes et menacent la sécurité des habitants. Dans ce contexte, la mise en place d'une stratégie efficace de gestion et de prévention du risque d'inondation apparaît comme une priorité pour les autorités locales.

Le risque d'inondation résulte de l'interaction de deux composantes principales : l'aléa, qui correspond à la probabilité d'occurrence et à l'intensité des crues, et la vulnérabilité, qui traduit les conséquences potentielles sur les personnes, les biens et les infrastructures.

L'objectif de cette étude est de cartographier l'aléa d'inondation dans la région d'Aïn Sefra, puis d'évaluer l'impact de différents aménagements susceptibles d'atténuer ce risque. Cette démarche repose sur une approche de modélisation hydraulique intégrant des images satellitaires à très haute résolution spatiale ainsi qu'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de grande précision. Elle vise également à mettre en évidence l'apport des outils informatiques dans la production de cartes d'aide à la décision, permettant de définir des niveaux de protection adaptés.

Dans cette optique, la première étape consiste à identifier les principales causes des crues ayant affecté la région d'Aïn Sefra, puis à tester différents scénarios d'aménagement, tels que le curage des oueds, l'élargissement de leur lit ou la mise en place d'ouvrages de protection. Ces interventions sont intégrées dans le modèle numérique afin d'évaluer leur efficacité dans la réduction du risque.

La seconde étape repose sur l'utilisation d'outils de simulation hydraulique, notamment HEC-RAS, couplés aux systèmes d'information géographique (SIG) tels qu'ArcGIS, pour élaborer des cartes de risque à différents niveaux de sensibilité. Ces outils permettent d'identifier avec précision les zones les plus exposées aux inondations.

L'ensemble de ces analyses conduit à des simulations prospectives destinées à proposer des solutions techniques adaptées aux décideurs. L'objectif n'est pas de produire des projets définitifs, mais d'orienter vers une gestion intégrée et durable des cours d'eau, fondée sur des

approches accessibles et opérationnelles.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, ce travail est structuré en trois chapitres. Le premier présente le phénomène d'inondation et la problématique des crues en Algérie. Le deuxième décrit les caractéristiques du milieu physique de la région d'étude et l'analyse les paramètres physiographiques du bassin versant. Enfin, Le troisième chapitre est consacré à la cartographie de l'aléa d'inondation et à l'évaluation de l'impact des aménagements proposés. Une conclusion générale vient synthétiser les principaux résultats et propose des perspectives visant à améliorer la gestion du risque d'inondation à Aïn Sefra dans une optique de développement durable.

Chapitre I



Description du Phénomène d'Inondation et Problématique des Cues en Algérie

Chapitre 01 : Description du phénomène d'inondation et problématique des crues en Algérie

I.1 Introduction

Ce premier chapitre à deux objectifs principaux, le premier est de replacer les attentes en terme de caractérisation de l'inondation d'une vallée (phénomène physique naturel appelé aléa) dans le contexte plus général de la gestion du risque d'inondation, et aussi de présenter les approches d'analyse de l'aléa qui sont fiables et robustes afin d'en faire émerger : « les intérêts et les limites », le second est la présentation d'un inventaire des crues et quelques recensements des inondations en Algérie et en particulier la ville de ain sefra'.

I.2 Définition et genèse du phénomène d'inondation

Phénomène d'origine naturelle, l'inondation est définie comme suit :

« Submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal. Cette notion recouvre les inondations dues aux crues des rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens ainsi que les inondations dues à la mer dans les zones côtières et elle peut exclure les inondations dues aux réseaux d'égouts » [Official Journal of the European Union, 2007].

On peut ajouter à cette liste de situations, la rupture de digue qui occasionne également une submersion temporaire de zones non submergées en temps normal.

La crue correspond à une augmentation du débit d'un cours d'eau qui l'amène à sortir de son lit mineur, limité par les berges, pour recouvrir le lit majeur, situé de part et d'autre. Des précipitations importantes sur tout ou partie du bassin versant sont la cause la plus fréquente de l'augmentation du débit. Suivant les circonstances et la topographie, on distingue différents types d'évènements.



La vallée fluviale

Le terme « vallée fluviale » désigne usuellement les zones de dépression géographique où une gorge de forme allongée et plus ou moins large qui a été creusée dans le relief par un cours d'eau ou par un glacier. Elle peut se situer entre deux montagnes ou plus.

Une vallée est constituée d'un talweg, qui est une ligne joignant les points les plus bas d'une vallée, soit le creux de la vallée. Comme est montré dans la figure I-1, la vallée fluviale est caractérisée par ses versants qui représentent chacune des pentes d'une montagne, et comprend : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur.

Figure 1: Les composants de la vallee fluviale

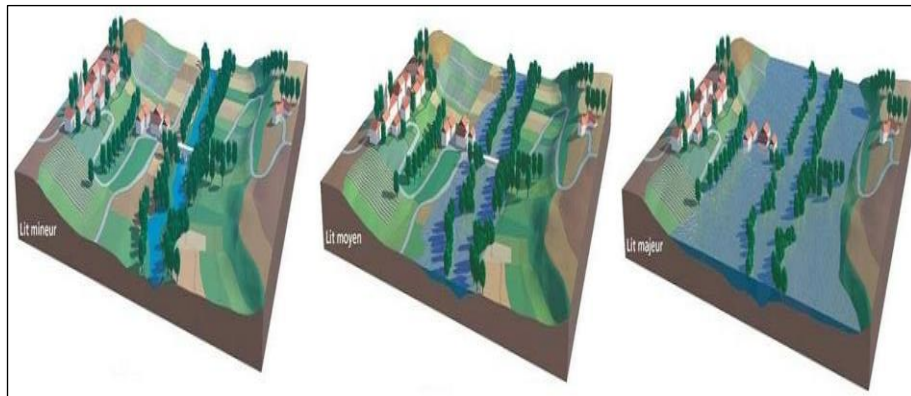


Figure I- 1 : Les composants de la vallée fluviale

I.3.1 Le lit mineur

C'est la partie du lit du cours d'eau comprise soit entre des berges franches, soit des barges marquées, dans laquelle l'intégralité de l'écoulement s'effectue la plupart du temps en dehors des périodes de très hautes eaux et de crues débordantes.

I.3.2 Le lit majeur

C'est le lit maximum qu'occupe un cours d'eau dans lequel l'écoulement ne s'effectue que temporairement lors du débordement des eaux hors du lit mineur en période de très hautes eaux, en particulier lors de la plus grande crue historique.

I.3.3 Lit moyen

C'est l'intermédiaire entre le lit mineur et le lit majeur, qui est l'espace occupé par le cours d'eau lors de crues courantes, telles que les crues saisonnières.

I.4 L'aléa et la vulnérabilité des risques des inondations

La notion de risque est communément définie comme la combinaison de deux composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité.

Les spécialistes définissent, le risque comme étant la résultante du croisement entre l'aléa et la vulnérabilité (voir Figure I-2).

Pour le risque d'inondation l'aléa représente le phénomène naturel aléatoire traduit par le débordement du cours d'eau et l'extension de l'eau dans le champ d'inondation. La vulnérabilité transcrit quant à elle la sensibilité de l'occupation du sol et de la société au phénomène d'inondation, elle comprend intrinsèquement une notion d'acceptabilité, ainsi sur le plan socio-économique, nous parlerons des dommages potentiels encourus [Gendreau et al., 1998].

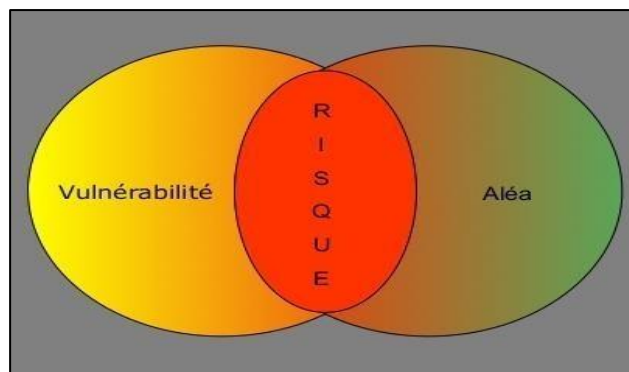


Figure 2: Décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité

Figure I- 2 : Décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité

Il n'est pas envisageable, pour une société, de se protéger pour tous les niveaux de risque. Elle doit donc définir un niveau de risque acceptable où les événements naturels extrêmes et leurs conséquences devront être tolérés [Gilard, 1995] : le "risque zéro n'existe pas". Cette notion de risque dit "naturel" est quelque peu trompeuse puisqu'elle englobe une importante composante humaine.

I.5 Typologie des risques d'inondation

A l'exception de phénomènes rares tels une rupture d'une digue ou d'un barrage, l'inondation est toujours le résultat de précipitations intenses (et/ou de fonte de neige). Selon la nature du processus aboutissant à l'inondation (origine, dynamique temporelle et spatiale), il est classique de distinguer trois grands types de risques d'inondation qui, dans la réalité, se retrouvent souvent combinés.

1.5.1 Le risque d'origine pluvial

Représente le résultat d'un processus de ruissellement suite à des précipitations violentes sur des surfaces assez exigües. Il est généré par des phénomènes localisés dans l'espace (de quelques km² à quelques dizaines de km² au maximum) et le temps (quelques heures). Si les zones exposées sont de faible extension, elles peuvent être malheureusement très peuplées, de plus, le temps de réaction à l'événement est faible. L'exemple type est l'inondation produite par dépassement de capacité des réseaux d'assainissement pluvial en milieu urbain.

1.5.2 Le risque fluvial

C'est le résultat d'un débordement exceptionnel de cours d'eau en plaine, généralement caractérisé par des montées lentes des eaux et des vitesses d'écoulement modérées sur des surfaces de faibles pentes. Les zones exposées constituent généralement des secteurs de forte extension sur lesquels l'homme s'est implanté depuis longtemps.

1.5.3 Le risque torrentiel

Représente le résultat de débordement exceptionnel de cours d'eau des montagnes, généralement caractérisé par des montées rapides des eaux et des vitesses d'écoulement élevées sur des surfaces de fortes pentes. Les zones exposées sont souvent limitées mais la violence et la rapidité du phénomène le rend particulièrement dangereux.

Évaluation du risque d'inondation

L'évaluation du risque d'inondation passe par la caractérisation séparée de l'aléa et de la vulnérabilité puis les croisées. L'aléa hydraulique est souvent défini à l'aide de la seule variable de hauteur de submersion, les autres variables étant considérées comme ayant des effets négligeables sur le milieu ou strictement liées à la hauteur maximale [Torterotot, 1993].

L'évaluation de la vulnérabilité est très délicate car une partie des dommages d'une inondation n'est pas quantifiable (perte en vies humaines, angoisse face à l'événement, stress, inquiétude, ...) : ce sont les dommages intangibles, qui sont opposés aux dommages tangibles. D'après le Flood Hazard Research Center, la contribution des dommages intangibles, si l'on se réfère à la perception des pertes par les sinistres, est d'une valeur au moins égale à celles des dommages tangibles directs, à savoir les dommages matériels [Torterotot, 1993].

Pour croiser les deux résultats précédents, deux approches ont été proposées. La plus fréquente est une approche socio-économique des crues par l'établissement (éventuellement à la parcelle) de courbes coût des dommages / fréquence de l'aléa.

L'analyse fréquentielle de l'aléa repose souvent sur la seule hauteur de submersion considérée, d'après [Hubert et Ledoux, 1999], comme "le paramètre le plus significatif pour expliquer le montant des dommages".

A l'inverse, la méthode "Inondabilité" propose de transcrire la vulnérabilité à travers des variables de caractérisation de l'aléa (hauteur, durée et fréquence). Plus précisément, la comparaison est effectuée sur une période de retour à l'occurrence la première crue débordante et celle liée à l'objectif de protection d'une parcelle [Gilard, 1998].

I.7 Mesures de gestion du risque d'inondation

L'ampleur du risque d'inondation en Algérie et dans le monde nous éclaire sur les fortes motivations de tous les acteurs impliqués dans la mise au point de mesures de réduction de ce risque. Cependant n'oublions pas que le cours d'eau est le lieu de nombreux usages socio-économiques qu'il faut satisfaire. Ainsi, les mesures de gestion devront également prendre en compte les contraintes imposées par le maintien d'une richesse écologique et d'une ressource en eau suffisante.

Une première typologie possible des modes de gestion du risque d'inondation découle directement de la dichotomie du risque en aléa et vulnérabilité. Elle conduit à différencier :

- ✚ Les mesures structurelles visant à modifier l'aléa par des mesures techniques (construction d'un barrage, la rectification de la section d'un cours d'eau, édification de digues ...) ;
- ✚ Les mesures non structurelles qui agissent sur la vulnérabilité en cherchant à réduire les dommages potentiels soit de façon pérenne hors contexte de crise (contrôle de l'occupation du sol et de son usage), soit en réaction directe à l'événement (prévision, annonce de crue, organisation des secours...).

Une deuxième typologie, qui semble plus intéressante, redistribue les précédentes mesures selon trois champs d'intervention : culture du risque (volet communication), prédétermination et prévention (volet aménagement et réglementation), prévision et alerte (volet gestion de crise) [Gilard, 1998].

Une politique efficace de gestion du risque d'inondation utilise une combinaison, très tributaire du contexte local, de mesures appartenant à ces trois domaines d'intervention, la figure I-3 présente ces trois modes.

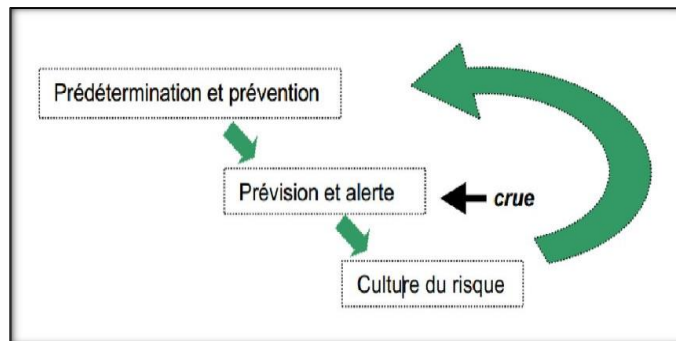


Figure I- 3 : Les trois modes de gestion du risque d'inondation [Gilard, 1998]

I.8 Caractérisation de risque d'inondation

Le choix d'une stratégie d'étude de risque d'inondation dépend directement des moyens (temps, données, capacité de calcul, budget ...) à disposition mais aussi et surtout de l'objectif recherché. Au sein même de la gestion du risque d'inondation, ces objectifs sont très variés (cartographies informatives pour développer la culture du risque, cartographie réglementaire, prévision des zones submergées, choix de scénarios d'aménagement...). Ils conditionnent les variables d'inondation recherchées (hauteur, durée, vitesse, fréquences...).

Dans ce contexte, il n'est pas étonnant d'être confronté à une multitude d'approches d'étude

de risque. Leur présentation s'appuie sur le découpage suivant :

- ✚ Approche historique (analyse d'observations d'événements passés) ;
- ✚ Approche hydrogéomorphologique ;

1.8.1 L'approche historique

Le terme "approche historique" est employé pour désigner toute valorisation d'observations de crues récentes ou anciennes. Cette approche nous permettra la reconstitution d'une chronologie des crues sur un secteur géographique.

Si l'on exclut les données issues de télédétection spatiale, les observations mobilisables proviennent soit de limnigrammes, soit des repères de crues où des témoignages.

1.8.1.1 Les limnigrammes

C'est l'information la plus fréquente car elle est le produit du seul dispositif pérenne d'observations du cours d'eau : les stations limnimétriques qui mesurent, de manière ponctuelle mais continue (stations automatisées), la hauteur d'eau en fonction du temps. Une loi de tarage, qui définit la relation entre le débit et la hauteur d'eau mesurée au niveau de la station, permet d'accéder au débit en fonction du temps.

Placés uniquement dans le lit mineur du cours d'eau, le coût et l'entretien de tels dispositifs limitent leur emplacement. Ainsi la distance qui les sépare est rarement inférieure à une dizaine de kilomètres. En dehors des quelques défaillances, survenant malheureusement souvent pendant les événements extrêmes qui nous intéressent, la précision de la mesure est de 1 à 10 cm pour la hauteur et de 10 à 20 % pour le débit [Cetmef et Cete, 2001]. Le principal intérêt de cette mesure, ponctuelle et en faible nombre, réside donc dans sa continuité temporelle et non dans sa distribution spatiale.

1.8.1.2 Les "laisses" de crues

Sous ce vocable sont regroupées toutes les indications de hauteurs maximales atteintes par une crue, observées à des endroits quelconques de la plaine d'inondation. Elles proviennent de traces (herbes, branches, boues, humidité) laissées par les eaux et sont souvent référencées dans le temps de manière imprécise (rarement en deçà de la journée). Pour être exploitables, ces traces doivent être nivelées, transformées en un triplet (X, Y, Z) et archivées, pour les phénomènes extrêmes, elles sont parfois matérialisées (marque de peinture, plaque, ...) mais leur fiabilité est très variable.

1.8.1.3 Les témoignages

Les témoignages de personnes présentes sur le site au moment de l'inondation (habitants, secouristes, ...) peuvent fournir des témoignages très intéressants sur le fonctionnement de la crue, permettant ainsi d'accéder à des variables qualitatives ou quantitatives. Le problème de ces données se pose en termes de recueil (enquête de terrain lente) et surtout de fiabilité. Ainsi est-il important de recouper les divers témoignages, mais aussi de récupérer, stocker et archiver tout document susceptible de les conforter (photographies ou vidéographies). Malheureusement, le travail de recueil pour ce type de données n'est pas systématique et celui d'archivage et de mise en cohérence le plus souvent inexistant.

1.8.2 L'approche hydrogéomorphologique

1.8.2.1 Philosophie

L'approche hydrogéomorphologique correspond à "une première phase d'analyse des milieus naturels et anthropisés des vallées, elle est basée sur une approche naturaliste, qui vise

à mettre en évidence les différents lits des cours d'eau, les diverses implantations susceptibles de perturber les écoulements en les accélérant ou en les ralentissant, et à en déduire les zones inondables ainsi que des valeurs approchées des paramètres physiques de l'inondation" [METL/MATE, 1996].

L'identification des différents lits des cours d'eau repose sur une approche purement géographique, mêlant morphologie, sédimentologie et occupation traditionnelle du sol afin de délimiter, au sein des plaines alluviales, les unités hydrogéomorphologiques ; C'est-à-dire les zones qui sont exposées à des crues fréquentes, rares, ou exceptionnelles et celles qui ne sont jamais submergées comme les terrasses anciennes (voir Figure I-4).

Le but de cette philosophie, est d'accéder à une représentation conceptuelle du fonctionnement de la plaine en inondation pour en déduire un zonage du risque d'inondation par un schéma non quantitatif, rapide et peu cher (valorisant les données existantes).

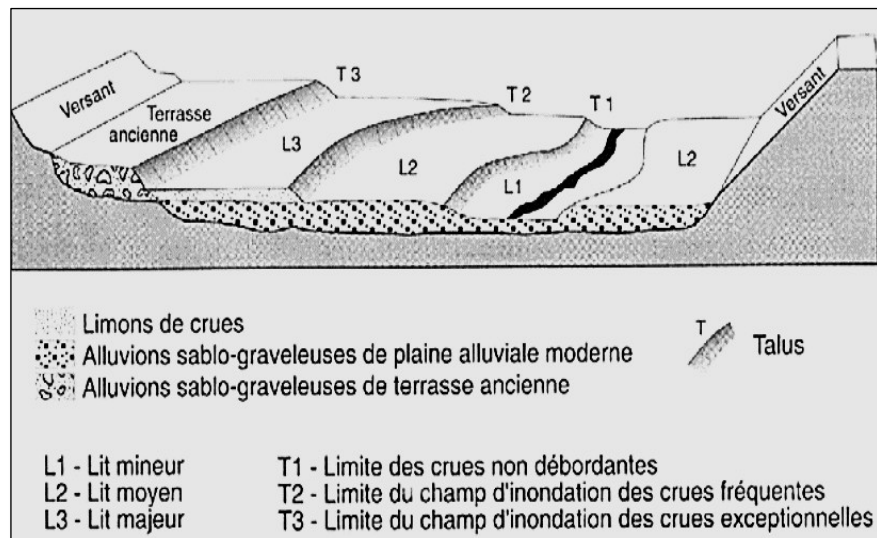


Figure I- 4 : Unités hydrogéomorphologiques et niveaux d'exposition à l'aléa associés [METL/MATE, 1996]

I.8.2.2 Informations requises

Les informations requises par cette approche sont principalement la morphologie, l'occupation/utilisation du sol et des informations de sédimentologie. Puisque la philosophie de l'approche est de privilégier les données existantes, les niveaux de précision utilisés sont très variables.

Pour accéder à ces informations, plusieurs données spatialisées sont consultées :

- ✚ Les cartes topographiques, géomorphologiques, pédologiques, géologiques, d'occupation du sol et autres, utilisées pour leur référentiel géométrique et leur contenu thématique ;
- ✚ Les données topographiques issues des levés de terrain ou de photo-restitution, utilisées pour compléter les informations altimétriques trop imprécises des cartes topographiques ;
- ✚ Les images de télédétection : images satellitaires et surtout photographies aériennes (hors inondation), utilisées pour leur contenu sémantique et morphologique extrait le plus souvent par photo-interprétation et stéréo-interprétation ;
- ✚ Des compléments par observations sur le terrain sur des secteurs complexes.

Cette démarche est souvent réalisée à la fois sur des données récentes pour caractériser le milieu actuel et des données anciennes pour analyser les évolutions et effectuer des analyses diachroniques.

I.8.2.3

Appliquée au niveau du bassin versant mais aussi de la plaine alluviale. La figure I-5 présente un exemple des résultats de la caractérisation hydrogéomorphologique qui sont :

- Une description du milieu "naturel" : unités hydrogéomorphologiques (lit mineur, moyen et majeur), limites séparant ces unités (talus, avec leur hauteurs et déclivités) et manifestations de l'hydrodynamique (zone d'érosion, de sédimentation, affleurement rocheux, axes d'écoulements préférentiels...).
- Une description des modifications apportées par l'homme : occupation des sols et ouvrages (remblais, digues, seuils...) modifiant les écoulements.

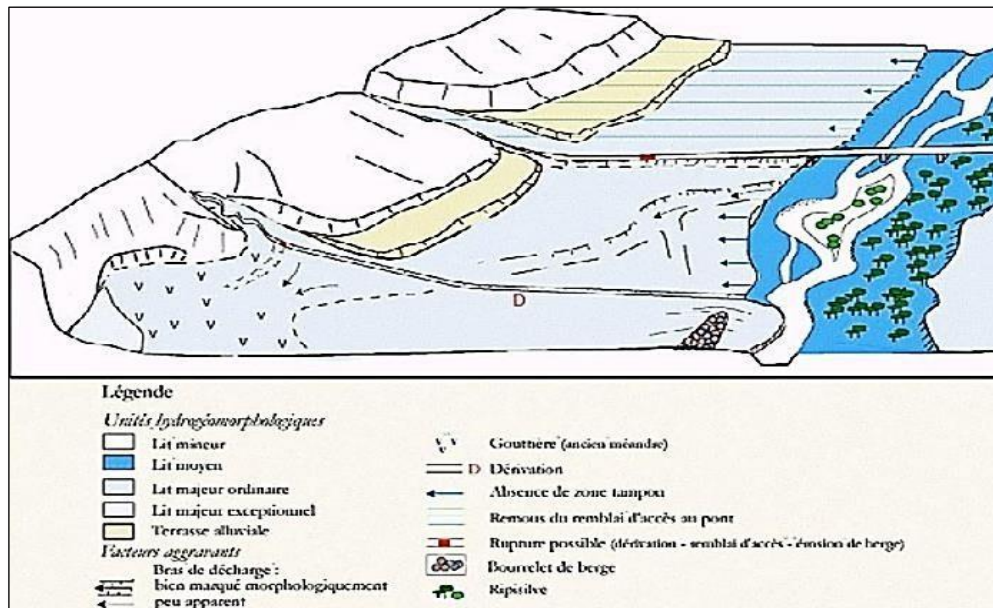


Figure I- 5 : Exemple de caractérisation hydrogéomorphologique
<http://www.environnement.gouv.fr/Languedoc-Roussillon/risques/zi/aude/methodologie.htm>

I.8.3 L'approche par modélisation hydraulique

Un modèle n'est qu'une représentation schématique, et donc simplifiée, du système "réel" afin de répondre aux objectifs du modélisateur. Sa raison d'être n'est rien d'autre que de répondre aux problèmes posés [Bachelard, 1979], qui vont de la prédiction/prévision de grandeurs intéressant l'ingénieur, jusqu'à l'analyse, la compréhension et l'explication du fonctionnement de systèmes complexes par le chercheur [Ambroise, 1999].

La première phase effective de la mise en œuvre d'un modèle consiste à rassembler les processus considérés comme essentiels, et dont il est démontré que la combinaison est la cause des phénomènes observés. Cette phase nécessite de choisir le niveau d'analyse pertinent au problème posé en identifiant les variables significatives pour décrire le système physique, son environnement, le problème et l'ensemble des interactions entre elles [Kauark Leite, 1990]. Dès lors il est possible de définir :

- ❖ Des modèles distribués, si les variables et les paramètres sont variables dans l'espace, sinon

ils sont dits globaux ;

- ❖ Des modèles permanents (ou stationnaires) dans le cas particulier où toutes les variables sont constantes au cours du temps ;

- ❖ Des modèles empiriques (boîte noire) qui ne font aucune référence, sinon sémantique, aux processus internes du système étudié mais se contentent d'établir des relations directes entre les variables d'entrée et de sortie ;
- ❖ Des modèles déterministes ou stochastiques.

I.8.3.1 Performance d'un modèle hydraulique

La performance d'un modèle hydraulique, c'est-à-dire la qualité de la réponse apportée par le modèle aux questions posées (prévision/prédiction et/ou analyse du fonctionnement), est directement liée d'une part aux hypothèses simplificatrices de représentation du processus (exprimées à travers des équations et de la discrétisation spatio-temporelle) ; à la disponibilité et à la qualité des données d'entrée (conditions aux limites, conditions initiales et topographie de la plaine alluviale) et d'autre part aux approximations induites par la méthode de résolution des équations et à la précision du calage (pour le paramètre de rugosité et les lois d'ouvrages).

I.8.3.2 Typologie des modèles utilisés en hydraulique fluviale

En hydraulique fluviale, trois grandes classes de modèles existent : les modèles bidimensionnels, les modèles unidimensionnels, et des modèles hybrides.

✓ Les modèles bidimensionnels

• Hypothèses

Les hypothèses essentielles des modèles bidimensionnels sont [EDF, 1993] :

- ✚ L'homogénéité des vitesses sur la verticale ;
- ✚ La répartition hydrostatique de la pression, qui découle de la faiblesse de l'accélération verticale vis à-vis de la gravité (faible courbure des lignes de courant, écoulement dit graduellement varié) ;
- ✚ La faiblesse de la pente moyenne de l'écoulement.

• Discrétisation spatiale et schémas de résolution

Les premiers modèles développés, et donc les plus fréquents, s'appuient sur un maillage régulier du domaine et un schéma de résolution basé sur la méthode des différences finies. Plus récents et plus efficaces en termes de précision de calcul, mais plus compliqués à implémenter, des modèles basés sur des schémas aux éléments finis sont développés [Hervouet et Van Haren, 1996]. Ils permettent de découper avec beaucoup plus de souplesse le domaine en un maillage irrégulier formé le plus souvent de triangles (issus d'une triangulation de Delaunay [Hervouet et Van Haren, 1996] illustrée à la figure I-6.1), d'un mélange de triangles et de quadrilatères (méthode développée dans [Farissier, 1992] et illustrée dans la figure I-6.2) ; et plus rarement de polygones d'ordre supérieur (tessellation de Dirichlet [Todini, 1994] illustrée à la figure I-6.3).

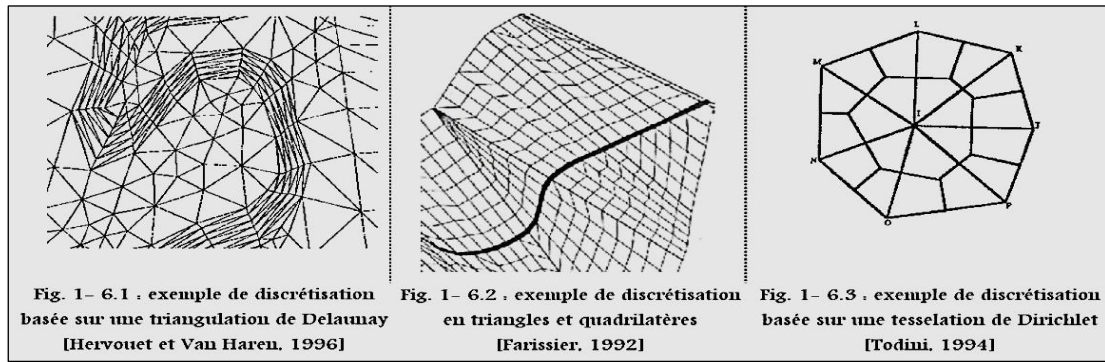


Figure I- 6 : Discretisation spatiale et schémas de résolution des modèles bidimensionnels

Les conditions aux limites sont généralement décrites par un hydrogramme et un profil transversal de vitesse à l'amont, et un limnigramme à l'aval.

Quels que soient le découpage et le schéma de résolution retenus, chaque maille doit être paramétrée en son centre en termes de topographie et de coefficient de rugosité. Le modèle calcule alors, à chaque pas de temps et pour chaque maille (une maille = un nœud de calcul au centre de la maille) un tirant d'eau et un vecteur vitesse.

✓ Les modèles monodimensionnels

• Hypothèses

Dans le cas monodimensionnel, l'écoulement est supposé bien "canalisé", c'est-à-dire organisé par rapport à une direction préférentielle bien identifiée, appelée "axe d'écoulement" [EDF, 1993], dont l'emplacement est supposé constant au cours de la crue. Les principales hypothèses simplificatrices sont [METL/CETMEF, 1999] :

- ✚ La surface libre est horizontale dans une section en travers : la vitesse et le tirant d'eau sont uniformes dans toute section perpendiculaire à l'axe d'écoulement (appelée section en travers).
- ✚ L'écoulement est graduellement varié (comme en bidimensionnel).
- ✚ La pente moyenne (longitudinale) de l'écoulement est faible.

• Discretisation spatiale et schémas de résolution

La géométrie du lit majeur est constituée par une série de profils transversaux et les nœuds ou sections de calcul s'appuient sur ces profils (voir Figure I-7). Des sections supplémentaires de calcul peuvent éventuellement être ajoutées par interpolation des profils.

Les ouvrages (seuils, ponts...) présents sur le long de la rivière provoquent une discontinuité spatiale où les hypothèses du modèle ne sont plus valables. Leur comportement hydraulique est décrit alors par une loi spécifique.

Les conditions aux limites sont généralement décrites par un hydrogramme à l'amont et un limnigramme à l'aval.

Un coefficient de frottement est défini par section de calcul, éventuellement différenciée entre sa partie lit mineur et sa partie lit majeur. Le modèle calcule alors, à chaque pas de temps et pour chaque section de calcul, un tirant d'eau unique et un débit. Contrairement aux modèles bidimensionnels, la cartographie des résultats impose un processus de post-traitement spatial plus ou moins complexe et efficace [Werner, 2001].

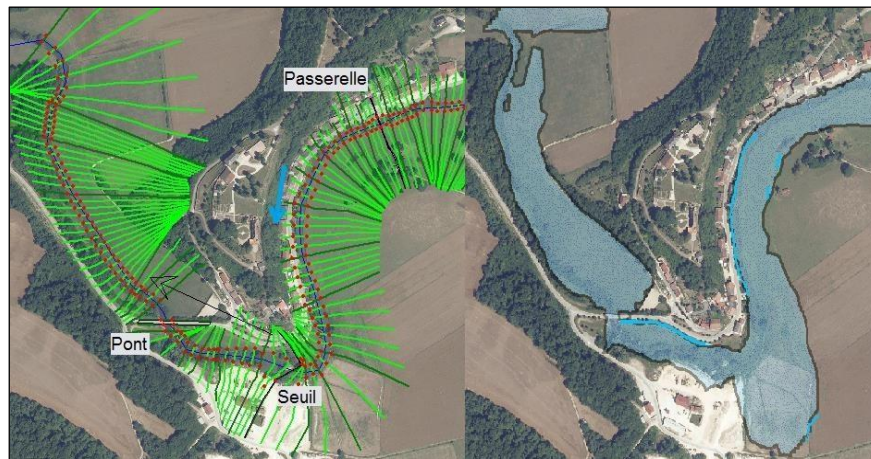


Figure I- 7 : Exemple de discrétisation spatiale en sections de calcul (cas 1D)

✓ Les modèles hybrides

• Présentation

Cette catégorie propose des modèles de fonctionnement spatial intermédiaires entre les modèles monodimensionnels et les modèles bidimensionnels dans le sens où ils essaient de dépasser les limitations fortes imposées par les hypothèses du 1D, tout en cherchant à limiter le nombre très important de points de calculs et de variables à déterminer de certaines modélisations 2D.

En effet, lorsqu'on s'intéresse à une rivière naturelle en crue, la présence de sinuosité et le débordement par-dessus les berges induisent des interactions complexes entre le lit mineur et la plaine en termes d'échange de quantité de mouvement. Ces changements importants dans les caractéristiques de l'écoulement ne sont plus en accord avec les hypothèses du modèle 1D [Ervin et MacLeod, 1999] : la vitesse n'est plus homogène dans une section en travers, l'écoulement n'est plus exactement parallèle au lit mineur en quelques points. Par ailleurs, en présence de lit mineur endigué, il peut exister une phase de débordement où l'écoulement dans la plaine d'inondation est plutôt perpendiculaire au lit mineur et des zones de stockage peuvent apparaître... Les adaptations des modèles monodimensionnels ne suffisent pas.

La figure I-8 montre un exemple du modèle hybride le plus courant est celui dit à casiers, qui incorpore des entités surfaciques (appelées "casiers") dont la taille et la forme sont ajustées aux ordres de grandeurs relatifs des gradients hydrauliques (cote et vitesse) et aux orientations principales de l'écoulement. Pour rester proches de la réalité physique, leurs limites doivent s'appuyer sur les éléments structurants de la plaine : digues, ouvrages de franchissement, déversoirs, chenaux [Hingray, 1999]. Chaque casier est supposé homogène en niveau d'eau et est défini par la relation entre son volume de stockage et la cote du plan d'eau. Les liaisons avec l'écoulement principal ou avec des casiers connexes sont "conceptualisées" soit par une loi d'ouvrage soit par une loi de résistance.

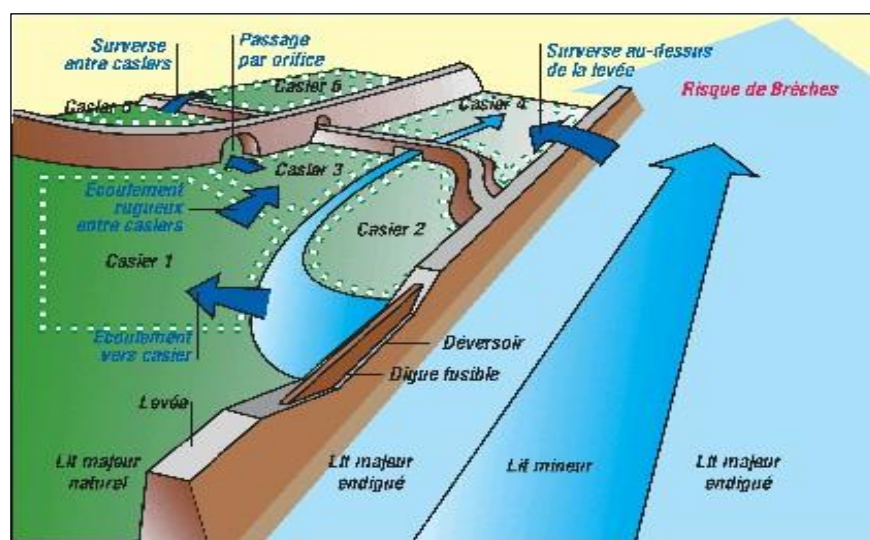


Figure I- 8 : Exemple de modélisation à casiers (illustration sur le modèle Loire, HYDRATEC d'après [METL/CETMEF, 1999])

• Hypothèses

Dans ce type de modèle, le calcul de l'écoulement est basé sur la continuité du volume dans les casiers et sur des lois d'écoulement sans inertie entre les casiers. Si ces hypothèses sont légitimes à l'intérieur des champs d'inondations (faible vitesse dans le lit majeur), elles le sont beaucoup moins en lit mineur. Ceci a débouché sur plusieurs tentatives de modèles couplés 1D-2D, où l'écoulement dans le lit mineur est représenté par un modèle unidimensionnel, et où l'écoulement dans le champ d'inondation (lit majeur) est représenté par des casiers ou par des équations bidimensionnelles éventuellement simplifiées [Bates et De Roo, 2000].

I.9 Intérêts et limites de ces approches

I.9.1 Approche historique

Le principal intérêt de l'approche historique réside dans la valorisation d'archives, elle permet donc de fournir de très précieuses données à posteriori sur des crues passées. Issues de l'observation et de la mesure, ces données présentent une fiabilité inégalée par les données issues de simulation. Malheureusement diverses contraintes limitent la disponibilité (quantité et répartition spatiale) de ces données. D'un point de vue pratique, cela rend indispensable le recours à une approche faisant intervenir une méthode d'interpolation et d'extrapolation des informations.

Ainsi, à l'exception de rares cas où la densité de ces informations est suffisante pour établir une cartographie de l'aléa, l'approche historique ne constituera qu'une étape nécessaire, venant alimenter l'une ou l'autre des deux grandes approches en tant que données d'entrée, de calage ou de validation.

I.9.2 Approche hydrogéomorphologique

Pour la cartographie réglementaire dans le cadre du risque d'inondation, son principal avantage réside dans sa rapidité et dans la modestie des moyens techniques auxquels elle fait appel (cartes, levés de terrain, photographies aériennes). Son atout provient de son orientation très géographique, parfaitement en accord avec ce problème spatial qu'est l'inondation.

Les principales limites résultent de :

- La difficulté, dans certaines configurations morphologiques, à délimiter des zones inondables (limites masquées par des phénomènes secondaires comme le biseautage d'un talus par érosion) ;
- La difficulté à prendre en compte les effets d'ouvrages anthropiques récents (qui n'ont pas encore été clairement observés, ou qui n'ont pas eu le temps de façonner le paysage) ;
- La difficulté à récupérer et analyser l'ensemble de ces données éparpillées (notamment des données historiques pour les études d'évolution morphologique) et très disparates (types de documents, qualité...). Dans ce cas, un outil d'archivage et de traitement de données (spatiales) est d'une aide considérable ;
- Le côté un peu opaque de l'obtention du zonage, qui rend la méthode très tributaire de l'opérateur ;
- Le résultat beaucoup plus qualitatif, si la précision de ses résultats (sans recours à une modélisation) peut paraître insuffisante pour des fins réglementaires, son analyse "géographique" (pour la topographie, l'occupation du sol, ...) offre toutefois un grand intérêt au moins à un niveau plus régional dans la compréhension globale d'une vallée ou d'une portion de vallée. Ainsi, le recours à une telle approche géographique se révèle très utile en phase préalable à toute modélisation hydraulique.

En conclusion, l'approche hydrogéomorphologique valorise intelligemment, mais de façon un peu opaque, le maximum de données existantes sur le site étudié par une approche géographique (et donc spatiale). Très efficace à l'échelle de la planification, elle a besoin, pour espérer d'approcher l'échelle locale de l'aménagement et de la réglementation, d'être "consolidée" par des données historiques quantifiées.

1.9.3 Approche par modélisation hydraulique

Des différentes méthodes d'analyse de l'aléa, la modélisation hydraulique est la plus apte à répondre aux questions posées par la gestion des inondations : durée, hauteur et vitesse du courant, même si la détermination de ces vitesses reste un gros problème dans les versions les plus performantes en termes de discrétisation spatio-temporelle et de prise en compte de la turbulence [Wilson et al., 2002].

Son utilisation pour la gestion du risque d'inondation dépasse très largement la cartographie réglementaire en permettant de simuler des scénarios futurs, **de comparer différentes options d'aménagement**, d'étudier la sensibilité d'un système à l'urbanisation d'un bassin versant, à la rugosité etc.... La connaissance "fine" du schéma de propagation des eaux obtenue par modélisation permet également l'étude du transport sédimentaire [Hardy et al., 2000] et donc de l'évolution morphologique, du transport de contaminant [Carroll et al., 2000], ou encore de la dynamique écologique [Whigham et Young, 2001].

Le développement de modèles décrivant des phénomènes de plus en plus complexes, les améliorations en termes de capacité informatique et de disponibilité de données physiques sur les plaines d'inondation, font des modélisations hydrauliques des outils de plus en plus intéressants et d'ailleurs de plus en plus utilisés. L'utilisation de modèles bidimensionnels sur des linéaires de plusieurs kilomètres de rivière, éventuellement aidés par les possibilités croissantes de couplages inter modèles (1D-casiers-2D), devient par exemple courante.

Cependant le choix à priori de la "bonne" structure du modèle reste un problème très délicat puisque'elle définit le modèle spatial de fonctionnement d'un processus que l'on cherche à

Outre le coût de la donnée topographique, une première limite des modélisations toujours plus finement distribuées provient de la lourdeur de leur mise en œuvre, notamment au moment de l'implémentation de la topographie sur le maillage de calcul. De plus, cette course à la complexité soulève de forts questionnements sur la validité, notamment à l'intérieur de la plaine modélisée, du résultat du modèle trop souvent calé et validé sur des événements à dynamique simple avec, faute de mieux, un seul et même hydrogramme à l'aval ; ce qui renvoie inlassablement sur les problèmes de :

- Choix à priori du bon niveau de description du phénomène (structure du modèle : taille, forme, emplacement des mailles...).
- Qualité nécessaire pour les paramètres et variables observés (topographie, conditions aux limites et éventuellement des conditions initiales).
- Calage de nombreux paramètres non observables, qui doivent donc être ajustés par des méthodes inverses.

La modélisation hydraulique est en effet, comme toute modélisation mécaniste de systèmes environnementaux complexes, soumise à ce problème de sur-paramétrisation qui conduit au problème d'équifinalité. Ceci consiste, à accepter plusieurs structures et plusieurs jeux de paramètres fondamentalement différents. Cela vient de notre connaissance restreinte du phénomène hydraulique modélisé, qui ne permet pas de réfuter, ni même de hiérarchiser ces différentes configurations de modèle.

Si bien qu'au stade actuel de nos connaissances, il est impossible d'identifier la part de responsabilité relative aux choix à priori de sa structure (erreurs liées à la discrétisation spatio-temporelle extrêmement tributaires du site d'étude), au paramétrage du modèle, à la procédure d'estimation des paramètres non observables du modèle (calage), ou aux imperfections des données servant à son calage [Bates et al., 1998]. Ceci explique l'importance de l'expertise dans le domaine de la modélisation hydraulique. Seul l'accès à des observations distribuées du phénomène à modéliser peut permettre d'élucider ces questionnements pour mieux prendre en compte les incertitudes et produire des prédictions distribuées plus fiables : Sans ces observations distribuées, il est impossible de hiérarchiser l'importance relative de ces divers facteurs. La priorité doit donc préalablement se tourner vers cette quête d'informations distribuées.

I.10 Les inondations en Algérie

Parmi les quatorze risques majeurs répertoriés par l'Organisation des Nations Unies (ONU), le risque d'inondation en Algérie fait partie des dix risques majeurs présents sur le territoire et cités par la loi 04-20 du journal officiel algérien paru le 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable [J.O.R.A., 2004]. Il est en troisième position après les séismes et les risques géologiques dans le classement national des risques majeurs, vu l'ampleur des dégâts matériels et aussi humains engendrés.

1.10.1 Perturbations météorologiques (origine et mécanisme de formation)

L'Algérie est soumise régulièrement à des systèmes perturbés pluvieux très diversifiés liés, d'une part, à sa grande superficie et d'autre part, à sa situation géographique, considérée comme position centrale entre les phénomènes d'origine polaire et tropicale, subissant des sécheresses et des inondations d'ampleur et de périodicité variables. En effet, les fortes pluies qui se produisent généralement entre le mois de septembre et le mois de mai sont dues essentiellement aux perturbations du front polaire. Elles sont provoquées par l'arrivée de masses d'air polaire de l'arctique et qui se régénèrent fortement lorsqu'elles parviennent sur les eaux chaudes de la Méditerranée. Le flux fort de la chaleur d'humidité de la mer vers les masses d'air est en effet prépondérant dans l'intensification des perturbations. Ces dernières peuvent parfois pénétrer dans les régions sahariennes, elles sont alors fortement alimentées en humidité en provenance des régions tropicales.

1.10.2 Causes et types des crues catastrophiques en Algérie

Les précipitations sont caractérisées par une très forte irrégularité saisonnière et interannuelle entraînant des étiages extrêmement sévères des cours d'eau et inversement, des fortes crues et des inondations engendrant des dégâts humains et matériels considérables.

La genèse des fortes crues et leurs impacts sur l'environnement, diffèrent d'une région à une autre, et cela en fonction de la nature géographique, les conditions climatiques et d'occupation des sols qui les caractérisent.

Bien que la cause fondamentale de la plupart des inondations est les fortes pluies, d'autres facteurs interviennent, soit pour aggraver les effets d'une crue, soit pour créer eux-mêmes des phénomènes hydrauliques provoquées par la présence des détritiques et des troncs d'arbres qui réduisent la capacité du lit du cours d'eau.

D'une manière générale, les causes des inondations en Algérie peuvent être classées en trois types [Protection civile, 2009] :

a) Inondations liées à des situations météorologiques remarquables : se traduisant par une forte pluviosité (pluie importantes, orages violents), tels que les inondations de décembre 1957 des bassins de Mazafran et de la Sebaou, les inondations de l'automne 1969 en Algérie et en Tunisie, les inondations catastrophiques de mars 1973 sur l'Est algérien, les inondations de mars 1974 des bassins versants de l'Algérois et de la Sebaou, les inondations de décembre 1984 sur tout l'Est algérien, les inondations du 10 novembre 2001 à Bâb El Oued etc...

b) Inondations provoquées par des facteurs liés à l'effet de l'homme : la défaillance des réseaux d'assainissement et de collecte des eaux pluviales, l'exhaussement des lits des cours d'eau par les décombres et les détritiques et d'autres agissements humains qui favorisent des dégâts lors des averses saisonnières : les cas de la ville de Tiaret inondée presque chaque hiver, et la plaine du M'Zab où des inondations se produisent tous les 2 à 3 ans illustrant parfaitement l'influence de ces facteurs.

c) Inondations produites dans des régions présentant un environnement topographique défavorable : comme le cas des villes traversées par des cours d'eau (Bordj Bou Arreridj, Oued R'Hiou, Sidi Bel Abbès) ou situées au pied d'une montagne (Ain Defla, Batna, Médéa). Ces agglomérations à forte concentration des populations et sous l'effet d'une urbanisation anarchique et non réglementée présentent des grands risques, des pertes humaines et des destructions de constructions sont enregistrées à chaque inondation aussi légère qu'elle soit.

Ces inondations selon les caractéristiques des crues, leurs durées et leurs étendues sont de deux types [Protection civile, 2009] :

[1] Inondations engendrées par des crues torrentielles ou crues éclair, affectent les petits bassins versants de quelques dizaines de km² et sont le plus souvent liées à des chutes de pluies isolées et localement intenses issues de phénomènes de convection sous forme de tempêtes orageuses se produisant généralement en automne, et en été. Les crues de ce type sont particulièrement dangereuses en raison de la soudaineté et de la rapidité avec lesquelles elles se produisent. Les ruissellements extrêmement rapides et violents peuvent intervenir moins d'une heure après la pluie et les débits des cours d'eau passent de quelques m³/s à plusieurs milliers de m³/s en 2 ou 3 heures seulement. L'inondation de la ville de Oued R'Hiou, le 20 octobre 1993 en est un exemple, en 20 minutes de pluies des dégâts importants sont enregistrés, 23 morts, 20 blessés et plusieurs disparus.

[2] Inondations des grands bassins versants résultent le plus souvent des précipitations importantes généralisées sur des grandes étendues et caractérisées par leur quantité et leur durée (10 à 15 jours). Ces crues sont massives, lentes et à évolution facilement prévisible sauf lorsqu'elles sont brutalement aggravées par des affluents avals plus courts et plus rapides.

1.10.3 Quelques cas d'inondations catastrophiques en Algérie

L'Agence Nationale des Ressources en Eaux (ANRH) a effectué un inventaire exhaustif des inondations survenues en Algérie durant les quarante dernières années. Cet inventaire différencie les inondations causées par des pluies exceptionnelles généralisées sur plusieurs Wilayas, et d'autre part les inondations dues à des orages locaux, de forte intensité et affectant surtout certaines agglomérations et villes rendues plus vulnérables par prolifération des constructions anarchiques [Lahlah, 2004].

On présente dans ce qui suit par ordre chronologique, un bref aperçu des inondations survenues en Algérie [Lahlah, 2004] :

- **28 au 31 mars 1974** : Des chutes de pluie exceptionnelles dans les wilayas d'Alger et de Tizi Ouzou (688 mm en 4 jours et 381 mm en une journée au col de Sakamody). Les dégâts à Tizi Ouzou sont : 52 morts et 4570 maisons détruites, 130 villages isolés, et plus de 18 000 sinistrés, 13 ponts détruits et des dizaines de kilomètres de routes emportées.
- **03 février 1984** : Les pluies abondantes généralisées sur l'ensemble de l'Est Algérien avec un foyer de maximum sur les monts de Constantine (120 mm en 3 jours) et les monts de Medjerda (80 mm en 3 jours) ont provoqué des inondations catastrophiques dans toutes les wilayas de l'Est Algérien et les dégâts occasionnés sont importants :
 - **La wilaya de Jijel** : 20 morts, 500 têtes de bétail emportées et dégâts évalués à 50 millions de dinars.
 - **La wilaya de Constantine** : 1140 familles sinistrées, 200 hectares de cultures détruites.
 - **La wilaya de Skikda** : 8000 habitations envahies.

- **La wilaya de Guelma** : 03 disparus, 1957 familles sinistrées, 02 ponts détruits et canalisations d'alimentation en eau potable (AEP) détruites à 100 %.
 - **La wilaya de Khenchela** : 777 familles sinistrées et pertes importantes en Cheptel.
 - **La wilaya d'Oum – El – Bouaghi** : 144 maisons détruites et 429 familles sinistrées.
- **29 décembre 1984 au 01 janvier 1985** : Des pluies exceptionnelles (plus de 250 mm en 4 jours seulement et 195 mm en une journée) généralisées sur tout l'Est Algérien provoquent des inondations très catastrophiques dans les wilayas de Jijel, Constantine, Skikda, Guelma, Annaba et El-Tarf. Le Tableau I-1, résume les caractéristiques des fortes crues observées sur l'ensemble des Oueds des bassins versants de la Seybousse des côtiers constantinois et du Kebir Rhummel.

Tableau I- 1 : Crues observées du 28/12/1984 au 01/01/1985 dans l'Est Algérien [Lahlah, 2004]

Tableau 1: crues observees du 28/12/1984 au 01/01/1985 dans l'Est Algerien

Station	Oued	Hauteur maximale (m)	Débit maximum (m ³ /s)	Volume ruisselé (m ³)
Medjez Amar I	Cherf Aval	6.20	---	---
Medjez Amar II	Bouhamdane	6.10	1450	124.70
Bougegouf	Mellah	3.89	510	---
Ain Breida	Ressoul	3.05	80	6.84
Mirbeck	Seybousse	14.90	2900	455
Ain El Assel	Kebir Est	10.10	508	71.5
Ain Charchar	Kebir Ouest	11.30	316	113

- **Les 9 et 10 novembre 2001** : à Bâb El Oued (bassin versant de l'Oued Koriche-Alger) qui a fait plus de 772 morts, 320 blessés, 126 disparus avec des pertes matérielles conséquentes.

I.10.4 Analyse de l'événement pluvieux du 08 septembre 2024 dans la région de Naâma

Le 8 septembre 2024, la région de Naâma a été frappée par un épisode pluvieux exceptionnel, générant des crues soudaines dans les principaux oueds affectant les localités de Aïn Sefra, Tiout, Moghrar et Kalaât Cheikh Bouamama. Les précipitations intenses et concentrées dans un court laps de temps ont saturé le sol et amplifié le ruissellement vers les lits des oueds, entraînant une montée rapide des eaux et des débordements localisés dans les zones basses et urbanisées.

Selon les témoignages et relevés locaux, la crue du 08 septembre 2024 est exceptionnelle par son intensité et sa vitesse, provoquant :

- Le débordement des lits mineurs et moyens, avec inondation des routes et des infrastructures locales.
- Une concentration rapide des eaux sur les versants escarpés, entraînant un transport accru de sédiments et une intensification du ruissellement.
- Une exposition élevée des zones agricoles et des habitats périphériques, en particulier dans les plaines d'Aïn Sefra et Moghrar, ainsi que les secteurs bas de Tiout et Kalaât Cheikh Bouamama.

Cet événement met en évidence la vulnérabilité des bassins versants semi-arides aux crues soudaines, en raison de la combinaison d'intenses précipitations, d'une topographie accidentée et d'une faible capacité d'infiltration du sol.

I.10.5 Étude synoptique et caractérisation météorologique

L'analyse des images satellitaires MODIS et Sentinel-2 pour la période du 7 au 9 septembre 2024, montre une masse nuageuse convective persistante sur le Nord-Ouest du Sahara, englobant l'ensemble du bassin de Naâma et concentrant les précipitations sur les bassins versants des quatre localités étudiées. Les données pluviométriques des stations locales indiquent des intensités horaires comprises entre 120 et 160 mm, confirmant le caractère exceptionnel et localisé de l'événement.

Cette répartition spatiale illustre la dynamique de la crue : la convection atmosphérique combinée à la morphologie des bassins a favorisé un ruissellement rapide et une concentration des eaux dans les lits principaux des oueds. L'événement du 08 septembre 2024 constitue un exemple typique de crue extrême dans un contexte semi-aride, soulignant l'importance de la modélisation hydraulique et de la cartographie des zones exposées pour améliorer la prévention et la gestion du risque.

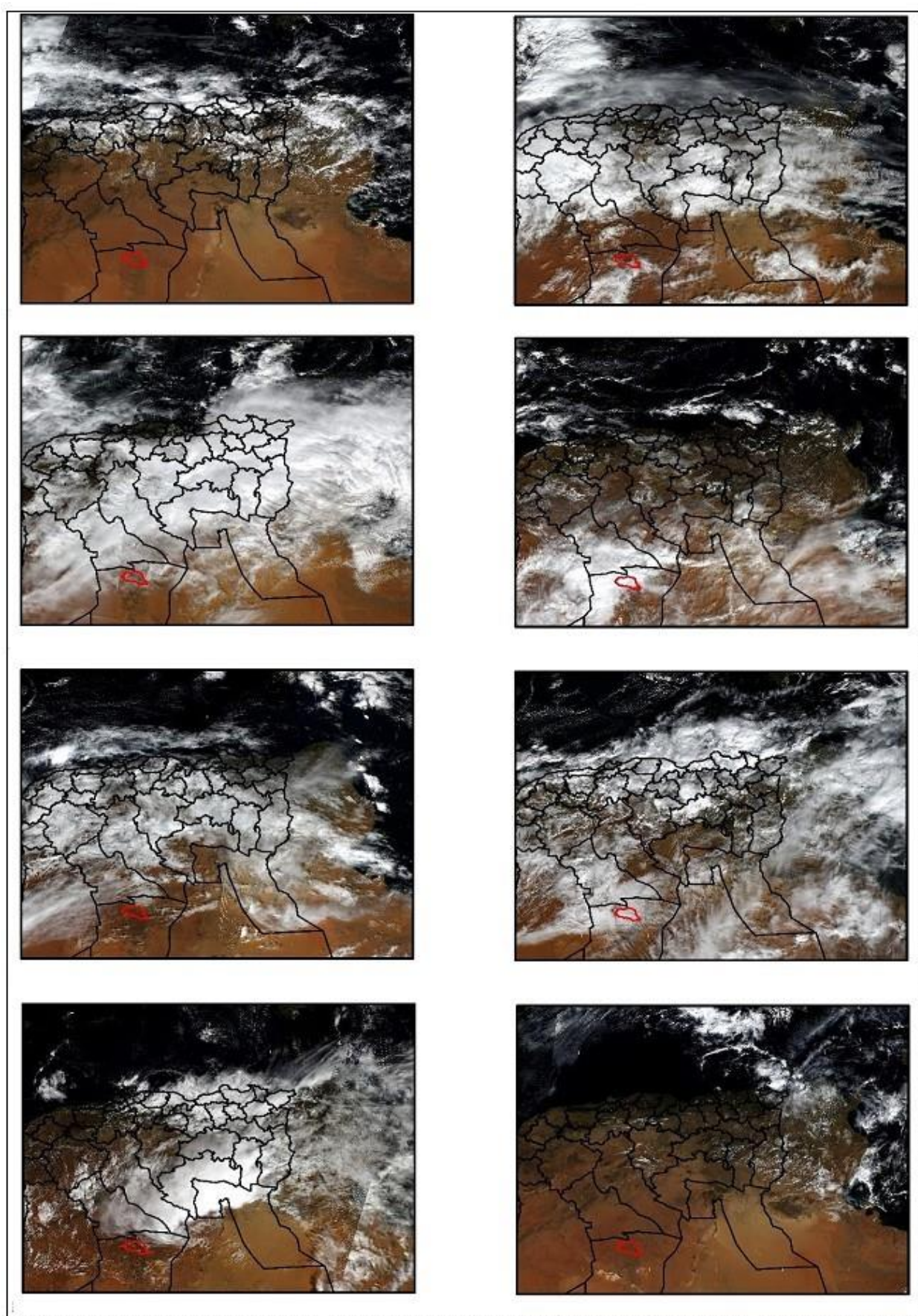


Figure I- 9: Images MODIS (07/09 – 09/09/2024)

1.10.6 Impacts immédiats des inondations du 08 septembre 2024 dans la région de Naâma :

L'épisode pluvieux exceptionnel du 08 septembre 2024 a généré, dans la région de Naâma et plus particulièrement dans les localités d'Aïn Sefra, Tiout, Moghrar et Kalaât Cheikh Bouamama, une crue d'une ampleur rarement observée dans l'Atlas saharien occidental. Les hauteurs d'eau soudaines, exacerbées par la forte pente des talwegs et la concentration rapide des ruissellements, ont provoqué des conséquences humaines et matérielles d'une intensité remarquable, rappelant des événements majeurs tels que la catastrophe de Ghardaïa en 2008.

Les premiers impacts de cette crue se sont manifestés en quelques minutes seulement : habitations submergées, routes coupées, infrastructures publiques endommagées et perturbation généralisée des réseaux essentiels. Plusieurs quartiers d'Aïn Sefra et de Moghrar ont été envahis par des torrents boueux atteignant parfois plus de 1,5 m de hauteur, entraînant l'effondrement partiel de murs d'enceinte et l'inondation de dizaines d'habitations situées en bordure des oueds El Breidj, Mouileh et Tiout.

Les dégâts recensés dans les heures qui ont suivi révèlent l'ampleur du phénomène :

- De nombreuses familles ont été déplacées en urgence après la submersion totale de leurs habitations.
- Plusieurs infrastructures vitales – notamment des ponts, des tronçons de routes nationales, des écoles et des postes de santé – ont été fortement endommagées.
- Les exploitations agricoles situées dans les lits majeurs des oueds ont particulièrement souffert : des centaines d'hectares de cultures irriguées (légumes, palmeraies, vergers) ont été détruits sous l'effet combiné de l'érosion et du dépôt de matériaux grossiers.
- Le cheptel pastoral, ressource essentielle de la région, a subi des pertes importantes, avec de nombreuses têtes de bétail emportées par la crue.

Les images recueillies sur le terrain (Fig.5) montrent clairement la violence du phénomène : véhicules renversés ou déplacés sur plusieurs dizaines de mètres, berges entièrement remodelées, infrastructures hydrauliques endommagées et accumulations massives de matériaux alluvionnaires dans les zones d'habitat.

À Aïn Sefra, la crue du 08 septembre 2024 s'impose comme un cas d'étude hydrologique majeur pour la région de Naâma. Les premières estimations communales font état de pertes financières importantes, affectant simultanément les secteurs résidentiel, agricole, hydraulique et routier.

Cette catastrophe rappelle avec force la vulnérabilité des zones d'habitat et de production situées dans les lits majeurs et souligne l'importance d'améliorer les dispositifs de surveillance hydrométéorologique, de modélisation hydrologique et d'aménagement préventif dans les bassins versants semi-arides.

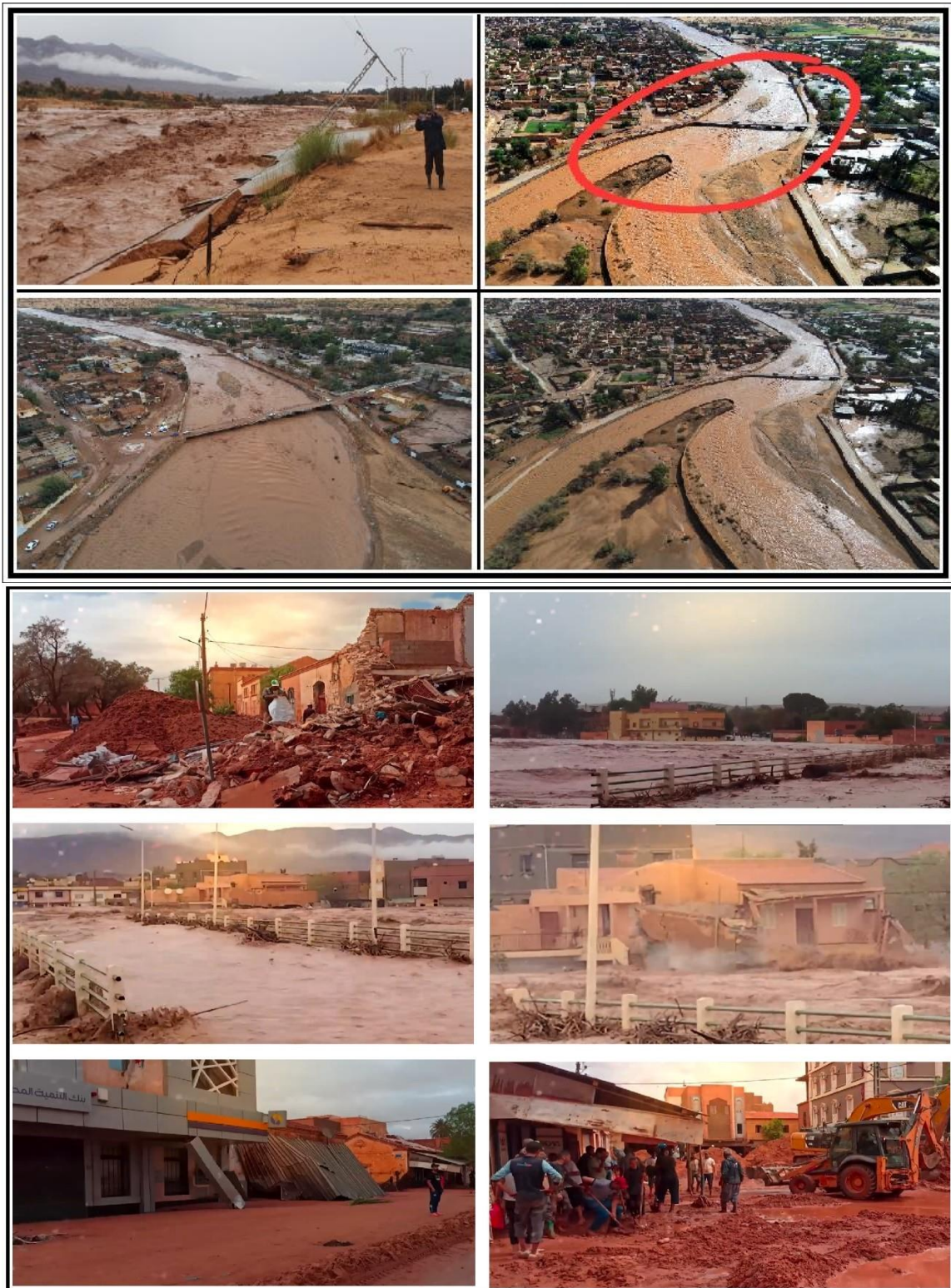


Figure 3: illustration des dommages causes par l'inondation de septembre 2024

Figure I- 10 : Illustration des dommages causés par l'inondation de septembre 2024 'Photos capturées par Drone'

I.10.7 Conséquences principales et implications pour la gestion du risque :

Les observations et analyses de terrain révèlent que :

- Les zones basses et plaines alluviales sont les secteurs les plus vulnérables.

- Les infrastructures critiques, notamment les routes et habitations périphériques, ont été directement impactées.
- Le transport de sédiments et le ruissellement rapide ont aggravé les effets locaux, créant des points de concentration de crue et d'érosion.

Ces résultats permettent de cartographier l'aléa d'inondation à haute résolution pour les quatre localités, de simuler différents scénarios d'aménagement et de proposer des mesures de prévention adaptées, notamment le curage des lits d'oueds, l'élargissement des lits et l'implantation de protections hydrauliques.

Conclusion

La modélisation hydraulique constitue aujourd'hui un outil essentiel pour comprendre et analyser la dynamique complexe des inondations dans les milieux arides et semi-arides, à l'image de la région d'Aïn Sefra. En offrant une représentation réaliste et détaillée des écoulements, elle permet de répondre efficacement aux problématiques liées au risque d'inondation auxquelles cette ville est régulièrement confrontée.

Caractérisée par une topographie contrastée, un réseau hydrographique irrégulier et une urbanisation en constante expansion, Aïn Sefra présente une vulnérabilité accrue face aux crues soudaines. Dans ce contexte, l'analyse hydraulique repose sur une évaluation précise de paramètres clés tels que les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement, les durées de submersion et leur répartition spatio-temporelle. L'objectif est d'atteindre un niveau de détail suffisant, pouvant aller jusqu'à l'échelle parcellaire, afin d'orienter de manière pertinente les stratégies d'aménagement et de prévention.

L'intégration de l'approche historique s'avère également indispensable. Elle permet de mieux cerner les zones exposées et de valider les résultats issus de la modélisation. À ce titre, la crue exceptionnelle du 8 septembre 2024 à Aïn Sefra constitue un événement marquant, au cours duquel plusieurs quartiers ont été submergés par des écoulements rapides provenant notamment du piémont du Djebel Mekther, causant d'importants dégâts aux infrastructures et aux habitations. Cet épisode met en évidence la nécessité d'une prise en compte rigoureuse de la mémoire hydrologique dans toute démarche d'évaluation du risque.

Ainsi, cette étude s'inscrit dans une perspective visant à évaluer l'efficacité de différents aménagements, tels que les ouvrages de protection, l'aménagement des lits d'oueds ou encore la réorganisation de l'espace urbain, dans la réduction du risque d'inondation à Aïn Sefra. L'approche adoptée repose sur la confrontation des résultats de la modélisation hydraulique avec les données historiques, permettant de développer un cadre d'analyse fiable pour simuler des scénarios futurs et améliorer la résilience du territoire.

En définitive, la combinaison de la modélisation hydraulique, des outils géospatiaux et de l'analyse des événements passés constitue une approche intégrée et performante pour mieux comprendre, anticiper et atténuer les risques d'inondation à Aïn Sefra. Elle offre ainsi aux décideurs des éléments concrets pour mettre en œuvre des politiques de gestion durable, visant à protéger efficacement les populations, les infrastructures et l'environnement.

Chapitre 2



Description des Eléments du Milieu Physique de la Région d'Ain Sefra

Chapitre 02 : Description des éléments du milieu physique de la région d'Ain sefra

Introduction :

La région de Naama, à l'instar de l'ensemble des zones méridionales de l'Algérie, est particulièrement exposée à une variété d'aléas naturels (inondation, désertification, ensablement, effets du changement climatique). Ce phénomène s'explique non seulement par les caractéristiques climatiques et géographiques de la région, mais également par des facteurs anthropiques qui aggravent le risque. De nombreux événements liés à l'aléa inondation se sont produits dans la région, entraînant des dégâts considérables. Ces manifestations ont provoqué la destruction totale ou partielle d'infrastructures telles les habitations, les routes, et ont malheureusement occasionné des pertes en vie humaine.

En effet, la croissance rapide et souvent non planifier des centres urbains dans cette région contribue largement à accentuer l'exposition au risque naturel. Ce développe urbain qui se fait fréquemment sans prendre en considération les contraintes environnementales et les spécifiés des terrains, ce qui engendre une occupation inappropriée de l'espace, y compris dans les zones identifiées comme potentiellement à risques. Par ailleurs, de nombreuses infrastructures et ouvrages d'art (pont, gabion, retenues collinaires, routes...) sont réalisés sans études techniques préalables approfondies ni analyses de faisabilités. Cette approche d'aménagement, souvent improvisée, engendre une fragilité structurelle qui se révèle dès l'apparition des phénomènes naturels extrêmes.

Dans le cadre de la présente étude portant sur l'aléa inondation affectant la région de Naama, il a été constaté que, dans la plus des cas, l'absence d'études approfondies sur les sites ne tenant compte ni des considérations d'ordre techniques en ce qui concerne l'urbanisation et l'aménagement des endroits à risques.

Le risque qui découle de ces aléas (inondation, déformation crustale et des ouvrages d'art...) pourrait atteindre des proportions catastrophiques. Il est donc impératif de disposer de connaissance précise et actualisée sur le sol et sous-sol et des phénomènes naturels, constituent une première étape vers la prise en charge des mesures de réduction des risques avant de se doter d'une stratégie globale pour lutter et limiter les dégâts occasionnés par ces risques.

Les événements météorologiques extrêmes, notamment les inondations et les sécheresses, affectent un grand nombre de personnes, constituant ainsi une menace majeure parmi les aléas naturels. Les inondations sont l'une des catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus impactant, causant des pertes considérables en vies humaines et en biens matériels. Ces événements peuvent survenir dans divers environnements, tels que les rivières, les réservoirs et les zones côtières, provoquant d'importants dégâts lorsque les débits excèdent les capacités des infrastructures hydrauliques (Smith et Ward, 2020).

En Algérie, les inondations constituent un risque majeur, en particulier dans les zones urbaines à forte densité de population. Au cours des deux dernières décennies, les inondations ont causé la mort de plus de 1200 personnes en Algérie, selon les données de la Protection civile rapportées par le Ministère des Ressources en Eau, (2023). L'inondation dévastatrice de Bab El Oued à Alger en 2001 reste l'un des épisodes les plus meurtriers avec 781 morts et des milliers de logements détruits. Par ailleurs, plus de 700 sites dans le pays sont identifiés comme zones à risque, nécessitant des interventions prioritaires pour réduire les impacts (Meziani et al., 2022).

Les tendances actuelles suggèrent que l'intensité et la fréquence des inondations augmenteront dans les prochaines décennies en raison de la croissance démographique, du développement économique non planifié et du changement climatique. Cela souligne l'importance de développer des approches modernes de modélisation hydrologique pour prédire les crues soudaines et mieux gérer les risques associés (Berrada et al., 2021). Ces modèles, intégrant des données de précipitations, de ruissellement et des imageries satellitaires, jouent un rôle essentiel dans la précision des impacts et protéger efficacement les zones vulnérables.

La modélisation des inondations joue aujourd'hui un rôle assez important dans la planification urbaine et la gestion des risques, notamment dans un contexte de changements climatiques et d'urbanisation croissante. Les outils modernes, combinant les modèles numériques d'élévation (MNE), les systèmes d'information géographique (SIG) et les modèles hydrologiques et hydrauliques, ont permis des avancées majeures dans la compréhension et la gestion des risques liés aux inondations (Bates, 2020).

Les SIG, intégrés à des modèles comme HEC-HMS, HEC-RAS et WMS, offrent une capacité d'analyse précise pour extraire des paramètres critiques tels que les pentes, les directions d'écoulement et les bassins versants. Ces outils permettent de modéliser les événements d'inondation à diverses échelles, offrant ainsi une aide précieuse pour l'élaboration de plans de gestion des risques et la mise en œuvre de politiques adaptées (Jenson et Domingue, 1988 ; Wilson et Gallant, 2021).

Les progrès technologiques récents ont conduit à une meilleure intégration des modèles distribués dans les environnements SIG. Plusieurs études de cas à travers le monde illustrent cette évolution. En Algérie, de nombreuses études ont exploité ces approches :

- **L'Agence spatiale algérienne (ASAL)** a mené une étude approfondie sur les zones inondées et inondables à l'aide d'outils récents tels que GIS, HEC-RAS et HEC-GeoRAS, combinés à des données précises de modèles numériques de terrain (MNT) à 2 mètres de résolution et des images de très haute résolution à 60 cm. Ce projet de recherche, étalé sur **quatre ans**, a permis de proposer des aménagements stratégiques pour toute la vallée de M'Zab, mettant en évidence un potentiel d'atténuation significatif des dégâts liés aux inondations.
- Derdous et al. (2018) ont prédit des risques d'inondation dans le réservoir de Zardezas, mettant en évidence un potentiel d'atténuation des pertes de 25 %.
- Yamani et al. (2019) ont combiné HEC-HMS et HEC-RAS pour cartographier les zones vulnérables dans la région de Ghardaïa, améliorant la précision des prévisions de 18 %.
- Bekhira et al. (2021) ont utilisé le modèle GR pour prédire les inondations dans le bassin versant de Wadi Bechar, avec une précision de 92 %.

Ain Sefra, située dans la partie ouest des monts Ksour, est historiquement vulnérable aux Inondations, aggravées par des précipitations torrentielles soudaines et un climat semi-aride. Depuis 1882, la région a subi plusieurs événements majeurs, notamment en 1904, 1990, 2000, 2007 et 2014, causant des pertes humaines et économiques significatives. En 2014, une inondation a touché 35 % de la zone urbaine, affectant plus de **12 000 habitants**, provoquant des dommages matériels évalués à plusieurs milliards de dinars.

En 2024, la ville d'Ain Sefra a été confrontée à nouveau à des précipitations extrêmes, provoquant en moins de 24 heures l'inondation de vastes zones urbaines. Ces événements ont causé des dégâts importants aux infrastructures publiques, endommagé plus de **1 500 habitations** et forcé le déplacement d'environ **8 000 résidents**. Ces pertes soulignent l'urgence d'une gestion proactive et d'aménagements adaptés pour réduire la vulnérabilité de la région.

Dans cette étude, nous avons recours à une modélisation avancée des inondations basées sur les principaux outils du **HEC-RAS et GIS**, dont L'objectif principal est de :

1. **Identifier les zones inondées** via la régénération de la crue 2024, intégrant les récentes laisses de crues.
2. **Identifier les zones à haut risque d'inondation** via une carte de vulnérabilité, intégrant les récents événements.
3. **Évaluer l'efficacité des infrastructures actuelles**, telles que les barrages et les canalisations, face à des scénarios climatiques extrêmes.

Les résultats attendus fourniront des **outils stratégiques pour les décideurs**, permettant d'optimiser les investissements en infrastructures, de limiter les pertes humaines et de réduire les dommages matériels jusqu'à **85%**. Cette approche proactive, combinant modélisation hydrologique et gestion territoriale, constitue une réponse essentielle aux défis posés par le changement climatique et l'urbanisation croissante dans la région.

II.1. Évolution de l'Adaptation humaine face aux Aléas de la Nature

De tout temps, l'être humain a été exposé aux aléas de la nature entraînant dans beaucoup de cas, une influence négative sur sa vie en général.

Quelques groupes se déplaçaient des régions affectées en évitant d'y habiter parce qu'ils étaient incapables d'affronter les risques de la nature. Néanmoins, l'être humain a remarqué avec le temps que ce type de risque a tendance à se répéter dans un lieu donné, surtout lorsqu'il s'agit de tremblements de terre, de conditions météorologiques liées aux cyclones et aux inondations qui sont devenus des sources d'inquiétude dont les causes, la puissance de destruction et les facteurs qui jouent un rôle majeur ont nécessité le recours à des technologies appropriées prenant en considération le développement démographique là où il est difficile d'éviter les régions influencées. Celles-ci couvrent une grande surface sur la terre et elles sont souvent d'une utilité et d'une importance commerciale, industrielle et agricole avérées. Une partie des intempéries de la

terre auxquelles on est obligé de s'habituer est devenue avec le temps une vérité incontournable. Et malgré les souffrances, on a pallié ces conséquences néfastes en mettant en place des règles et en procédant à la mise au point de plans détaillés relatifs au développement de nos connaissances en la matière et à la minimisation des risques.

L'homme a continué à modifier ses plans précédents en tenant compte de ses échecs et en ajoutant ce qui est convenable après avoir exposé les résultats pratiques relatifs aux risques en ce qui concerne chaque nouvel événement.

II.2. Différents types d'inondations

II.2.1. Inondations des Oueds :

Les inondations des oueds sont la principale menace pour la région de Naâma, où plusieurs oueds saisonniers traversent la région. Ces inondations se produisent lorsque la quantité d'eau dans les oueds dépasse leur niveau habituel, débordant sur les plaines adjacentes.

Malgré la construction de barrages ou de digues pour contrôler ces crues, les protections peuvent s'avérer insuffisantes lors d'épisodes de pluies exceptionnellement fortes. Les zones inondées restent généralement limitées aux lits des oueds, mais des crues violentes peuvent submerger des zones bien plus vastes.

Dans la région de Naâma, les facteurs les plus fréquents d'inondations sont :

- Les pluies torrentielles, souvent localisées, mais intenses.
- La fonte rapide des neiges sur les sommets environnants, notamment au printemps.

Les inondations soudaines sont également fréquentes dans cette région semi-aride. Elles se produisent lorsque des orages violents transforment des oueds habituellement secs en torrents dévastateurs. Ce phénomène est amplifié par la nature imperméable des sols dans ces zones arides, qui favorise un ruissellement rapide et massif.

II.3. Les inondations dans les zones arides et semi-arides

Les études spéciales de prévision des inondations inattendues dans les régions arides ou semi-arides constituent un grand défi pour les spécialistes, et pour les chercheurs qui travaillent dans le domaine des risques naturels. Le but de cette étude est de comprendre et connaître les caractéristiques et les causes de ces inondations qui peuvent toucher des grandes parties d'une ville.

II.3.1. Caractéristiques des inondations dans les zones arides et semi-arides :

Les inondations des zones arides et semi-arides se distinguent par des caractéristiques spécifiques qui les rendent plus destructives que des inondations courantes qui se produisent dans les régions humides et, vu la spécificité des régions arides quant à leur survenue rapide et inattendue, on les a nommées « les inondations inattendues ». Il y a deux différences principales entre les inondations habituelles et les inondations inattendues, la première se produisent vite et la deuxième se passe en peu de temps entre le moment de début du l'intempérie causant

l'inondation et celui où elle atteint son pic ; ceci explique l'écart de temps très court qui s'écoule entre l'intempérie et le ruissellement des eaux.

Plusieurs chercheurs dans le domaine de l'étude des risques naturels considèrent que la durée courante des inondations inattendues ne dépasse pas six heures 6H. Cette période s'avère idéale pour distinguer entre l'inondation inattendue et l'inondation habituelle. Les caractéristiques les plus importantes de l'inondation inattendue sont l'effet de surprise et la distribution aléatoire des eaux sur les surfaces.

II.3.2. Les Causes :

Les inondations inattendues surviennent dans les zones arides et semi-arides, souvent à cause de violents orages de pluie, dans des zones à pentes abruptes, peu couvertes de végétation, créant aussi un cours d'eau au débit très rapide (lié à l'impossibilité, pour ce dernier, de réguler les flux en son centre). En raison des circonstances climatiques arides qui distinguent ces zones, le flux rapide est habituellement accompagné d'une opération de sculpture et d'érosion de la surface terrestre, vu la rareté de la couverture végétale susceptible de raffermir le sol.

II.4. Changements climatiques et inondations dans les zones arides et semi-arides

Dans les régions d'Ain Sefra, Tiout, Kallaat Cheikh Bouamama, et Moghrar Fokania, le changement climatique entraîne des événements météorologiques inhabituels, notamment des tempêtes de pluie intenses et concentrées. Dans ces zones arides et semi-arides, ces pluies torrentielles, souvent inattendues, peuvent provoquer des inondations soudaines et dévastatrices.

La prédominance du climat aride combinée à l'augmentation des variations climatiques a amplifié la fréquence et l'intensité des fortes pluies au cours du XXe siècle et au-delà. Ces tempêtes localisées, tombant sur des sols imperméables et des terrains aux reliefs accidentés, favorisent des crues rapides, intensifiant les dégâts dans ces régions vulnérables.

Malgré les défis posés par la rareté de l'eau dans ces zones, les inondations destructrices sont devenues un problème récurrent, causant des dommages croissants aux infrastructures, aux habitations, et à l'agriculture. Les épisodes récents dans ces localités rappellent la nécessité d'améliorer les systèmes de gestion des crues et les stratégies d'adaptation climatique pour minimiser les impacts de ces catastrophes naturelles.

Mise à part la crue de 2024, dans les régions d'Ain Sefra, Tiout, Kallaat Cheikh Bouamama et Moghrar Fokania, plusieurs événements notables de crues ont causé de lourds dégâts. Par exemple, en novembre 2007, Ain Sefra a subi des inondations majeures, provoquant des pertes humaines et matérielles importantes. À Tiout, les fortes pluies de septembre 2012 ont également conduit à des inondations graves, submergeant des maisons et des infrastructures. Les crues de 2013 à Kallaat Cheikh Bouamama ont également été particulièrement dévastatrices, affectant les routes et les habitations locales. En 2020, Moghrar Fokania a été touchée par une crue soudaine après des pluies torrentielles, causant des évacuations et endommageant les cultures locales.

Ces événements soulignent la vulnérabilité croissante de ces régions aux impacts du changement climatique. Ils mettent en évidence la nécessité d'améliorer la gestion des risques d'inondation et de renforcer les infrastructures pour faire face à ces phénomènes de plus en plus fréquents et intenses.

II.4.1. Contexte et objectif

L'objectif de cette investigation est d'effectuer une synthèse sur la cartographie de l'aléa inondation à travers une approche de modélisation hydraulique. Il s'agit également de mettre en lumière les potentialités offertes par les outils informatiques dans la représentation cartographique des résultats issus de ces modélisations. Ces outils constituent un levé puissant et efficace à la disposition des décideurs, leur permettant de mieux évaluer les niveaux de protection à adopter et d'identifier les améliorations à apporter aux aménagements existants, dans une optique de prévention et de gestion efficace des risques d'inondation.

La première phase du projet concerne particulièrement la compilation de tout type de données utiles à la réalisation de ce projet et compris l'investigation et l'enquête de terrain et particulièrement au niveau des sites longeant les oueds (Oued Tirkount, Oued Breidj, Oued Mouileh, Oued Ain Sefra, Chaabat Lakhra, Oued Tiout, Moghrar...). Lors de la mission de terrain, de nouvelles données ont été acquises pour l'interprétation des résultats issus de la première analyse préliminaire et qui vont être servir par la suite comme donnée d'entrée pour le calage du modèle.

II.5. Présentation générale de la wilaya de Naama

II.5.1. La Wilaya de Naâma:

La Wilaya de Naâma est située dans le sud-ouest du Sahara algérien, elle correspond à une zone au nord-ouest du pays, à proximité de la frontière marocaine. Elle est délimitée au nord par la Wilaya de Saïda, au sud par celle de Béchar, à l'est par la Wilaya de Laghouat et à l'ouest par la frontière Algéro-marocaine. Cette wilaya englobe une vaste région comprenant des zones arides et semi-arides, caractérisées par une altitude moyenne de 1 000 mètres au-dessus du niveau de la mer.

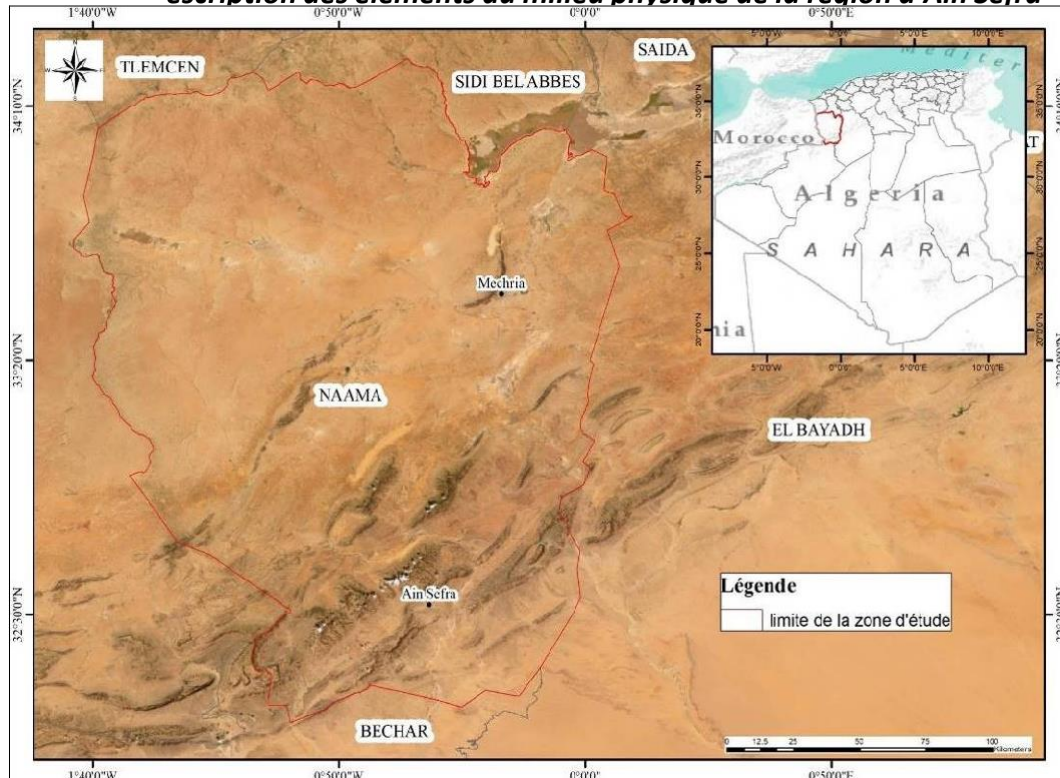


Figure II.1 : Situation géographique de la wilaya de Naâma.

Figure 4: situation géographique de la wilaya de Naama

La Wilaya de Naâma se situe précisément entre les latitudes (32°30' N) et (33°30' N) et les longitudes (1°50' O) et (2°50' O). Le chef-lieu de la wilaya, se trouve à 650 km au sud-ouest d'Alger, 300 km au sud de Saïda, et environ 250 km au nord de Béchar.

La wilaya de Naâma fait partie des anciennes divisions administratives du pays, créée en 1984 par la loi n°84/09, après avoir fait partie de la Wilaya de Saïda. Sa superficie est d'environ 29 514,14 km², et sa longueur du nord au sud est d'environ 250 km, tandis que sa largeur d'est en ouest varie entre 150 et 180 km.

Limites géographiques de la Wilaya de Naâma :

- Au Nord : la Wilaya de Tlemecen et Sidi Bel Abes ;
- Au Sud : la Wilaya de Béchar ;
- À l'Est : la Wilaya de El Bayadh ;
- À l'ouest : la frontière avec Maroc ;

II.5.2.1. Ain Sefra :

Ain Sefra est le chef-lieu de la commune et se situe dans le sud-ouest de l'Algérie, au cœur des montagnes de l'Atlas saharien, à une latitude de 32°45'57"N et une longitude de 0° 33' 57"O. Elle fait partie de la Wilaya de Naâma et constitue un point central pour les zones environnantes. La ville est connue pour son climat semi-aride et ses paysages montagneux impressionnants.

Ain Séfra est une ville de la wilaya de Naâma, située à 65 kms au sud-ouest du Chef-Lieu de la Wilaya, sur la Nationale 4. Elle est localisée dans les monts des Ksours de l'Atlas Saharien, à 1 058,040 m d'altitude. La ville d'Ain Sefra est dominée par un cordon dunaire de 12 kms de long, s'étendant du Nord-Est au Sud-Ouest, et de 1,5 km de large. La région est caractérisée par un

bioclimat aride avec des formations steppiques à base d'alfa (*Stipa tenacissima*) au piémont nord et des zones de parcours, et à Remt (*Arthrophytum scoparium*) au sud de l'Atlas Saharien. Le Djebel Aïssa, culminant à 2236 m et d'une superficie de 22400 ha, est considéré comme un site potentiel en matière de préservation de la faune et la flore.

Les Ksours sont les témoignages de l'hospitalité de la population locale, rappelant la glorieuse histoire de la région avec le Ksar de Moghrar qui abrite la citadelle de Cheikh Bouâmama, ainsi que les Ksours de Sfisifa, de Tiout et d'Asla. Toute la région est caractérisée par la présence de gravures rupestres d'âge néolithique (Moghrar, Tiout, Asla), d'où son classement en 2003 comme Parc National.

Figure 5: Situation géographique de la ville de Ain Sefra

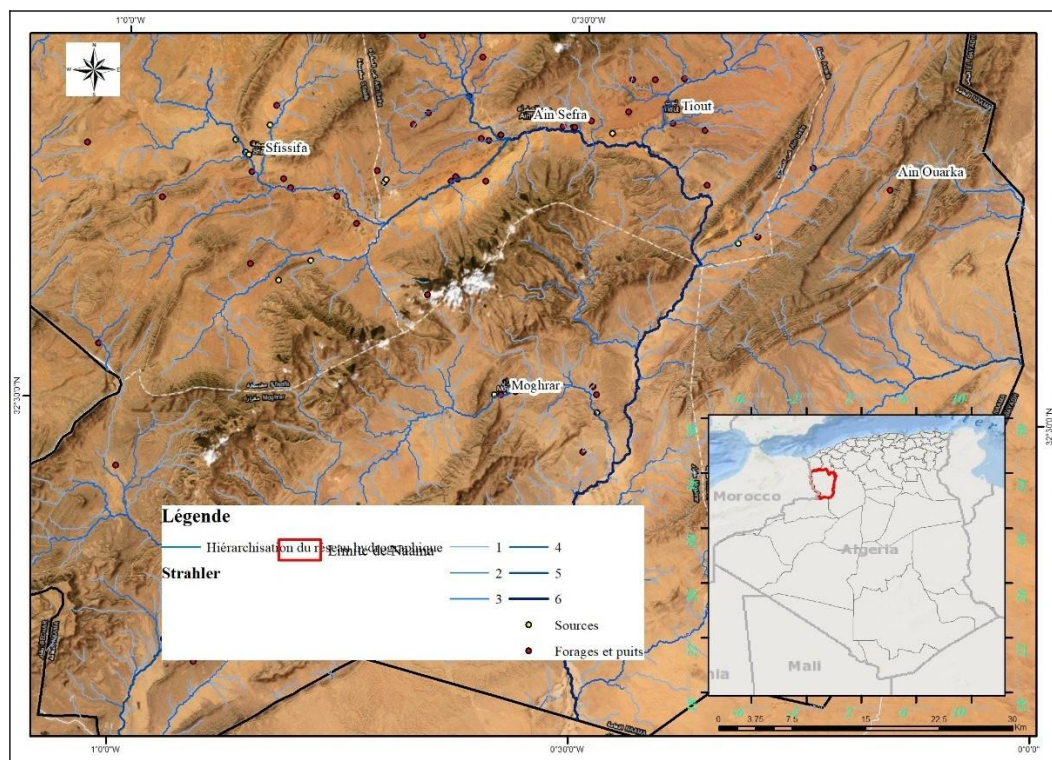


Figure II.2 : Situation géographique de la ville de Ain Sefra.

Les limites géographiques de la ville sont les suivantes :

- Au nord : la commune de Naâma ;
- Au nord-ouest : la commune d'Ain Ben Khelil ;
- A l'ouest : la commune de Sfisifa ;
- À l'est : la commune de Tiout ;
- Au sud : la commune de Moghrar Fokania.

La région d'Ain Sefra dispose d'un réseau routier peu développé, jouant principalement un rôle de liaison entre les Wilayas du Sud-ouest algérien et le reste du pays. Ce dernier comprend notamment un tronçon de 41 km de la route nationale n°6 reliant Ain Sefra à Béchar au Sud et Oran au nord, ainsi que la route nationale n°47 sur 57 K.7 en direction d'El Bayadh, avec un potentiel d'extension vers Sfisifa ainsi qu'une connexion transfrontalière au Maroc. Ces voies de communication convergent vers le chef-lieu, appuyées par un chemin de Wilaya de 14 km vers Sfisifa et un ensemble de pistes facilitant l'accès à l'intérieur de la commune. L'expansion

urbaine a engendré un élargissement du réseau de voirie, articulé autour de la déviation de la RN6. Ce dernier souffre d'un état de dégradation avancée, marqué par l'ensablement le mauvais état de revêtement ainsi que l'absence des caniveaux. Par ailleurs, la voie ferrée reliant Béchar à Mohammadia, présente des signes d'ensablement récurrents. Il est à noter que des travaux de réhabilitation sont cours, incluant le déploiement de la ligne sur un nouveau tracé et l'implantation d'une gare moderne au sud de la zone d'habitation nouvelle.

Sur le plan d'alimentation en eau potable, la zone s'appuie particulièrement sur plusieurs points de captage d'eau, dont les forages de Skhoua 1 et Slih 1, les puits du Ksar, et les sources des dunes. Il est à signaler que la distribution est assurée par sept réservoirs ayant une capacité globale de 5050 m³, complétée par une bache de reprise de 500 m³, située à Dalaa. Une étude du schéma directeur de l'AEP est en cours de réalisation, avec l'objectif d'optimiser la couverture des besoins en eau de la population.

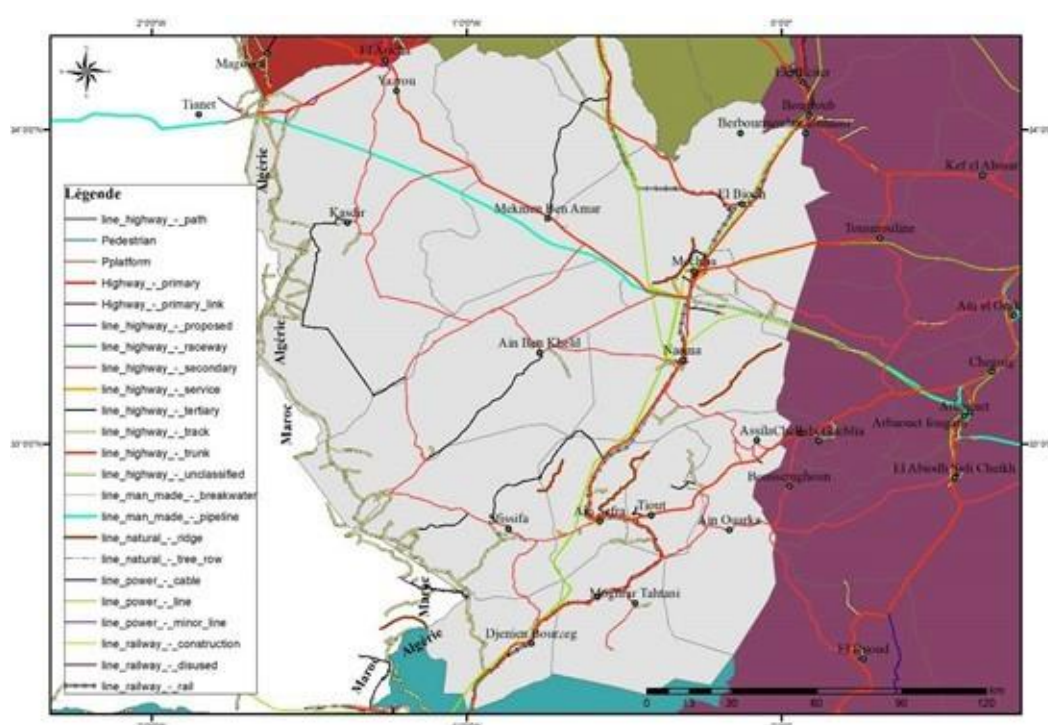


Figure II.3.a : BDD des infrastructures de la région d'étude.

Figure 6: infrastructure de la region d'etude vue sur image spatiale

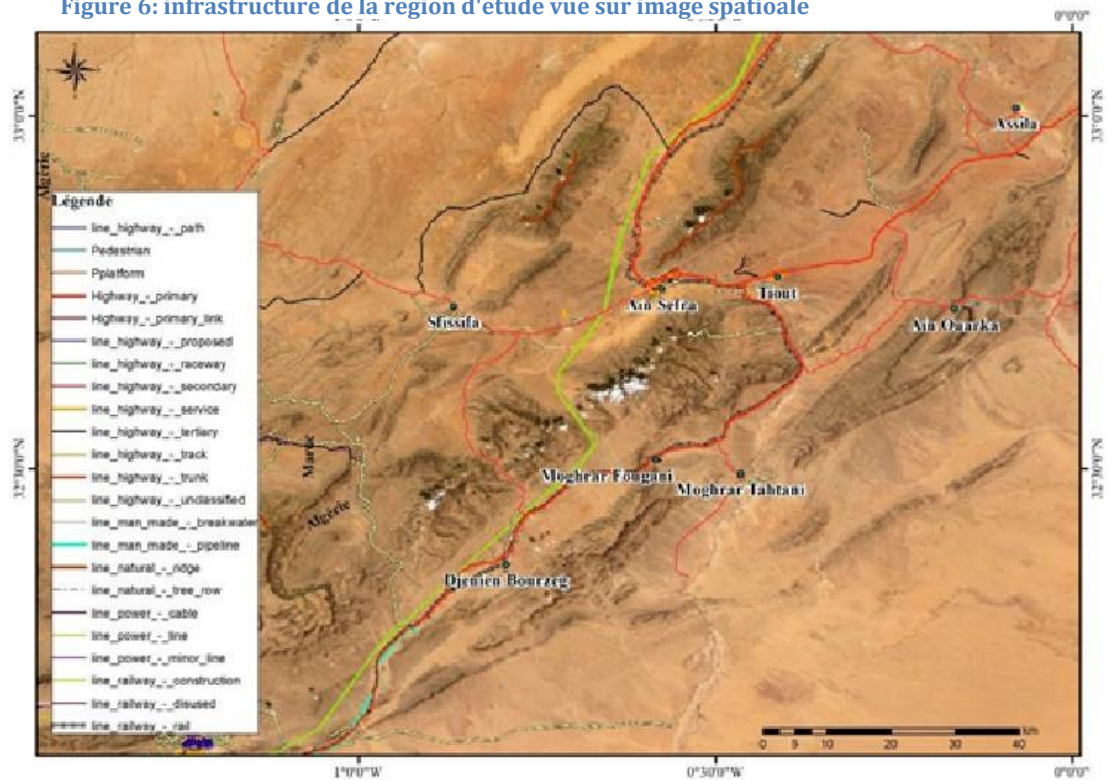


Figure 11.3.b : infrastructure de la région d'étude vue sur image spatiale.

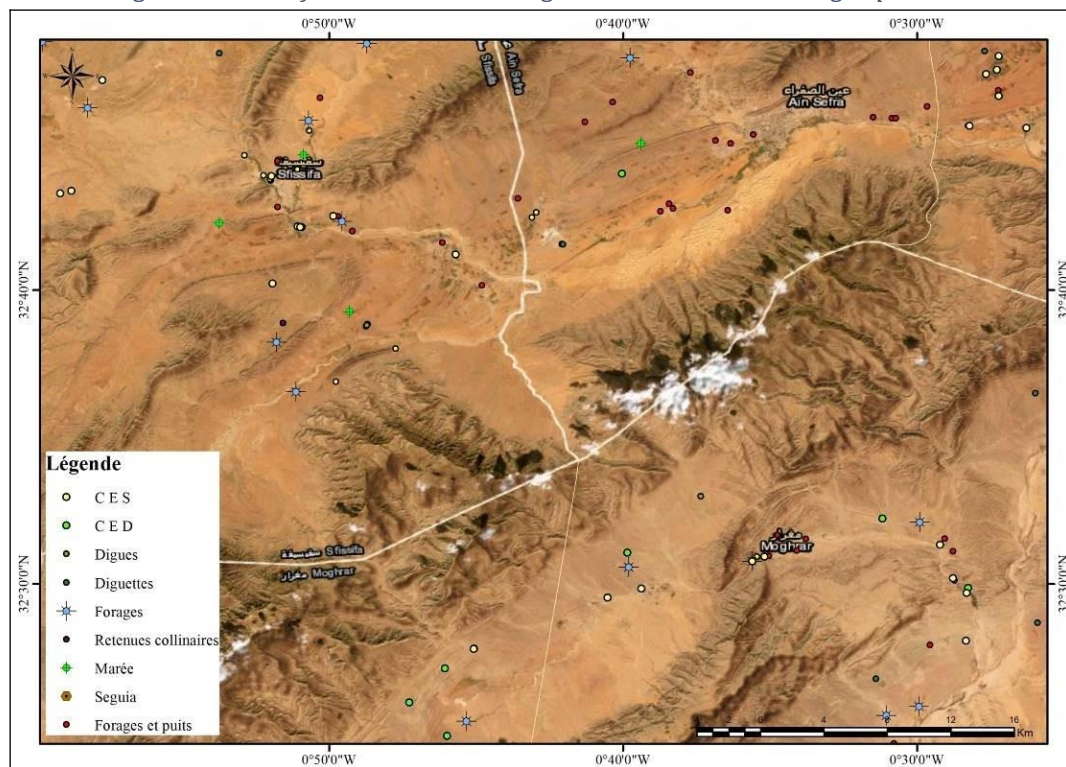


Figure 11.4 : points d'eau de la région d'étude (puits et forages).

Figure 7: points d'eau de la region

Les habitants de la région d'Ain Sefra, majoritairement actifs dans des activités agricoles et pastorales, dépendent principalement des eaux souterraines, en raison de la rareté des ressources en eaux de surface. Dans ce contexte, les projets d'aménagement des bassins versants revêtent une importance stratégique, car ils permettent de valoriser et de gérer durablement les ressources en eaux superficielles et souterraines.

Pour élaborer un plan complet de développement du bassin versant, il est impératif de comprendre la topographie et l'état du drainage de la région. Pour une analyse morphométrique détaillée, nous avons utilisé les données satellites pour l'établissement de différentes cartes l'extraction des sous-bassins versants délimités, et la mise en évidence de cartes paramétriques, tels la mosaïque des cartes topographiques, les cartes climatiques de températures, de précipitations issues de données satellitaires, une étude morphométrique du bassin, une étude hypsométrique, une étude de la fracturation à partir d'images satellites et u recensement des historicités des crues affectant notre zone .

II.5.2. Hydrographique et densité de drainage

La région considérée se caractérise particulièrement par un réseau hydrographique qui ne coule qu'au moment où après de courtes périodes pluvieuses, vu leur écoulement endoréique. Dans les zones qui sont connues par un couvert végétal abondant où les eaux de surface se perdent par l'évaporation, il y'a une salinité élevée et notamment au niveau des dépressions fermées CHOISEL M.D., et al (1974) : (HADEID M., (1996).

La configuration hydrographique de notre zone se particularise par le phénomène de l'endoréisme, où l'écoulement de surface se dirige principalement vers les deux entités géomorphologiques, à savoir le Chott El Chergui et le Chott El Gharbi.

La densité de drainage est un paramètre qui inversement proportionnelle à la perméabilité, ce qui en fait un élément assez important dans l'évaluation des ressources hydriques (Anduallem et Demeke, 2019). Son évaluation représente la proximité aux affluents et aux cours d'eau, ce qui permet de mesurer la longueur moyenne des affluents et cours d'eau dans l'ensemble de la zone d'étude (Strahler, 1964 ; Singh et al., 2017).

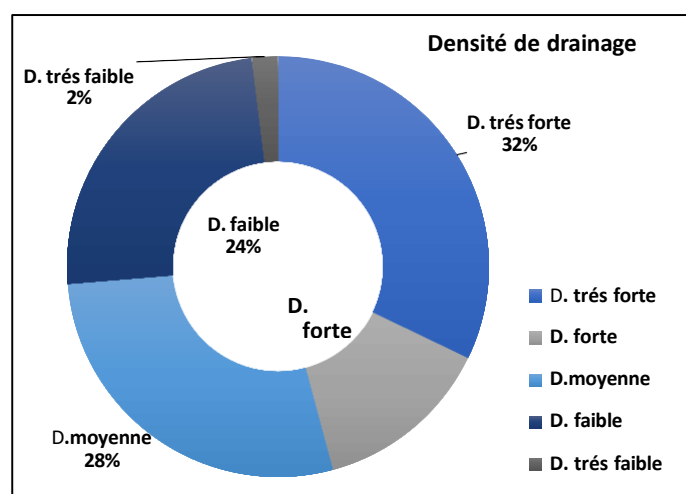


Figure II.5 : Pourcentage des classes de densité de drainage.

Figure 8: pourcentage des classes de densite de drainage

Dans notre cas, la carte de densité de drainage a été obtenue après l'extraction automatique du réseau hydrographique en utilisant un modèle numérique de terrain et qui s'en suivit par sa génération directement par le biais de 'tool box'. Le processus de génération de ce paramètre a impliqué de faire le rapport entre la longueur totale des cours d'eau sur une unité surfacique.

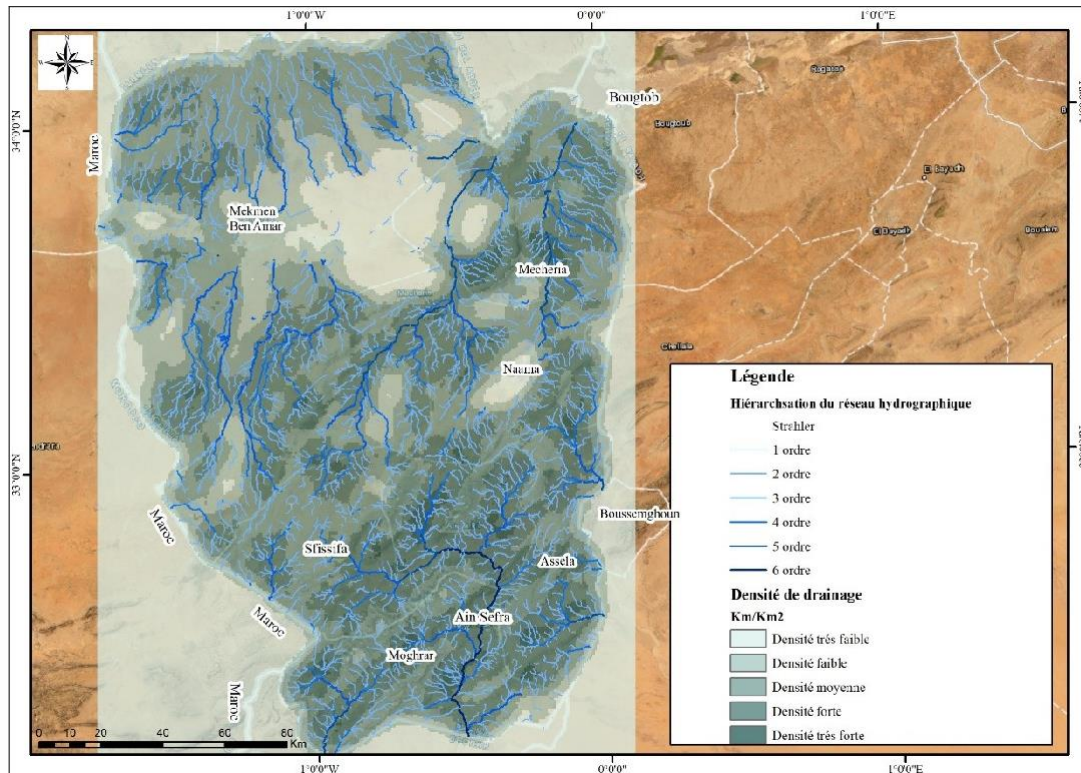


Figure II.6 : Densité du réseau hydrographique.

II.5.3. Hydrogéologie

Figure 9: densité du reseau hydrographique

L'étude hydrogéologique menée dans la région a permis d'identifier plusieurs d'aquifères, qui ont été délimités sur la base d'une analyse approfondie des conditions géologiques. Cette analyse a permis de classier les différentes formations géologiques en fonction leur aptitude à stoker l'eau, en tenant compte de leur porosité et de leur perméabilité.

II.5.3.1. Synclinal d'Ain Sefra

Situé sur l'axe reliant Saïda à Béchar, s'étend sur une superficie de 1133 km². Il est bordé au nord par Dj Aïssa et Mohrad, à l'ouest par Dj Djahaf et Saïga, et au sud ainsi qu'à l'est par les monts des Ksours. Ce dernier renferme plusieurs nappes aquifères de potentiel variable. Les formations aquifères comprennent notamment les grés du jurassique supérieur et du Crétacé inférieur, localisés en affleurement dans les Dj Aïssa et Mokhtar. Ces nappes se caractérisent par leur faible capacité en raison de leur confinement dans des couches discontinues. Par ailleurs, les grés albiens forment un ensemble gréseux épais constituant la principale nappe de la région en termes de volume et d'extension. Les formations quayetrnaire principalement constituées de dunes présentent également un caractère aquifère, bien que limité. Cependant, des nappes localisées dans les alluvions à la confluence des oueds El Briedj et Tirkount. Toutes fois, les grés albiens, par analogie evc ceux de la région de LAghoueat laissent suoser un potentiel aquifère plus important.

Figure 10: direction de flux global souterrain

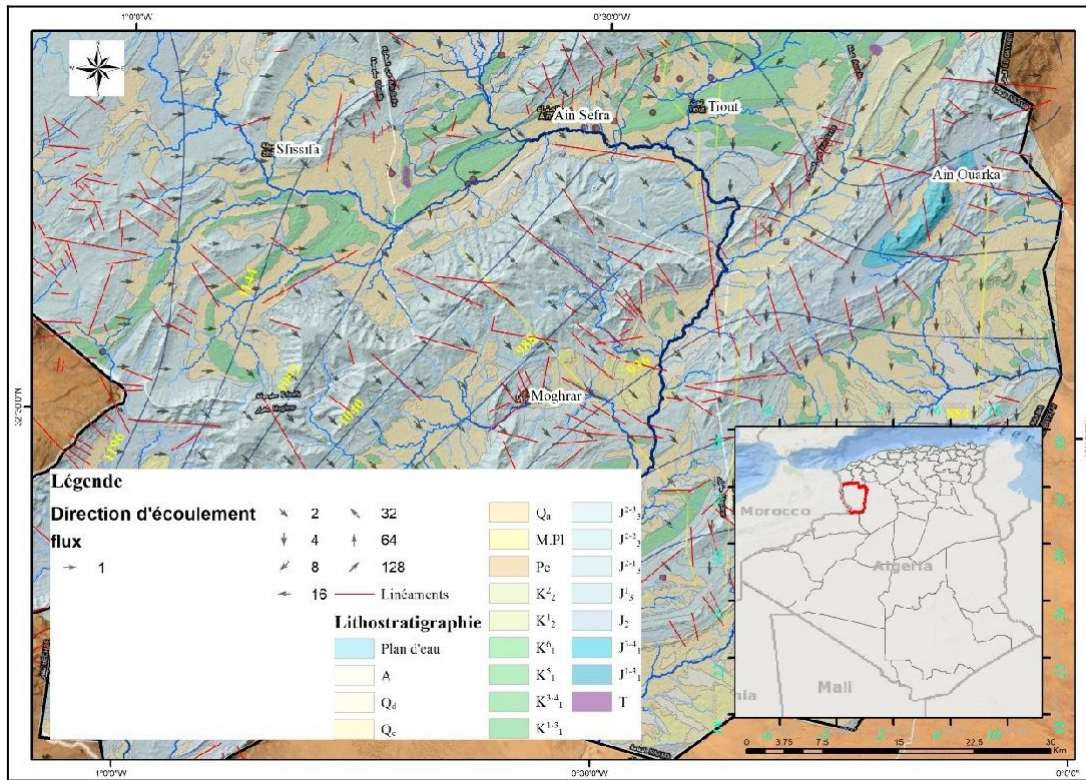


Figure 11.7 : Direction de flux global souterrain.

II.5.4. Description Géologique : 'Cadre géologique de la plate-forme saharienne'

Le domaine de la plate-forme saharienne correspond à une vaste étendue constituée de formations sédimentaires d'âge secondaire et tertiaire, globalement subhorizontales, reposant en discordance sur un socle paléozoïque intensément plissé et érodé lors de l'orogénèse hercynienne. Cet ensemble géologique remplit une large dépression synclinale formant le bassin du Bas-Sahara, également connu sous le nom de bassin du Chaamba (Conrad, 1969).

Le cœur de cette cuvette est occupé par les dunes du Grand Erg Oriental, tandis que le Grand Erg Occidental recouvre en grande partie ses marges occidentales. Sous ces accumulations sableuses, le bassin présente localement des structures en bombement anticlinal, caractéristiques du domaine du Haut-Sahara (Flandrin, 1957).

Vers le nord, cette plate-forme entre en transition avec les reliefs de l'Atlas saharien, notamment dans la région d'Aïn Sefra, qui constitue une zone charnière marquée par des structures tectoniques complexes et des variations lithologiques importantes. La plate-forme saharienne s'étend ainsi depuis le massif cristallin du Hoggar au sud jusqu'au piémont méridional de l'Atlas saharien au nord. Ces deux grands ensembles géologiques, saharien et atlasique, sont séparés par un accident structural majeur appelé la flexure sud-atlasique (figure 8.a).

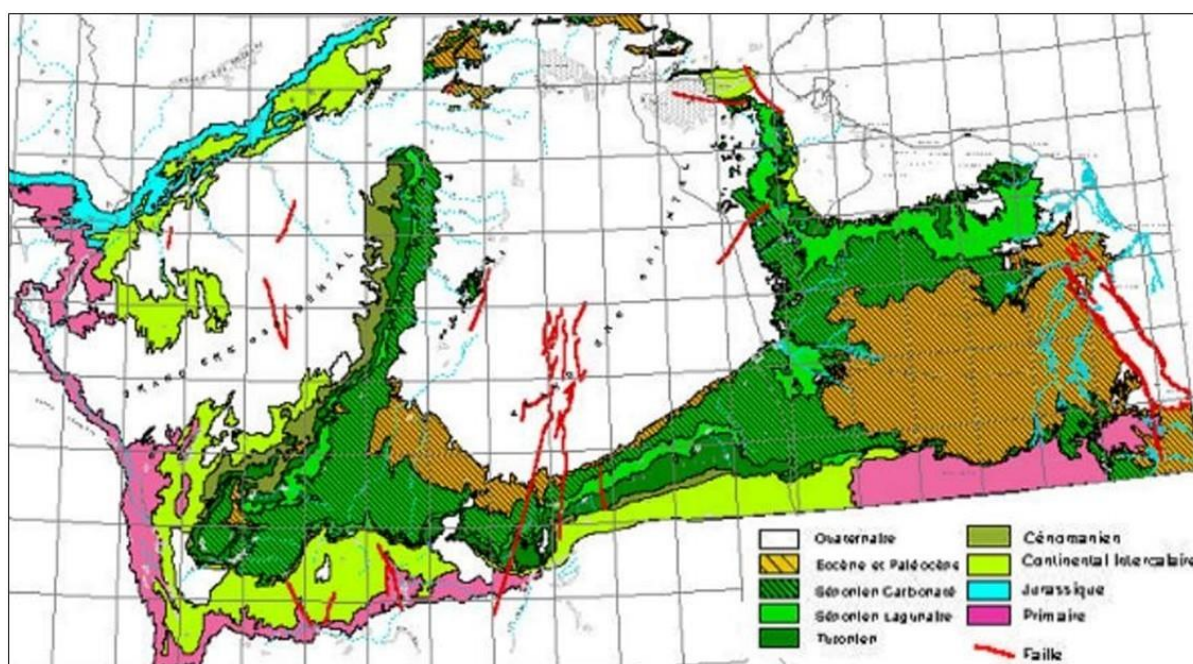


Figure II.8.a : Carte Géologique du bassin septentrional du Sahara [O.S.S, 2003]

II.5.4.1. Cadre géologique de la région d'étude

La région des monts des Ksour, située dans la continuité méridionale du Moyen Atlas marocain, repose sur des terrains autochtones caractérisés par une succession lithostratigraphique étendue et complexe. Cette série repose particulièrement sur un socle paléozoïque surmonté d'un ensemble mésozoïque bien développé, affecté par une tectonique à la fois souple et cassante. Les travaux effectués par Bassoulet (1937), Douihasni (1976), et Kazi Tani (1986), Ait ouali 1992 et mékahli (1995) ont permis de préciser la stratigraphie régionale qui se décline comme suit :

Trias : Le Trias est représenté par des formations évaporitiques, souvent en position diapirique ou en plis diapiriques (Diapir d'Ain Ouarka, Meddah 1998). Ces structures, qualifiées d'appareils diapiriques se développent au cœur des anticlinaux. Elles se composent particulièrement d'argiles gypsifères bariolées renfermant divers minéraux.

Le gypse est fréquent, apparaissant sous forme variée : cristaux maclés fer-de-lance, fibreux, en amas saccharoïde, ou hyalin. Le sel peut affleurer localement (diapir d'Ain Ouarka) bien qu'il soit absent dans certaines structures (diapir d'El Hendjir). L'une des caractéristiques des appareils diapiriques de l'Atlas saharien occidental (monts des Ksour) est leur association fréquente à des épanchements volcaniques.

Jurassique : Les formations jurassiques sont bien représentées, incluant les unités du Lias, Dogger et Malm.

- **Lias :** Très localisé par rapport aux restes des terrains du Secondaire. Il est composé principalement de dolomies, de calcaires et de marno-calcaires. Ces dépôts sont souvent riches en ammonites (Djebels Chémarikh ; et Djebel Melah de Mecheria) Mékahli (1995).
- **Dogger :** présente une alternance de faciès marno-argilo-gréseux et des calcaires récifaux.

- Malm : montre des dépôts gréseux croissant vers le sommet avec des formations de du Kimméridgien affleurant tout au long de l'Atlas saharien.

Crétacé : cette période est représentée par plusieurs unités stratigraphiques :

- Le Néocomien est constitué de marnes à ammonites et de faciès gréso-dolomitiques peu fossilifère. Dans certaines zones (Djebel Zerga, l Tadjrouna, Brézina), il montre une transition du faciès côtier à laguno-marin, avec intercalation des faciès calcaro-dolomitiques et marnes bariolées à gypse. Il se poursuit vers l'ouest en se chargeant de grés dans la région d'Ain-Sefra située dans les monts des Ksour.
- Le Groupe Barrémo-Albo-Aptien se compose de grés rouges continentaux, à stratifications obliques et à lits de graviers (grés à dragées de quard), principalement abandon Aïn-Sefra est représenté par des niveaux pauvres en dragées de quard.
- Le Cénomano-Turonien se caractérise par des marnes intercalées de calcaire dolomitique et d'épais bancs de gypse surmontés d'une assise calcaire marine (barre Turonienne) riche en Néolobites et Strombes notamment à El Abiod Sidi Cheikh.
- Le Sénonien, entièrement marin dans l'Atlas saharien oriental, comprend des calcaires à Miliolidés et des marno-calcaires. Vers l'ouest, des faciès conglomératiques ont été découverts dans la cuvette de Slim à l'ouest de Boussaâda (monts d'Ouled Naïl). Alors qu'au sud (Laghouat), il est représenté par des poudingues, des grés et de gypse difficilement différenciable du Tertiaire continental.

Tertiaire continental : Les dépôts tertiaires se présentent sous forme de faciès, argilo-gréseux de teinte rouge-brique ou verdâtre, parfois argilo-gypseux ou conglomératique. Ces formations sont fréquemment recouvertes par une croûte gréso-calcaire, témoignant le phénomène de cimentation ou d'altération superficielle. Le tout repose en discordance marquée sur les ensembles mésozoïques sous-jacents, indiquant une discontinuité sédimentaire majeure.

II.5.4.2. Tectonique :

La zone d'étude s'inscrit dans un cadre structural intracontinental correspondant à l'Atlas saharien, un vaste édifice tectonique mis en place au cours du Tertiaire. Cette chaîne se développe entre deux grands domaines structuraux : les Hautes plaines et Hauts plateaux au nord, et la Plateforme saharienne au sud. Elle délimitée par deux principaux accidents tectoniques majeurs

- L'accident Nord Atlasique : il s'agit d'une grande ligne de dislocation orientée sud-ouest/nord-est, qui s'étend du nord de l'extrême ouest algérien jusqu'à la région de Bousaada à l'est (Emberger, 1960) (Guiraud, 1985). Ce dernier est apparu sous forme de sillon dès le jurassique, voire depuis le trias (Kazi Tani, 1986),
- L'accident sud atlasique : il constitue la limite méridionale de l'Atlas saharien, séparant cette région de la plateforme saharienne. Cette ligne tectonique se présente sous forme de plusieurs segments discontinus, traduisant une structuration complexe liée à des phases tectoniques successives.

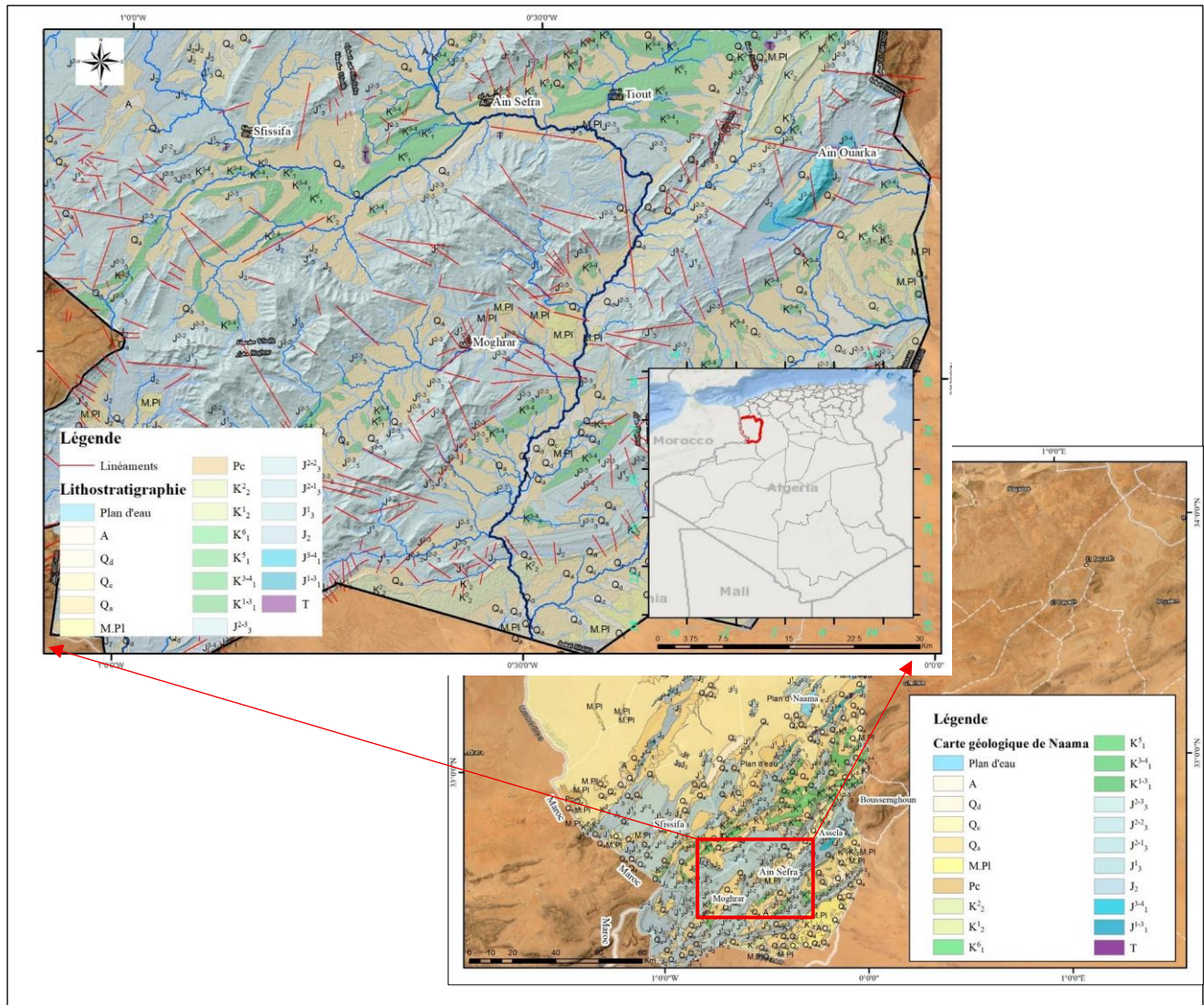


Figure II.8.b : Carte géologique de la zone d'étude.

Figure 11: carte geologique de la zone d'etude

II.6. Le grand bassin versant d'Ain Sefra

Le bassin versant d'Ain Sefra d'une superficie de 1957 km² situé dans le sud- ouest du territoire dans la région appelée monts des Ksour. Il est moyennement allongé et caractérisé par un réseau assez ramifié, de fortes pentes et des terrains relativement imperméables, de nature lithologique variée, offrant un environnement favorable au développement de fortes crues.

L'écoulement superficiel dans cette région semi-aride est lié au régime pluviométrique local. Les crues, de type orageux sont variables et très irrégulières et de courte durée. Les débits de pointe sont très élevés par rapport aux modules moyens. Caractérisés par une montée très rapide, ils entraînent des inondations agressives au niveau des berges et même dans la ville d'Ain Sefra. La décrue lente est toujours suivie d'un tarissement prolongé. L'automne est signalé comme saison de grand risque d'inondation. Le débit en période d'étiage, témoigne des potentialités phréatiques que produit le relief atlasique de la région, ce qui dévoile une relation hydrologique assez forte entre les eaux superficielles et les eaux souterraines.

II.6.1. Description du bassin

D'après les informations de l'International Disaster Database (IDD : la base de données en matière de catastrophes internationales) du Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres (CRED), les inondations sont classées au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde au cours de la dernière décennie (2003-2012). Elles représentent 48.2% des catastrophes enregistrées en 2013 à l'échelle mondiale, causant près de 32 millions de victimes, soit 33.2 % du nombre total des personnes touchées par les catastrophes naturelles (CRED, 2014).

En l'Algérie, les inondations sont marquées comme l'une des catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus destructrices. L'inondation du 10 novembre 2001 du quartier de Bab El Oued à Alger, avec un débit de crue max de 730 m³/s et un apport total de 2.600.000 m³, est la plus meurtrière avec 772 décès (Guenefi, 2004).

Historiquement, la ville d'Ain Sefra, objectif de notre étude, connaît des inondations récurrentes suite aux débordements de l'oued Ain Sefra (Confluence entre oued Breidj et oued Tirkount) dont nous citons les principales :

- 10 octobre 1904 (une trentaine de victimes, dont la célèbre écrivaine Isabelle Ebehardt). (Henine, 2010)
- L'inondation du 5 mai 1990, des pertes humaines et des dégâts matériels considérables. Le niveau des eaux a atteint plus de 2 mètres de hauteur dans le centre-ville d'Ain Sefra.
- 22 octobre 2000 une famille de 5 personnes a trouvé la mort, et plusieurs familles sinistrées. (Henine, 2010)
- 14 novembre 2004, des dégâts matériels importants (Lahlah, 2004).
- 19 octobre 2007, des dégâts importants au niveau du centre-ville d'Ain Sefra. Beaucoup de passerelles et ponts ont été endommagés et beaucoup de terres agricoles inondées et les récoltes ravagées. (Benhamed, 2007)
- 1 octobre 2014 Un enfant de 11 ans emporté par les crues (Aps, 2014)

L'étude des crues des oueds de l'Algérie reste un domaine inconnu, seules quelques indications très ponctuelles sont données dans les annuaires hydrologiques algériens. Partant de cette constatation, nous nous sommes intéressés à l'étude de ce phénomène très important aussi bien pour la connaissance du comportement hydrologique de nos oueds que pour toute étude d'aménagement hydraulique dans sa conception et sa gestion.

Nous allons présenter dans cette contribution une synthèse des résultats obtenus au niveau du bassin de l'oued Ain Sefra (1957 km²), Confluent et réceptacle des oueds Breidj et Tirkount.

En effet, en se basant sur les données de crues (débits instantanés) mesurées à la station d'Ain Hadjadj (20 km en aval d'Ain Sefra) sur une période de 32 ans (de 1977 à 2008) par les services de l'Agence Nationale des Ressources hydriques (A.N.R.H), nous avons mis en lumière la répartition des écoulements du bassin versant d'Ain Sefra pour en déduire les paramètres de comportement. On se limitera dans cette étude des crues, à leurs caractères généraux tels que leur genèse, leur puissance et leur fréquence en précisant par ailleurs, le potentiel et les risques hydrologiques qu'elles représentent.

II.6.2. Contexte Géographique

Le bassin Versant d'Ain Sefra situé dans le sud-ouest dans la région appelée monts des Ksour et faisant partie du bassin du Sahara forme la partie amont du grand bassin versant de l'Oued Namous qui déverse ces eaux dans le grand erg occidental. Il est situé entre les longitudes ($1^{\circ}00'00''$ et $0^{\circ}03'00''$ W) et les latitudes ($32^{\circ}30'22''$ et $33^{\circ}00'00''$ N). Le bassin se présente comme un bassin enclavé et entouré de montagnes, dominé au sud par un relief accentué du Djebel Mekther (2035 m), au sud-ouest par le Mir El Djebel (2109 m) et le Djebel Mzi (2206 m), au nord le Djebel Aissa (2236 m) et au nord-ouest par le Djebel Morghad (2136 m) et le Djebel Bouamoud.

Le bassin est très exposé aux aléas climatiques en générant directement des crues violentes.

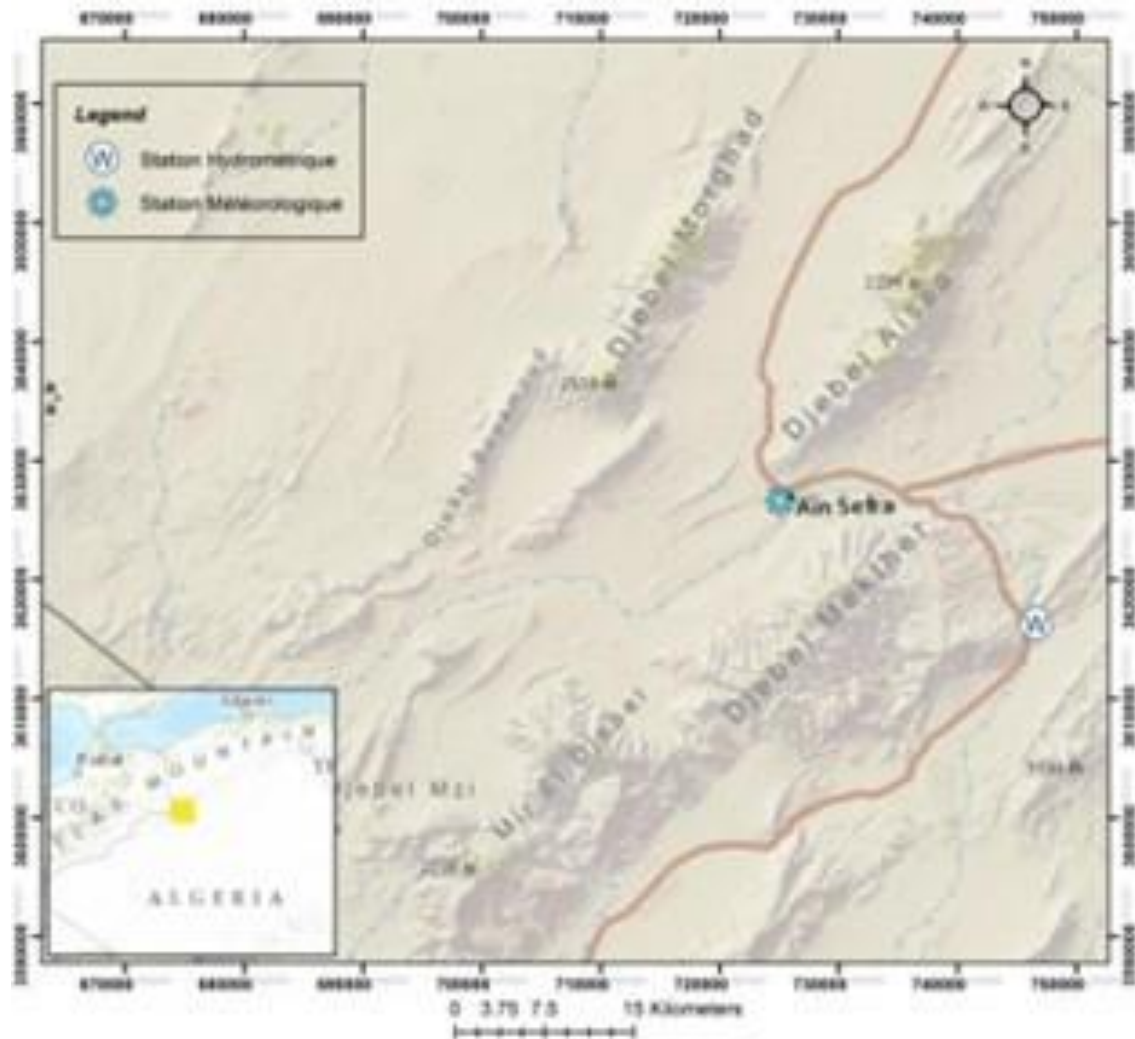


Figure II.9 : Situation géographique de la région d'étude.

II.6.3. Caractéristique morphologique du bassin versant

Nous avons déduit les caractéristiques morphologiques du bassin d'Ain Sefra à partir de techniques digitales et de modèles numériques du terrain MNT.

Le bassin versant d'Ain Sefra occupe une superficie de 1957 km² pour un périmètre de 236 km, avec un indice de compacité de 1.49, ce qui caractérise un bassin moyennement allongé. Il correspond à une région montagneuse assez élevée avec certains sommets qui culminent à plus

de 2000 mètres d'altitude. La présence de massifs montagneux favorise la concentration des eaux de ruissellement vers les dépressions. (Derdour et al. 2013).

Avec 67 km de long, le talweg considéré le plus important prend sa naissance dans le flanc nord du Djebel Morghad. Dans son trajet sud-est il reçoit l'oued Noufikha, ensemble ils forment l'oued Sfissifa, qui poursuit la même direction jusqu'à sa jonction avec son important affluent l'oued Breidj, qui prend naissance à Djebel Mzi, puis continue dans la même direction pour rencontrer l'Oued Tirkount qui draine les eaux du Djebel Morghad et Djebel Aissa et présente 29.6% de la surface du bassin versant d'Ain Sefra. Ces deux oueds se rencontrent au centre de la ville d'Ain Sefra pour former l'oued Ain Sefra qui se dirige vers le sud et reçoit d'autres oueds comme les oueds Tiout et Sam, donnant un seul Oued celui de Rhouiba, pour devenir à la fin l'oued Namous qui se perd dans le grand Erg occidental à 370 km de son origine. Le réseau est assez ramifié et dense ce qui permet une collecte aisée des eaux de précipitations pour les conduire vers l'exutoire.

D'après l'étude hypsométrique, on constate que l'altitude la plus fréquente est comprise entre 1200 et 1400 m représentant ainsi 57 % de la surface totale. Les altitudes inférieures à 1100 m ne représentent que 2 % de la surface totale et l'altitude médiane est de 1334 m. Le bassin d'Ain Sefra est caractérisé par des pentes assez fortes en amont, la pente diminue en aval à partir de la confluence de l'oued Sfissifa avec l'oued Breïdj. On peut distinguer trois types de pentes :

Une pente relativement faible entre (0 et 6 %) aux basses altitudes (1058- 1400), d'où la présence d'une vallée encaissée dans la région d'El Hendjir, et Ain Sefra, occupant 79 % de la surface. Ceci entraîne la formation de larges zones inondables s'étendant jusqu'à la ville d'Ain Sefra. 2) Une pente moyennement forte entre (6 et 25 %) vers les altitudes (1400-1600), d'où la présence d'un plateau intermédiaire dans les piémonts des Djebels : la surface occupée est de 12 %. Une pente très forte (supérieur à 25%) aux altitudes (1600-2213) expliquant la présence de montagnes qui occupent 8 % de la surface totale du bassin, ces pentes confèrent à l'oued un caractère violent et torrentiel. La pente moyenne du talweg principal est de 0.25% et le temps de concentration évalué à partir de la formule de Giandotti est de 8.87 h.

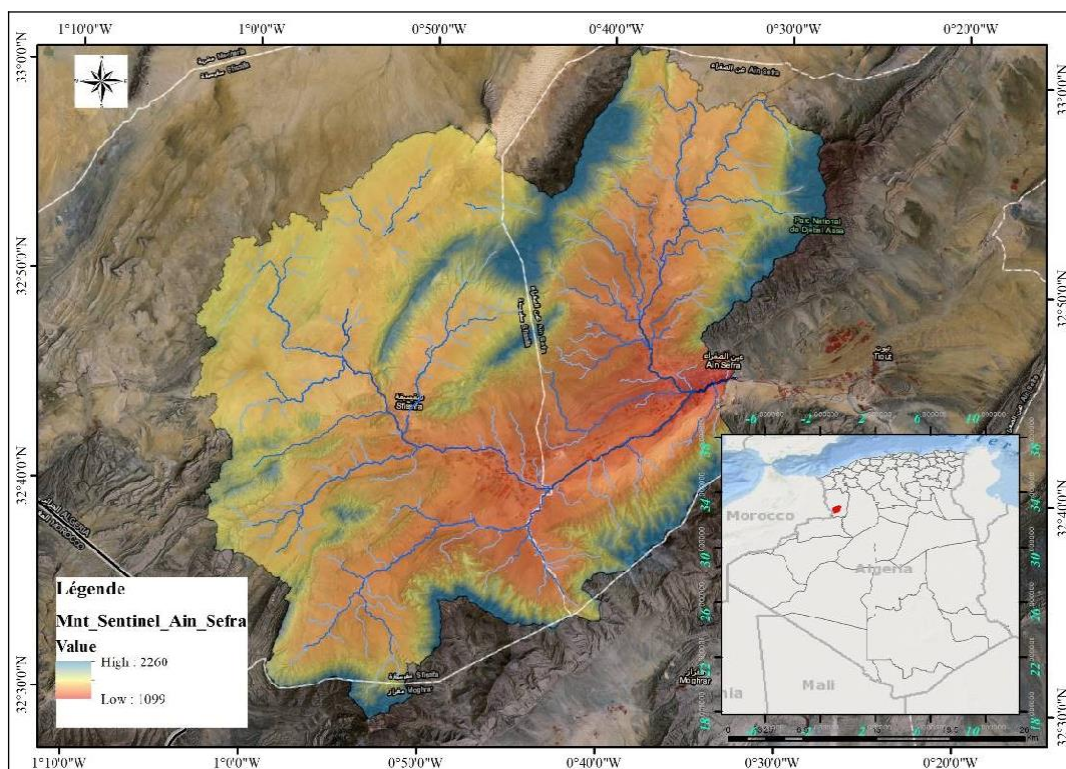


Figure II.10 : Modèle numérique de terrain du Bassin versant d'Ain Sefra.

Figure 12: modele numerique de terrain du bassin versant d'Ain Sefra

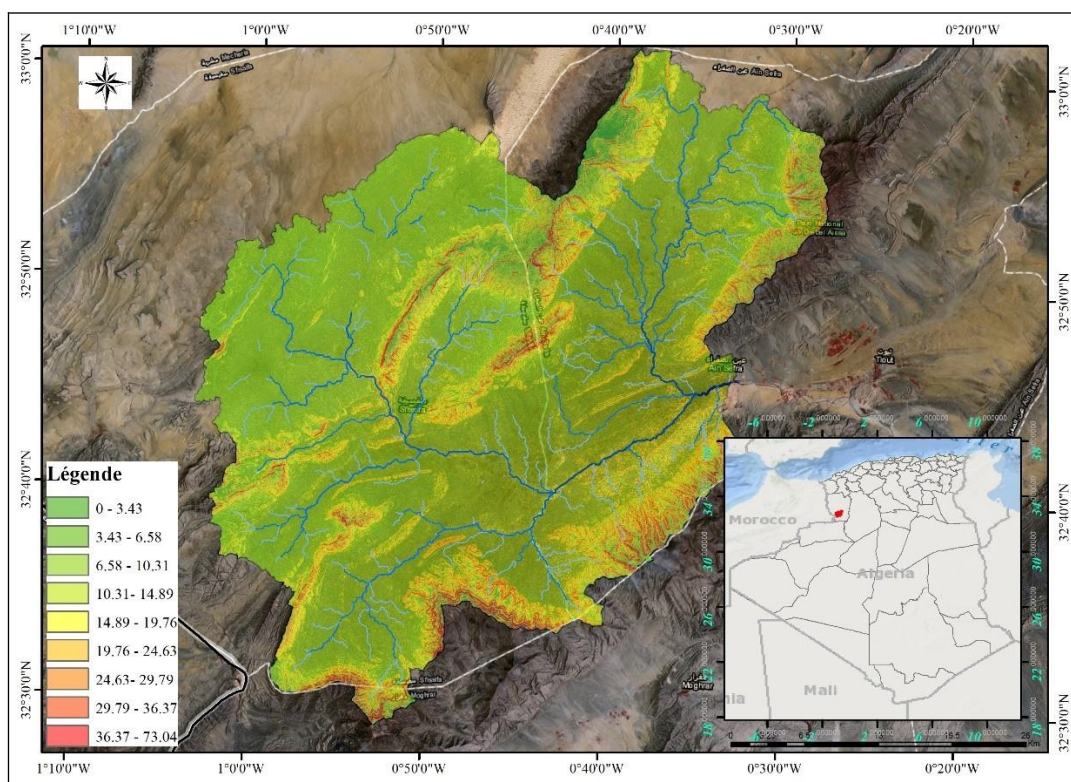


Figure II.11 : Carte des pentes du Bassin versant d'Ain Sefra.

Figure 13: carte des pentes du Bassin versant d'Ain Sefra

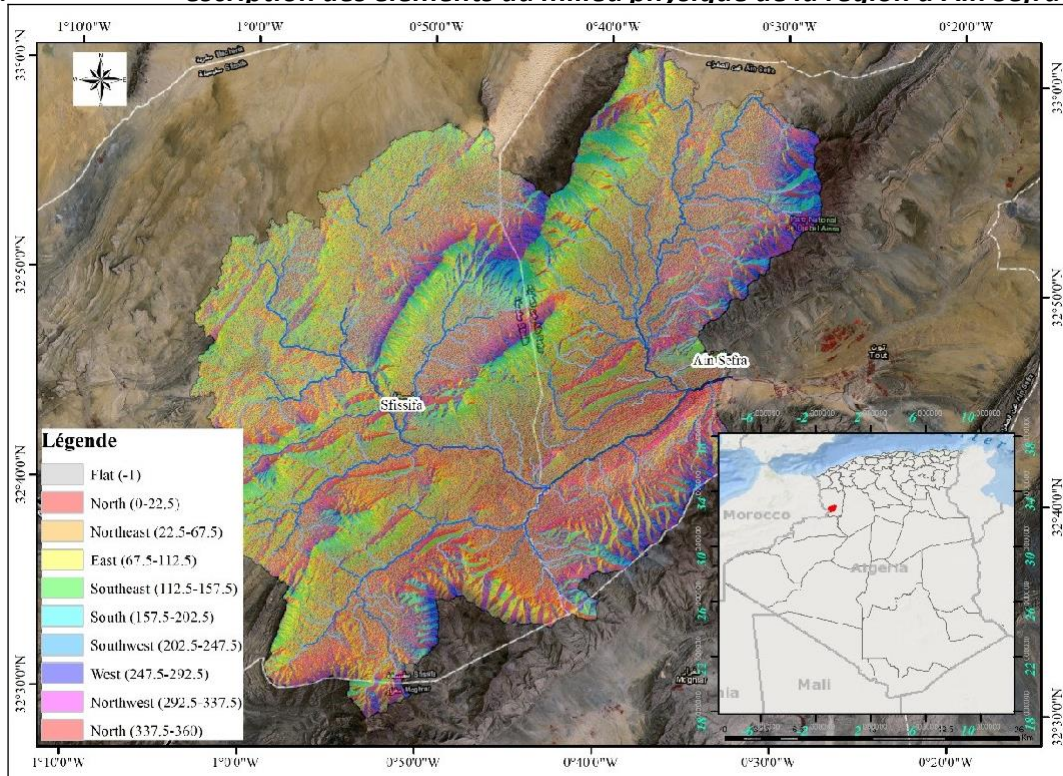


Figure 14: Carte d'exposition des versants d'Ain Sefra

Figure II.12 : Carte d'exposition des versants d'Ain Sefra.

La densité du drainage est aussi un paramètre important. Il permet de décrire le degré de développement du réseau hydrographique. Pour un réseau hydrographique d'une longueur totale de 1815 km dans le bassin d'Ain Sefra, la densité de drainage calculée par la loi de HORTON est de l'ordre de 0.9 km/km², la vitesse de ruissellement évaluée par le rapport entre la longueur du cours d'eau principal et le temps de concentration a atteint 7.5 Km/h, et le cours d'eau principal a atteint l'ordre 5 à l'exutoire selon la classification de Strahler.

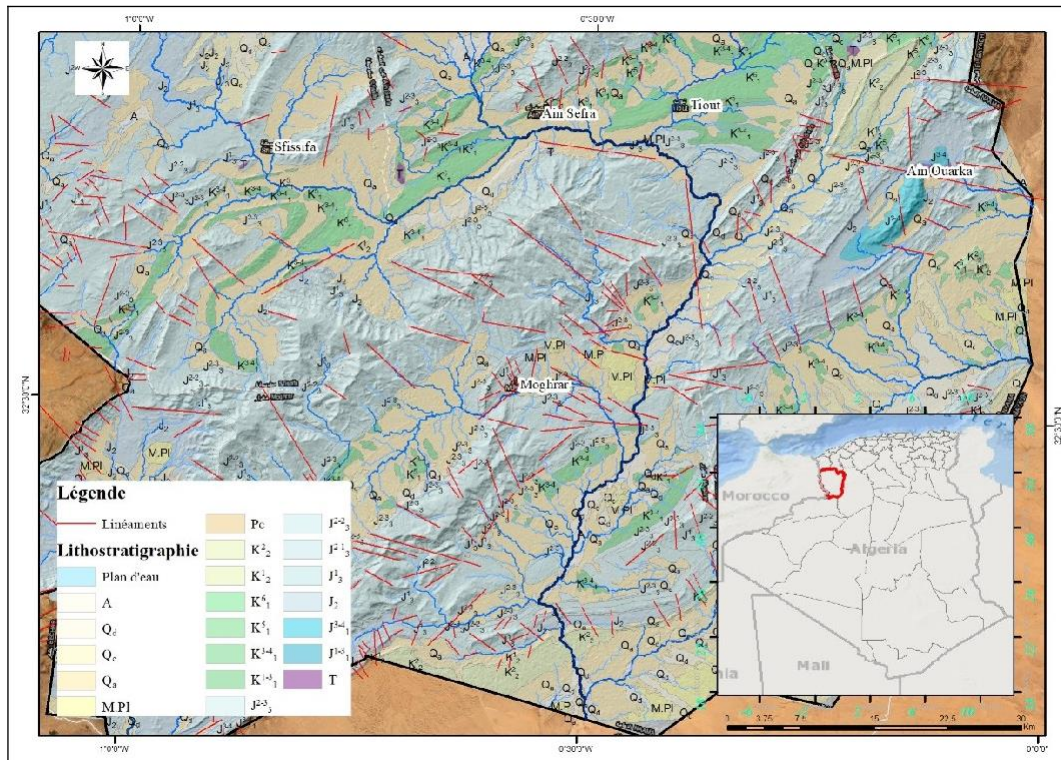


Figure 15: Carte géologique du Bassin versant d'Ain Sefra

Figure II.13 : Carte géologique du bassin versant d'Ain Sefra.

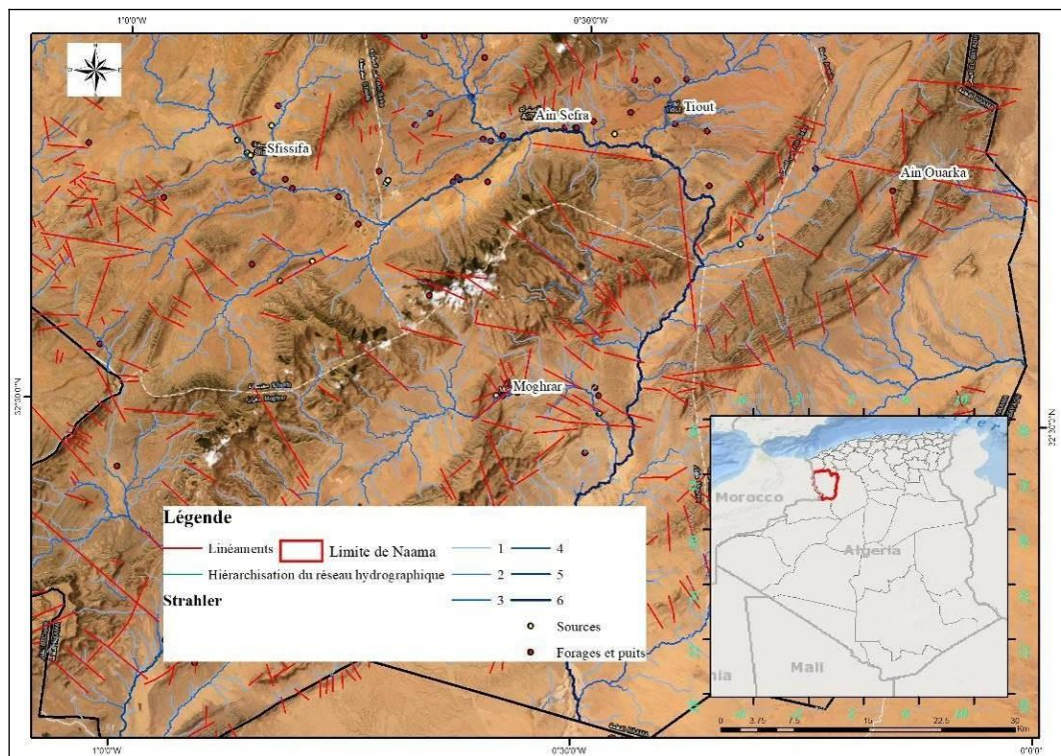


Figure II.14: Carte du réseau linéaire.

Figure 16: carte du reseau lineaire

II.6.2. Comportement hydrologique

L'Algérie se caractérise par grande diversité climatique, reflétant la variété de ces zones géographiques allant du littoral méditerranéen aux vastes étendues désertiques. Pour caractériser le type de climat dans une région spécifique, il est préconisé de prendre en compte plusieurs facteurs

géographiques et physiques, notamment la localisation, l'altitude, la topographie ainsi que sa proximité de la mer ou des reliefs montagneux.

Dans le cadre des travaux d'évaluation des risques d'inondation, l'étude hydroclimatique constitue un élément fondamental, permettant d'analyser les conditions météorologiques et hydrologiques susceptibles d'influencer l'intensité et la survenue des phénomènes d'inondation. L'étude hydroclimatique permet également de prévoir les variations saisonnières et interannuelles des ressources hydriques, ce qui est important pour une planification efficace, ainsi pour une gestion durable.

Les systèmes d'observation des précipitations sont en constante évolution grâce aux progrès technologiques et scientifiques et à la coopération entre les agences spatiales.

Ces collaborations permettent de partager des données, des méthodologies et des ressources, ce qui contribue à améliorer la précision et la couverture des observations des précipitations à l'échelle mondiale. Grâce à ces efforts conjoints, il est possible de mieux comprendre les phénomènes météorologiques et climatiques liés aux précipitations.

Les premières tentatives d'estimation de précipitation par satellite remontent aux années 1970, avec l'utilisation des satellites géostationnaires tels que GOES ou METEOSAT. A cette époque, le canal visible permettait de distinguer les nuages non précipitants, tandis que le canal infrarouge mesurait la température du sommet des nuages pour en déduire des estimations de précipitations au sol. Cette méthode a permis de fournir des estimations de précipitations à l'échelle régionale et mondiale, mais elle présentait des limites en termes de précision et de résolution spatiale. Au fil du temps, les techniques d'observation des précipitations par satellite ont évolué pour devenir plus sophistiquées et plus précises.

Par la suite, l'introduction des capteurs à micro-ondes passives pour l'estimation des précipitations, comme ceux embarqués à bord des satellites tels que le SSM/I (Special Sensor Microwave/Image), à partir de 1987, a marqué un tournant significatif. Ces capteurs, placés sur des orbites polaires, ont permis une détection directe des précipitations en mesurant les émissions de micro-ondes des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace présents dans les nuages. Parallèlement, les radars météorologiques ont continué de jouer un rôle fondamental, notamment dans la validation des données satellitaires. L'intégration de ces différentes sources d'information

permet aujourd'hui d'obtenir des estimations de précipitation plus fiables et plus fine, tant sur le plan spatial que temporel.

Afin de mieux cerner les dynamiques climatiques affectant les ressources hydriques de la région d'étude, une nouvelle approche de l'Hydro climatique intégrée a été adoptée. Celle-ci consiste tout d'abord à acquérir des données climatiques de différents paramètres tels que la précipitation et la température, sur une période de 40 ans (1981 à 2021). Ces données sont ensuite analysées pour identifier les tendances et les variations saisonnières et interannuelles influençant ces ressources. Un défi majeur dans la conduite de ce type d'étude est la faible densité des stations météorologiques au sol, en particulier dans les régions arides et semi-arides.

Pour pallier cette contrainte, les données issues de la plateforme POWER (Predictive of Worldwide Energy Ressources) de la Nasa ont été utilisées. Cette plateforme fournit des séries climatiques cohérentes, dérivées de modèles d'observation satellitaires, couvrant de vastes zones géographiques avec une résolution et une précision adaptée aux besoins des études environnementales et hydrologiques.

En effet, le POWER NASA est une source de données climatiques très utilisée dans différents domaines, notamment pour la modélisation météorologique et les prévisions climatiques. Cette source de données est également utile pour les applications relatives aux énergies renouvelables, car elle fournit des informations précises sur les conditions météorologiques locales. Le POWER NASA est donc une source de données fiable et précise pour une variété d'applications liées au climat et à l'environnement. Ces différents travaux menés, en utilisant les données acquises par cette plateforme, ont jugé l'excellente qualité en termes de précision et résolution.

La région d'étude fait partie d'un climat aride chaud, fortement marqué par es condition de sécheresse persistante. Ce climat se traduit par une pluviométrie très faible, irrégulière et imprévisible, tant d'une saison à l'autre que d'une année à l'autre. Cette variabilité interannuelle des précipitations représente un facteur majeur déclenchant le risque d'inondation et limitant la stabilité des ressources et la planification des usages agricoles et domestiques. Les données climatiques analysées à travers la plateforme POWER Nasa révèlent également une sensibilité accrue aux épisodes extrêmes, tels que les sécheresses prolongées ou, à l'inverse les épisodes orageux violents susceptibles de provoquer des crues soudaines et des inondations.

Le climat est un ensemble de circonstances atmosphériques et météorologiques d'une région donnée. C'est donc l'ensemble des facteurs du milieu qui interviennent en écologie, tel que les précipitations, les températures, l'humidité relative de l'air et les vents. De ce fait, nous avons recueilli des données entre 2015 et 2020 qui proviennent de données satellites (Power Nasa).

II.6.2.1. Précipitation

La précipitation est la quantité totale d'eau météorique, liquide (Pluie, brouillard, rosée) ou solide (neige, grêle...) qui tombe sur une surface horizontale. L'étude des précipitations est très importante, car elle permet de déterminer la quantité d'eau qui parvient à alimenter les ressources souterraines ainsi d'étudier le climat de la région considérée.

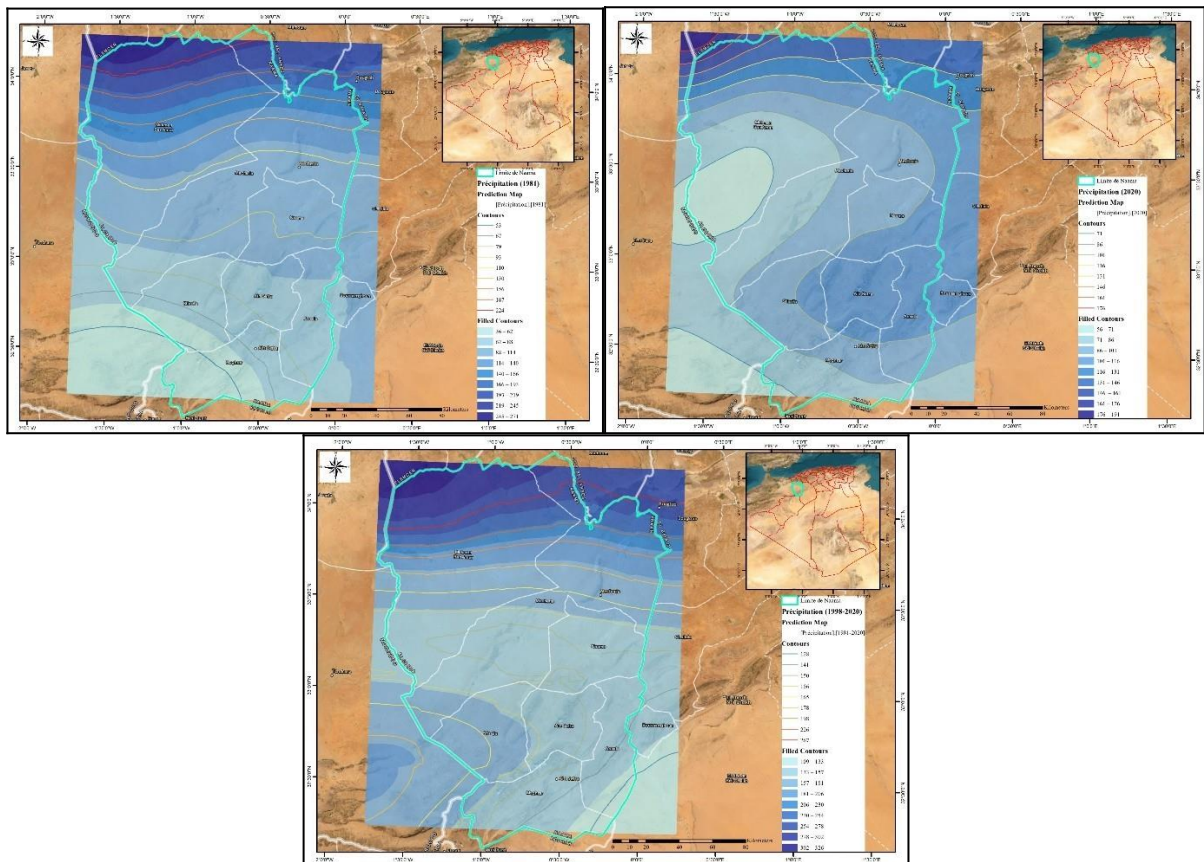


Figure 17: carte des précipitations moyennes annuelles de la region de Naama

Figure II.15 : Carte des précipitations moyennes annuelles de la région de Naama (1981-2020).

Les précipitations moyennes annuelles, enregistrées à partir de données satellites dans la région sont comprises entre 110 et 300 mm (fig.15).

Le graphe des précipitations moyennes mensuelles (fig.16) de la région d'étude indique que le mois le plus arrosé est le mois d'octobre avec des précipitations moyennes mensuelles de 27.6 mm, par contre le mois le plus sec correspond au mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle de l'ordre de 6.6 mm.

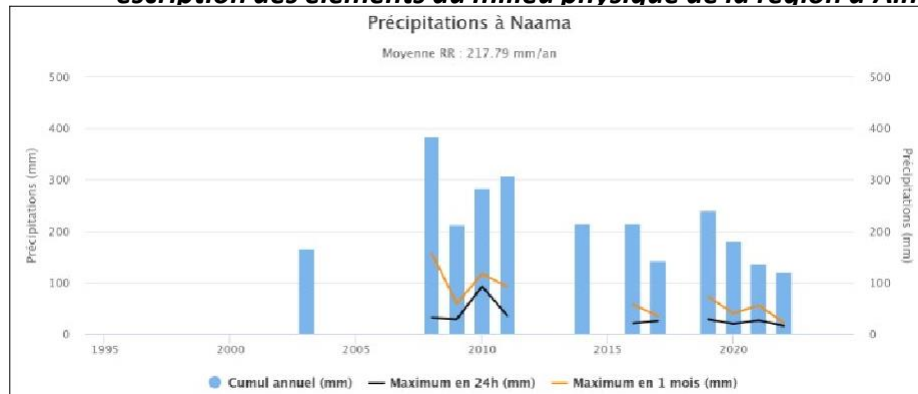


Figure II.16 : Précipitations moyennes annuelles de Naama (1995-2020)

(Source : <https://www.infoclimat.fr/climatologie/globale/naama/60557.html>)

Figure 18: precipitations moyennes annuelles de Naama

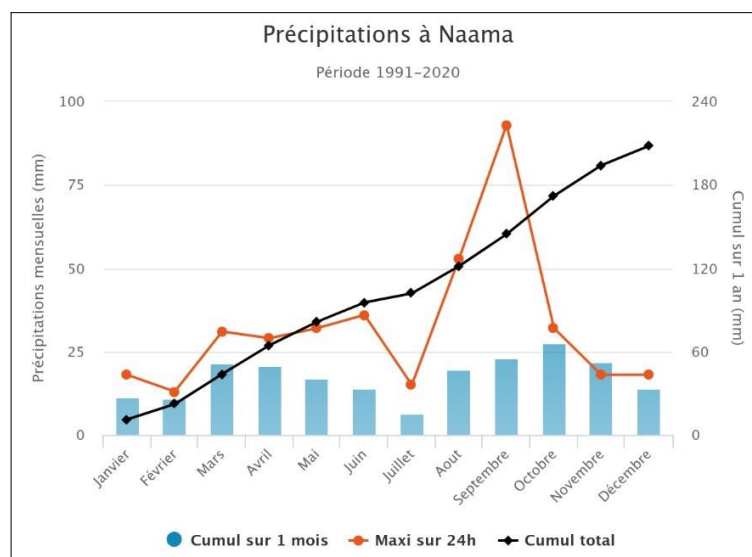


Figure II.17.a : Précipitations moyennes mensuelles de Naama (1991-2020)

De ce fait, la région considérée est située dans une région aride qui reçoit moins de 300 mm de pluies par an, ce sont des précipitations irrégulières et faibles dont la moyenne annuelle (fig.17) est de l'ordre d'un peu plus de 217 mm.

D'après la figure 17.b, J. Dubief (1953) a localisé notre région entre l'isohyète 100 et 300 mm. Conventionnellement, l'isohyète 300 mm est pris comme limite nord du domaine du désert. Le trait essentiel qui s'en dégage montre une évolution latitudinale des précipitations avec une diminution du Nord vers le Sud.

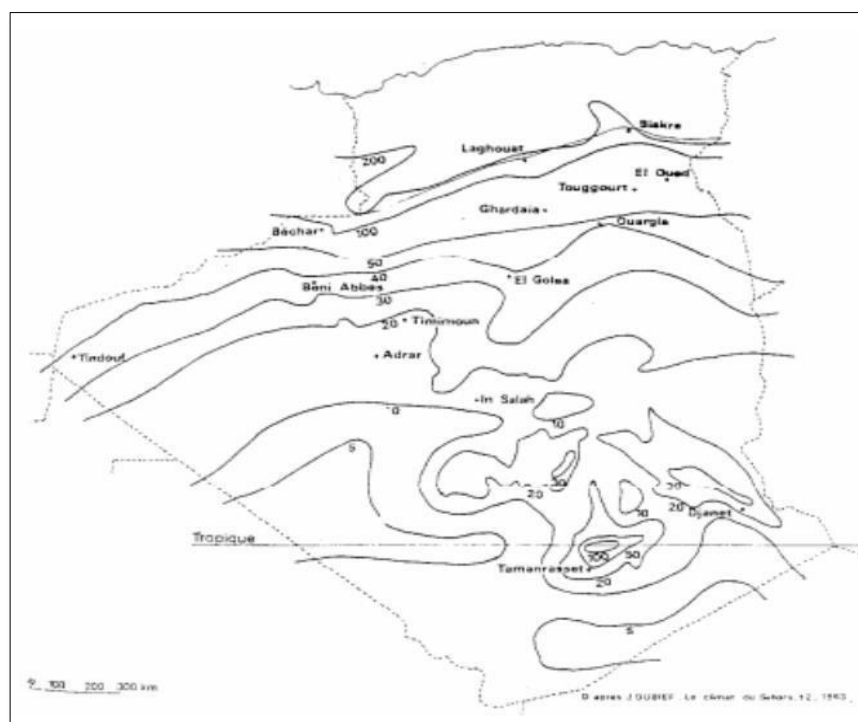


Figure 19: Carte des isohyètes

Figure II.17.b : Carte des isohyètes [Dubief, 1953]

II.6.2.2. Température

La température est un facteur important, elle régit l'évaporation et influence ainsi que la variation des réserves d'eau souterraine. Elle est également un facteur clé et intervient dans un grand nombre de phénomènes, tels que la formation des nuages, la circulation atmosphérique, les précipitations ainsi dans la régulation du climat et de l'environnement. Les variations de la température de l'air pourraient avoir des influences et des conséquences importantes sur les écosystèmes, les différentes ressources naturelles et notamment les ressources hydriques ainsi que les activités humaines. Ce paramètre climatique est assez important que la pluviométrie pour caractériser le climat d'une région, dont il varie en fonction de nombreux facteurs tels que, la latitude, la couverture nuageuse et les courants marins. D'une manière générale, la température diminue avec l'altitude, ce qui signifie que les zones situées à des altitudes plus élevées ont tendance à être plus fraîches que les zones situées à des altitudes plus basses.

Cependant, les moyennes de températures mensuelles minimales et maximales sont relevées dans la figure (fig.5), dont elle indique que le mois le plus froid est le mois de janvier avec une température moyenne mensuelle de 0.5°C , alors que le mois d'août est le mois le plus chaud avec une température moyenne mensuelle de 30.3°C .

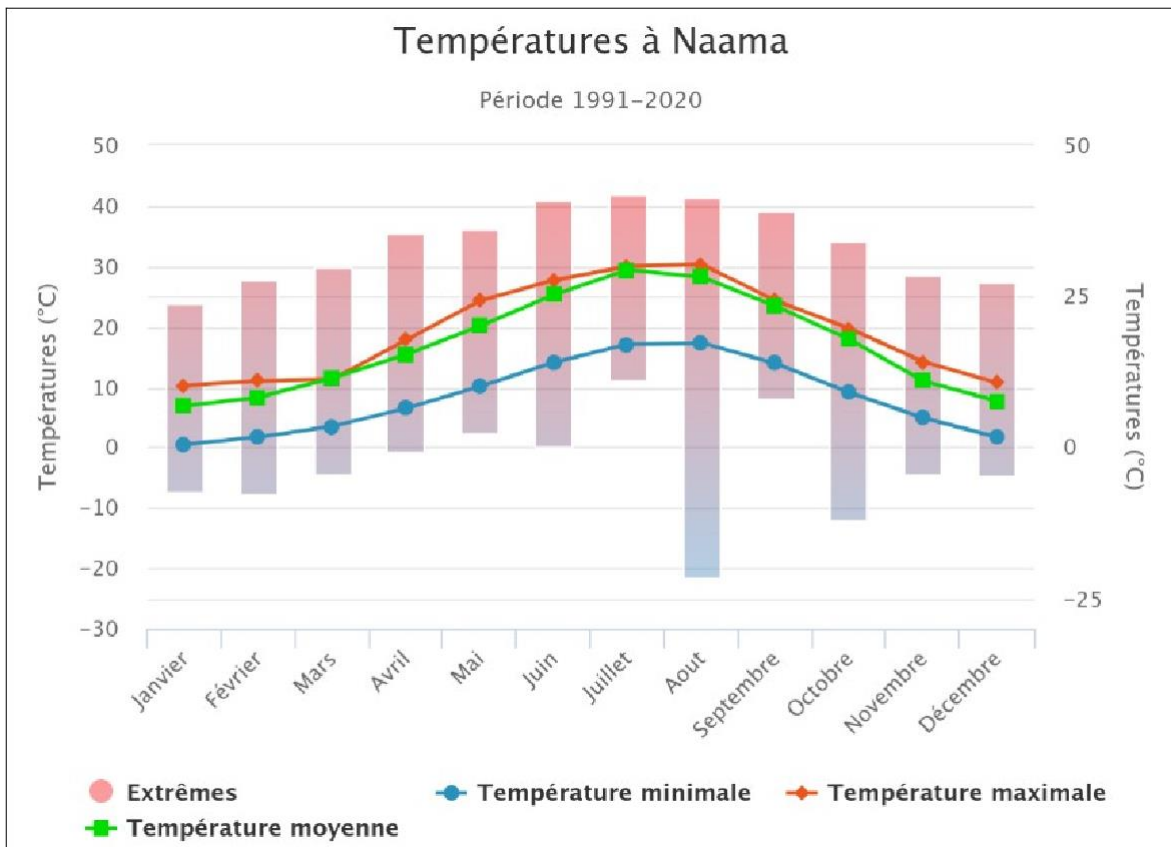


Figure II.18 : Températures moyennes mensuelles de Naama (1991-2020)

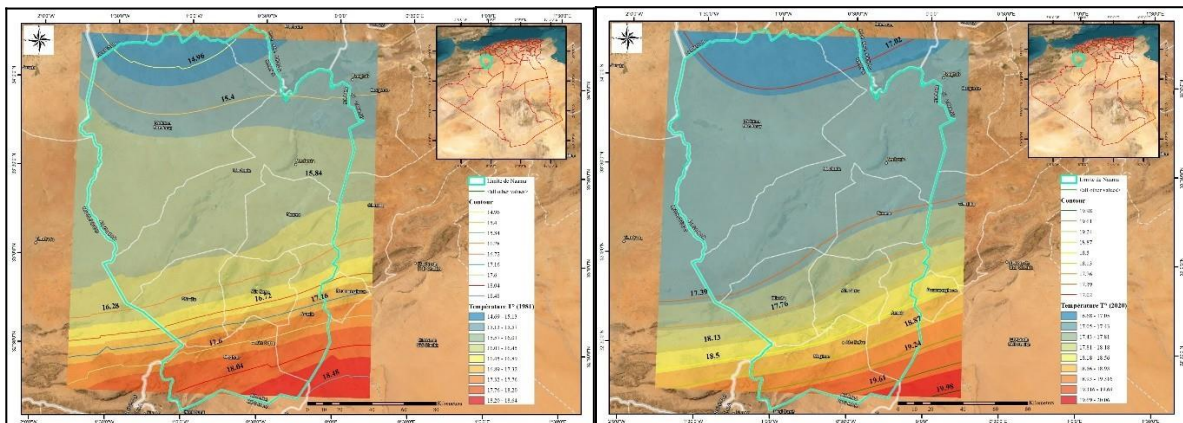


Figure II.19 : Carte des températures moyennes annuelles maximales de Naama

Figure 20: carte des températures moyennes annuelles maximales de Naama

Par contre, concernant les températures moyennes annuelles minimales à Naama sont entre -0.8 07 °C, alors que celles concernant les températures moyennes annuelles maximales entre sont comprises 39 et 40 °C (fig.18 et fig.19).

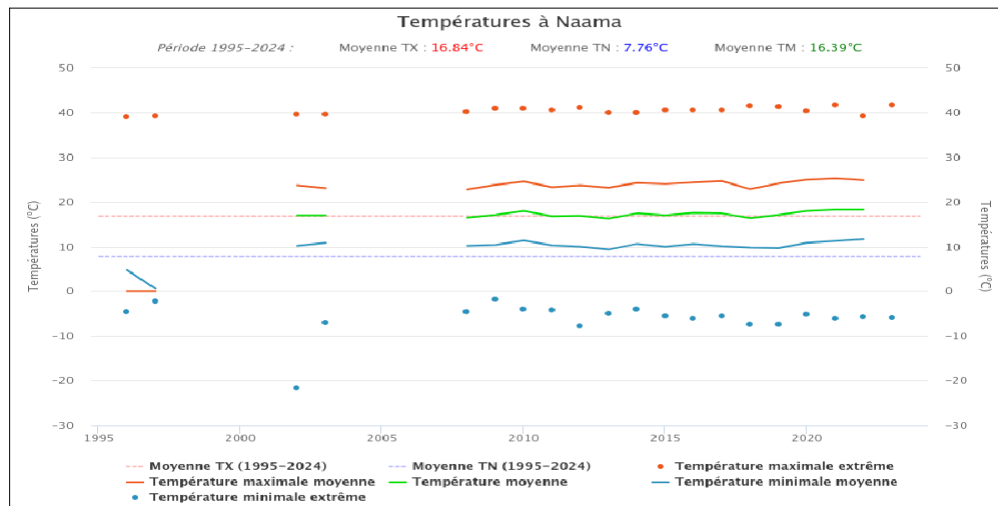


Figure II.20 : Températures moyennes annuelles de Naama (1995-2024)

(Source : <https://www.infoclimat.fr/climatologie/globale/naama/60557.html>)

II.6.2.3. Humidité de relative

L'humidité relative s'exprime principalement par la tension de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la tension maximale à la même température. Dans la région de Naama, l'air est assez sec où le taux d'humidité relative de l'air est inférieur à 57 %.

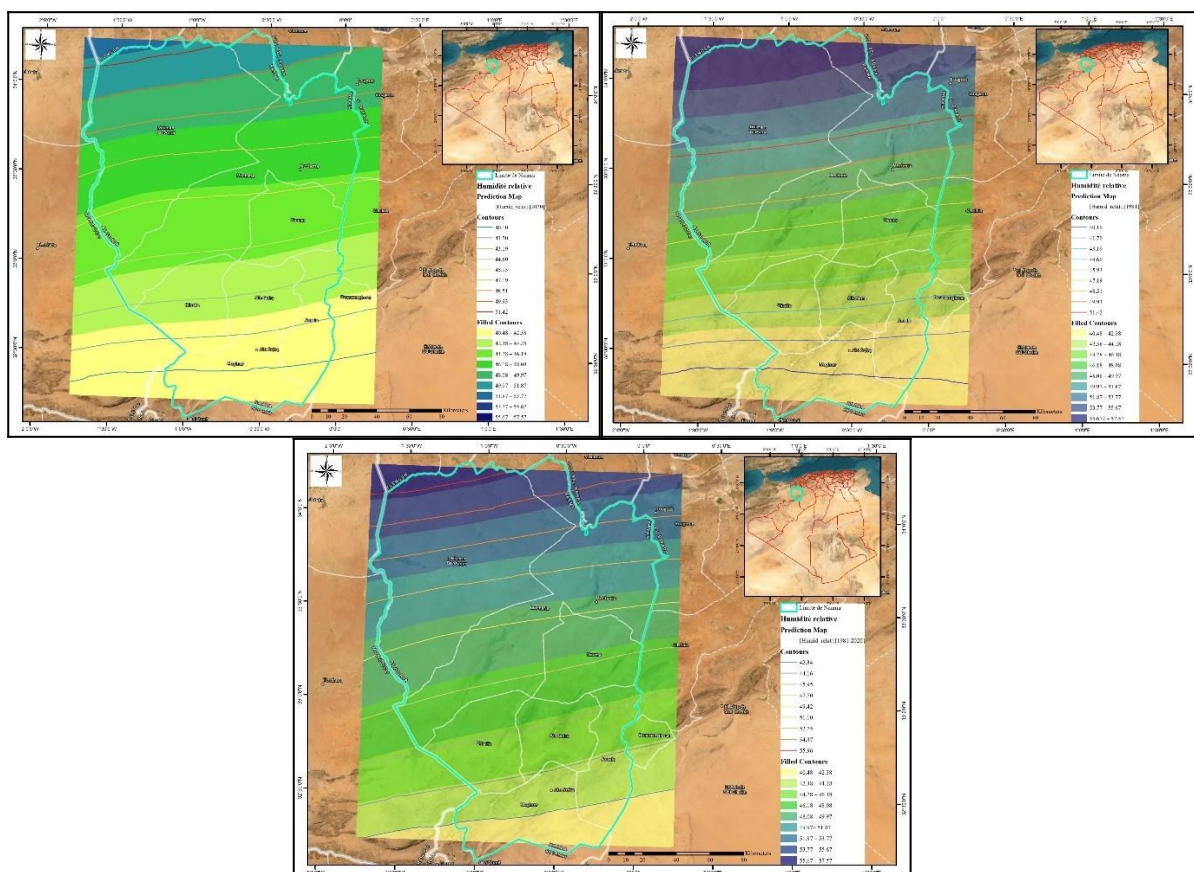


Figure II.21 : Humidité relative de la région de Naama (1981-2020)

Figure 21: hymidite relative de la region de Naama(1981-2020)

Alors que la carte de l'humidité de l'air reflétant la moyenne annuelle à Naama entre 1981 et 2020 est de 40 à 57% (fig.21).

II.6.2.4. Vitesse et direction des vents

Les vents sont des courants engendrés généralement par une variation de pression dans les masses d'air. Au niveau du secteur d'étude, les vents dominants sont ceux de l'Est et à un degré moindre du Nord-est et du SW, ces vents s'installent de janvier au juin où ils peuvent souffler avec une vitesse de 2.9 à 3.1 m/s (fig.9). Le mois d'avril est le mois le plus venteux à Naama avec une vitesse qui dépasse 4.61m/s. Tandis que la période la plus calme s'étale du juin au décembre. Le mois le plus calme de l'année est le mois d'août avec une vitesse de 2.9m/s.

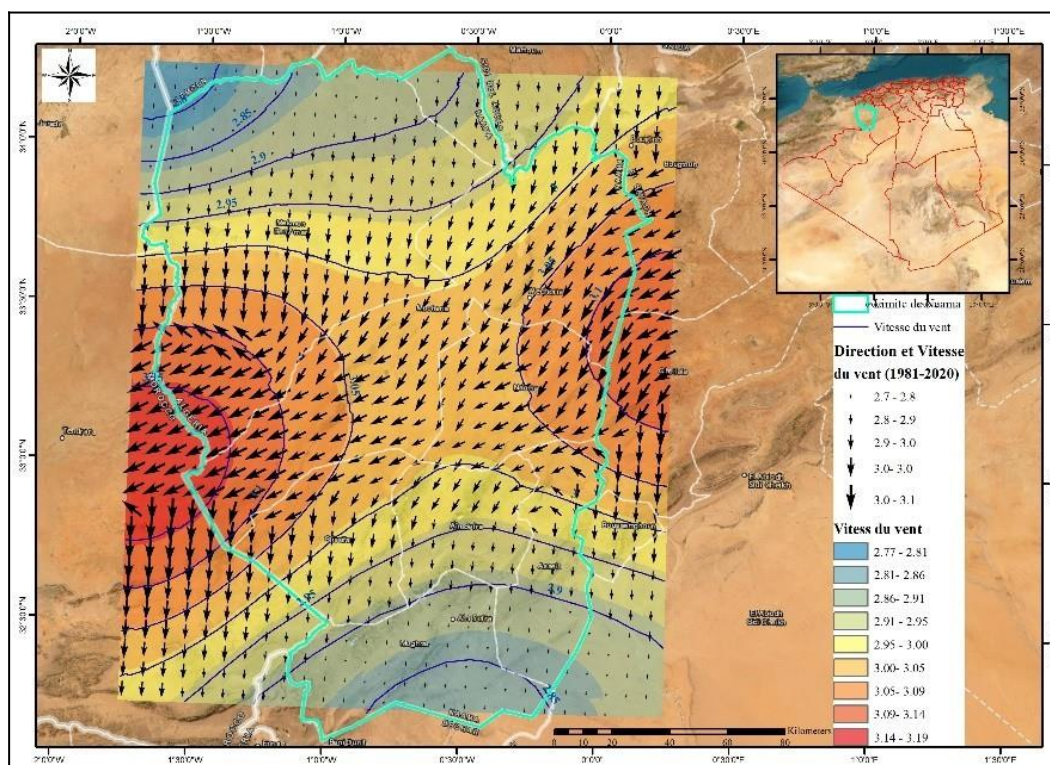


Figure II.22: Carte des vitesses et directions des vents de la région de Naama (1981-2020).

Généralement les vents soufflent toute l'année et à un rythme ne dépassant pas les 3.5 m/S. La carte établie pour la région de Naama montre que le vent souffle du nord-est (NE) au sud-ouest (SW).

II.6.3. Contexte climatique

La région est caractérisée par un climat semi-aride selon l'indice de Stewart ($Q_2=16.12$), avec des étés secs et chauds où les précipitations sont quasiment absentes et l'évaporation particulièrement forte.

Les hivers sont frais et parfois très froids, avec des intensités des précipitations souvent importantes en automne. La série de données disponibles de 1980 à 2014 à la seule station météorologique de la région celle d'Ain Sefra, montre que la région d'Ain Sefra est caractérisée par des irrégularités pluviométriques interannuelle et mensuelle importantes, avec une moyenne annuelle de 185 mm, où le maximum pluviométrique enregistré est de 439.8 mm en 2008. La

la moyenne des précipitations mensuelles est de l'ordre de 30.64 mm pour le mois le plus humide (octobre) et de 3.92 mm pour le mois le plus sec (juillet).

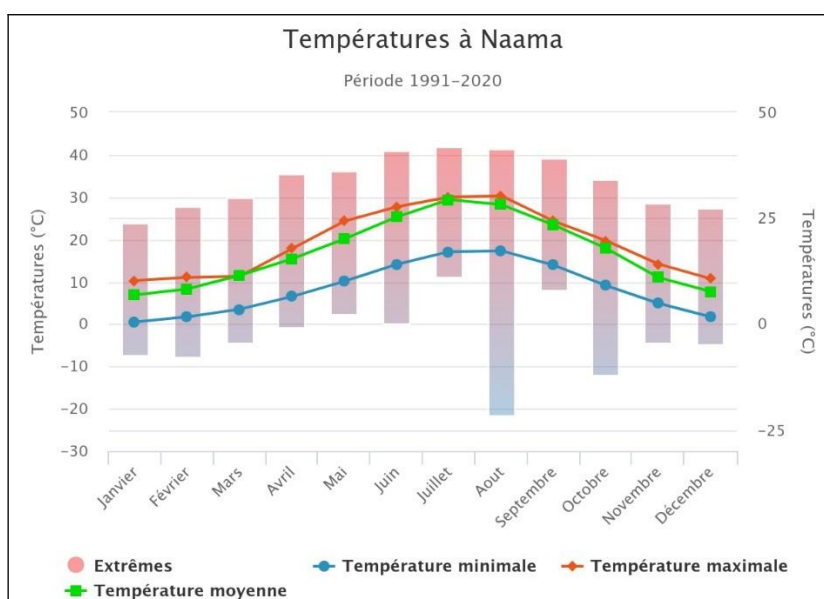


Figure II.23 : Température à Naâma (1991-2020) / (source : infoclimat.fr).

Le diagramme ombrothermique de la station d'Ain Sefra fait ressortir une aridité étalée sur sept mois du mars à septembre où le total pluviométrique mensuel en mm est dépassé par le double des températures en °C. La température moyenne annuelle y est de l'ordre de 17.5 °C.

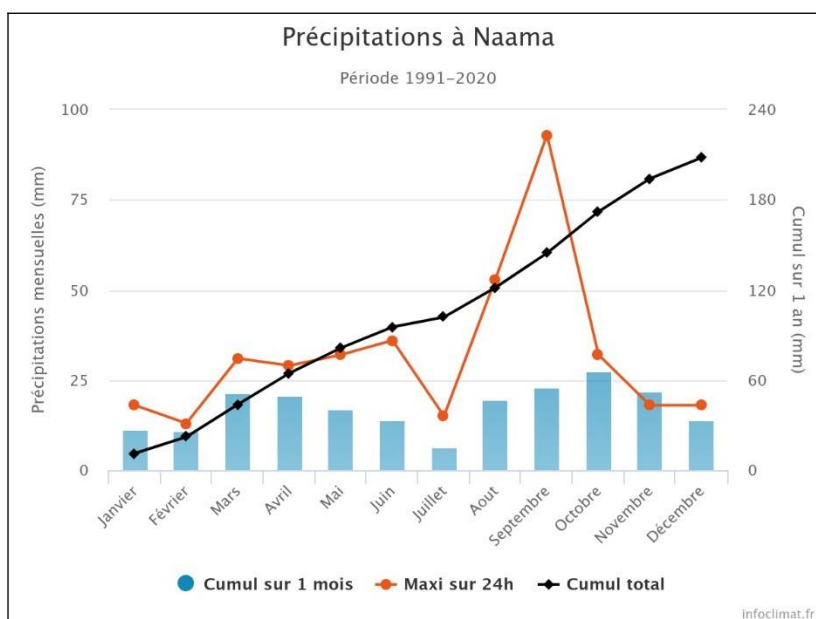


Figure II.24 : : Précipitation à Naâma (1991-2020) / (source : infoclimat.fr).

II.6.4. Débits moyens annuels et mensuels

L'analyse des débits mesurés sur une période de 32 ans (de 1977 à 2008) à la station d'Ain Hadjadj (20 km en aval d'Ain Sefra) est basée sur les données recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources hydriques (ANRH).

À l'échelle annuelle, l'oued d'Ain Sefra reçoit un débit moyen de 0.7 m³/s pour une surface drainée de 1957 km², le débit moyen est très faible justifié par la nature peu fréquente de l'écoulement, de courte durée et de type orageux ; ainsi, 12 années sur 32 présentent des débits

supérieurs au débit moyen interannuel. Le maximum moyen annuel de 2.8 m³/s a été observé en 1991, alors que le minimum moyen annuel de 0.013 m³/s a été remarqué en 2006 ce qui confirme la grande variabilité interannuelle de débits dans la région d'étude. La Figure 10 montre que les débits dans le bassin d'Ain Sefra suivent les hauteurs pluviométriques mensuelles. Le débit maximum mensuel de 2.4 m³/s est enregistré en octobre. Il correspond au mois le plus pluvieux de l'année avec une précipitation moyenne mensuelle de 30.6 mm, ce qui justifie la grande fréquence de formation de crues pendant cette période de l'année. Le mois de juillet est considéré comme le plus sec de l'année. Les coefficients de variation (cv) des débits moyens mensuels de l'Oued Ain Sefra qui varient entre 1.74 et 14.5 témoignent de l'extrême irrégularité mensuelle des débits. Le bassin d'Ain Sefra se classe d'après la classification des régimes hydrologiques des rivières de [Pardé, 1959] dans les régimes simples de type pluvial, où les hautes eaux s'enregistrent en automne généralement et les basses eaux en été. L'infiltration est faible par rapport aux précipitations suite au taux élevé d'évaporation, pour le bassin de l'Oued Ain Sefra durant la période (1985-2005), 97.05 % de la pluie s'évapore, 1.28 % s'infiltré et 1.67 % ruisselle (DERDOUR, 2010).

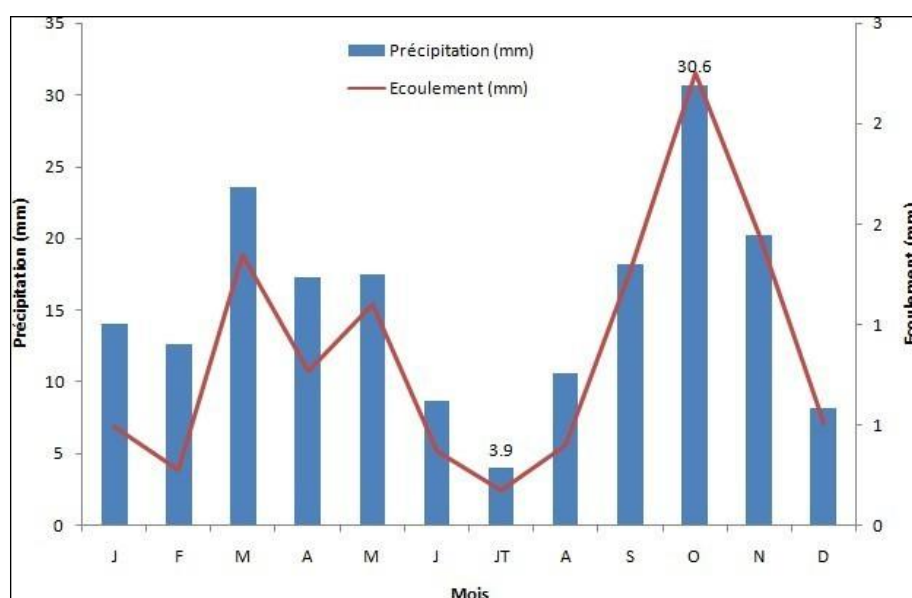


Figure II.25 : Lames d'eau précipitées et écoulées au niveau de l'oued Ain Sefra.

Figure 23: lames d'eau précipitées et écoulées au niveau de l'oued Ain Sefra

Les études isotopiques sur le Tritium (Conrad et Fontes, 1972 ; OSS, 2003) ont montré l'existence d'eaux récentes dans la nappe des grès crétacés de la région de l'Atlas saharien occidental, et qu'elle est considérée comme une zone de recharge du système aquifère de du Sahara septentrional par l'infiltration des eaux météoriques dans les affleurements perméables du bassin d'Ain Sefra. Ould Baba Sy (2005), a estimé l'infiltration moyenne annuelle à 1.069 Mm³ durant la période de crues (1974-1989), du total du ruissèlement moyen annuel évalué à 5.181 Mm³/an. Il arrive parfois que le bassin ne reçoive pas de pluie pendant de longues périodes, toutefois on observe de faibles débits (généralement inférieur à 0.02 m³/s soutenu par l'apport des eaux souterraines.

II.6.5. L'étude des débits extrêmes de l'oued Ain Sefra

Les crues du bassin versant d'Ain Sefra sont exclusivement d'origine pluviale. Elles résultent généralement de fortes averses. La morphologie du bassin contribue à amplifier les débits de pointe observés aux exutoires qui varient de quelques m^3/s à $751 \text{ m}^3/\text{s}$ où le maximum est enregistré le 24/10/2000. Sur 16 événements enregistrés ($Q_{\text{max}} > 100 \text{ m}^3/\text{s}$), l'automne est signalé comme saison de grand risque avec 11 crues, soit 69 % des crues de la série. Aussi, la région a connu trois crues de débits de pointe supérieure à $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Les crues sont généralement de courte durée, avec des temps de montée assez courts, et des décrues plus lentes, généralement suivies d'un tarissement prolongé. Toutefois, le caractère le plus redoutable des crues du bassin versant d'Ain Sefra est leur violence et la rapidité avec laquelle elles se produisent.

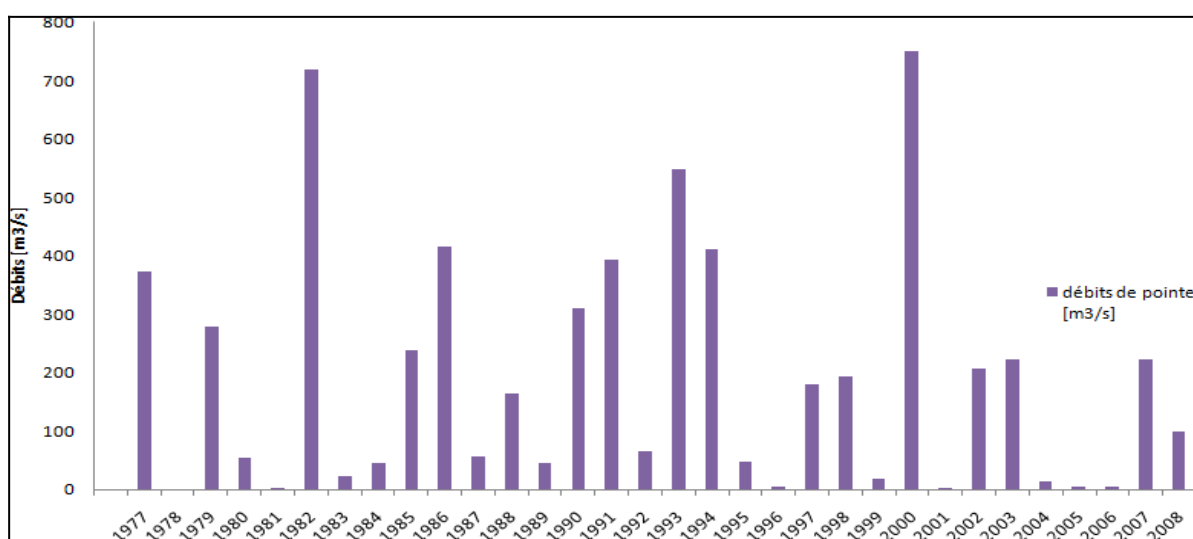


Figure II.26 : Variation des débits de pointe de l'Oued Ain Sefra.

La crue du 26 octobre 1977 par exemple, avec un débit de pointe évalué à $373 \text{ m}^3/\text{s}$, a causé d'importants dégâts matériels dans les quartiers populaires de la ville d'Ain Sefra. La crue a duré près de 35 heures, le débit de pointe a été atteint après 8h, alors que la décrue a mis 27 h pour revenir au débit initial (soit 3 fois le temps de montée).

Une autre crue, celle du 05 mai 1990 est l'une des crues les plus dévastatrices de l'histoire de la ville d'Ain Sefra, plusieurs morts, de centaines de sinistrés et des dégâts matériels très lourds. Du 26/04/1990 au 04/05/1990, Le bassin d'Ain Sefra a connu une séquence pluviométrique exceptionnelle (rappelons que la moyenne mensuelle du mois de mai est de 20.5 mm). La station météorologique d'Ain Sefra a enregistré un cumul de 123 mm pendant les 09 jours, et 113.4 mm dans la seule après-midi du 05/05/1990, avec une intensité de 18 mm/h pendant quatre heures et quarante minutes. Suite à ces pluies abondantes, tous les cours d'eau du bassin ont réagi par de forts gonflements hydrologiques et des débits importants vers l'aval, le niveau des eaux a atteint plus de 2 mètres de hauteur dans le centre-ville d'Ain Sefra. La station hydrologique d'Ain Hadjadj située en aval de la ville a enregistré un débit de pointe de $392.72 \text{ m}^3/\text{s}$ et un volume de

27.71 millions de mètres cube pendant la période de crue. Pour la crue du 24 octobre 2000, la montée a duré 6h et la décrue a mis 29h pour revenir au débit initial (soit 5 fois le temps de montée). Les débits ont atteint un record avec une pointe de 750.8 m³/s, malgré les taux faibles des précipitations enregistrées à la station d'Ain Sefra 7.2 mm. Cela pourrait s'expliquer par la répartition spatiale des précipitations qui reste plus importante dans les sommets des montagnes (>2000m) qu'à Ain Sefra située plus bas. Les pluies intenses qui ont certainement touché une partie du bassin versant ont visiblement échappé à la mesure. Une famille de 5 personnes a trouvé la mort, plusieurs habitants étaient contraints de quitter les lieux laissant place aux furies des eaux. Les rues et ruelles étaient complètement paralysées dont certaines endommagées et fermées à la circulation.

Un autre exemple de crues, celle de 19 octobre 2007 (Photo 1), le débit a atteint un maximum (222.7 m³/s) après une intensité exceptionnelle de précipitation de 50 mm en une heure (rappelons que la moyenne mensuelle du mois d'octobre est de 32.2 mm). Cette crue est caractérisée par un temps de montée très rapide (04 heures). Des dégâts importants ont été enregistrés au niveau du centre-ville d'Ain Sefra, beaucoup de passerelles et ponts au niveau du bassin versant ont été endommagés (Photo 2). Tous les cars, les voitures et les camions en direction du Nord comme ceux allant au Sud ont été paralysés à Ain Sefra puisque toutes les routes furent endommagées.



Figure 24 : Confluence Oued Breidj-Oued Tirkount (19/10/2007)

Photo II.1. Confluence Oued Breidj-Oued Tirkount (19/10/2007) (DERDOUR).

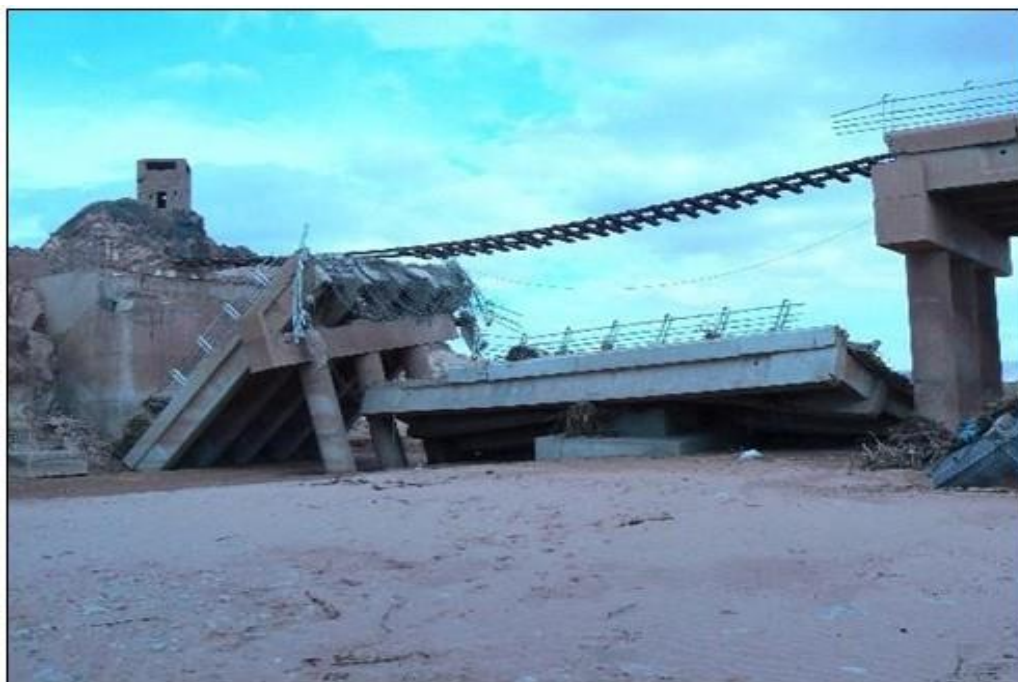


Photo II.2. Dégâts de la crue de 19 octobre 2007.

Figure 25: Dégâts de la crue de 19 Octobre 2007

Les hydro-grammes de crues observées à la station hydrométrique d'Ain Hadjaj disponible sont dans l'ensemble, simples, de forme pointue, caractérisant des crues monogéniques avec une seule montée et une seule descente. Les durées des crues sont généralement de quelques heures pour les plus brèves (crues du 24/10/2000 et 19/10/2007) à deux journées pour les plus longues (crues du 05/05/1990 et 25/10/1977). Le temps de montée est assez bref (généralement de quelques heures) et les temps de base de quelques heures, tandis que les décrues sont plus longues (27 heures pour la crue du 25/10/1977). Ces délais de montée qui sont relativement courts constituent un grand risque pour la ville, laissant très peu de temps pour réagir.

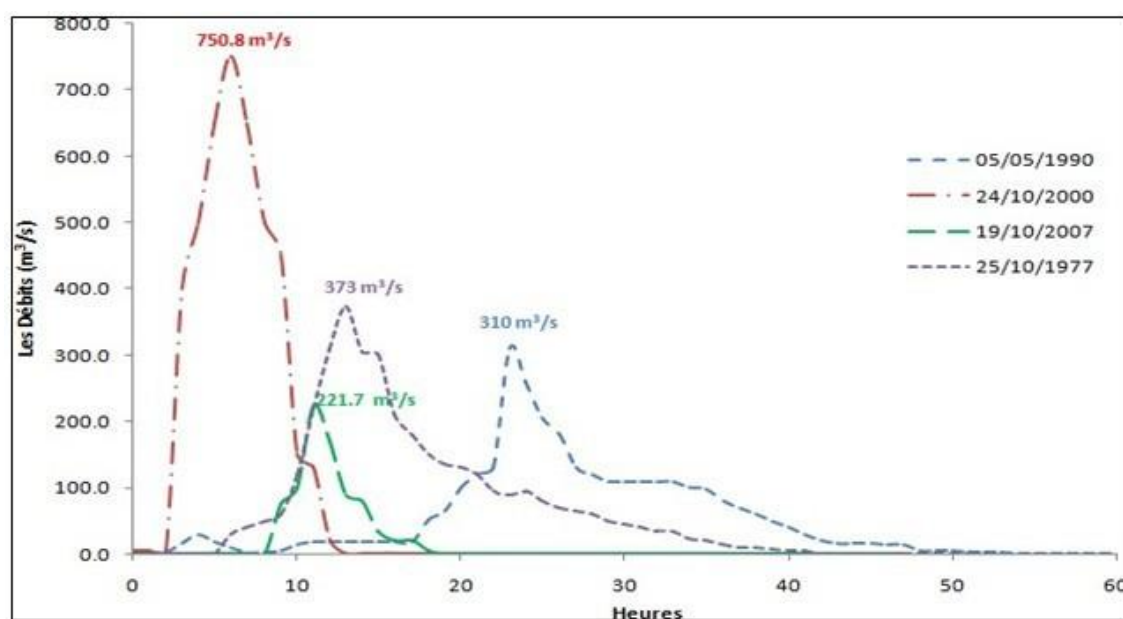


Figure II.24 : Hydrogrammes de crues de l'oued Ain Sefra.

II.6.6. Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles

L'analyse fréquentielle en hydrologie est une approche statistique de prédiction basée sur des calculs probabilistes utilisant l'historique des événements pour prédire des fréquences d'apparitions futures. Cette analyse devra permettre, d'estimer les quantiles correspondant aux périodes de retour, retenues dans le cadre de la présente étude : 10, 20, 50, 100 et 200 ans. Après avoir testé plusieurs lois (Exponentiel, GEV, Gamma, Gumbel, Normal, Log-Normal), l'échantillon de 32 années de débits max de l'Oued d'Ain Sefra s'adapte bien à la loi de Gumbel qui est fréquemment utilisée pour rendre compte des valeurs extrêmes en hautes eaux. L'analyse fréquentielle de la série de débits maximaux de l'Oued d'Ain Sefra permet d'estimer les probabilités d'occurrence des crues et leurs périodes de retour (Tableau 1).

Tableau II.1 : Les débits de retour après l'ajustement selon une loi de Gumbel

Période de retour T =	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	200 ans
Débit (m ³ /s)	463	580	731	845	958

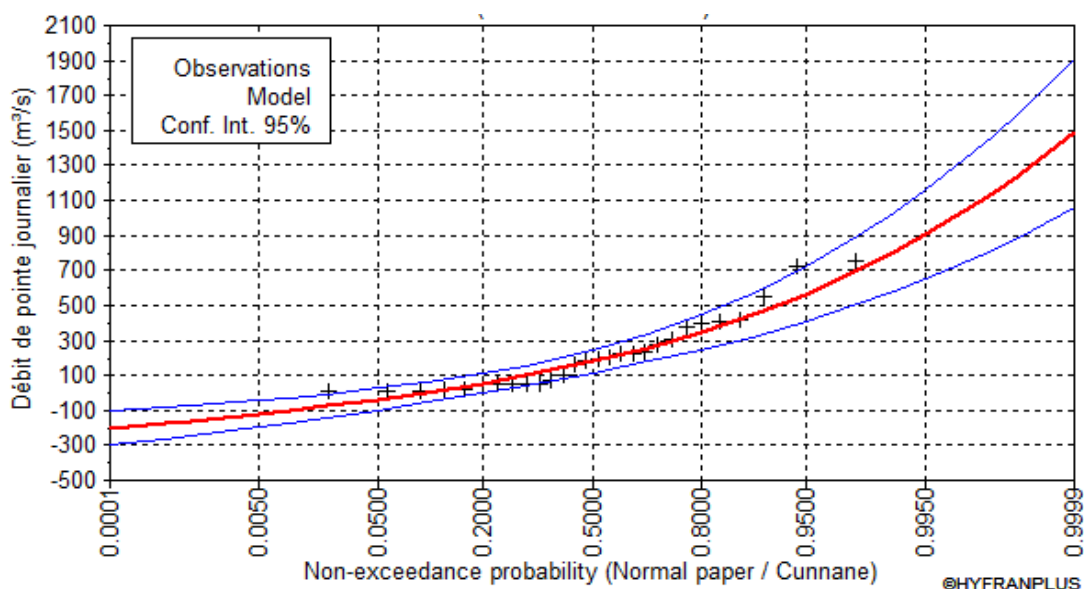


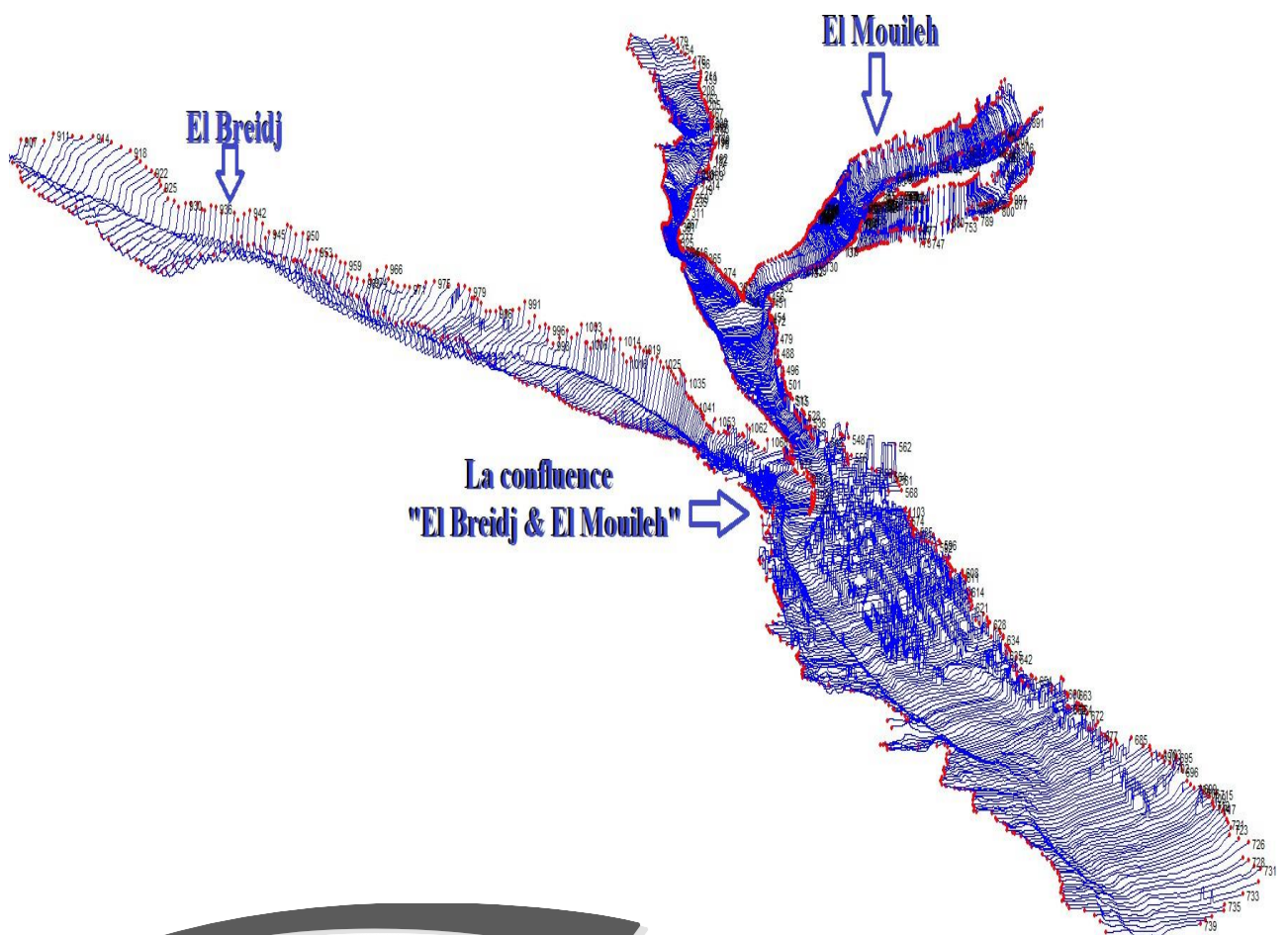
Figure II.28 : Ajustement des débits journaliers maximums à une loi de Gumbel. Occupation du sol

Conclusion

Ce travail constitue une première contribution dans l'analyse des phénomènes hydrologiques du bassin versant d'Ain Sefra. L'étude nous a permis de déterminer les caractéristiques du bassin et les principaux traits du régime d'écoulement. Le milieu physique du bassin est caractérisé par des pentes fortes, des sols peu perméables, moyennement allongé ($K_c = 1,3$) avec un réseau hydrographique bien hiérarchisé. Cette configuration morphologique offre un environnement favorable au développement de fortes crues. Le débit annuel moyen du bassin versant d'Ain Sefra est de l'ordre de $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ calculé d'après les observations hydrométriques à la station d'Ain Hadjadj. Quant au maximum moyen annuel, il est de $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$. Les coefficients de variation des débits moyens mensuels varient entre 1.74 à 14.5, ce qui traduit l'extrême irrégularité de ces débits, résultant des conditions climatiques, géologiques et géomorphologiques, qui règnent dans ce secteur. Les crues du bassin versant d'Ain Sefra sont très rapides et très violentes, causant des dégâts matériels et humains importants. La décrue assez lente permet de supposer l'existence

d'un inféro-flux important. On enregistre une concordance entre le régime d'écoulement et le régime pluviométrique de la région d'étude. Cependant durant certaines périodes, la station hydrométrique enregistre des débits importants par rapport au taux faible des précipitations au niveau de la station météorologique d'Ain Sefra. Cela pourrait s'expliquer par la répartition spatiale des précipitations qui reste plus importante dans les sommets des montagnes (>2000 m) qu'à Ain Sefra située plus bas. Un débit d'étiage ($<0.02 \text{ m}^3/\text{s}$) se produit fidèlement dans l'oued, témoin des potentialités phréatiques de la nappe des grès crétacés de la région et d'une relation hydrologique assez forte entre les eaux superficielles et les eaux souterraines. A l'échelle mensuelle les crues du mois d'octobre, sont plus violentes et plus fréquentes, constituant une menace contre la ville d'Ain Sefra. L'étude des écoulements extrêmes de l'Oued Ain Sefra permet de confirmer le caractère d'irrégularité des débits, et met en évidence le caractère torrentiel dû à la forte intensité des précipitations qui surviennent en automne. Un certain nombre d'aménagements ont été entrepris par la direction des ressources en eau de la Wilaya de Naama après l'inondation de 19/10/2007, par la protection des berges au niveau de plusieurs zones vulnérables par des murs de soutènement et surélévation en béton armé, pour favoriser la stabilisation des berges contre l'érosion et éviter les débordements des eaux de crues. Toutefois, il serait plus judicieux de procéder à des aménagements en amont par la réalisation de seuils, et de digues écrêteurs pour l'amortissement des flux. Il est nécessaire aussi d'installer des stations hydrométriques au niveau de l'Oued Breïdj et Oued Tirkount ainsi que des stations météorologiques autour du bassin, leurs mesures instantanées ont un intérêt capital dans la prévention contre les crues à l'aval du bassin. Aussi un système pilote d'alerte et d'annonce de crues en amont du bassin d'Ain Sefra doit être mis en place pour pouvoir évacuer à temps les gens en aval et protéger la population contre les inondations.

Chapitre 3



artographie des risques et réévaluation post-aménagement

Chapitre 03 : Cartographie des risques et réévaluation post-aménagement

III.1. Évolution de l'occupation du sol

L'évolution de l'occupation des sols dans le bassin d'Aïn Sefra reflète une dynamique territoriale fortement conditionnée par les contraintes physiques du milieu et par la pression croissante de l'urbanisation dans les fonds de vallée. Le site, marqué par un relief accidenté et un réseau hydrographique dominé par des oueds à régime torrentiel, présente des conditions naturelles particulièrement sensibles aux crues éclair. Dans ce contexte, l'aménagement et l'extension du tissu urbain se sont progressivement orientés vers les zones planes situées au cœur du bassin, c'est-à-dire directement dans le lit majeur de l'oued Aïn Sefra, là où se concentrent naturellement les écoulements lors des épisodes pluvieux intenses.

L'attractivité résidentielle du secteur, liée à la valeur paysagère de la vallée et à la disponibilité relative des surfaces planes, a favorisé une urbanisation progressive à proximité immédiate de l'oued. Cette proximité, souvent perçue comme un avantage esthétique et fonctionnel, a contribué à l'installation d'une urbanisation linéaire le long du corridor fluvial. Toutefois, la morphologie étroite de la vallée, combinée à des versants pentus et parfois instables, limite fortement les espaces constructibles. Cette contrainte a entraîné, au fil des décennies, une densification du bâti dans les zones aval, initialement les plus accessibles. Avec la croissance urbaine continue, le front bâti s'étend désormais vers l'amont, atteignant des zones en contact direct avec les couloirs d'écoulement et les secteurs naturellement exposés aux inondations, ce qui accentue la vulnérabilité du tissu urbain existant.

Cette évolution spatiale de l'occupation du sol constitue un facteur déterminant dans l'analyse du risque hydrologique à Aïn Sefra. La mise à jour régulière de la cartographie du couvert terrestre est essentielle pour adapter les cartes de vulnérabilité, identifier les nouvelles zones exposées et ajuster les paramètres nécessaires à la simulation hydraulique. Si cette actualisation ne modifie pas nécessairement la structure des modèles hydrologiques ou hydrodynamiques, elle influence toutefois de manière directe les conditions limites, les coefficients de Manning, ainsi que les scénarios d'aléa hydrologique.

L'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) revêt un rôle central dans ce processus. Cet outil permet non seulement de spatialiser et suivre les évolutions du tissu urbain, mais aussi d'intégrer cette information dans la carte de rugosité, indispensable pour la modélisation de l'écoulement. En effet, la nature de la surface (milieu urbain, sol nu, zone rocheuse, lit alluvial ou végétation) impacte directement

- La vitesse de propagation des écoulements,
- La perte de charge,
- La perméabilité,
- La dynamique d'inondation.

Ainsi, la compréhension fine et actualisée de l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin d'Aïn Sefra s'impose comme un élément fondamental pour une gestion efficace et durable du risque hydrologique. Elle permet d'anticiper l'amplification possible des crues en contexte urbain, de soutenir les stratégies d'aménagement, et d'orienter les interventions de protection dans les zones riveraines de l'oued principal.

III.1.1 Cartographie de l'occupation du sol

La cartographie de l'occupation du sol du bassin d'Aïn Sefra met en évidence une mosaïque de classes paysagères étroitement liées aux conditions climatiques semi-arides et à la dynamique géomorphologique de la région, comme illustré dans les figures correspondantes. Les analyses montrent que le bassin est dominé par une alternance de surfaces naturelles peu végétalisées, de sols nus, de zones sableuses mobiles, ainsi que de surfaces anthropisées. Les principales catégories observées sont les suivantes :

a. Zones urbaines (Urbain) :

Elles constituent les surfaces bâties localisées principalement dans le fond de vallée, au niveau du lit majeur de l'oued. L'urbanisation dense, composée de bâtiments, voiries et surfaces imperméabilisées, réduit fortement l'infiltration et accélère le ruissellement. Ces zones jouent un rôle déterminant dans la propagation des crues, en modifiant la rugosité locale et en perturbant les écoulements naturels.

b. Sols nus

Très largement représentés sur les glacis et les versants dénudés, ils se caractérisent par une absence de couverture végétale significative. Leur faible capacité d'infiltration contribue à augmenter le ruissellement direct et favorise la formation de ravinements lors des épisodes pluvieux intenses.

c. Zones de parcours

Ces surfaces correspondent à des terrains semi-naturels utilisés comme pâturages extensifs. Elles présentent une végétation clairsemée, souvent dégradée, ce qui limite leur efficacité hydrologique. Leur rugosité modérée joue néanmoins un rôle dans la dissipation partielle de l'énergie du ruissellement.

d. Arbustes (Arbuste)

Les zones d'arbustes sont présentes sous forme de touffes éparées, généralement situées dans les zones intermédiaires du bassin. Elles permettent une légère amélioration de l'infiltration et contribuent à réduire localement la vitesse des écoulements.

e. Broussailles (Broussaille) :

Plus denses que les arbustes, elles augmentent la rugosité, favorisent la rétention superficielle et participent à limiter l'érosion, bien que leur extension reste limitée par l'aridité du climat.

f. Dunes et Voiles sableux (Dune, Voile sableux) :

Ces formations sableuses, influencées par la mobilité éolienne, occupent des zones spécifiques du bassin, principalement en aval et sur les secteurs plats exposés aux transports de sable. Les dunes présentent une très faible cohésion, ce qui favorise la remobilisation des sédiments par le vent. Les voiles sableux, plus diffus, recouvrent localement les surfaces et peuvent modifier temporairement la microtopographie. Ces unités jouent un rôle complexe dans le ruissellement en fonction de la nature du sable : infiltration variable, obstruction ou déviation des écoulements.

g. Zones agricoles (Agriculture)

Localisées essentiellement dans la plaine alluviale, elles regroupent des cultures irriguées ou traditionnelles, dépendantes de la disponibilité en eau. Ces zones présentent une rugosité plus élevée que les sols nus et constituent parfois des obstacles partiels aux écoulements. Lors

des crues, elles peuvent être inondées rapidement en raison de leur situation topographique en fond de vallée.

L'intégration de ces classes dans la cartographie de l'occupation du sol et dans la carte de rugosité (coefficient de Manning) permet de mieux représenter la diversité hydrologique du bassin. Chaque type de surface modifie la dynamique des écoulements par sa :

- Perméabilité,
- Capacité de rétention,
- Rugosité,
- Sensibilité à l'érosion.

Ainsi, la cartographie fine de l'occupation du sol constitue un élément fondamental pour les simulations hydrauliques du bassin d'Aïn Sefra, en particulier dans les modèles 2D où les contrastes de rugosité influencent fortement la propagation et la vitesse des crues.

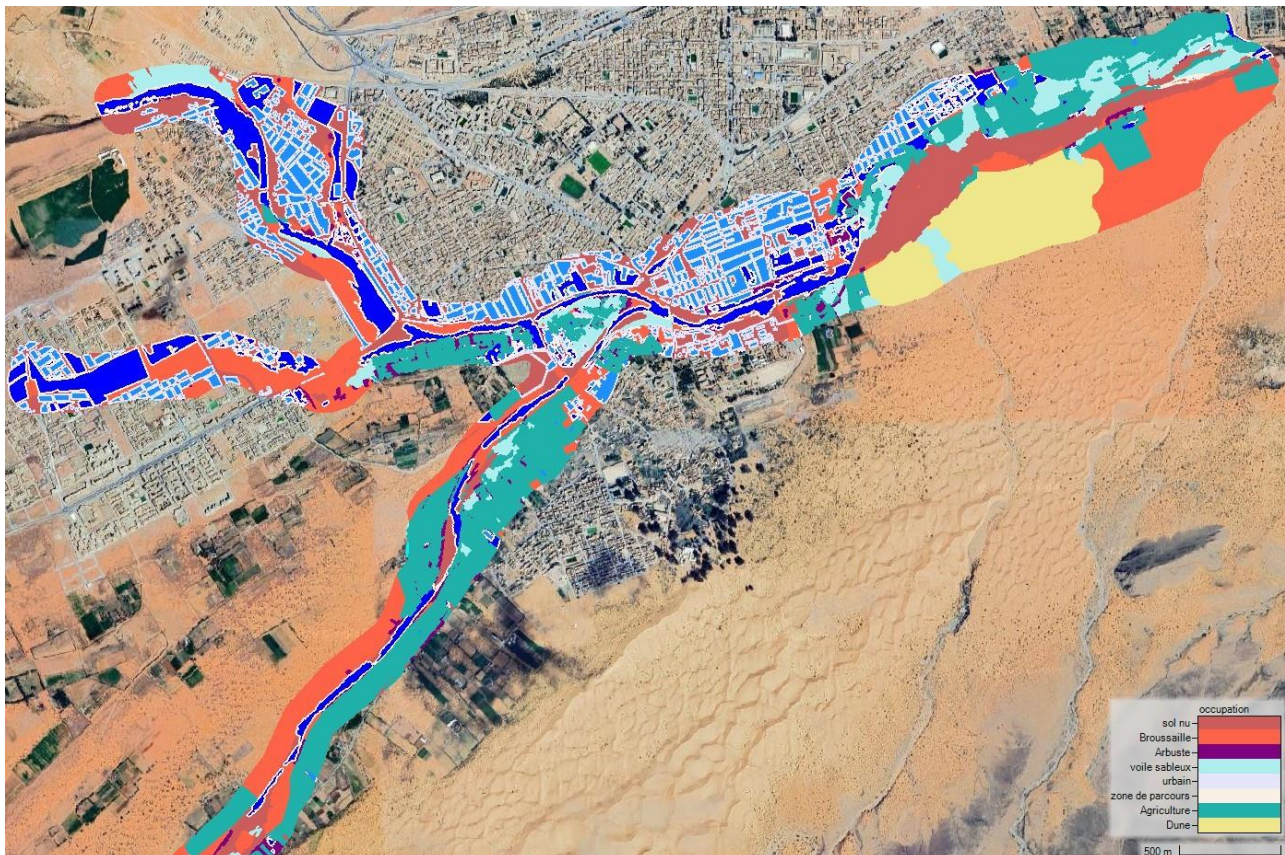


Figure 26: Carte de l'occupation du sol du site d'étude

Figure 1: Carte de l'Occupation du sol du site d'étude

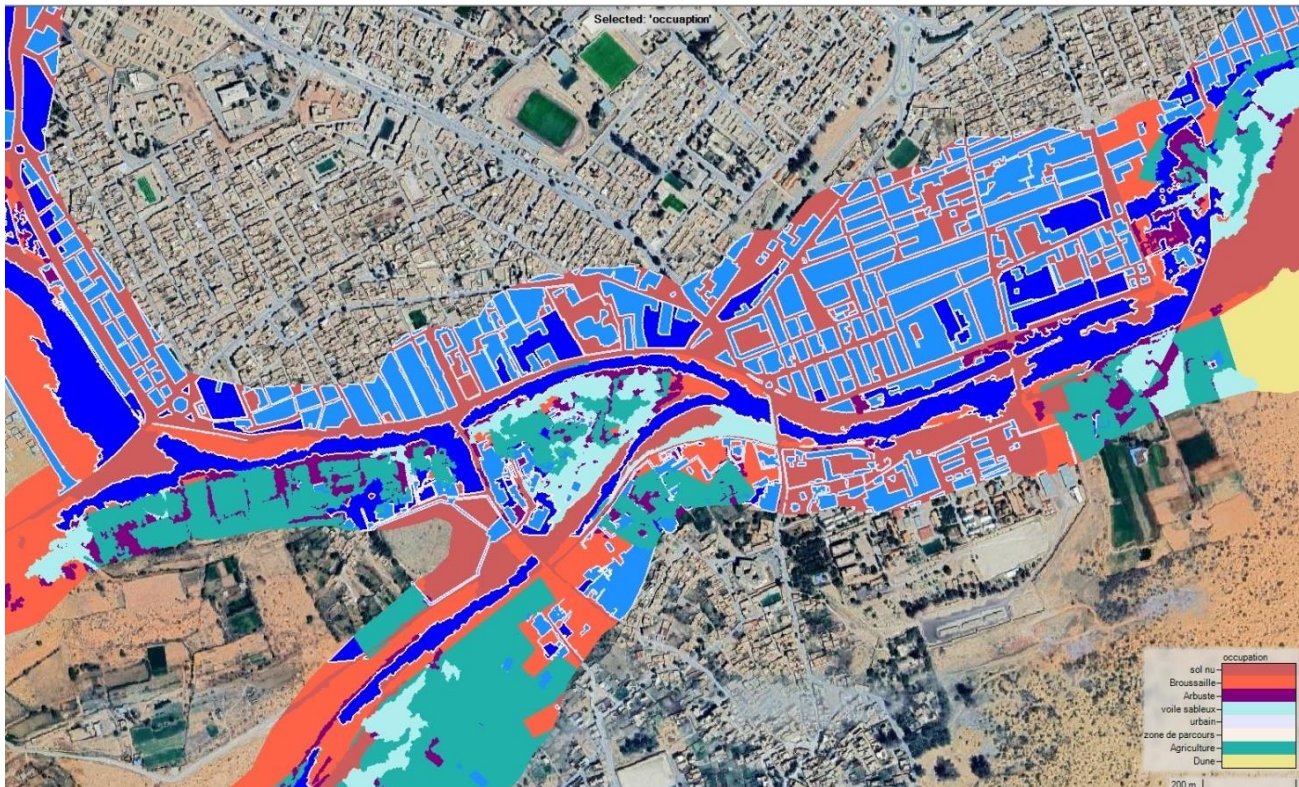


Figure 27: Zoom sur la carte de l'occupation du sol de la region de Ain sefra

Figure 2: Zoom sur la carte de l'occupation du sol de la région de Ain Sefra

III.2. Impact hydrologique

La rugosité varie fortement selon la nature du couvert terrestre :

- Les zones urbaines, caractérisées par des surfaces lisses et imperméabilisées (routes, chaussées, toitures), présentent une rugosité faible, ce qui accélère les écoulements et amplifie les vitesses locales.
- Les zones de broussailles et d'arbustes offrent une rugosité plus élevée, contribuant à ralentir l'eau et à dissiper une partie de l'énergie du ruissellement.
- Les zones agricoles jouent un rôle intermédiaire : leur rugosité dépend du type de culture et de la saison, réduisant parfois efficacement la vitesse de l'écoulement lorsque la végétation est dense.
- Les zones sableuses (dunes et voiles sableux) présentent une rugosité variable : elles peuvent soit ralentir le ruissellement par épaisseur de sable, soit au contraire favoriser l'écoulement lorsque le sable est compacté par les vents dominants.
- Les zones de parcours, souvent dégradées et faiblement végétalisées, présentent une rugosité modérée, insuffisante pour freiner efficacement les écoulements en cas de crue.

Vitesse d'écoulement

La vitesse des écoulements de surface dépend directement de la rugosité et de la morphologie locale:

- Dans les zones urbanisées, les vitesses d'écoulement sont élevées en raison de l'imperméabilisation du sol et de la canalisation artificielle des flux. Les rues peuvent agir comme des chenaux directs guidant l'eau vers les parties basses de la ville.

- Dans les sols nus et les terrains fortement érodés, l'absence de couverture végétale favorise des vitesses rapides, avec un transport solide important.
- Les zones de broussailles et d'arbustes réduisent naturellement la vitesse de l'eau grâce à la présence de végétation structurée.
- Les zones de parcours ralentissent modérément les écoulements, mais restent insuffisantes pour réduire les pics de crue.
- Dans les dunes et voiles sableux, la vitesse dépend du degré de saturation : un sable sec peut infiltrer légèrement, tandis qu'un sable saturé accélère l'écoulement sous forme de nappe glissante.

Perméabilité et infiltration

Les conditions d'infiltration sont très contrastées dans le bassin :

- Les zones urbaines sont quasi totalement imperméables, générant un ruissellement direct massif.
- Les sols nus présentent une perméabilité très limitée liée à la compaction et à l'absence de matière organique. Ils réagissent très rapidement aux pluies intenses.
- Les zones agricoles, selon les pratiques culturales (labours, irrigation), présentent une perméabilité variable, favorable à l'infiltration lorsque le sol est travaillé, mais rapidement saturable en cas de pluie intense.
- Les zones d'arbustes et de broussailles améliorent localement l'infiltration grâce à la présence de racines et à une meilleure stabilité du sol.
- Les zones dunaires peuvent offrir une infiltration initiale élevée, maisaturent rapidement lors des événements extrêmes, générant des écoulements rapides.
- Les zones de parcours présentent une infiltration faible à moyenne, fortement dépendante du degré de dégradation des sols.

Conséquences hydrologiques globales pour Aïn Sefra

Dans l'ensemble, la composition du site d'Aïn Sefra dominée par des surfaces peu perméables (sols nus), des terrains semi-végétalisés dégradés (zones de parcours) et des surfaces urbanisées en fond de vallée favorise :

- Un ruissellement direct important,
- Des montées rapides des eaux,
- Une réponse hydrologique brusque,
- Un risque accru de débordement dans le lit majeur urbanisé,
- Une dissipation limitée de l'énergie des écoulements.

Rôle du SIG dans l'intégration hydrologique

L'utilisation du SIG permet de :

- Spatialiser précisément les classes d'occupation du sol,
- Assigner un coefficient de Manning adapté à chaque type de surface,

- Actualiser la carte de rugosité en fonction de l'évolution du paysage,
- Affiner la carte de vulnérabilité sans modifier la structure du modèle hydraulique,
- Améliorer la précision des simulations hydrodynamiques HEC-RAS ou tout autre modèle 2D.

III.2.1. Pluviométrie et variabilité

Une crue ne peut pas être décrite à partir d'un seul point d'observation ou à un instant donné, car c'est un phénomène variable dans l'espace et dans le temps. Or, les observations hydrologiques classiques sont ponctuelles et donc localisées. Avant de préciser le processus d'élaboration d'une crue, il convient de définir les grandeurs utiles à représenter.

Pour décrire un phénomène qui varie à la fois dans l'espace et dans le temps, on peut utiliser un observateur virtuel qui décrit le phénomène. Considérons dans un premier temps un observateur fixe, posté à un endroit donné le long du cours d'eau. Il perçoit la variabilité temporelle du débit de l'oued et de la hauteur d'eau. La variation du débit au cours du temps est appelée hydrogramme de crue (Fig.12). Ce schéma peut aussi être décrit par une chronologie de processus.

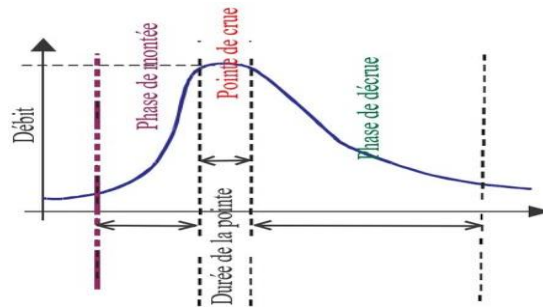


Figure 3: différentes phases d'une crue décrites par un hydrogramme

Au plus fort de la crue, le débit maximal de l'oued est appelé débit de pointe de la crue. Le débit de l'oued varie en permanence tout au long de la crue. La pointe de la crue correspond à un laps de temps limité, il est difficile à définir précisément, par rapport à la durée totale de l'événement.

Si on considère un observateur qui se déplace le long du cours d'eau, à la même vitesse que l'onde de crue, il décrit la variabilité spatiale du phénomène.

L'onde de crue se déplace le plus souvent de l'amont vers l'aval du bassin versant. Si l'observateur se déplace à la même vitesse que l'onde de crue, il constate que le débit de pointe augmente au fur et à mesure que les différents affluents viennent alimenter le cours d'eau principal.

La variabilité à la fois temporelle et spatiale de la crue implique qu'on ne peut pas la décrire complètement en un seul lieu et à un instant choisi a priori. Dans le cas des oueds de la Wilaya d'Ain Sefra, la variabilité spatio-temporelle est forte, car les bassins versants sont plus hétérogènes sur le plan nature du sol (lithologie) et de pluviométrie. Pour décrire un événement de crue en tout point du bassin versant, une approche spatialisée est nécessaire, or la plupart des données disponibles sont localisées.

III.2.2. Contexte climatique

Dans le bassin d'Aïn Sefra, la pluviométrie se distingue par une grande variabilité, tant dans le temps que dans l'espace. Les épisodes de pluie y sont souvent rares, mais intenses, concentrés sur de courtes périodes, et leur distribution spatiale est très hétérogène. Cette variabilité joue un rôle déterminant dans la genèse des crues soudaines qui affectent le réseau hydrographique local, caractérisé par des talwegs ramifiés convergeant rapidement vers l'oued principal.

L'absence de stations météorologiques bien réparties sur l'ensemble du bassin limite fortement la disponibilité de données précises sur les précipitations et les débits. Pour pallier cette lacune, il est nécessaire de recourir à des méthodes indirectes d'estimation des écoulements. L'analyse des laisses de crue constitue un outil essentiel pour reconstituer l'intensité et la fréquence des événements hydrologiques passés. De plus, des approches empiriques telles que les formules de Manning et Strickler sont utilisées pour simuler les débits en s'appuyant sur les caractéristiques morphologiques et hydrauliques du bassin. Ces méthodes combinées offrent une estimation robuste des écoulements, indispensable pour la compréhension des dynamiques hydrologiques et la gestion des risques de crue dans cette région aride et semi-aride.

III.2.3. Variabilité temporelle :

Les précipitations dans le bassin d'Aïn Sefra présentent une irrégularité temporelle marquée, caractéristique des régimes semi-arides à influence saharienne. Les épisodes pluvieux sont souvent brefs, mais d'intensité élevée, typiques des orages méditerranéens chaotiques. La durée et l'intensité d'un événement pluvieux dépendent fortement de l'échelle temporelle considérée : à l'échelle journalière, la pluie peut sembler continue, tandis qu'à l'échelle horaire, elle se compose généralement de plusieurs averses séparées par des intervalles secs.

Les crues les plus importantes du bassin sont généralement générées par des orages violents de quelques dizaines de minutes, parfois précédés de pluies plus faibles qui contribuent à saturer le sol et accélérer le ruissellement. L'intensité de la pluie diminue lorsque l'on considère des durées plus longues : l'intensité moyenne sur plusieurs jours est toujours inférieure à l'intensité maximale observée sur une heure ce qui est schématisé sur la figure 13.

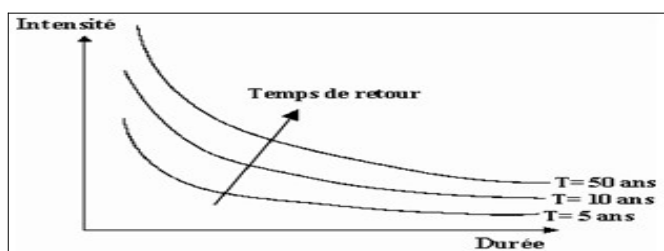


Figure 4: exemple schématique de courbes IdF (intensité, durée, fréquence)

Cette variabilité temporelle peut être quantifiée à travers des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF), qui permettent d'associer une probabilité de non-dépassement à chaque événement, et ainsi d'évaluer le risque d'événements extrêmes.

III.2.4. Variabilité spatiale :

La distribution spatiale des précipitations dans le bassin d'Aïn Sefra est également très hétérogène. Les reliefs de moyenne montagne, notamment autour du Djebel Mekter et du Djebel

Aïssa, favorisent des gradients pluviométriques importants en raison de l'effet orographique. Les pluies y sont généralement plus abondantes que dans les plaines ou zones de piémont, où l'intensité est souvent faible. Cette variabilité spatiale contribue à une concentration irrégulière des écoulements et à la formation de crues localisées dans les talwegs principaux.

Cependant, la densité du réseau pluviométrique reste insuffisante pour une représentation précise des champs de précipitation. Le bassin ne dispose que de quelques stations (notamment à Aïn Sefra et Méchéria), ce qui limite la précision des estimations spatiales. Pour pallier ce manque, il est nécessaire de recourir à des alternatives telles que l'exploitation de levés de terrain, l'analyse des traces de crue et l'utilisation de Modèles Numériques de Terrain (MNT) haute résolution. L'exploitation d'images radar météorologiques pourrait également fournir une meilleure résolution spatiale et temporelle des précipitations.

III.2.5. Limites du réseau ONM et méthodes de substitution

L'absence d'une couverture pluviographique dense dans le bassin d'Aïn Sefra constitue une contrainte majeure pour l'analyse hydrologique. Les données pluviométriques disponibles, limitées à quelques stations éloignées et souvent journalières, ne permettent pas de reconstituer avec précision la dynamique des épisodes extrêmes. Pour surmonter cette limitation, notre étude s'est appuyée sur un point fort du bassin : les traces de crue, bien conservées et facilement identifiables sur le terrain.



Figure 5: carte de localisation des stations de mesure

Figure 28: carte de localisation des stations de mesure

Nous avons ainsi exploité plus de 971 points GPS mesurant les hauteurs d'eau directement observées à Aïn Sefra, offrant une base solide pour estimer les écoulements passés. Cette approche a été complétée par des levés de terrain détaillés pour caractériser le réseau hydrographique et la géométrie des bassins, ainsi que par l'utilisation de Modèles Numériques de Terrain (MNT) haute résolution, permettant d'identifier les zones de concentration des écoulements et les pentes favorisant le ruissellement.

Pour la conversion des hauteurs d'eau en débits, nous avons appliqué des méthodes empiriques éprouvées, telles que les formules de Manning et Strickler, adaptées à la morphologie locale et à la rugosité des canaux. Cette combinaison méthodologique, intégrant observations directes, levés terrain et modélisation empirique, offre une estimation robuste des écoulements dans un

contexte de données limitées. Elle constitue un outil fiable pour analyser les crues et planifier des mesures de gestion des risques adaptées aux conditions hydrologiques spécifiques à Aïn Sefra.

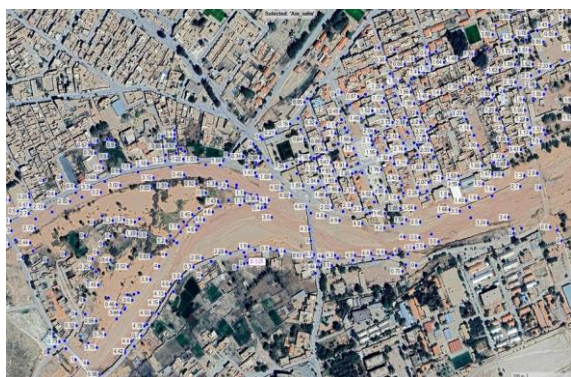
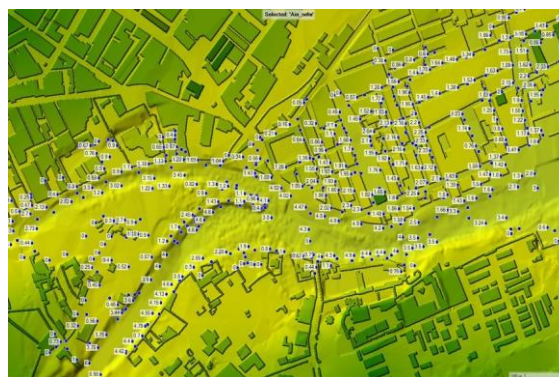
III.3. Cartographie de la Crue du 08 septembre 2024

La cartographie des crues constitue un outil fondamental pour la compréhension et la représentation spatiale des phénomènes d'inondation comme il est illustré sur la figure 15. Elle permet non seulement de visualiser l'extension d'un événement hydrologique, mais aussi de confronter directement l'ampleur de la crue aux enjeux vulnérables situés dans la zone inondée (GIVONE, 1998).

La spatialisation des débits aboutit à la production de cartes de référence représentant les événements caractéristiques, ou à une synthèse des enveloppes de crue. Ces cartes mettent en évidence principalement l'extension latérale de la crue, mais elles peuvent également illustrer d'autres variables hydrauliques telles que la hauteur d'eau, la durée de submersion, ou encore la vitesse d'écoulement.



Vue Globale des Laisses de la crue 8 septembre 2024



Zoom sur les Laisses de la crue 8 septembre 2024



Figure 29: Zoom sur les laisses de crue au niveau du centre-ville

Zoom sur les Laisses de crue au niveau du Centre-Ville

Figure 6: Détail sur la distribution spatiale des laisses de crue dans la partie de Aïn Sefra

La hauteur d'eau est la première variable à utiliser lorsqu'il s'agit d'évaluer une inondation, car les dommages en dépendent de :

1. La durée de submersion a un impact significatif sur l'endommagement des biens dans le cas d'inondations de durée supérieure à 24 heures.
2. La vitesse de l'écoulement peut être une variable complémentaire pour estimer les dommages, mais nous verrons plus loin qu'elle est assez difficile à modéliser en lit majeur. La direction de l'écoulement est parfois représentée sous forme de vecteurs vitesse, elle nécessite l'utilisation d'un modèle hydraulique bidimensionnel.
3. La force tractrice pourrait être une information utile pour situer les zones susceptibles d'être fortement érodées.

Ces variables physiques sont utiles pour décrire de façon spatialisée l'intensité de la crue, nous retiendrons en particulier la hauteur d'eau. Le premier objectif de la modélisation est de décrire le plus finement possible l'inondation à l'échelle du bassin versant. Ce phénomène étant variable dans l'espace et dans le temps, ce qui nécessite une approche spatialisée. Pour estimer un risque il faut par ailleurs tenir compte de la fréquence de l'événement étudié.

III.3.1. Objectif

Cette phase a pour objectif principal de déterminer les zones inondées de l'ensemble de la ville de Aïn Sefra, tout en valorisant les travaux préparatoires déjà réalisés comme la détermination des lits mineur et majeur de cours d'eau, inventaire des zones inondées lors de crues de 2024. Dans les faits, il consiste en l'établissement d'une carte de la zone inondable :

- La carte de l'aléa inondation, reprenant les territoires susceptibles d'être soumis à des inondations par débordement de cours d'eau ;

L'objet de cette phase est aussi l'identification et la cartographie des zones inondées des oueds rocheux et pentue de la region d'Ain Sefra. Il est fondé sur l'intégration dans un système d'information géographique (SIG), de données interprétées à partir d'un levé GPS, de produits dérivés d'un modèle numérique d'altitude (MNA) des élévations d'eaux lors de l'inondation 2024. Le traitement des données comporte différentes phases :

- 1) Création d'un MNA à partir des points de niveau d'eau et de points cotés extraits d'un MNT,

- 2) Calcul de variables morphométriques à partir du MNA,
 - 3) Intégration des données (MNT, MNA, données exogènes) et analyse spatiale dans un SIG.
- Les principaux facteurs de risque d'inondation considérés sont : la pluviosité, la couverture du sol, le réseau hydrographique, la pente du terrain et les domaines litho-structuraux.

En zones inondées, le développement urbain et économique constitue l'un des principaux facteurs aggravants, par augmentation de la vulnérabilité. De plus, les aménagements (activités, réseaux d'infrastructures) modifient les conditions d'écoulement (imperméabilisation et ruissellement), tout en diminuant les champs d'expansion des crues. Sur les cours d'eau les aménagements (pont, enrochements, digues) et le défaut chronique d'entretien de la part des riverains, aggravent l'aléa.

L'analyse spatiale multicritère, réalisée dans un SIG a permis d'élaborer la carte des zones inondées. Cette carte comporte quatre classes allant du faible risque au très fort risque d'inondation. Les zones à moyen et fort risque couvrent plus de 32% de la Vallée. Elles sont situées dans la partie australe et dans les plaines alluviales attenantes aux principaux cours d'eau. La carte obtenue peut être utilisée non seulement pour la prévention des risques d'inondation, pour la gestion des ressources naturelles dans la vallée, mais aussi au tant qu'un support de base pour valider la carte de risque générée par la suite selon un modèle étudié.

III.3.2. Méthodologie de la régénération de la Crue 8 Sept 2024 :

La cartographie des zones inondées a pour objectif principal de déterminer les zones d'inondation sur l'ensemble des sites d'Aïn Sefra tout en valorisant les travaux préparatoires déjà réalisés (détermination des lits mineur et majeur de cours d'eau, inventaire des zones inondées lors de crues antérieures, ...). Dans les faits, il consiste en l'établissement de deux cartes concernant les inondations par débordement de cours d'eau :

- La carte de l'aléa inondation ;
- La carte du risque de dommages.

La méthodologie mise au point a été approuvée suite à l'existence des laisses de crue. Cette méthodologie repose, dans ses principes, sur la méthode « inondabilité » de la zone d'étude, et de lier chaque point de laisse de la crue 2024 à des coordonnées en GPS. Elle appréhende distinctement le phénomène naturel d'inondation (aléa) et les conséquences dommageables liées à l'occupation du lit majeur des cours d'eau (risque de dommages). Tout en tenant compte des données de base disponibles ou acquises par un levé des laisses de la crue 2024, elle offre un assemblage cohérent de différentes méthodes scientifiques déjà éprouvées et elle est applicable à l'ensemble des sites demandés dans le cadre de ce projet.

III.3.3. Zones inondées

De nombreuses études sur la vulnérabilité de la ville d'Aïn Sefra, face au risque de crue, nous font dire que le risque zéro n'existe pas. En effet, malgré la vigilance et les efforts des autorités pour consolider et entretenir la longueur des oueds, celle-ci n'est pas un rempart infailible bien qu'insubmersible pour le moment. Il nous semble donc important de trouver des solutions

d'aménagement dans les brefs délais, et d'informer les habitants des différentes vallées, afin de les sensibiliser et de les rassurer face aux aléas « inondation ».

La montée des eaux sur le bassin versant d'Aïn Sefra est un processus trop rapide, qui ne laissera pas assez de temps, s'il se produit, pour mettre les personnes en sécurité malgré les plans de sauvegarde et d'évacuation.

III.3.3.1. Levé des hauteurs de la crue 2024

Une mission de terrain effectuée par les chercheurs du centre des Techniques Spatiale quia apporté un début de réponse au besoin d'entretenir la mémoire et la conscience du risque et d'éviter la disparition des repères de crue. Il s'agit aujourd'hui d'une base de données qui impose la réalisation de l'inventaire des repères de la crue 2024 et d'établir un fichier des repères correspondant à cette crue. Il est préférable de marquer ces crues exceptionnelles sur des bâtis (bâtiments publics ou privés, quais, piles de pont, etc.).

La mission de terrain effectuée a permis de localiser chaque hauteur d'eau de la crue 2024 avec ces propres coordonnées géographiques, collectées sous une base de données.

a. Organigramme de la phase « Carte des zones Inondées » :

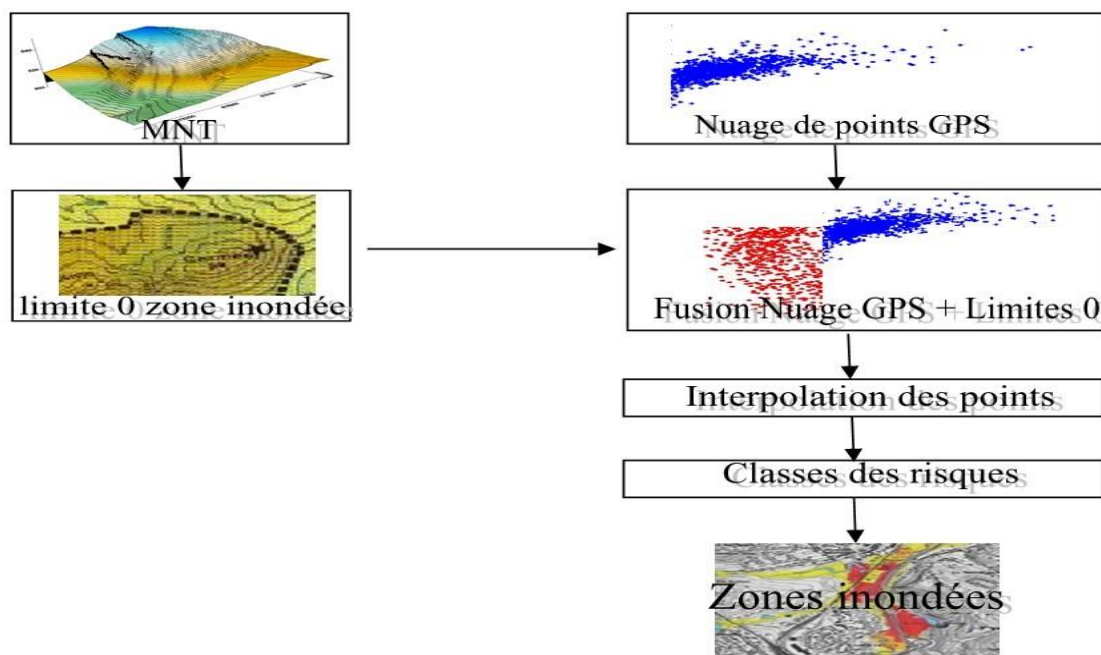


Figure 7: Organigramme de la phase « régénération de la crue 2024

b. Principes de la méthode

Cette méthodologie est fondée sur l'exploitation d'une campagne GPS, qui reste le principal document de référence pour cette démarche. Elle ne vise qu'à interpoler cette cartographie à une échelle supérieure et à traduire, tant que faire se peut, l'emprise des champs d'inondation parcourus en termes de côte d'inondation et de hauteur d'eau.

Le principe retenu se veut simple : estimer l'altitude du champ d'inondation par confrontation de la topographie et de l'emprise de la zone d'inondation. Les altitudes de la surface de l'inondation ainsi estimées sont généralisées par interpolation et reportées sur une carte, sous

forme de courbes isohypses « isocotes ». Les secteurs submergés par des hauteurs d'eau inférieures à 40 cm sont ensuite identifiés par comparaison entre ces altitudes généralisées et la topographie disponible sur la zone considérée, jusqu'à ce qu'on fixe les courbes de 0.

c. Collecte des données GPS

La mise en œuvre de ce principe nécessite donc une connaissance aussi complète que possible de la topographie. La densité et la précision des données GPS relevées conditionnent en effet pour partie :

- La précision avec laquelle l'altitude de la zone inondée pourra être estimée ;
- La précision de l'estimation des hauteurs d'eau et donc la fiabilité de l'identification des zones submergées par moins d'un mètre d'eau.

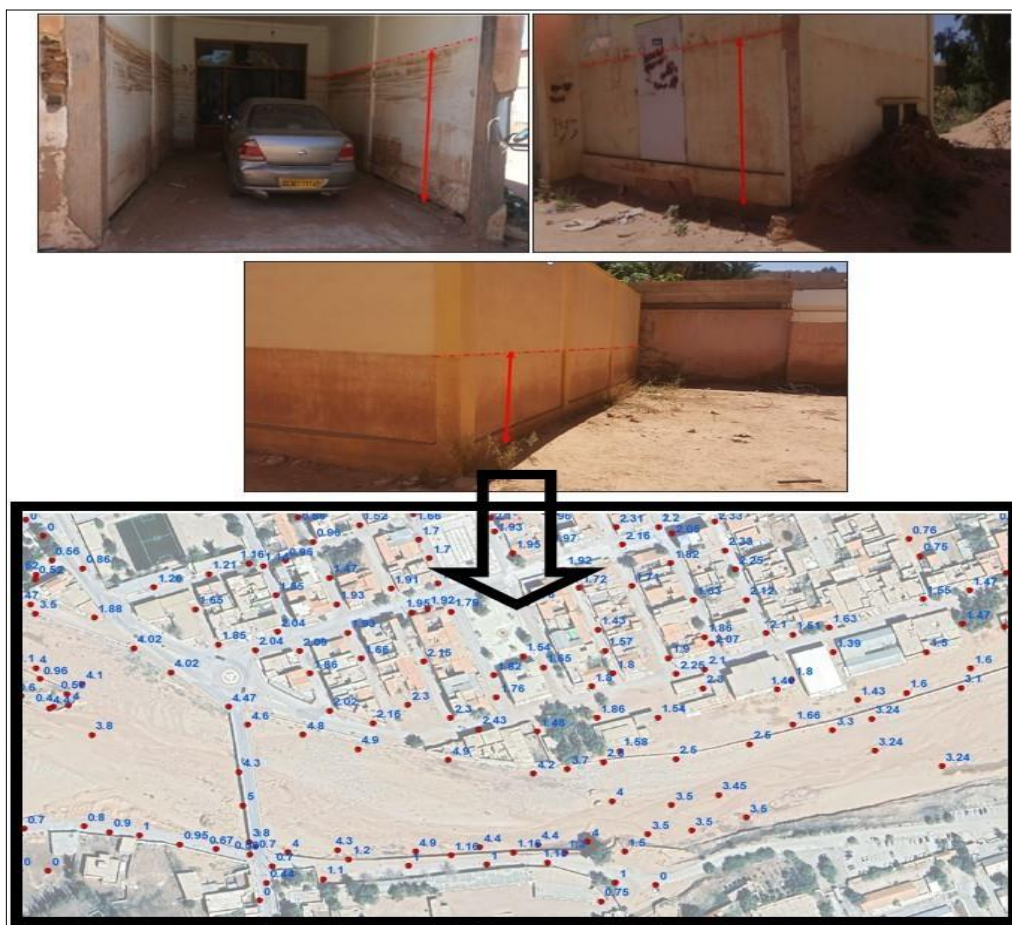


Figure 8: Zoom sur les points de levé GPS des zones inondées

d. Les levés spécifiques

Dans les zones où aucune donnée topographique satisfaisante n'a pu être utilisée, un nuage de points a été réalisé à partir d'un MNT transposé. Ces levés ont fourni des points cotés permettant d'estimer la côte du champ d'inondation et de disposer d'une description du terrain naturel utilisée pour définir la zone submergée par moins de 0,40 m d'eau.

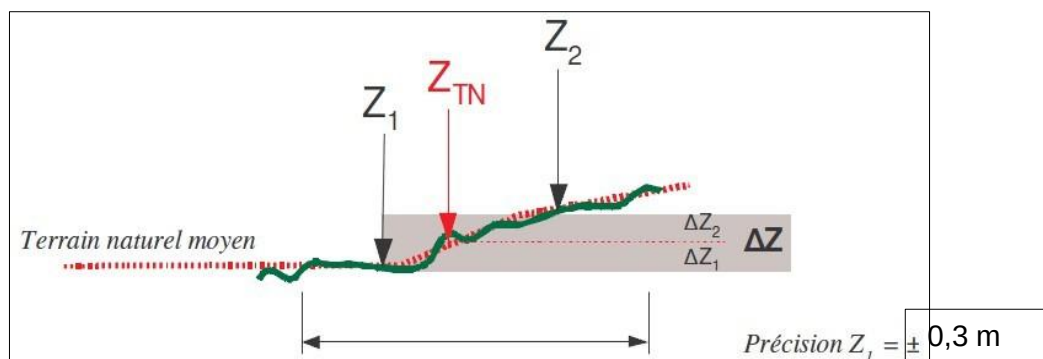


Figure 9: Les levés spécifiques

La précision théorique des levés est de 0,3 m (spécifications techniques du GPS utilisé), mais la précision réelle est vraisemblablement d'environ 0,2 m compte tenu des irrégularités du sol. En effet, si l'altitude du point considéré est mesurée avec une grande précision, ce point n'est représentatif du terrain naturel qu'avec une incertitude décimétrique (Fig.18).

III.3.3.2. Analyse détaillée de la crue du 8 septembre 2024

a. Extension des inondations

L'extension des inondations a été analysée pour deux scénarios principaux :

1. **Crue centennale (~1 200 m³/s)** : utilisée comme crue de référence pour le zonage réglementaire, elle permet de délimiter les zones présentant une forte probabilité de submersion et devant faire l'objet de restrictions d'urbanisation.
2. **Crue extrême du 8 septembre 2024 (>1 850 m³/s)** : cette crue exceptionnelle a dépassé les estimations de la crue centennale et a mis en évidence des secteurs vulnérables supplémentaires, notamment dans les lits majeurs d'El Bridj et de Mouileh, et à l'aval de la confluence Mouileh + Tinkourt.

Dans la plaine d'Aïn Sefra, où l'urbanisation s'étend progressivement sur les berges des oueds, plusieurs secteurs à risque élevé ont été identifiés. La précision de la cartographie dépend de la qualité du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de la restitution des microreliefs influençant la répartition des flux.

La modélisation a donc privilégié une description fine du fond de vallée et du lit majeur, permettant d'estimer de manière réaliste l'extension géographique des inondations pour chaque scénario de crue.

b. Variables cartographiées

Dans le cadre de l'analyse du risque d'inondation, le débit de pointe n'est qu'une donnée intermédiaire servant à la simulation hydraulique. Ce sont les variables physiques de l'inondation qui déterminent la gravité et l'intensité du phénomène.

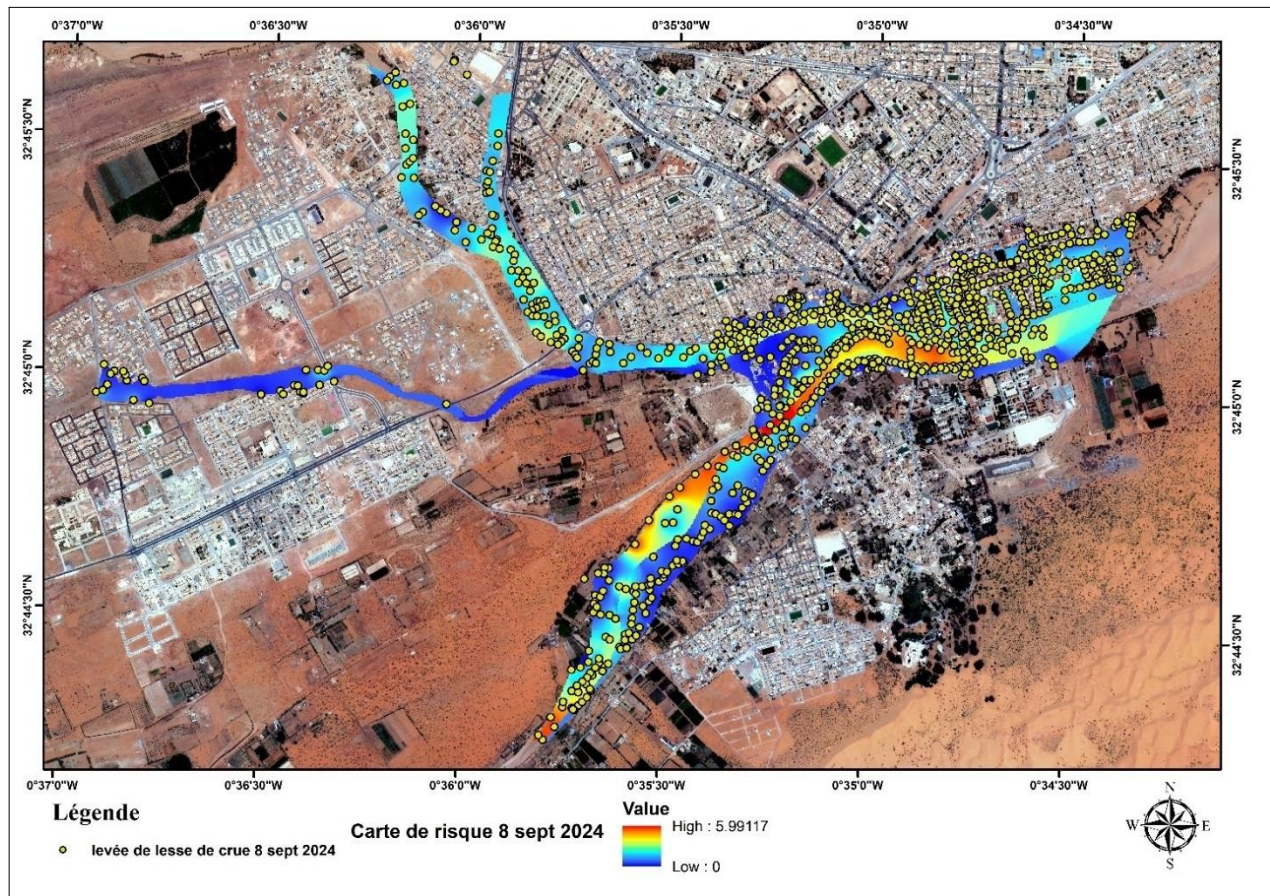
Conformément aux recommandations de Torterotot (1994) et des approches hydrauliques récentes, trois variables principales sont considérées :

- **Hauteur d'eau (h)**

Il s'agit du paramètre le plus déterminant. Une submersion de quelques dizaines de centimètres ne présente pas le même niveau de danger qu'une hauteur d'eau dépassant 1 mètre. Des seuils

de hauteur d'eau sont donc définis pour qualifier l'intensité de l'aléa et estimer les dommages potentiels sur les infrastructures et habitations.

Pour garantir une précision altimétrique suffisante (± 10 cm), la cartographie repose sur un MNT de résolution métrique dérivé d'un couple d'images stéréoscopiques à 30 cm de résolution.



• Vitesse d'écoulement (v)

Cette variable complète la précédente, car elle permet d'évaluer la force dynamique de la crue. Dans le cas d'Aïn Sefra, la vitesse moyenne observée varie significativement selon les secteurs : elle est plus élevée dans les oueds encaissés (El Bridj, Mouileh et Tinkourt) et plus modérée dans les zones de débordement en aval.

La cartographie des vitesses est obtenue à partir des résultats du modèle 2D et permet de distinguer les zones de courant fort, susceptibles d'érosion ou d'arrachement d'ouvrages légers.

• Durée de submersion (t)

Bien que moins déterminante dans le contexte d'Aïn Sefra, où les crues sont généralement brèves et intenses (durée inférieure à 24 heures), cette variable reste utile pour l'évaluation des dégâts post-crue et des temps de séchage des sols et bâtiments.

Compte tenu de la nature torrentielle des oueds de moyenne montagne de la région, la hauteur maximale de submersion a été retenue comme variable principale de cartographie. Les hauteurs d'eau issues des simulations ont été interpolées spatialement à partir des points de calcul du modèle 2D afin de produire une spatiocarte homogène de l'aléa d'inondation couvrant l'ensemble

de la plaine d'Aïn Sefra.

III.4. Modélisation Hydraulique

L'objectif de cette étude est de développer un modèle hydraulique réaliste et scientifiquement robuste pour la reconstitution et l'analyse des crues survenues dans la région de Naâma, en particulier celles ayant affecté la localité d'Aïn Sefra. Cette démarche se justifie par l'absence de données hydrométriques fiables en amont, mais également par la complexité topographique caractéristique de ces territoires, qui rend difficile la modélisation des écoulements en milieu aride et semi-aride.

Afin de surmonter ces contraintes, le présent rapport explore le potentiel des données de télédétection à très haute résolution (images optiques, modèles numériques de terrain haute précision) pour alimenter et calibrer une modélisation hydraulique avancée. L'objectif est de reconstituer la crue du 8 septembre 2024 et d'évaluer, dans un second temps, l'impact de divers scénarios d'aménagement hydraulique et urbain.

La méthodologie retenue repose sur une géométrie mixte 1D/2D, combinant simultanément :

- Une modélisation 1D pour représenter précisément l'écoulement longitudinal dans les lits d'oueds principaux (Oued Aïn Sefra),
- Et une modélisation 2D pour capturer la dynamique latérale complexe de l'inondation dans les zones urbanisées, les plaines alluviales et les cônes de déjection.

Ce choix méthodologique n'est pas fortuit :

- La modélisation 1D seule est performante pour le calcul des profils d'écoulement dans un chenal structuré, mais elle ne peut pas représenter correctement la dispersion latérale, les débordements, l'effet des zones urbanisées ou des obstacles,
- La modélisation 2D seule, bien que plus détaillée, reste limitée pour reproduire la dynamique d'un écoulement concentré dans un lit d'oued encaissé, et devient particulièrement coûteuse en temps de calcul pour de longues distances,
- Tandis que la modélisation mixte 1D/2D combine les avantages des deux approches, permettant une représentation réaliste, précise et physiquement cohérente des crues, particulièrement dans les contextes morphologiques complexes tels que ceux de Aïn Sefra.

Ainsi, pour Aïn Sefra, la géométrie mixte permet de simuler correctement la propagation rapide du ruissellement depuis le piémont jusqu'au tissu urbain.

Dans ce cadre, l'étude menée dans ce rapport vise à évaluer, à travers cette modélisation hydraulique intégrée, l'efficacité de différentes stratégies d'aménagement destinées à réduire le risque d'inondation. Les simulations prospectives permettront ainsi de tester et de comparer plusieurs solutions techniques aménagements hydrauliques, protections urbaines, zones tampons, recalibrage des lits d'oueds afin d'apporter aux décideurs des outils d'aide à la décision fiables et opérationnels.

III.4.1. Méthodologie proposée :

La méthodologie adoptée dans ce travail repose sur une démarche intégrée combinant télédétection de très haute résolution, hydraulique numérique avancée et validation par données historiques afin de reproduire de manière réaliste la dynamique de la crue

exceptionnelle de septembre 2024 dans la localité majeure du bassin de Aïn Sefra. Cette démarche s'appuie sur la puissance de la modélisation hydraulique mixte 1D/2D sous HEC-RAS, particulièrement adaptée aux environnements topographiquement complexes et soumis à des processus hydrologiques rapides et non linéaires.

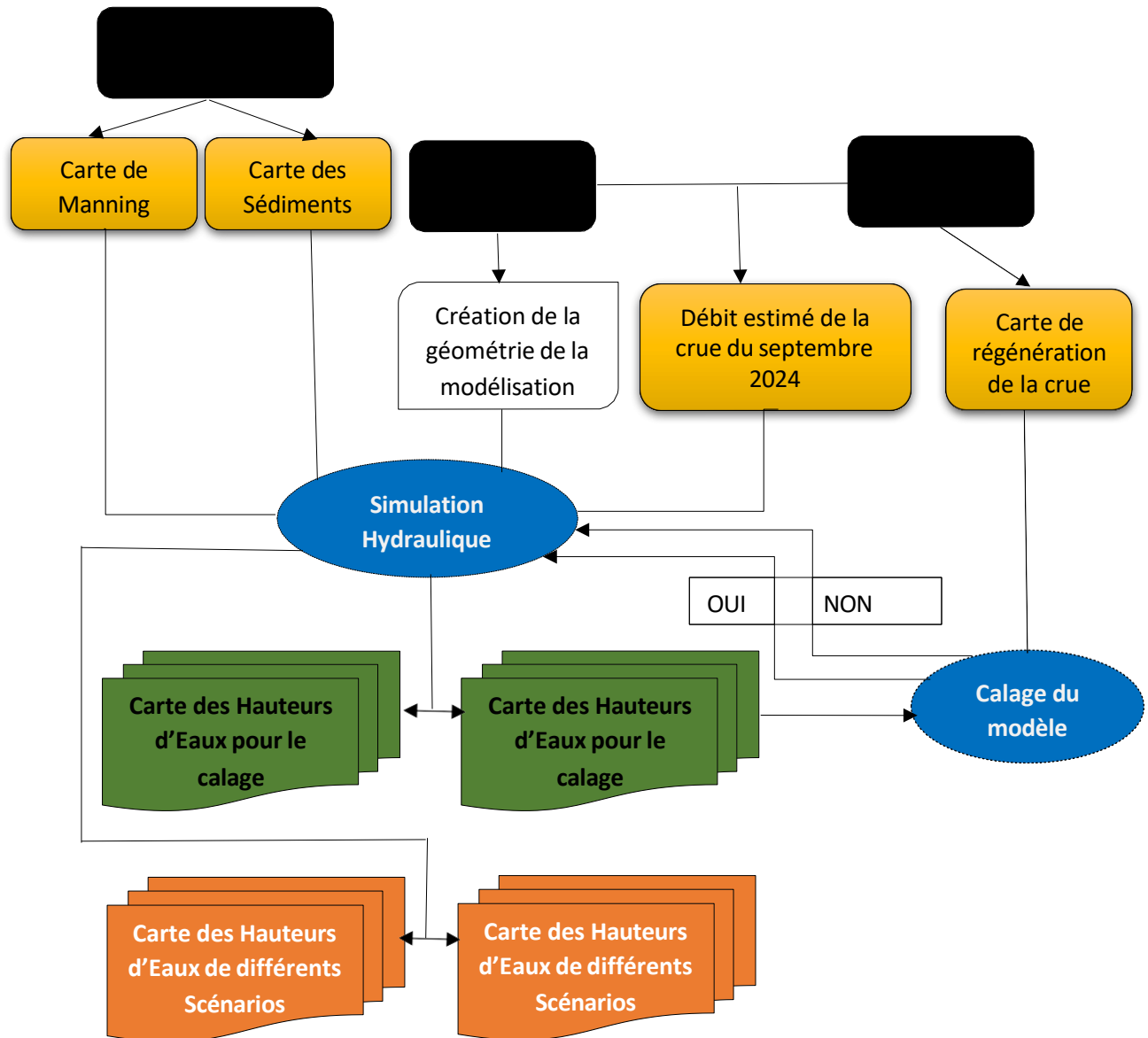


Figure 11: Organigramme de la méthodologie proposée

a. Structure générale de la méthodologie

La Figure 20 présente l'organigramme détaillé de la méthodologie de modélisation hydraulique mise en œuvre dans cette étude. Cet organigramme décrit de manière structurée et séquentielle l'ensemble du processus, depuis la collecte, l'analyse et le prétraitement des données d'entrée (modèle numérique de terrain, occupation du sol, paramètres hydrologiques et sédimentaires), jusqu'à l'exploitation et la validation des résultats. La démarche méthodologique repose sur une progression logique intégrant successivement la construction de la géométrie hydraulique, la discrétisation spatiale du domaine de calcul, la définition des conditions aux limites et des paramètres physiques (rugosité de Manning, caractéristiques granulométriques), puis la

réalisation des simulations hydrauliques. Les étapes de calage et de validation du modèle, basées sur la comparaison des résultats simulés avec les observations disponibles ou les références hydrauliques, permettent d'ajuster les paramètres du modèle et d'assurer la cohérence et la robustesse des simulations. Cette approche systématique garantit une représentation réaliste des écoulements et constitue une base fiable pour l'analyse des aléas d'inondation et l'évaluation du risque hydraulique.

b. Acquisition des images et réalisation d'un MNT

Dans le cadre du projet de Fin d'Etude, une chaîne de traitements géospatiaux intégrée et automatisée a été mise en œuvre afin de produire des données altimétriques et cartographiques de haute précision. Cette démarche repose sur l'exploitation de couples stéréoscopiques d'images satellitaires à haute résolution, sélectionnées selon des critères géométriques et radiométriques rigoureux, permettant une restitution tridimensionnelle fiable du relief par photogrammétrie spatiale. Les images acquises selon des angles de visée différenciés ont été traitées à partir des modèles de capteurs et des paramètres orbitaux, puis ajustées géométriquement afin d'extraire l'information de parallaxe nécessaire à la génération d'un Modèle Numérique de Terrain continu et cohérent.

Afin de garantir une précision planimétrique et altimétrique compatible avec les exigences de la modélisation hydraulique, des points de contrôle au sol issus de levés GPS de précision ont été intégrés au processus de traitement. Ces points ont permis de renforcer le calage géométrique et l'orthorectification des scènes, conduisant à la production d'orthoimages géoréférencées et directement exploitables dans un environnement SIG. Les produits générés, en particulier le MNT, constituent une base essentielle pour l'analyse hydrologique et hydraulique du bassin versant, la simulation des écoulements en crue, l'identification des zones potentiellement inondables et la définition de scénarios d'aménagement adaptés aux contraintes morphologiques et hydrodynamiques de l'oued Aïn Sefra.

b.1. Moyens matériels & équipements scientifiques

b.1.1. Images satellitaires

Les données d'observation de la Terre exploitées dans cette étude proviennent de la constellation satellitaire commerciale SuperView Neo, développée par la société chinoise SIWEI, qui figure parmi les systèmes d'imagerie optique à très haute résolution les plus performants actuellement disponibles. Cette constellation repose sur un ensemble d'au moins 28 satellites répartis en plusieurs séries complémentaires, dont les SuperView Neo-1, spécifiquement conçus pour l'acquisition d'images optiques de très haute précision, avec des résolutions spatiales de l'ordre de 20 à 30 cm. Ces satellites se distinguent par une excellente qualité radiométrique associée à une finesse spatiale remarquable, les rendant particulièrement adaptés aux applications de cartographie détaillée, d'analyse urbaine fine, de détection d'objets et de modélisation géospatiale de précision, avec des performances comparables aux constellations de référence à l'échelle internationale telles que WorldView-3 ou Pléiades Neo.

Le capteur embarqué fournit des images panchromatiques à une résolution de 0,30 m, ainsi que des images multispectrales d'environ 1 à 2 m de résolution. Cette très haute résolution permet l'identification et la caractérisation d'objets de petite taille au sol, tels que les véhicules, les détails architecturaux des bâtiments, les infrastructures linéaires et divers éléments du micro-

relief, indispensables pour les analyses urbaines et hydrauliques à fine échelle. Sur le plan spectral, le système multispectral comprend quatre bandes classiques — Bleu, Vert, Rouge et Proche Infrarouge (NIR) complétées par une bande panchromatique à très haute résolution, offrant une capacité d'analyse à la fois des surfaces artificialisées et des milieux naturels.

Les images panchromatiques acquises à 30 cm offrent un niveau de détail particulièrement élevé, permettant de distinguer avec une grande netteté les structures linéaires, les véhicules individuels, les ombres portées des bâtiments ainsi que les variations de texture entre différents matériaux de surface. Dans un contexte urbain, ce niveau de précision constitue un support privilégié pour l'extraction automatique de bâtiments, la détection de changements et certaines approches de modélisation tridimensionnelle basées sur l'analyse des formes et des ombres. Les images multispectrales, quant à elles, permettent une analyse avancée de la végétation, des sols, des zones humides et des surfaces en eau, notamment à travers le calcul d'indices spectraux tels que le NDVI, le NDWI ou le SAVI, largement utilisés pour l'évaluation de la vigueur végétale, de l'humidité des sols et de la présence d'eau en surface.

La fusion des images panchromatiques et multispectrales par des techniques de pansharpening permet enfin de générer des images couleur à 30 cm de résolution, combinant la richesse spectrale des bandes multispectrales avec la finesse spatiale de la bande panchromatique. Ces produits à très haute résolution constituent une base essentielle pour les applications de photogrammétrie satellitaire, la production d'orthoimages de précision et la modélisation tridimensionnelle des zones étudiées.

b.1.2. Observations GPS

En complément des données satellitaires, des observations de terrain par positionnement satellitaire GNSS ont été réalisées afin d'assurer la précision géométrique et altimétrique des produits cartographiques. Dans le cadre de ses missions scientifiques et techniques, le Centre des Techniques Spatiales (CTS) d'Arzew a développé une expertise reconnue dans le domaine du positionnement précis par satellite et dispose de moyens humains et matériels de haut niveau.

Les levés GNSS ont été effectués à l'aide de récepteurs Trimble NetR9, associés à des antennes géodésiques Trimble Zephyr Geodetic Model 2. Cette technologie prend en charge l'ensemble des constellations GNSS existantes et futures (GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou), ainsi que les systèmes d'augmentation satellitaire (SBAS), permettant d'atteindre des précisions planimétriques et altimétriques de l'ordre du centimètre.

Les points de contrôle ainsi obtenus ont été intégrés aux traitements photogrammétriques afin d'assurer le calage géométrique des images, l'orthorectification des scènes satellitaires et la validation altimétrique des Modèles Numériques de Terrain. L'association de données satellitaires de très haute résolution et de mesures GNSS de précision confère à l'étude une robustesse scientifique élevée, indispensable pour la modélisation hydraulique, l'évaluation du risque d'inondation et la définition de scénarios d'aménagement fiables et opérationnels.

b.2. Méthodologie proposée

La stéréoscopie satellitaire constitue une technique d'observation tridimensionnelle reposant sur l'exploitation de deux images d'une même zone acquises selon des angles de prise de vue distincts. Cette différence géométrique induit un décalage apparent des objets en relief, appelé parallaxe, dont l'analyse permet de reconstituer la géométrie spatiale de la surface terrestre et d'en déduire les altitudes avec une grande précision. La stéréoscopie offre ainsi une solution efficace pour la production de données altimétriques fiables, indispensables pour l'hydrologie, la cartographie, l'aménagement du territoire et la gestion des risques naturels, notamment dans les zones sujettes aux inondations.

.Collecte des points de contrôle (GCPs)

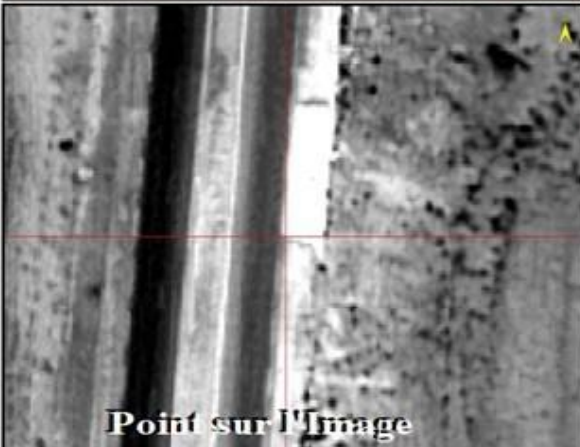
Table des informations des contrôle points			
Points ID: A2			
Coordonnées des points		Fiche de description du point	
UTM (WGS84)	Géographique (WGS84)		
3641944.845	32.89265584N		
724657.019	0.59828149W		
Hauteur ellipsoïdale (h)	1268.111		
Image ID:			
SVN1-01_20250524_L1B0001522057_6042500130040005_01-PAN1			



Le Point sur Terrain



Contexte sur Terrain



Point sur l'Image



Contexte du Point sur l'Image

Figure 12:Fiche signalétique des points des contrôles

La qualité du MNT dépend directement de la précision des points de contrôle au sol. Dans ce projet, une phase de préparation stéréoscopique a été consacrée à l'acquisition de points GNSS de haute précision, indispensables au calage géométrique des images et à la production d'ortho-images et de MNT fiables. Cette phase a porté sur l'observation d'un réseau géodésique de 77 points couvrant l'ensemble de la zone d'étude d'Aïn Sefra.

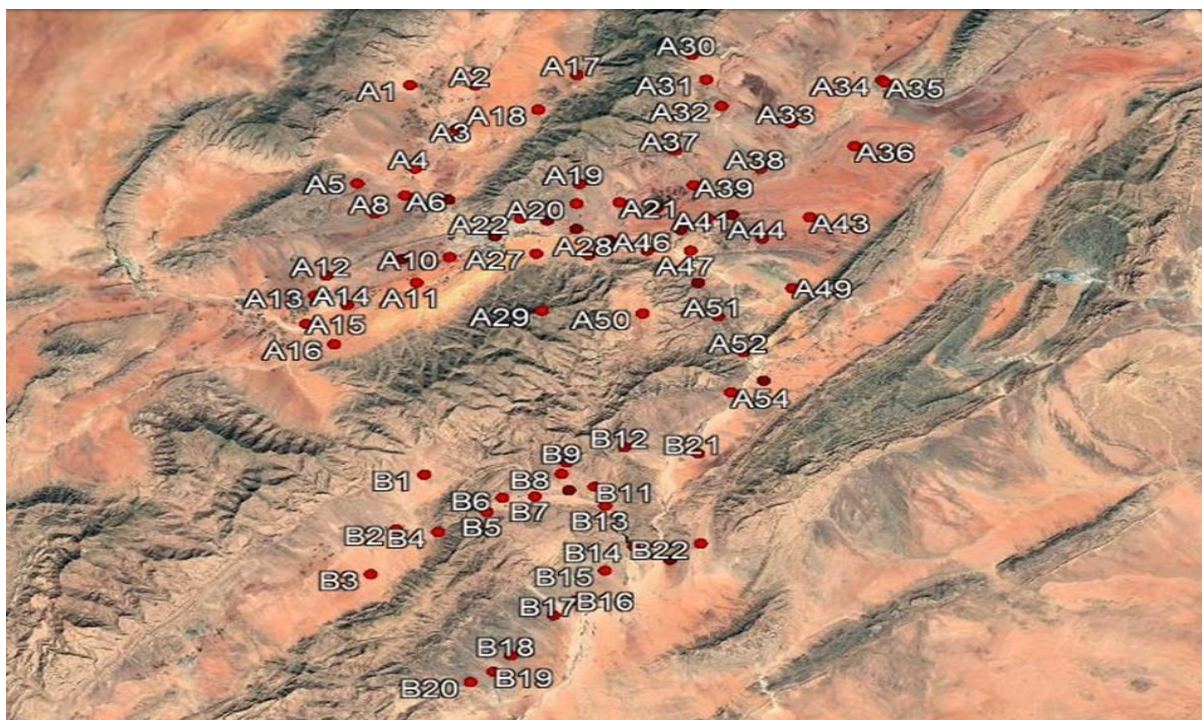


Figure 13: Choix des points de control

L'objectif principal était l'établissement d'une base géodésique de référence précise pour permettre une cartographie détaillée et la génération d'un MNT de haute précision, nécessaire à une modélisation hydraulique robuste et à la gestion durable des oueds.

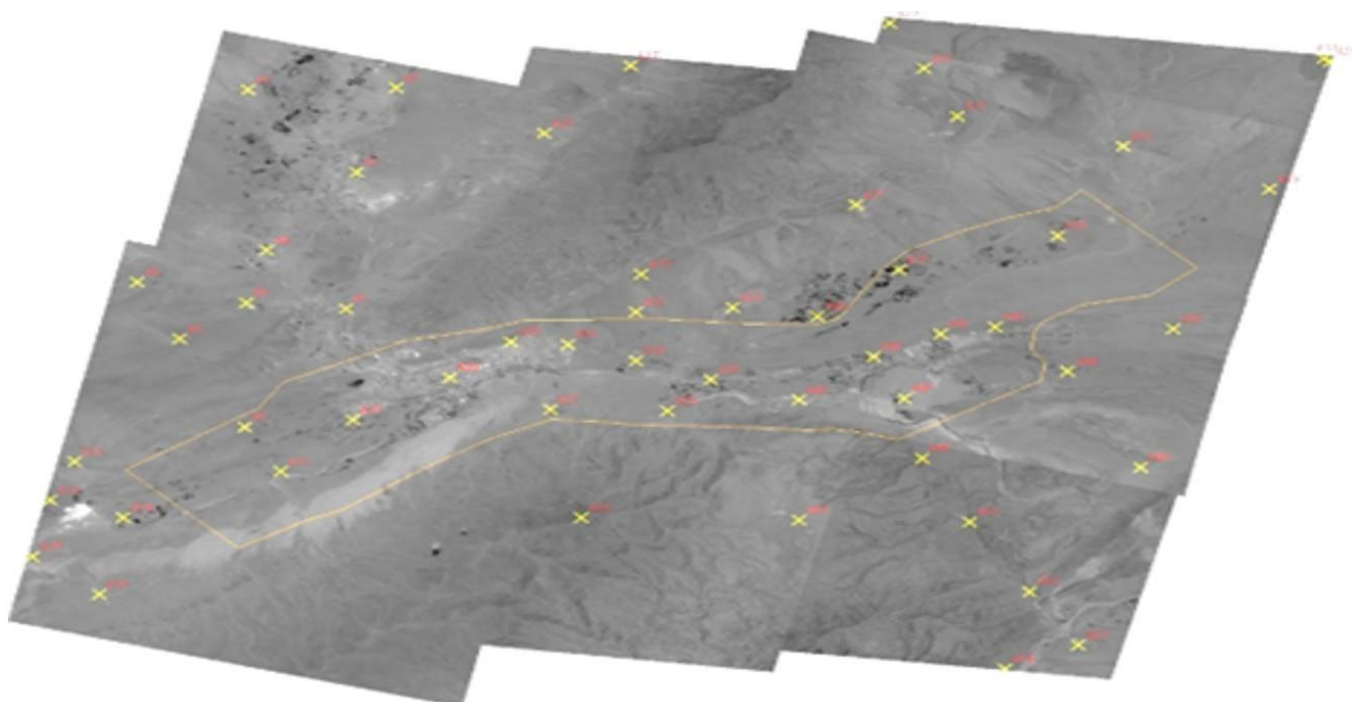


Figure 14: Vue globale des points GPS sur les Images prises "SIWEI"

Cette section présente une vue d'ensemble de la sélection des points GPS utilisés pour établir le canevas GNSS, servant de référence pour le contrôle de l'orthorectification ainsi que pour la

validation altimétrique des modèles générés. Les données ont été acquises dans le système de coordonnées UTM Nord, rattaché au système géodésique WGS-84, conformément aux spécifications techniques du projet. La méthodologie de levé GNSS adoptée, associée au traitement rigoureux des lignes de base et à l'évaluation des indicateurs de précision des points mesurés, assure la fiabilité, la cohérence et la traçabilité des modèles numériques de terrain (MNT) produits sur l'ensemble de la zone d'étude.

[1]. Technique de positionnement GNSS adoptée

Le mode de positionnement retenu pour les travaux de stéréo-préparation est le positionnement GNSS en Statique Rapide, une technique largement éprouvée dans les applications nécessitant un compromis optimal entre précision, rapidité d'exécution et productivité. Il s'agit d'une méthode différentielle reposant sur l'observation simultanée d'une ligne de base entre deux récepteurs GNSS, dont les données sont traitées conjointement afin d'estimer avec précision les coordonnées des points observés.



Figure 15: le positionnement GNSS en Statique Rapide.

Le positionnement statique rapide se distingue du positionnement statique classique par des durées d'observation réduites, généralement de l'ordre de quelques minutes plutôt que de plusieurs heures. Cette performance est rendue possible grâce à des méthodes avancées de résolution des ambiguïtés de phase sur de courtes périodes d'observation, sans dépendre fortement de l'évolution de la géométrie satellitaire. Ces méthodes exploitent des informations supplémentaires, telles que l'utilisation du code P ou la redondance satellitaire, avec un nombre de satellites supérieur au minimum requis. Dans le cadre de cette étude, les observations ont été réalisées sur des lignes de base courtes, inférieures à 10 km, permettant d'atteindre des précisions planimétriques et altimétriques de l'ordre de quelques centimètres, compatibles avec les exigences de production de MNT de haute précision.

[2]. Configuration et gestion des lignes de base GNSS

Les levés GNSS en mode statique rapide étant caractérisés par des temps d'observation courts, il est impératif de maîtriser les effets des perturbations atmosphériques, en particulier ionosphériques. Celles-ci doivent être aussi similaires que possible entre les stations d'une même ligne de base, ce qui implique une réduction maximale de la distance entre les récepteurs. De manière générale, la longueur de la ligne de base constitue un facteur déterminant

influençant directement la durée d'observation requise et la précision finale des coordonnées estimées. Il est donc fortement recommandé de minimiser cette longueur, non seulement dans le cadre du statique rapide, mais pour l'ensemble des techniques de positionnement GNSS.

Compte tenu de l'étendue de la zone d'étude et du nombre de points à lever, la mise en place d'une station de référence provisoire s'est avérée nécessaire. Cette station, implantée sur un site approprié (Direction des Forêts), a servi de point d'ancrage pour un réseau radial de lignes de base, dont les longueurs pouvaient atteindre jusqu'à 10 km. Dans ce type de configuration, où de nombreuses lignes de base sont déterminées à partir d'une même station de référence, le choix du site et la fiabilité de la station revêtent une importance capitale pour la qualité globale du réseau GNSS.

[3]. Critères de choix des stations de référence

Les sites retenus pour l'implantation des stations de référence ont été sélectionnés conformément aux exigences techniques des observations GNSS de précision. Un site optimal doit présenter une visibilité satellitaire dégagée, caractérisée par l'absence d'obstructions au-dessus d'un angle de coupure minimal de 15°, afin de limiter les pertes de signal et d'améliorer la géométrie des observations. De plus, la présence de surfaces réfléchissantes susceptibles de générer des trajets multiples a été évitée, afin de réduire les erreurs liées au multipath. Enfin, les sites choisis offrent des conditions de sécurité satisfaisantes, avec une faible circulation et la possibilité de laisser le récepteur GNSS fonctionner sans surveillance pendant toute la durée des sessions d'observation.

b.2.1. Réalisation du MNT par stéréoscopie satellitaire

La génération d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à partir d'images stéréoscopiques suit une chaîne de traitement structurée. Elle débute par la collecte des données nécessaires, incluant les points de contrôle au sol pour le géoréférencement et les couples stéréos d'images acquises en mode où le capteur du satellite acquiert deux images du même emplacement prises sous des angles différents.

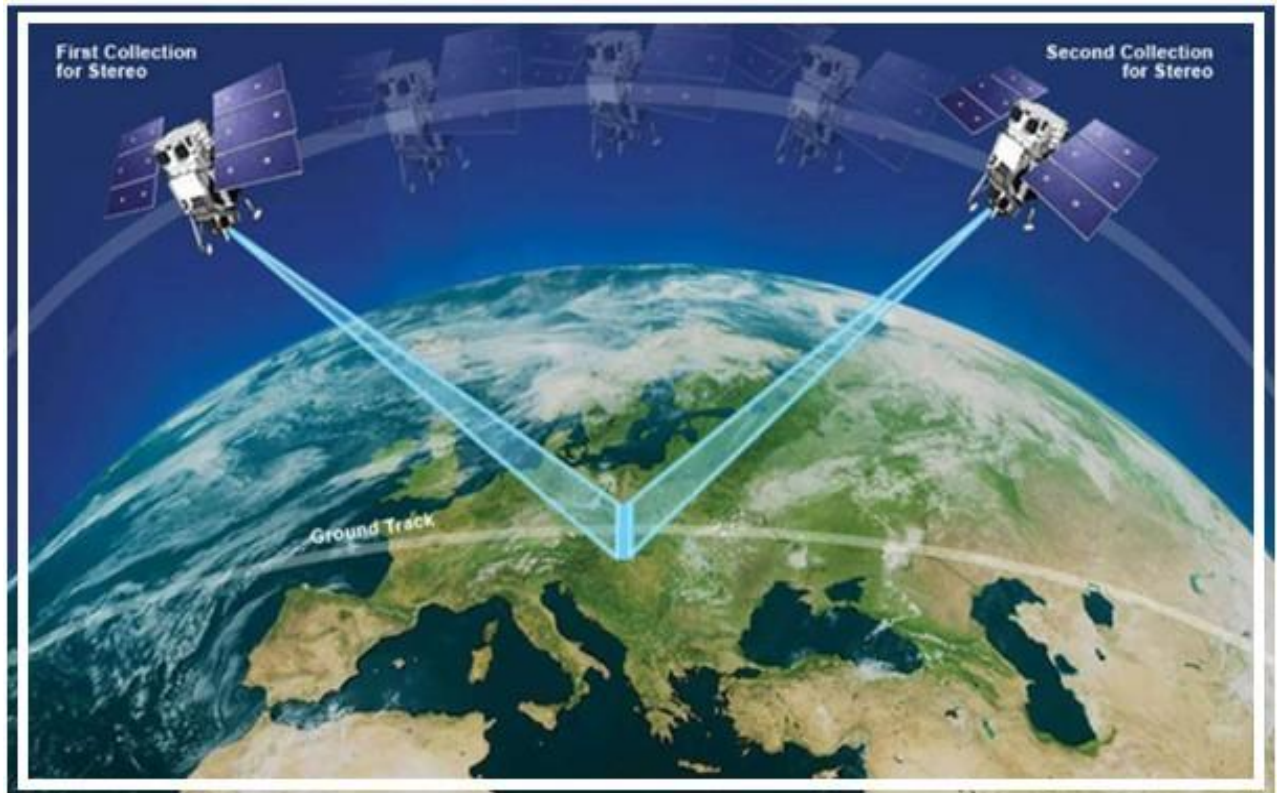


Figure 16: Mode stéréoscopique du Satellite Super View NEO-1

Les images sont ensuite soumises à des opérations d'orientation interne, relative et absolue, afin d'assurer une correspondance géométrique précise entre les deux prises de vue. Cette configuration permet de mesurer des décalages appelés parallaxes, qui sont directement liés à l'altitude du terrain.



Figure 17: Vue en mode stéréo montrant la parallaxe entre les acquisitions avant et arrière.

Une corrélation stéréoscopique permet l'identification des points homologues et le calcul de la parallaxe, conduisant à la création d'un nuage de points 3D. Ce dernier est interpolé pour produire un Modèle Numérique d'Élévation (MNE), puis filtré afin d'obtenir le MNT final représentant uniquement la surface du terrain naturel. Une étape de validation permet enfin d'évaluer la précision du modèle avant son exploitation dans les analyses hydrologiques, l'aménagement et la gestion des risques.

[1] Démarche Méthodologique

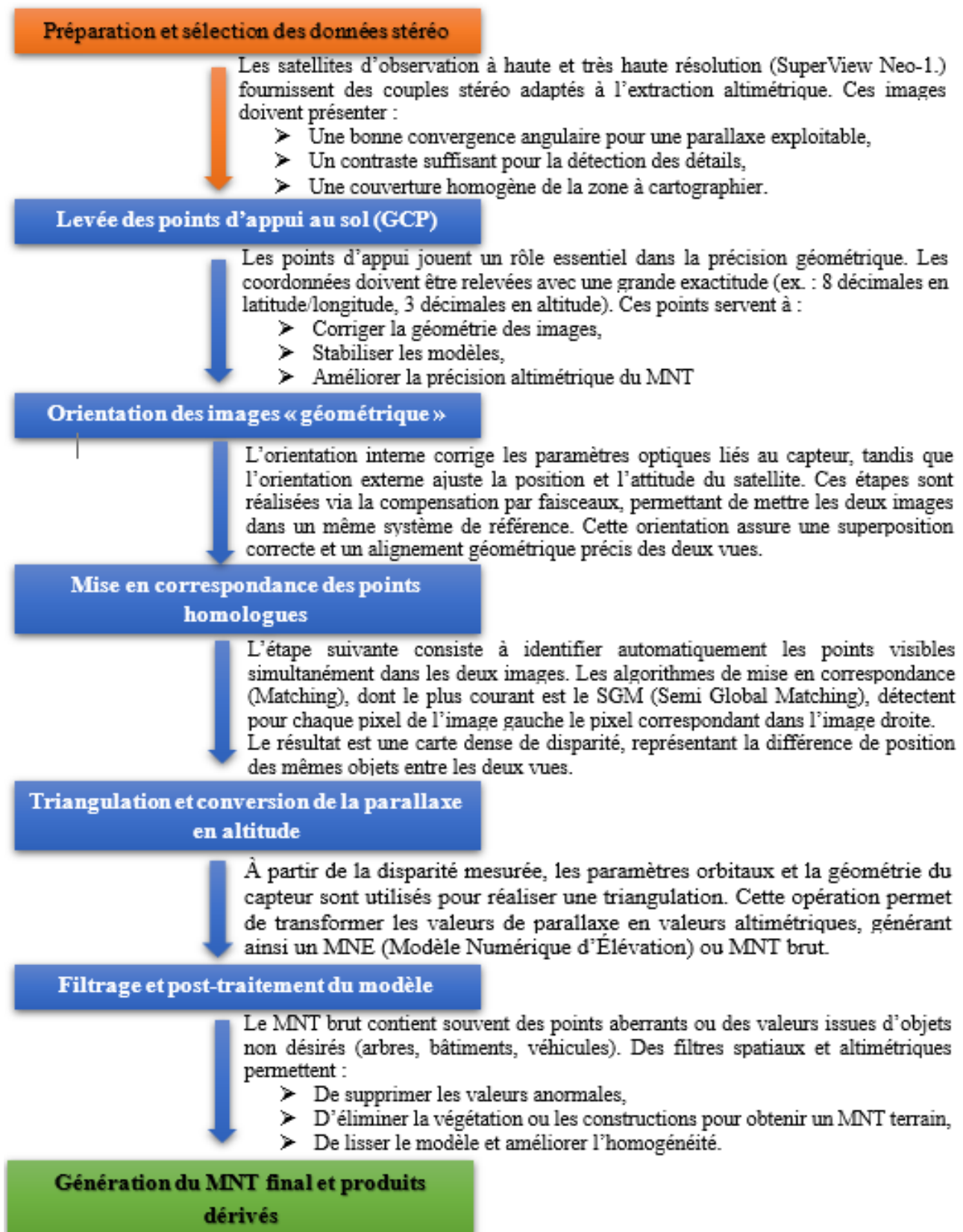


Figure 18: Organigramme général de la réalisation du MNT

Les traitements photogrammétriques et géodésiques mis en œuvre ont conduit, après la réalisation de l'ensemble de la chaîne de traitement, à la production d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à très haute résolution, répondant pleinement aux exigences des analyses hydrologiques et de la modélisation hydraulique, comme illustré sur la figure suivante. Le MNT a été généré avec une maille spatiale de 1 mètre, permettant une restitution fine et détaillée du relief naturel. Issu d'un processus rigoureux de filtrage visant à éliminer les objets hors sol tels que les bâtiments, la végétation et les infrastructures, ce modèle représente fidèlement la topographie du terrain nu. Il constitue ainsi une donnée fondamentale pour l'identification précise des axes d'écoulement, la caractérisation des plaines inondables et la délimitation des zones potentielles de débordement, garantissant une base altimétrique fiable pour les simulations hydrauliques à haute résolution.

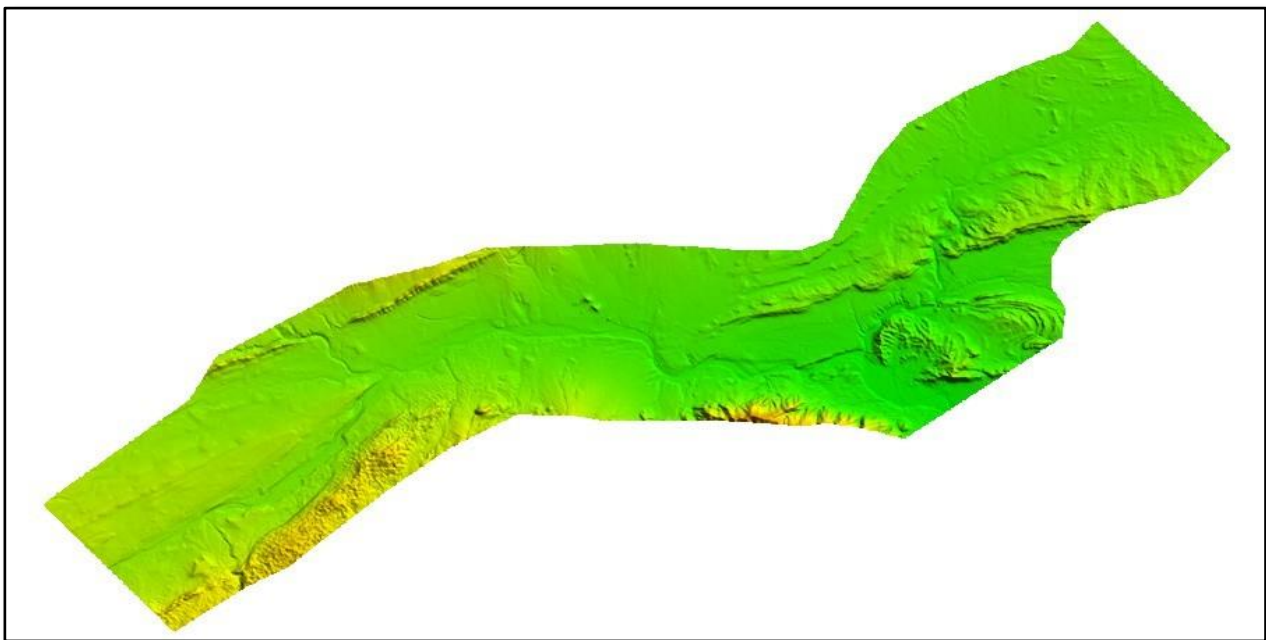


Figure 19: Vue Globale du MNT de la région "Ain Sefra - Tiout"

b.2.2. Réalisation d'Ortho-Images

L'orthorectification correspond à une correction géométrique avancée des images satellitaires visant à restituer la scène observée comme si elle avait été acquise selon une prise de vue strictement verticale, dite au nadir en télédétection. Cette opération permet de supprimer les déformations induites par le relief du terrain, la géométrie de prise de vue et les caractéristiques du capteur, afin de rendre l'image parfaitement superposable à une carte de référence. La mise en œuvre de cette correction repose sur la disponibilité d'informations précises relatives à la position du satellite au moment de l'acquisition, à son attitude (orientation spatiale) ainsi qu'à l'orientation et à la géométrie interne de l'instrument embarqué.

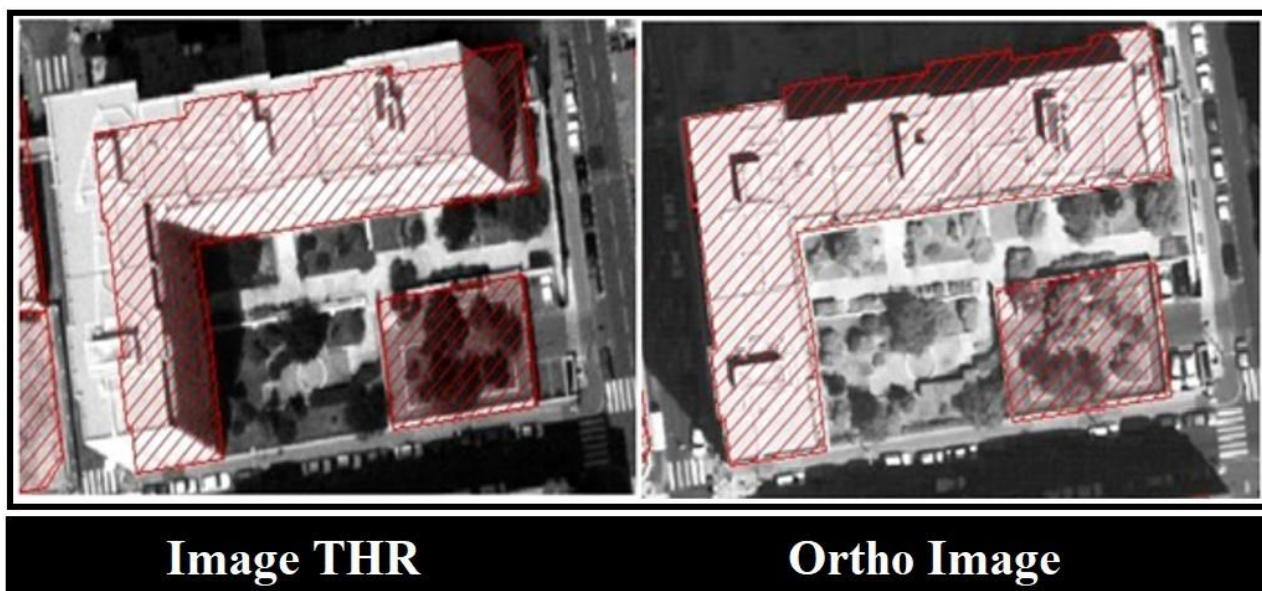


Figure 20: Technique d'Orthoréctification d'une Image THR

L'intégration conjointe de ces paramètres garantit une géolocalisation fiable et une cohérence spatiale élevée des images orthorectifiées, qui est illustrée sur l'organigramme suivant :

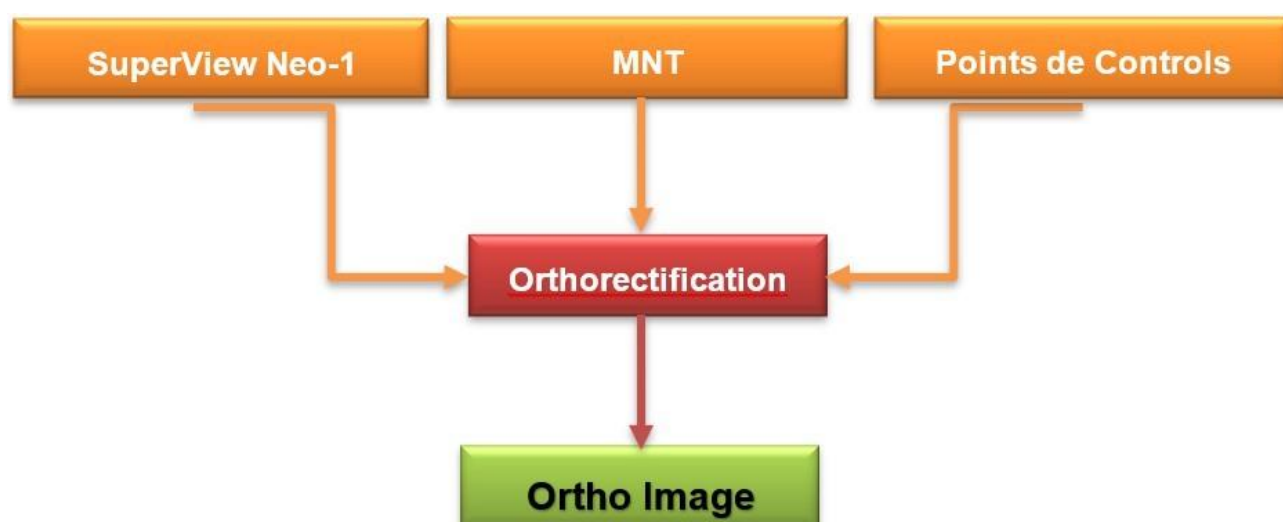


Figure 21: Organigramme de la Technique d'Ortho rectification

[1] Ortho rectification des Images acquise (SUPERVIEW NEO-1)

L'évaluation des zones inondables à partir des images satellitaires de très haute résolution SuperView Neo-1 permet d'obtenir une vision homogène et détaillée du risque à l'échelle de chaque zone concernée. L'exploitation de ces données spatiales fines facilite l'identification précise des territoires pour lesquels les actions publiques de prévention et de réduction des impacts liés aux inondations doivent être priorisées. Dans ce contexte, la chaîne de traitements méthodologiques, telle que décrite par l'organigramme proposé, conduit naturellement à l'orthorectification de notre image, étape indispensable pour garantir la fiabilité spatiale des analyses ultérieures.

Dans ce cadre, les différentes couches d'informations thématiques et les cartes finales d'aléa et de risque d'inondation sont élaborées et présentées sur des images SuperView Neo-1 d'une

résolution spatiale de 30 cm. Cette très haute résolution permet de caractériser avec précision l'extension des zones inondées et le degré d'exposition, en particulier au niveau des zones bâties, des infrastructures et des équipements sensibles. Elle constitue ainsi une base technique essentielle pour le partage de l'information, la hiérarchisation des secteurs à risque élevé et l'aide à la décision en matière d'aménagement et de gestion des risques. Toutefois, afin d'exploiter pleinement ce potentiel, la nécessité de l'orthorectification de notre image SuperView Neo-1 s'impose pour assurer une parfaite cohérence géométrique avec les autres données géospatiales.

Les images satellitaires acquises présentent en effet des déformations géométriques liées à la géométrie de prise de vue et aux variations du relief. Il est donc nécessaire de procéder à une étape d'orthorectification afin de corriger ces distorsions, d'assurer un positionnement spatial précis et de garantir une superposition rigoureuse avec les données cartographiques de référence et les couches thématiques utilisées dans l'analyse du risque d'inondation. Les résultats de ce processus d'orthorectification sont illustrés sur la figure suivante.



Figure 22: Illustration d'ortho rectification de l'image Super View NEO-1

[2] Fusion des images PAN et Multispectrales :

La fusion d'images satellitaires est une technique avancée de traitement permettant de combiner les images panchromatiques (PAN) et multispectrales pour produire un seul produit final enrichi en informations. Ce processus améliore à la fois la résolution spatiale, en restituant les détails fins du terrain et des infrastructures, et la résolution spectrale, en conservant les caractéristiques des différentes bandes (types de végétation, surfaces en eau, matériaux bâtis, etc.). La méthode de pansharpening est couramment utilisée pour réaliser cette fusion, générant ainsi une image couleur haute résolution adaptée à l'interprétation thématique et à l'analyse précise des zones urbaines, agricoles ou naturelles. Les résultats de cette fusion, illustrée sur la

figure suivante, offrent un support optimal pour la cartographie détaillée, l'évaluation des risques et les applications de modélisation spatiale.



Figure 23: Fusion de l'image PAN avec les Multispectrales
Figure 30: fusion de l'image PAN avec les Multispectrales

c. Préparation et intégration des données d'entrée

La première phase méthodologique consiste à rassembler et structurer l'ensemble des données nécessaires à la construction du modèle. Ces données d'entrée constituent la base sur laquelle repose la robustesse scientifique du modèle hydraulique :

1) MNT de très Haute Résolution (1 m)

Issu d'images stéréoscopiques de résolution 30 cm, ce MNT d'une précision remarquable permet :

- Une extraction fine des talwegs, lits mineurs et zones d'expansion,
- La génération d'une géométrie hybride 1D/2D fidèle aux structures réelles des oueds et aux dépressions topographiques.

2) Carte de Manning

La définition des paramètres hydrauliques du modèle s'appuie sur l'analyse combinée de l'occupation du sol, de la nature des matériaux en surface et de la base de données attributaire des coefficients comme il est illustré sur la figure 21.

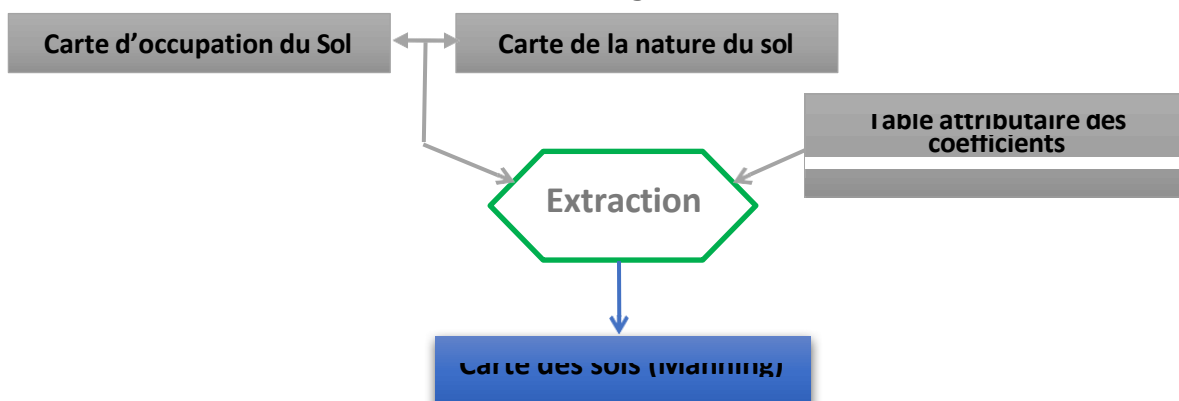


Figure 24: Organigramme d'extraction de coefficients de rugosité

À partir des images de très haute résolution, les différentes classes d'occupation du sol et les types de sols (sables, limons, zones urbanisées, substrats rocheux, etc.) ont été identifiés puis associés à leurs coefficients hydrauliques correspondants, notamment les valeurs de Manning et les paramètres granulométriques. Cette étape permet d'attribuer à chaque zone une signature physique cohérente comme le montre la figure 21, essentielle pour garantir la fiabilité des simulations hydrauliques du modèle 1D/2D.

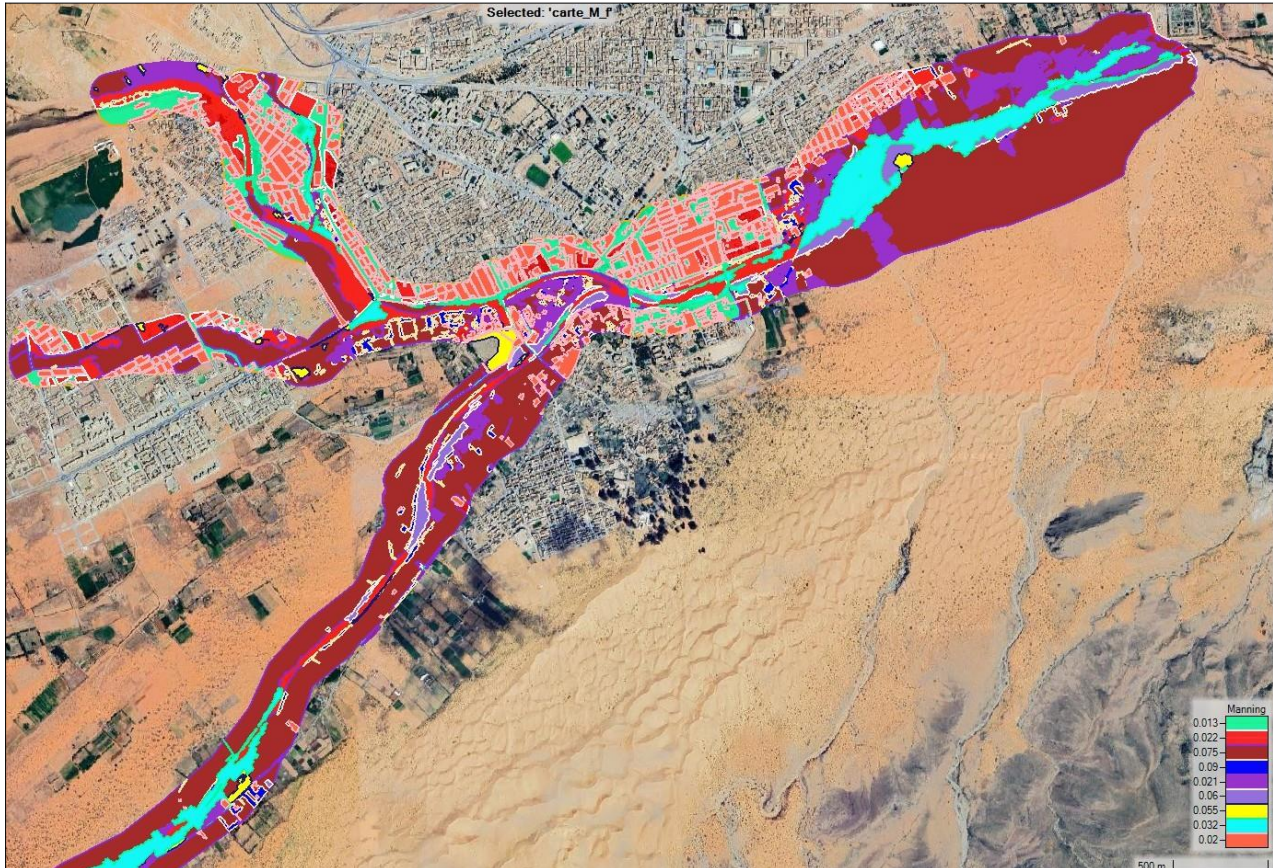


Figure 25: Carte de Manning d'Ain Sefra

Figure 31: carte manning d'Ain sefra

3) Occupation du sol

Une classification détaillée des structures au sol (zones urbanisées, lits graveleux, sols nus, zones agricoles, palmeraies, etc.) permet de :

- Générer la carte des coefficients de rugosité de Manning spatialement distribuée
- Représenter la dissipation d'énergie et les vitesses d'écoulement dans les différentes unités géomorphologiques.

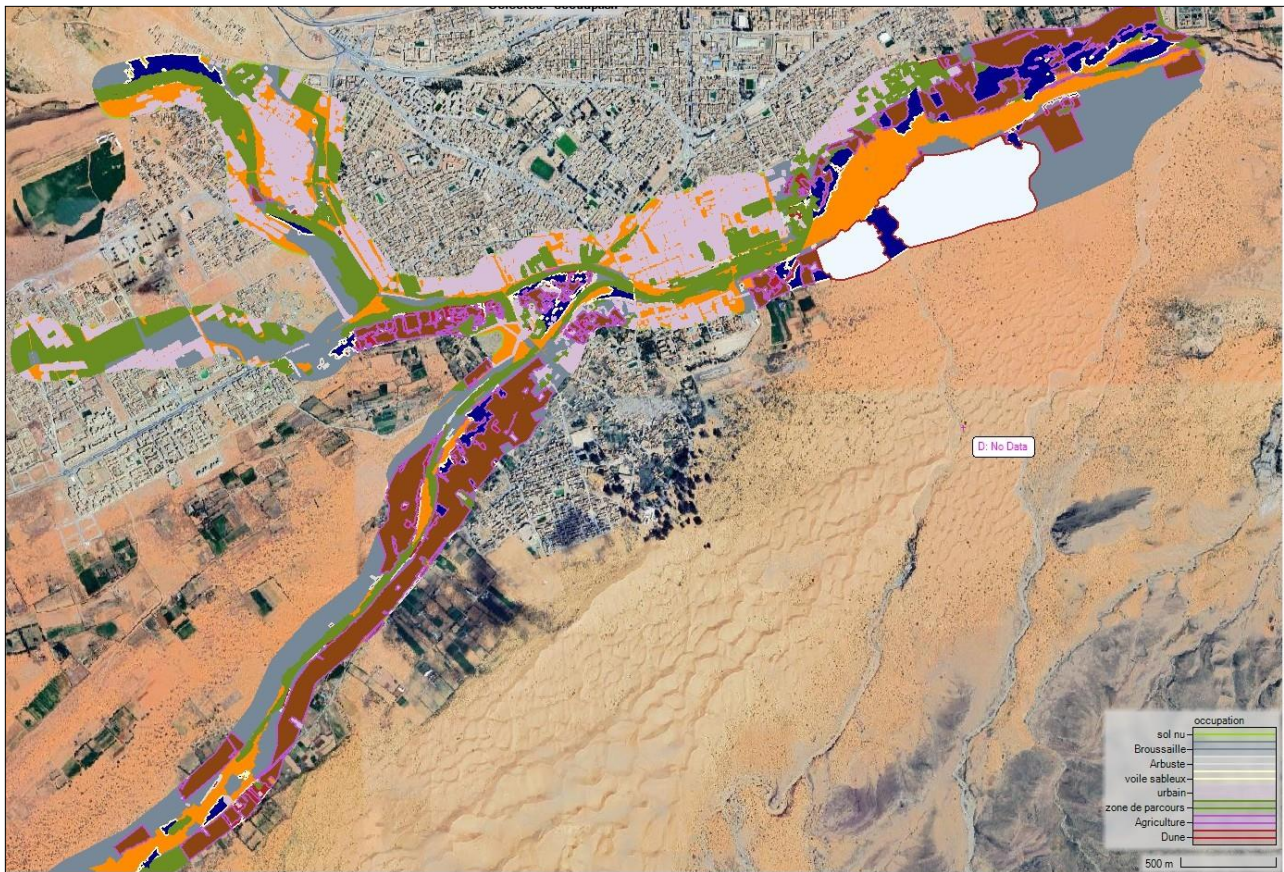


Figure 32: carte d'occupation du sol d'Ain Sefra

Figure 26: carte d'occupation du sol d'Ain Sefra

4) Carte de la nature du sol

Issue de l'analyse à très haute résolution (30 cm), cette carte renseigne :

- La granulométrie,
- La cohésion,
- Et les propriétés hydromécaniques.

Ces paramètres enrichissent la modélisation des contraintes de frottement, améliorant la représentation physique des écoulements débordants.

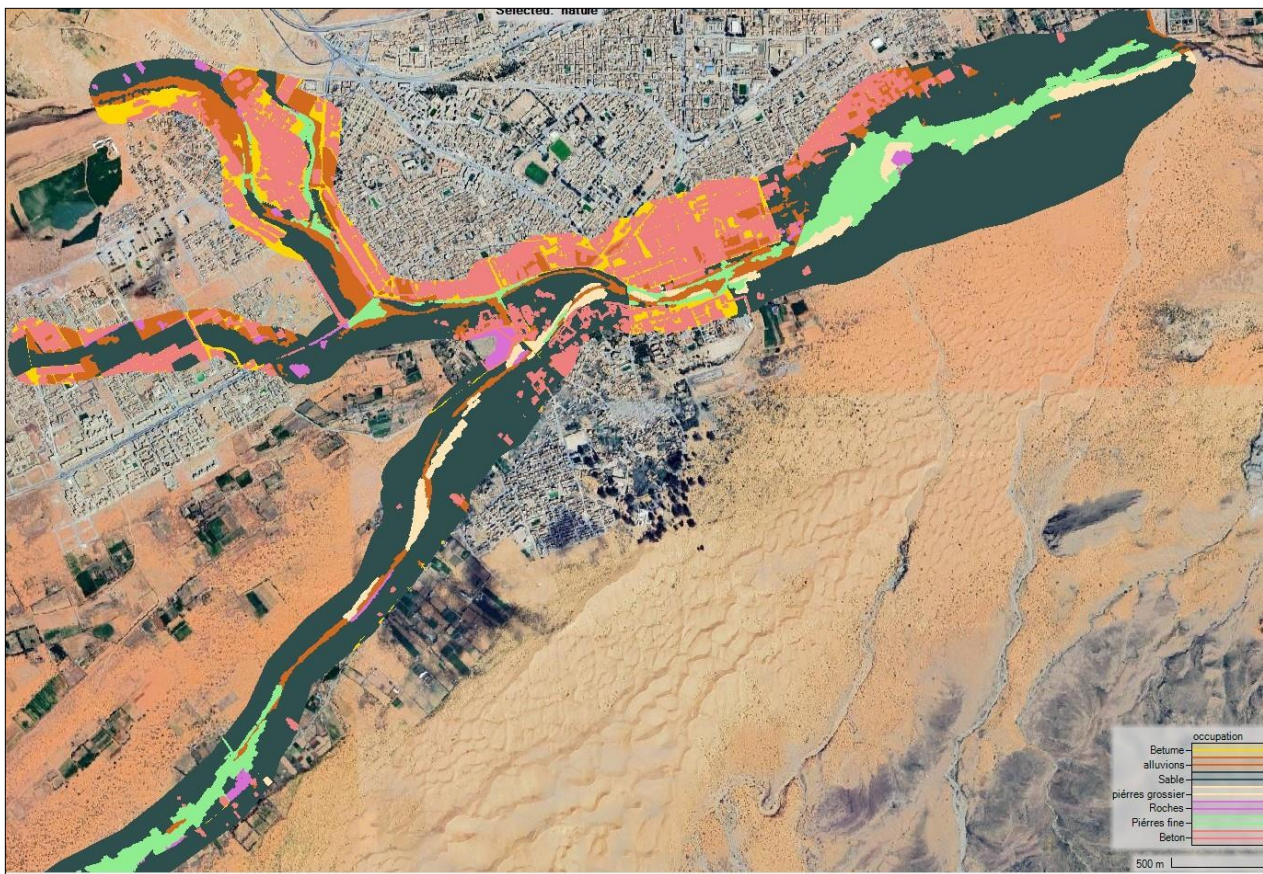


Figure 33: carte de la nature du sol d'Ain seфра

Figure 27: Carte de la nature du sol d'Ain Seфра

5) Cartes de sédiments pour la modélisation hydraulique

Le transport solide a été modélisé à partir d'une distribution granulométrique détaillée comprenant des sédiments fins, des graviers et des éléments grossiers, définis selon des classes normalisées. Les sédiments cohésifs ont été caractérisés par des paramètres spécifiques de contrainte critique et de coefficient d'érosion, tandis que les matériaux non cohésifs ont été simulés à l'aide de modèles de charriage adaptés, notamment le modèle de Meyer-Peter et Müller.

Pour cette étude, la modélisation hydraulique et sédimentaire repose sur un jeu unique de données granulométriques et paramétriques issu de la Bed Gradation Input Table de HEC-RAS. Cette base de données ne se limite pas à des classes granulométriques simplifiées, mais fournit une description détaillée des matériaux et des paramètres de transport solide, garantissant une représentation réaliste du comportement morphodynamique des lits et des lits majeurs lors de la crue exceptionnelle du 08 septembre 2024.

1. Classes granulométriques et cohésion

Chaque ensemble du Tableau d'entrée de la gradation du lit distingue trois catégories de sédiments:

- **Fines** : Clay, VFM, FM, MM, CM, VFS, FS, MS, CS, VCS
- **Graviers** : VFG, FG, MG, CG, VCG
- **Blocs/roches** : SC, LC, SB, MB, LB

Par ailleurs, les paramètres cohésifs et de transport sont détaillés pour chaque set :

- **Cohesive Param (0/1)** : indique si le sédiment est cohésif (1) ou non (0)
- **tc et M** : vitesse critique de transport et coefficients pour le modèle d'érosion
- **tc (MW) et M (MW)** : paramètres adaptés au modèle Meyer-Peter Müller si appliqué

2. Correspondance avec l'occupation du sol et la rugosité :

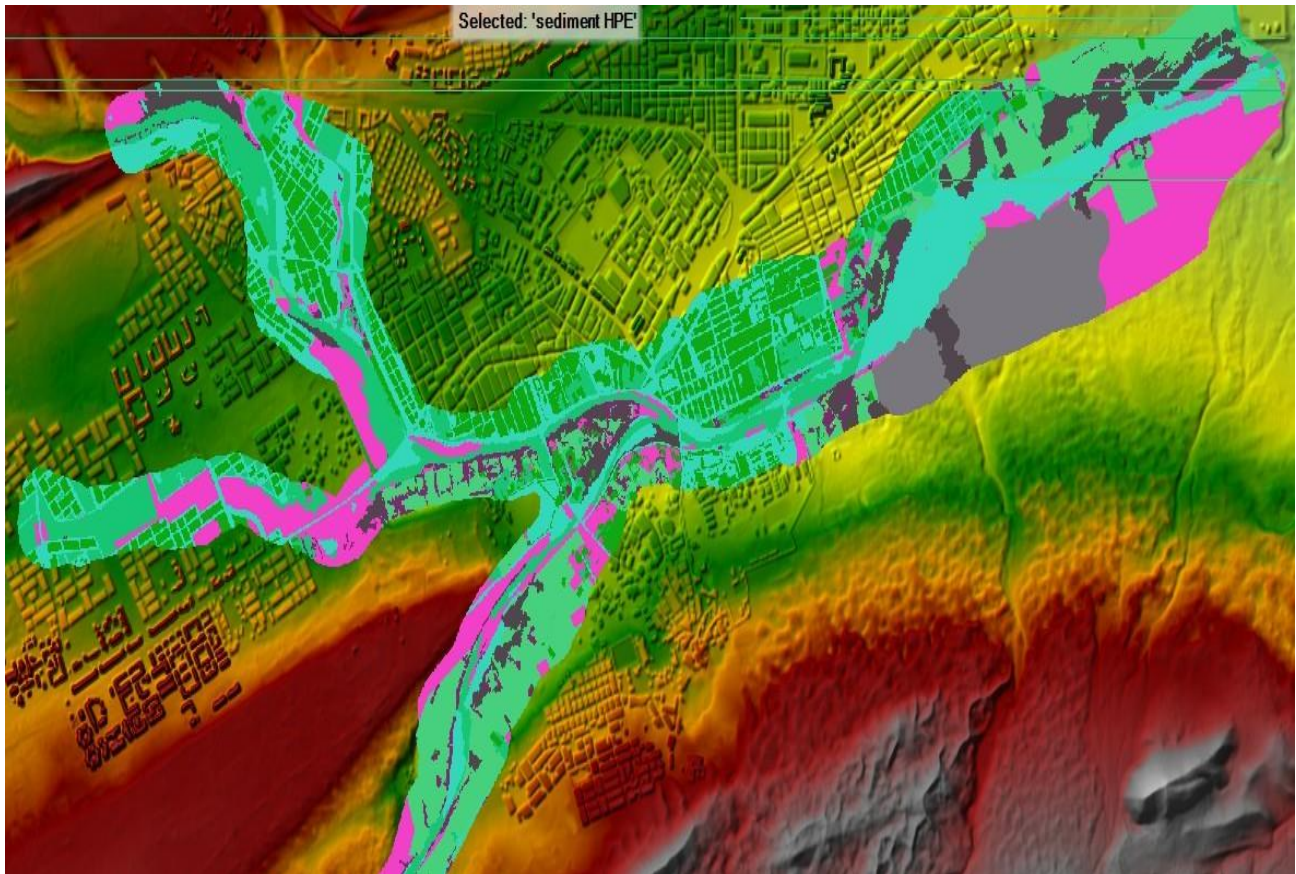


Figure 28: Carte des paramètres du sédiment

Figure 34: carte des parametres du sediment

- **Lit majeur béton/bitume** : toutes les classes granulométriques = 0, Cohesive Param = 0, tc et M = 0 → zone imperméable sans mobilité sédimentaire.
- **Lit naturel sable/terre** : dominance de fines (Clay, VFM, FM, MM), Cohesive Param = 1 pour sols argileux, tc et M adaptés pour sable fin.
- **Lit caillouteux / rocheux** : forte proportion de graviers et blocs (GF, CG, VCG, SC, LC), faible présence de fines, Cohesive Param = 0, tc et M adaptés aux matériaux grossiers.

Tableau 1: Fenêtre de HEC RAS pour les entrées des paramètres du sédiment

Bed Gradation Input Table

Number of Input Bed Gradations: 7 sets

	Name	sable/terre	Sable + pierre:	Zone graviers	Zone caillouteux	Zone très pierreux	cheuse / blocs
1	Clay (0.002-0.004)	10	5	0	5	5	0
2	VFM (0.004-0.008)	20	10	5	10	5	0
3	FM (0.008-0.016)	30	25	10	15	10	5
4	MM (0.016-0.032)	20	25	20	20	15	10
5	CM (0.032-0.0625)	10	15	25	20	15	10
6	VFS (0.0625-0.125)	5	10	10	10	15	10
7	FS (0.125-0.25)	0	5	5	10	10	5
8	MS (0.25-0.5)	0	5	5	5	5	5
9	CS (0.5-1)	0	0	5	5	5	5
10	VCS (1-2)	0	0	0	0	5	5
11	VFG (2-4)	0	0	5	5	10	10
12	FG (4-8)	0	0	10	10	15	15
13	MG (8-16)	0	0	10	15	15	20
14	CG (16-32)	0	0	10	10	15	20
15	VCG (32-64)	0	0	5	5	10	15
16	SC (64-128)	0	0	0	5	5	10
17	LC (128-256)	0	0	0	0	5	10
18	SB (256-512)	0	0	0	0	0	5
19	MB (512-1024)	0	0	0	0	0	5
20	LB (1024-2048)	0	0	0	0	0	5
21	Cohesive Param (0/1)	1	1	0	0	0	0
22	tc	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.1
23	M	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8
24	tc (MW)	0.015	0.025	0.04	0.05	0.06	0.08
25	M (MW)	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7

OK Cancel

Tableau 2 : Fenetre de HEC RAS pour les entrees des parametres du sediment

Tableau 2: Répartition des 7 Classes granulométriques

Set	Type de lit	Description principale
1	Lit majeur béton/bitume	Imperméable, aucune mobilité
2	Lit sable/terre	Dominance fines, sol argileux
3	Sable + pierres fines	Mélange fines et graviers fins
4	Zone graviers / pierres moyennes	Plus de GF/CG, moins de fines
5	Zone caillouteuse / hétérogène	Mix équilibré fines et graviers, petites pierres
6	Zone très pierreuse / gravier grossière	Forte proportion GF/CG/VCS
7	Zone rocheuse / blocs	Prédominance gros graviers et blocs (SC, LC, MB, LB)

Tableau 3: repartition des 7 classes granulometriques

Chaque set est défini par les pourcentages précis de chaque classe granulométrique, ainsi que les valeurs cohésives et de transport (t_c , M , t_c MW, M MW) nécessaire pour le module Sediment Transport de HEC-RAS.

3. Utilisation de la Base données complète :

L'intégration de cette BDD pour Aïn Sefra permet de :

- Simuler avec précision la mobilisation et le transport solide (sables, limons, graviers, blocs) dans le lit actif et majeur,
- Identifier les zones d'érosion et d'aggradation critiques,
- Évaluer les impacts sur la capacité hydraulique et le profil en long des oueds,
- Coupler de manière optimale avec la carte de rugosité Manning (30 cm) pour restituer les interactions fines entre écoulements et substrat.

Tableau 3:Tableau de paramètres granulométriques du lit : «7 Classes »

Name (Classe)	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Set 7
Clay	0	10	5	0	5	5	0
VFM	0	20	10	5	10	5	0
FM	0	30	25	10	15	10	5
MM	0	20	25	20	20	15	10
CM	0	10	15	25	20	15	10
VFS	0	5	10	10	10	15	10
FS	0	0	5	5	10	10	5
MS	0	0	5	5	5	5	5
CS	0	0	0	5	5	5	5
VCS	0	0	0	0	0	5	5
VFG	0	0	0	5	5	10	10
FG	0	0	0	10	10	15	15
MG	0	0	0	10	15	15	20
CG	0	0	0	10	10	15	20
VCG	0	0	0	5	5	10	15
SC	0	0	0	0	5	5	10
LC	0	0	0	0	0	5	10
SB	0	0	0	0	0	0	5
MB	0	0	0	0	0	0	5
LB	0	0	0	0	0	0	5
Cohesive Param (0/1)	0	1	1	0	0	0	0
Tc	0	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.1
M	0	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8
tc (MW)	0	0.015	0.025	0.04	0.05	0.06	0.08
M (MW)	0	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7

Tableau 4: tableau de parametres granulometriques du lit

4. Diagramme de gradation

Le diagramme de gradation illustre la répartition granulométrique des sept sets, offrant un outil visuel essentiel pour la validation et le calage du modèle sur l'ensemble des localités. Cette approche garantit un niveau de détail et de réalisme exceptionnel, particulièrement adapté aux conditions semi-arides et urbaines des lits d'oueds de la région de Ain sefra.

✓ Débit d'entrée estimé par la méthode de Strickler

Le débit de crue utilisé dans la modélisation hydraulique ne constitue pas une valeur théorique, mais un débit déjà estimé avec précision au préalable grâce à la méthode de Strickler, appliquée aux laisses de crue relevées sur le terrain. Cette estimation intègre simultanément la pente locale, la rugosité et la géométrie des lits concernés, permettant d'obtenir un débit réaliste et cohérent avec les observations hydrologiques post-crues. Ce débit validé sert ainsi comme donnée d'entrée fiable pour l'ensemble des simulations 1D/2D du modèle HEC-RAS.

c. Approche de calcul de débit

L'évaluation des débits de crue repose sur une démarche de terrain combinant l'analyse géométrique du lit de l'oued et l'exploitation des indices laissés par les crues. Cette approche permet d'estimer la ligne d'eau et la pente hydraulique associées aux plus hautes eaux observées.

1) Choix de la section d'étude :

La première étape consiste à identifier une section transversale régulière et représentative du cours d'eau. Cette section doit présenter une géométrie stable et un écoulement relativement uniforme, c'est-à-dire sans contre-courants, ni zones de remous, ni obstacles majeurs susceptibles de perturber la dynamique de la crue.

Ce choix est essentiel pour garantir la fiabilité des calculs hydrauliques et pour permettre une application correcte des formules empiriques de calcul du débit.

2) Observation des laisses de crue

Les laisses de crue (amas de débris végétaux, branchages, plastiques agricoles, sédiments déposés en hauteur, etc.) constituent des indicateurs naturels des plus hautes eaux (PHE) atteintes lors d'un événement extrême.

Leur repérage sur le terrain permet de déterminer la cote des PHE et de reconstituer la pente de la ligne d'eau entre deux sections successives.

En combinant ces observations avec les données topographiques du lit (largeur, profondeur, pente et rugosité), il devient possible de déduire le débit maximal ayant transité durant la crue.



Figure 29: recensement des laisses des crues

3) Calcul du débit par la formule de Manning-Strickler

Le calcul du débit dans une section d'oued repose sur la relation empirique de Manning-Strickler, largement utilisée en hydraulique à surface libre pour les écoulements naturels. Cette formule relie le débit à la géométrie de la section, à la rugosité du lit et à la pente de la ligne d'eau.

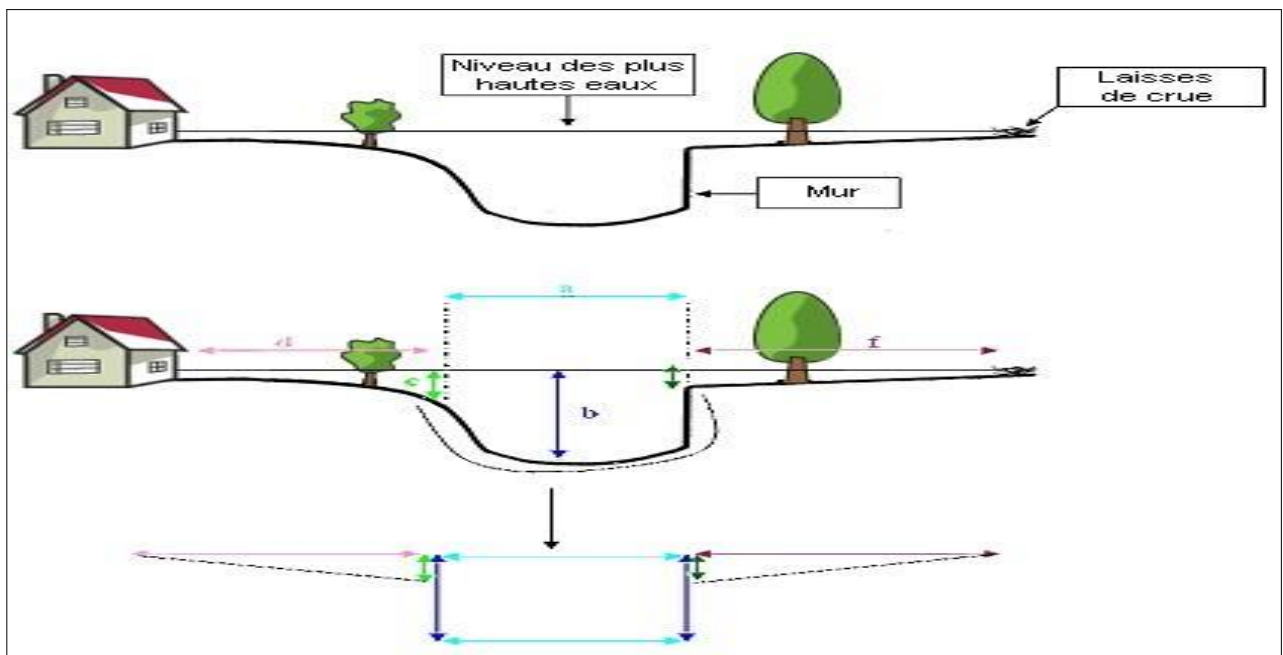


Figure 30: Calcul du débit

✚ Formulation de la relation :

La formule de Manning s'exprime sous la forme :

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

Et sous la forme de Strickler :

$$Q = K_s A R^{2/3} S^{1/2}$$

Où :

- Q : débit (m³/s),
- A : surface mouillée de la section (m²),
- R : rayon hydraulique = A/PA/PA/P (m), avec P le périmètre mouillé,
- S : pente de la ligne d'eau,
- n : coefficient de rugosité de Manning,
- Ks=1/n: coefficient de Strickler (m^{1/3}/s).

✚ Détermination des paramètres

- Surface mouillée (A) et périmètre mouillé (P) sont calculés à partir du profil en travers du lit de l'oued, relevé sur le terrain ou extrait du MNT.
- La pente hydraulique (S) est déterminée à partir des plus hautes eaux observées (PHE) entre deux sections consécutives.
- Le coefficient de rugosité (n) dépend de la nature du lit :
 - 0,025 à 0,035 pour un lit régulier à fond sableux,
 - 0,035 à 0,050 pour un lit grossier ou caillouteux,
 - 0,050 à 0,070 pour un lit irrégulier avec blocs, végétation ou méandres marqués.

✚ Cas d'Aïn Sefra

Dans le cas d'Aïn Sefra, la morphologie du lit présente une géométrie irrégulière et une rugosité moyenne à élever, liée à la présence de galets, d'alluvions à pierres fines à grossières et de végétation. Qui correspondent à une valeur de n = 0,013 à 0,075 est généralement adoptée.

La pente moyenne du lit, déduite de la topographie locale et des PHE, varie entre 0,001 et 0,006 selon les tronçons.

En appliquant la formule de Manning-Strickler avec ces paramètres et les mesures géométriques de la section (A et R), on obtient une estimation fiable du débit de pointe observé lors des crues récentes.

Ces résultats permettent ensuite de calibrer le modèle HEC-RAS, d'ajuster les conditions aux limites et de reproduire la propagation de la crue sur le tronçon étudié.

La démarche adoptée repose sur l'observation directe de la crue du 08 septembre 2024, Le débit cumulé en aval a été estimé à 1 850 m³/s sur la base des laisses de crues relevées sur l'ensemble des oueds contribuant,

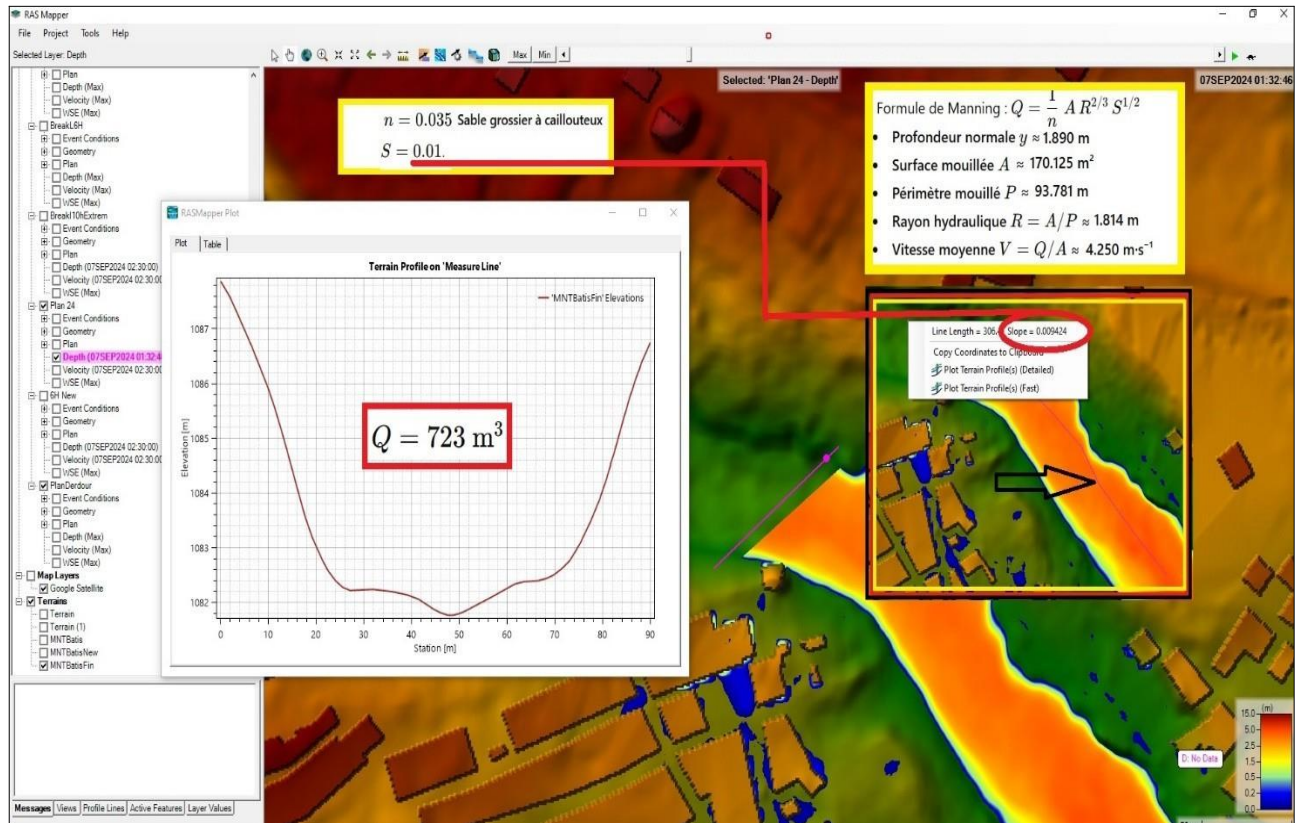


Figure 35: calcul du débit de calage à la confluence des deux affluents Tinkourt et Mouileh

Figure 31: Calcul du débit de calage à la confluence des deux affluents Tinkourt et Mouileh

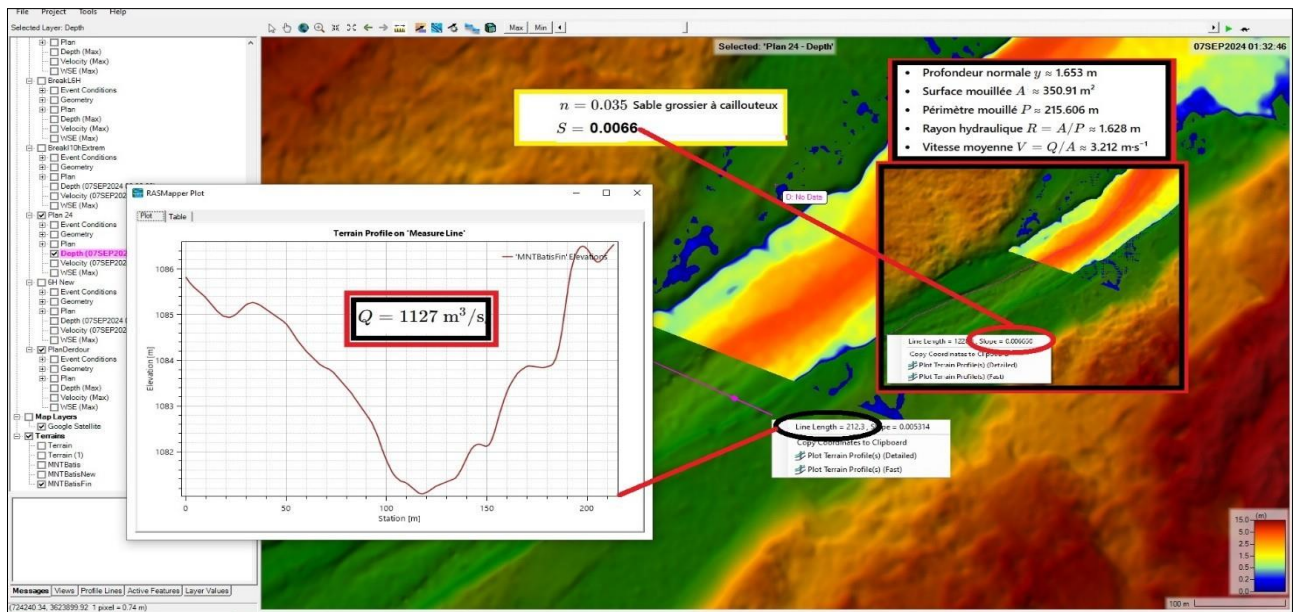


Figure 32: Calcul du débit de calage de l'Oued el Breidj

Figure 36: calcul du débit de calage de l'oued el Breidj

✓ Carte de régénération de la crue de septembre 2024

La carte de régénération de la crue de septembre 2024, déjà détaillée dans la section méthodologique, constitue dans cette phase un référentiel spatial majeur permettant d'identifier avec précision l'étendue réelle de l'inondation. Elle sert de support essentiel au calage du

modèle, en offrant une empreinte fiable de la submersion observée. Produite par télédétection multispectrale, elle fournit :

- L'enveloppe spatiale de l'inondation,
- Une référence indispensable au processus de calage.

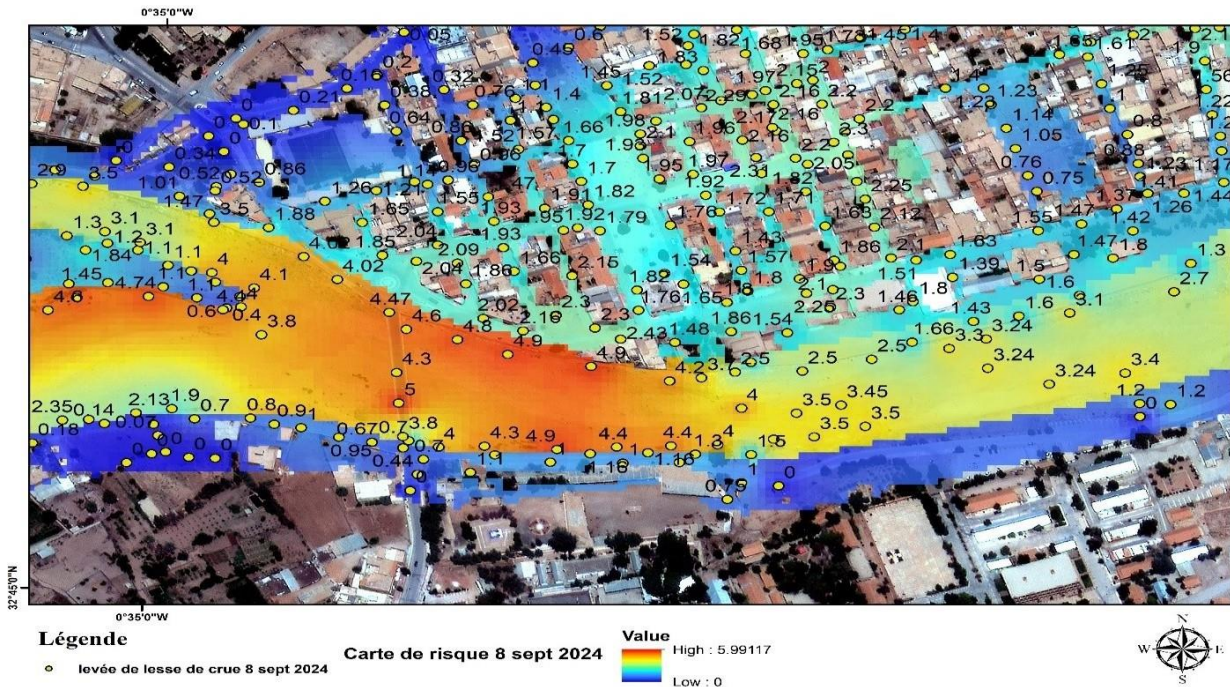


Figure 33: Carte de régénération de la crue survenue le 08 septembre 2024

Figure 37: carte de regeneration de la crue survenue le 08septembre 2024

✓ Points GPS des laisses de crue

De la même manière, les points GPS des laisses de crue dont la procédure de mesure a également été décrite préalablement interviennent ici comme indicateurs de validation quantitative, en assurant un contrôle rigoureux de la cohérence des hauteurs d'eau simulées. Ensemble, ces deux sources d'information permettent de consolider la crédibilité du modèle hydraulique et de garantir une confrontation directe entre les simulations et la réalité du terrain. Mesurés sur le terrain, ils permettent :

- Une validation fine et quantitative,
- Un contrôle de la cohérence verticale des hauteurs d'eau simulées.



Figure 38: points GPS des laisses de crue

Figure 34: Points GPS des laisses de crue

a. Construction de la géométrie mixte 1D/2D

La modélisation hydraulique des crues repose sur l'élaboration d'une géométrie hydraulique cohérente, qui constitue l'élément central de toute simulation sous HEC-RAS, en particulier dans des environnements morphologiquement complexes et hétérogènes. La géométrie du modèle a été construite à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de très haute résolution (1 m). Une approche de modélisation mixte 1D/2D a été adoptée, combinant des sections transversales 1D pour la représentation du chenal principal et des axes d'écoulement préférentiels, avec des domaines 2D destinés à la simulation des écoulements latéraux sur le lit majeur et les zones urbanisées. **La figure de vue globale de la géométrie mixte** illustre l'organisation spatiale du modèle hydraulique ainsi que la connectivité entre les composantes 1D et 2D.

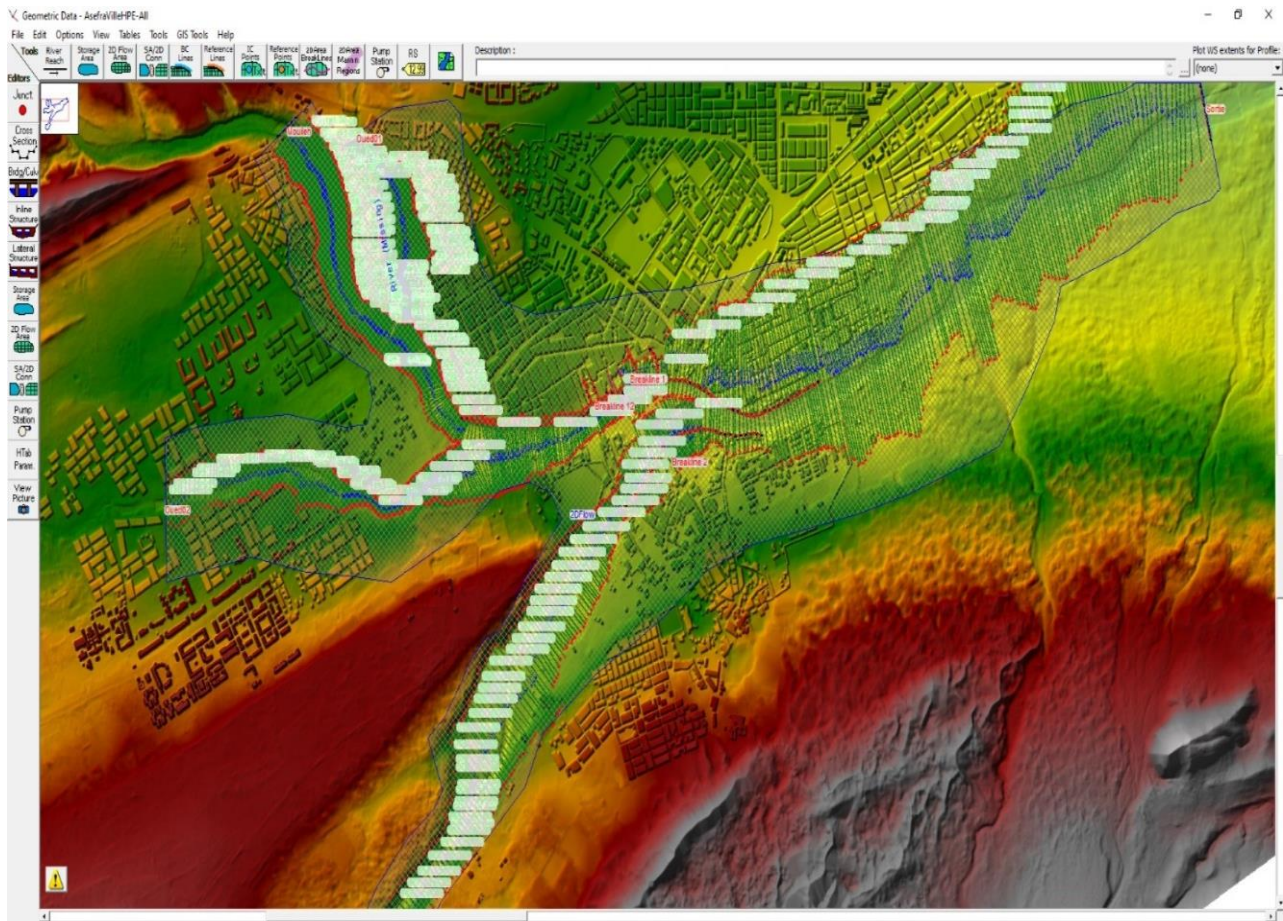


Figure 39: vue globale de a geometrie Mixte en 1D<<profile>> et 2D<<Mesh>>

Figure 35: Vue Globale de la Géométrie Mixte en 1D « Profile » et 2D « Mesh »

Afin d'assurer une représentation réaliste des conditions d'écoulement et des phénomènes de débordement, les principaux ouvrages hydrauliques et infrastructures urbaines ont été intégrés explicitement dans la géométrie du modèle. Ces éléments comprennent notamment les ponts, dalots, buses, ouvrages de franchissement et protections longitudinales, modélisés conformément aux fonctionnalités dédiées de HEC-RAS. La figure vue globale de la géométrie mixte et l'intégration des ouvrages met en évidence l'implantation de ces structures au sein du schéma hydraulique et leur interaction avec les domaines 1D et 2D, soulignant leur rôle dans le contrôle des écoulements, la redistribution des vitesses et la délimitation des zones potentiellement inondables.

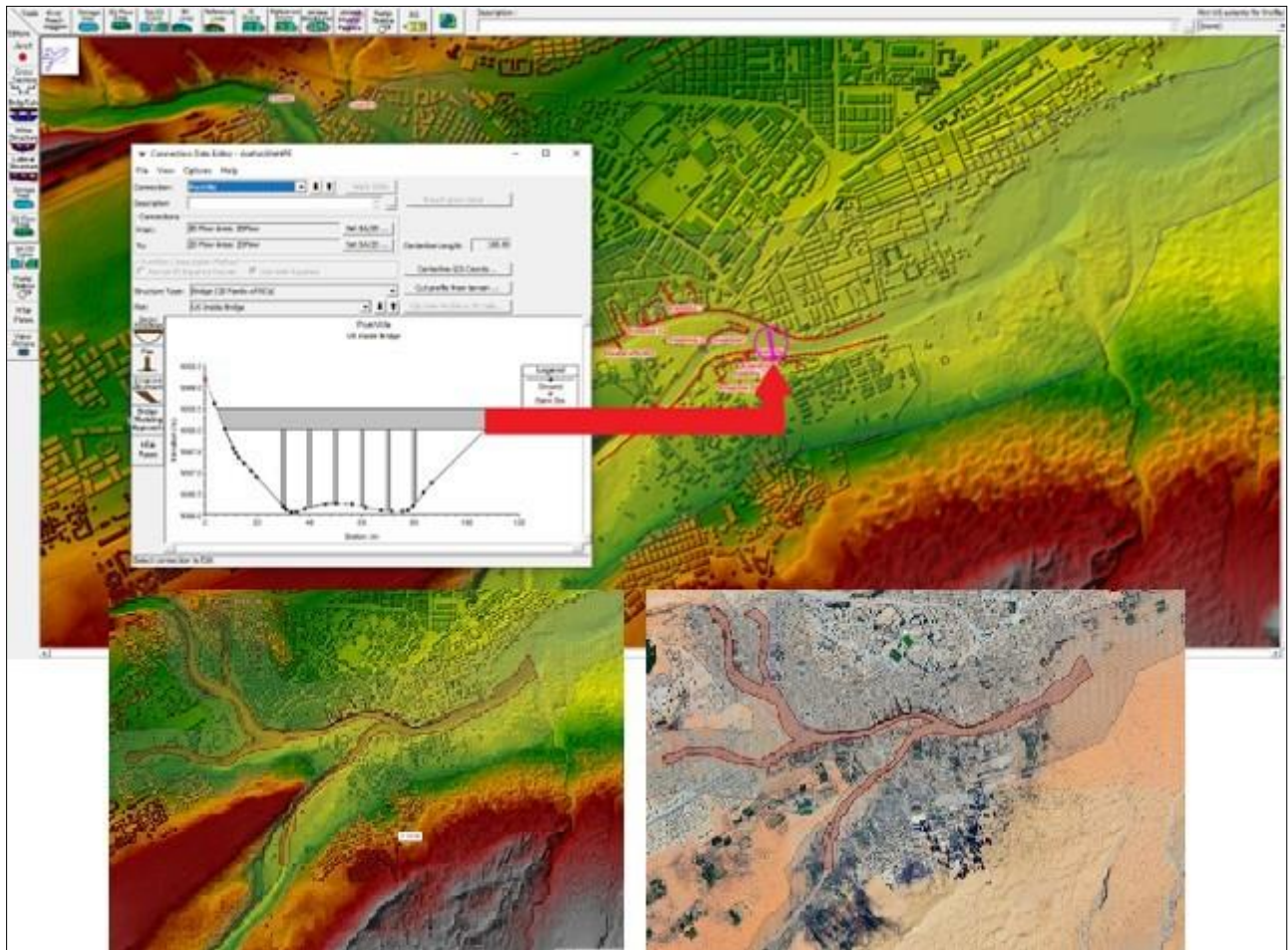


Figure 40: réalisation de la géométrie mixte 1D/2D

Figure 36: Réalisation de la géométrie mixte 1D/2D

1) Modélisation 1D

La modélisation unidimensionnelle a été appliquée aux segments où l'organisation morphologique impose un écoulement principalement longitudinal. Ce choix est particulièrement pertinent dans :

- Les lits bien encaissés des oueds de El Breidj , El Mouileh, el Handjir et Chaabat el Mouileh,
- Les sections où le chenal est dominant et dirige le transport du débit,
- Les gorges et passages étroits observés autour des principaux talwegs.

Dans ces configurations, le schéma 1D assure :

- Une représentation fine du profil énergétique,
- Une modélisation précise des pertes de charge,
- Un calcul rigoureux du transfert du débit dans les zones confinées,
- Un suivi cohérent de la variation spatiale des hauteurs d'eau.

L'organigramme de la géométrie 1D se concentre sur la définition morphologique de l'oued, en mettant en évidence le tracé du lit principal, la délimitation du lit mineur et du lit majeur, ainsi que la génération des profils en travers. Le tracé du lit d'oued constitue l'axe hydraulique de référence, tandis que la distinction entre lit mineur et lit majeur permet de représenter les zones d'écoulement en régime ordinaire et en période de crue. Les profils en travers, extraits perpendiculairement à l'axe de l'oued, décrivent la géométrie locale du cours d'eau et assurent une représentation fidèle des variations morphologiques le long du chenal.

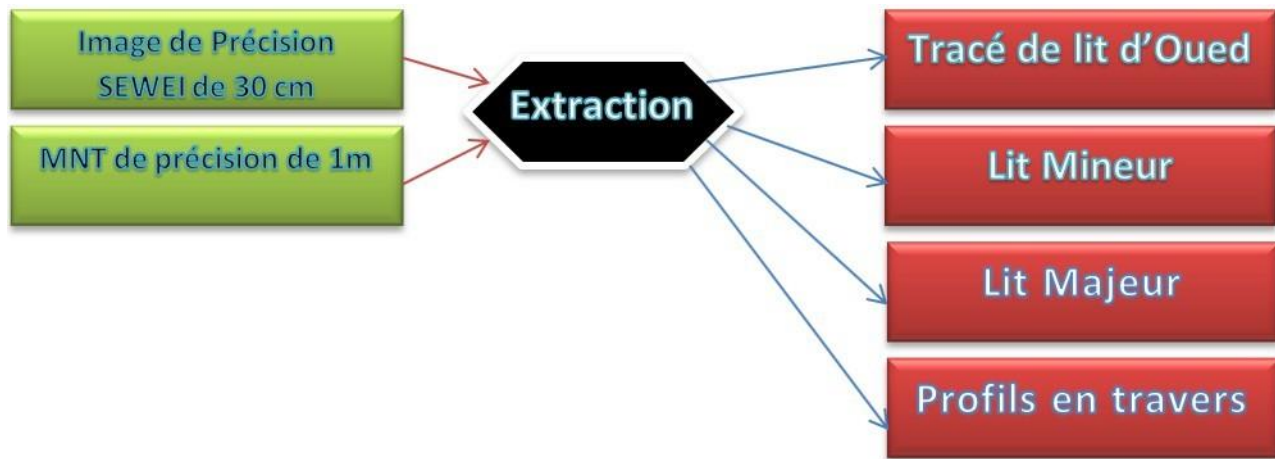
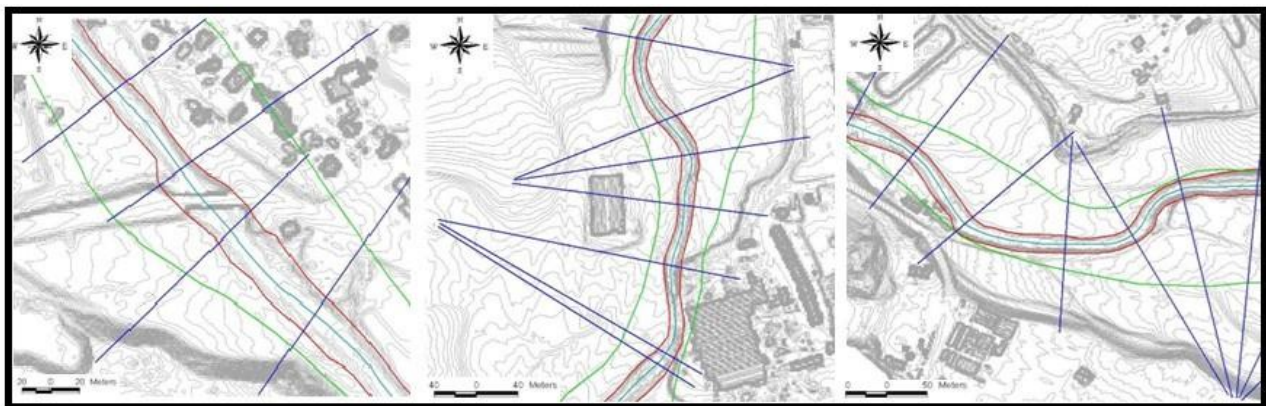


Figure 37: Organigramme global de la géométrie 1D

Le processus de construction de la géométrie 1D commence par le tracé de l'axe du lit principal de l'oued, suivi de la délimitation du lit mineur et du lit majeur. Ensuite, des profils en travers sont extraits perpendiculairement à l'axe pour représenter la section hydraulique locale à différents points du chenal. Chaque profil est ensuite enrichi avec les paramètres géométriques et hydrauliques nécessaires, garantissant la cohérence longitudinale du modèle et la précision des simulations d'écoulement sous HEC-RAS.



• Figure 38: Processus de la modélisation 1D

La figure 49 est première illustration qui présente la carte globale de la géométrie des oueds de la région d'Aïn Sefra, mettant en évidence le tracé principal des chenaux, ainsi que la délimitation des lits mineur et majeur pour l'ensemble du domaine d'étude. Cette vue offre une perspective synthétique de l'organisation spatiale du réseau hydraulique et permet d'appréhender les zones potentiellement inondables dans le contexte morphologique local.



Figure 41: VUE globale de la géométrie des Oueds de Ain Sefra

Figure 39: Vue globale de la géométrie des oueds de Ain Sefra

Un zoom sur un secteur particulier du réseau d'oueds illustré sur la figure 50, afin de visualiser de manière détaillée la configuration locale des chenaux, les profils en travers et la relation entre le lit mineur et le lit majeur. Cette vue permet de mieux comprendre la structuration fine du cours d'eau et les interactions avec les infrastructures et zones urbanisées situées à proximité.



Figure 40: Zoom sur un secteur spécifique "Centre-ville Ain Sefra"

Figure 42: Zoom sur un secteur spécifique

L'illustration suivante présente une vue 3D de la géométrie hydraulique, intégrant les variations topographiques du lit et du lit majeur ainsi que la morphologie des berges. Cette représentation tridimensionnelle facilite l'analyse visuelle des dénivellations, des points d'accumulation et de l'écoulement potentiel lors des crues, tout en constituant un outil précieux pour la validation et l'interprétation des simulations hydrauliques.

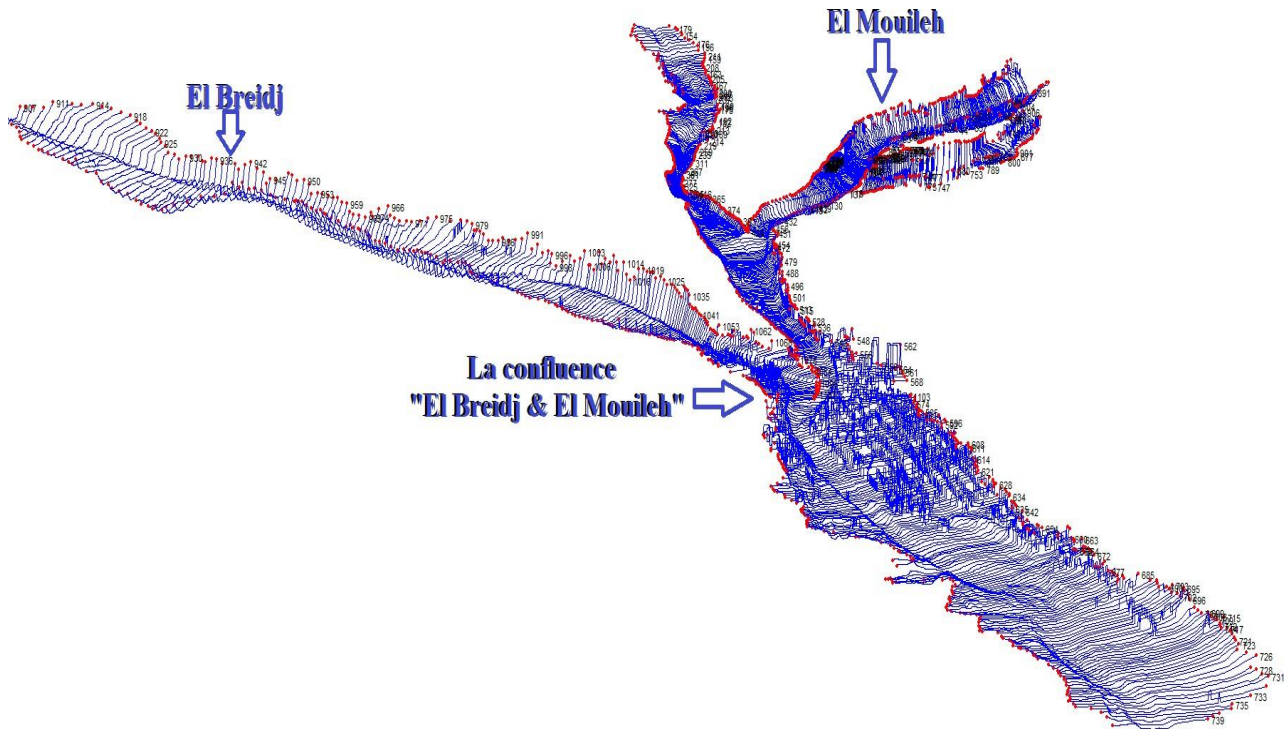


Figure 41: Vue 3D de la géométrie "Ain Sefra"

Figure 43: vue 3D de la geometrie 'Ain Sefra'

Ainsi, le domaine 1D constitue l'ossature longitudinale du modèle, garantissant une propagation hydraulique stable et physiquement correcte dans les secteurs où la dynamique de crue reste essentiellement canalisée.

2) Modélisation 2D

L'hybridation des deux approches constitue un gain décisif, tant sur le plan scientifique qu'opérationnel. Le modèle mixte 1D/2D combine :

- La précision et la stabilité du calcul 1D dans les chenaux bien définis,
- Le réalisme physique de la simulation 2D sur les lits majeurs et les zones à écoulement complexe,
- Une réduction notable du coût computationnel, comparativement à un modèle entièrement 2D,
- Une capacité accrue à représenter simultanément les débits longitudinaux et les expansions latérales,
- Une cohérence globale de la dynamique hydraulique, fondamentale en milieux arides où la pente, la rugosité et la microtopographie conditionnent fortement l'évolution des crues.

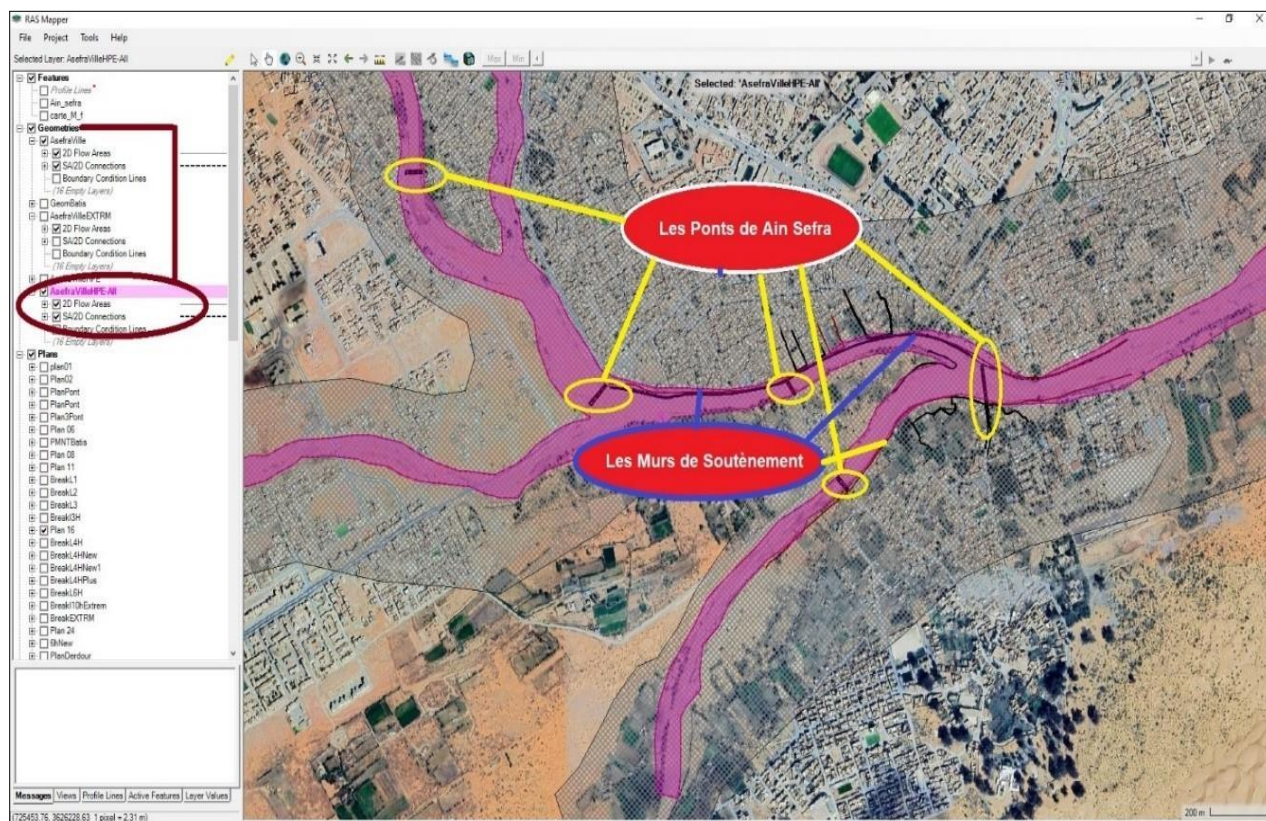


Figure 42 : exemple de modélisation 2D

b. Avantage de la géométrie mixte 1D/2D

La combinaison des deux approches offre une synergie inégalée.

Tableau 4: Combinaison des modèles (1D&2D)

Aspect	Modèle 1D	Modèle 2D	Modèle mixte 1D/2D
Débit longitudinal	Excellent	Moyen	Excellent
Débordement latéral	Faible	Excellent	Excellent
Coût de calcul	Faible	Élevé	Optimisé
Réalisme physique	Moyen	Excellent	Optimal

Tableau 5: combinaison des modeles (1Det2D)

En définitive, cette architecture mixte constitue la solution la plus scientifiquement robuste pour appréhender les crues rapides et violentes des régions semi-arides comme celles d'Ain Sefra. Elle garantit une simulation hydrodynamique fine, cohérente et adaptée aux exigences de validation, tout en permettant une exploitation future du modèle pour des scénarios d'aménagement, d'atténuation ou de prévision opérationnelle.

c. Simulation hydraulique :

L'interface de modélisation hydraulique développée dans cette étude a pour objectif fondamental d'effectuer un traitement numérique approfondi de la topographie et des données cartographiques afin de construire la géométrie de base indispensable à la simulation des écoulements. Cette chaîne de traitement permet de générer une représentation hydraulique cohérente, intégrant à la fois les structures linéaires 1D et les domaines 2D nécessaires pour capturer la complexité de la zone étude.

En s'appuyant sur des outils avancés dédiés à l'analyse du risque d'inondation intégrés aux environnements SIG, la modélisation tient compte de la configuration actuelle de la topographie, incluant l'ensemble des infrastructures hydrauliques, ouvrages transversaux, zones urbanisées et éléments susceptibles d'influencer l'écoulement. La géométrie générée reflète fidèlement les conditions réelles d'écoulement au sein des lits et des plaines inondables de ces quatre secteurs.

Le débit de référence utilisé dans la configuration du modèle n'a pas été issu de mesures hydrométriques classiques, mais repose sur une estimation robuste réalisée à partir des laisses de crue observées lors de l'événement exceptionnel de **septembre 2024**, déjà traitées préalablement par la méthode de Strickler. Cette estimation fournit un débit physiquement plausible, permettant de calibrer le modèle et d'obtenir une carte de risque en accord avec les dynamiques d'inondation observées sur le terrain.

Ainsi, l'interface joue un rôle clé dans la préparation du modèle hydraulique et dans la construction d'un système cohérent de simulation, capable de restituer avec précision les phénomènes d'inondation dans les différents sites de la zone inondable.

Une fois la géométrie hydraulique construite, la simulation est effectuée en régime transitoire, intégrant les conditions aux limites appropriées et les paramètres essentiels du modèle, à savoir :

- (i) La carte de rugosité Manning définissant la résistance à l'écoulement,
- (ii) La BDD des sédiments caractérisant la granulométrie, la cohésion et les propriétés hydromécaniques du lit,
- (iii) Le MNT THR fournissant la topographie précise de la vallée et des lits d'écoulement,
- (iv) Le débit estimé selon la méthode de Strickler, appliqué aux points d'entrée et servant de condition aux limites pour la propagation de l'onde de crue.

Cette configuration permet de reproduire de manière réaliste la dynamique spatiale et temporelle des hauteurs d'eau et des vitesses dans l'ensemble des lits majeurs et mineurs.

1) Régime hydraulique à privilégier : le régime transitoire (non permanent) :

Dans l'ensemble des zones inondées, les crues observées présentent un caractère rapide, brutal et fortement non stationnaire. Pour cette raison, tous les modèles hydrauliques ont été mis en œuvre en régime transitoire comme le montre la figure suivante, en couplant des simulations 1D/2D alimentées par des hydrogrammes représentatifs de la dynamique réelle des écoulements.

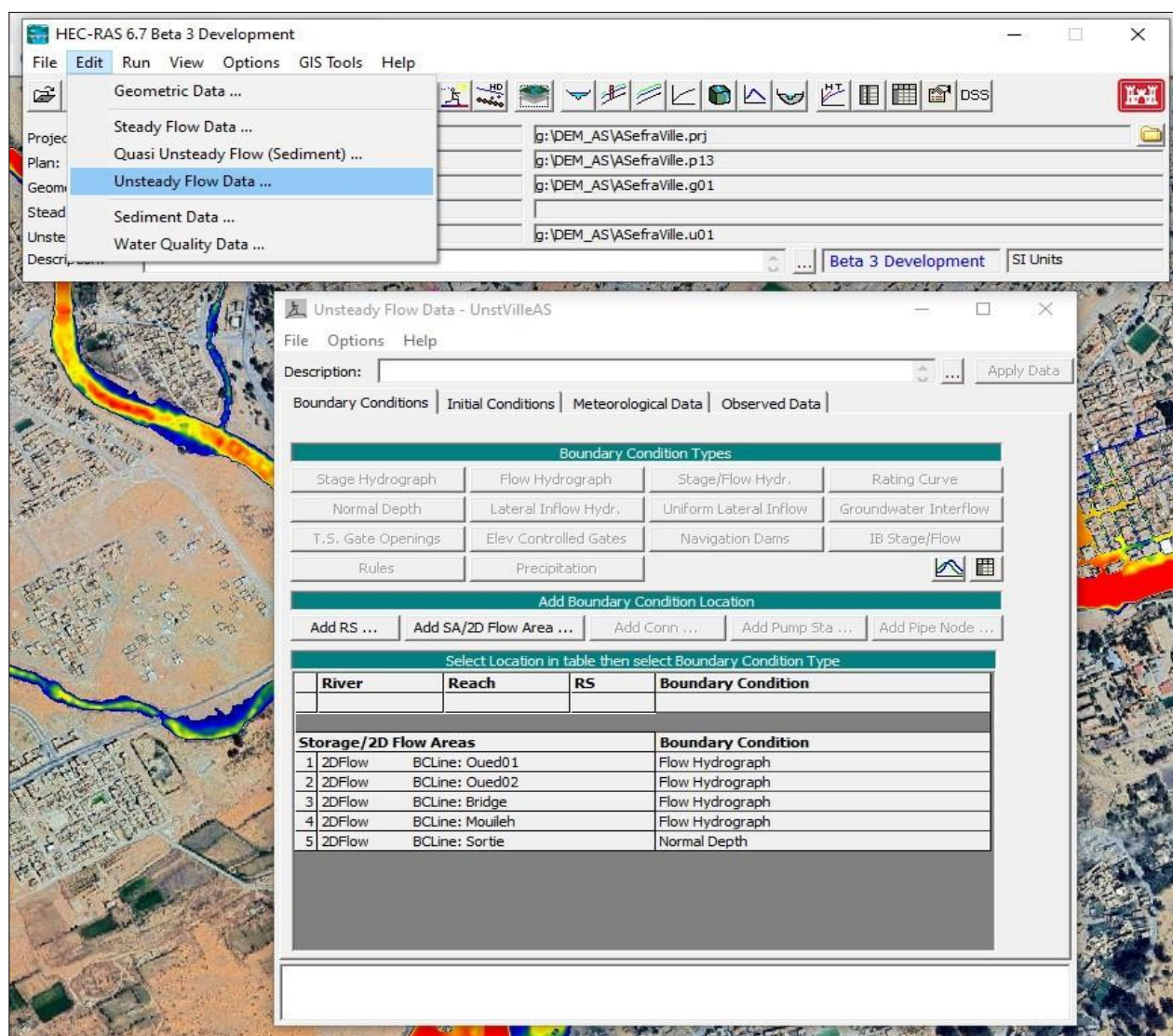


Figure 43: Illustration d'un exemple du régime transitoire (non permanent) « Cas d'Aïn Sefra »

Ce choix méthodologique est indispensable pour reproduire fidèlement la propagation de l'onde de crue, les temps de montée et de décrue, les zones de débordement, ainsi que les interactions complexes entre topographie, infrastructures et bassins versants arides. Le régime permanent (stationnaire), trop simplificateur, ne permettrait ni de restituer la variabilité temporelle du tirant d'eau et des vitesses ni de représenter les pics rapides d'inondation.

✓ Application du régime transitoire :

1 - Aïn Sefra

À Aïn Sefra, la crue du **08 septembre 2024** s'est distinguée par une dynamique hydrologique particulièrement brutale, marquée par une montée des eaux extrêmement rapide, des débordements violents dans le tissu urbain et une décrue tout aussi abrupte.

Pour reproduire fidèlement ce comportement non stationnaire, le modèle hydraulique a été élaboré en régime transitoire 1D/2D, avec plusieurs scénarios temporels représentatifs :

- Hydrogramme de calage : 4 h
- Scénario Risque Minimal : 6 h

- Scénario Risque Maximal : 10 h

L'ensemble du bassin versant ayant contribué simultanément à l'événement, le débit cumulé estimé pour l'ensemble des affluents principaux atteint : → **Q total = 1 850 m³/s**

Ce débit exceptionnel, résultant de la convergence hydrologique des oueds actifs entourant la plaine d'Aïn Sefra, constitue la base du calage hydraulique. Il reflète la puissance de l'onde de crue et justifie pleinement le recours à une modélisation transitoire à haute résolution, capable de capturer les pics de vitesse, les débordements latéraux et les phénomènes d'engorgement observés sur le terrain.

✓ Justification scientifique du régime transitoire:

Le recours au régime transitoire constitue un choix méthodologique pleinement fondé sur la physique des crues observées dans les systèmes hydrologiques arides et semi-arides du Sud-Ouest algérien. Ce choix répond à des exigences scientifiques majeures liées à la dynamique spatio-temporelle des écoulements, aux caractéristiques morphologiques des bassins versants, ainsi qu'à la complexité des interactions lit actif – lit majeur – infrastructures.

1. Fidélité à la dynamique hydrologique réelle des crues soudaines

La région de Ain sefra les crues présentent des caractéristiques typiques des environnements des Oueds :

- Montées rapides des niveaux d'eau (réponse hydrologique quasi instantanée aux précipitations torrentielles) ;
- Décrués tout aussi abruptes, caractérisant un cycle hydrologique très court ;
- Propagation d'ondes de crue extrêmement énergétiques, nécessitant une résolution temporelle élevée pour capturer les gradients de vitesse ;
- Débordements latéraux successifs, formant des nappes d'eau diffuses qui ne peuvent pas être reproduites par un régime permanent, intrinsèquement incapable de modéliser la variabilité temporelle des tirants d'eau.

Ainsi, le régime permanent (stationnaire) ne saurait représenter ni la propagation de l'onde de crue, ni l'évolution des tirants d'eau, ni les fluctuations rapides des vitesses qui structurent l'aléa hydrodynamique dans ces environnements.

2. Pertinence numérique dans les bassins arides à forte hétérogénéité topographique

Les crues étudiées évoluent dans des contextes où :

- La microtopographie joue un rôle prépondérant dans la redistribution des écoulements ;
- La concentration des ruissellements se fait en quelques dizaines de minutes ;
- Les discontinuités topographiques (seuils, cônes alluviaux, berges abruptes) induisent des phénomènes complexes d'emménagement, de ressaut hydraulique ou de contournement ;
- Les interactions entre écoulements et infrastructures (zones bâties, ponts, remblais) modifient localement les régimes d'écoulement.

Le régime transitoire permet de reproduire fidèlement :

- Les phénomènes d'accélération et de décélération ;
- Les variations spatio-temporelles des vitesses dans les zones de goulots hydrauliques ;
- Les zones d'expansion et de stockage temporaire ;
- Les réorganisations rapides de l'écoulement en lit majeur.

2) Conditions aux limites et régime hydraulique

La modélisation hydraulique conduite pour Aïn Sefra, repose sur un calage précis basé sur l'événement extrême du 08 septembre 2024, caractérisé par des crues rapides, non stationnaires et fortement destructrices. Afin de reproduire fidèlement la propagation de l'onde de crue et les phénomènes morphodynamiques associés, les conditions aux limites ont été définies selon des principes hydrauliques rigoureux, intégrant à la fois les observations terrain et les paramètres morphométriques des lits, comme il est illustré en prenant le cas de Aïn Sefra sur la figure suivante.

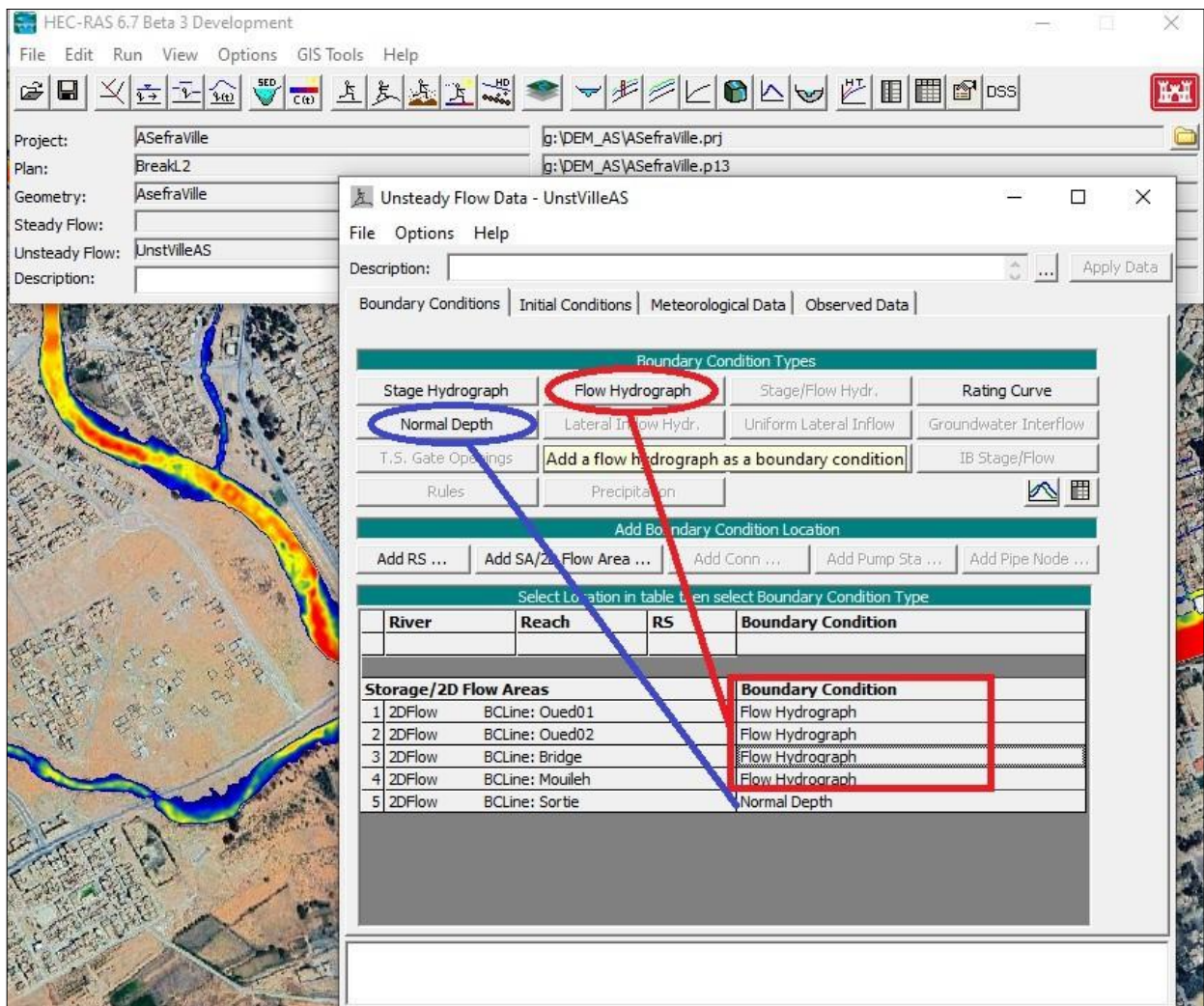


Figure 44: illustration d'un exemple des conditions aux limites « Cas Aïn Sefra »

1. Débit entrant calibré et hydrogrammes :

Pour chaque Oued à Ain Sefra, le débit entrant $Q(t)$ a été appliqué en amont sous forme d'hydrogrammes transitoires, permettant de simuler la variation temporelle du flux selon l'équation de continuité :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Et l'équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gAh \right) = gA(S_0 - S_f)$$

Où A est la section humide, h le tirant d'eau, S_0 la pente du lit, S_f la pente de frottement, et g l'accélération gravitationnelle.

Les hydrogrammes utilisés pour chaque débit sont :

- Système de calage sur 4 h, scénarios Risque Intermédiaire 6 h et Risque Extrême 10 h, avec un débit cumulé $Q_{cum}=1\,850\text{ m}^3/\text{s}$ et 971 points GPS de laisses de crue.

Ces hydrogrammes garantissent que la forme temporelle des crues, la montée et la décrue, ainsi que les pics de débit, soient fidèlement reproduits, assurant ainsi un calage hydraulique optimal.

2. Condition de sortie :

La condition de sortie a été définie en **profondeur normale**, permettant à l'onde de crue de se dissiper de manière réaliste et d'éviter les artefacts numériques. Cette approche assure une transition physique cohérente entre la section modélisée et le système récepteur aval.

3. Régime transitoire 1D/2D et stabilité numérique :

Compte tenu de la non-stationnarité des écoulements et de la rapidité des crues dans ces bassins semi-arides, le modèle a été conduit en régime transitoire couplé 1D/2D. Le pas de temps Δt a été choisi selon le critère CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) :

$$\Delta t \leq \min \left(\frac{\Delta x}{\sqrt{gh} + |v|} \right)$$

Pour assurer la stabilité numérique et la capture fine des fronts de crue. Cette formulation permet de représenter avec précision :

- La propagation longitudinale et latérale de l'onde,
- Les variations temporelles du tirant d'eau et des vitesses,
- Les phénomènes d'engorgement local et les interactions infrastructures-écoulement.

4. Paramètres morphologiques et sédimentaires :

La simulation intègre :

- La **carte de rugosité Manning/Strickler (30 cm)**,
- La **BDD sédimentaire haute résolution (30 cm)**, incluant granulométrie, cohésion et paramètres hydromécaniques (t_c , M , Meyer-Peter Müller),

- Le **MNT THR**, garantissant la représentation fidèle de la microtopographie.

Le module Sediment Transport de HEC-RAS est activé pour simuler les phénomènes d'érosion, d'aggradation et de transport solide, en cohérence avec les hydrogrammes calibrés et la répartition granulométrique détaillée.

5. Couplage 1D/2D et intégration locale :

Le couplage 1D/2D permet de reproduire à la fois :

- L'écoulement canalisé dans le lit mineur,
- L'expansion dans le lit majeur et les zones urbaines,
- Les interactions complexes entre écoulement et morphologie sédimentaire.

Cette approche intégrée assure une reproduction fidèle des processus hydrodynamiques et morphodynamiques observés lors de la crue de 2024 pour toutes les Oueds. Elle constitue une base solide pour :

- L'analyse des zones à risque,
- L'évaluation de l'efficacité des aménagements et mesures d'atténuation,
- La planification des opérations de curage et de protection, et
- L'optimisation de la gestion durable des lits d'oueds en zones semi-arides.

Dans un tel contexte, le régime stationnaire constitue une approximation trop grossière, susceptible d'entraîner une sous-estimation des vitesses de pointe et des hauteurs maximales.

Cette étape génère trois séries de résultats essentiels :

- Hauteurs d'eau,
- Vitesses d'écoulement,
- Temps de propagation de la crue.

Ces cartes constituent les premières estimations du comportement hydraulique réel de la crue.

1. Calage et validation du modèle hydraulique

L'étape de calage constitue un verrou méthodologique essentiel pour garantir la fiabilité du modèle hydrodynamique développé. Elle consiste à confronter les résultats issus de la simulation au comportement réel de la crue, tel qu'observé sur le terrain et reconstitué par télédétection.

Deux jeux de données indépendants sont mobilisés :

1. La carte régénérée de la crue de septembre 2024, dérivée d'analyses multispectrales, fournissant l'enveloppe spatiale exacte de l'inondation.
2. Les points GPS des laisses de crue, mesurés in situ, qui renseignent avec précision les hauteurs d'eau atteintes localement.

Le croisement de ces sources permet de calculer un indice de corrélation spatiale évaluant la concordance entre hauteurs d'eau simulées et hauteurs observées. Selon les standards

internationaux en modélisation hydraulique, un modèle est considéré fiable pour un usage opérationnel lorsque cet indice dépasse 0,80.

Qualité du calage sur de la zone d'étude :

Les résultats obtenus témoignent d'une performance remarquable du modèle hydrodynamique, particulièrement adapté au régime transitoire observé lors de la crue de 2024. Chaque localité a été calibrée à partir d'un jeu dense de mesures GPS, garantissant une validation robuste.

Le modèle a été confronté à 971 points GPS, représentant l'un des jeux de données les plus riches. Pour un débit de pointe estimé à 1 850 m³/s, le calage atteint une corrélation de 0,80, seuil reconnu internationalement comme satisfaisant. Cette valeur confirme la capacité du modèle à reproduire fidèlement les gradients de hauteur d'eau dans un contexte urbain complexe et fortement contrôlé par la microtopographie.

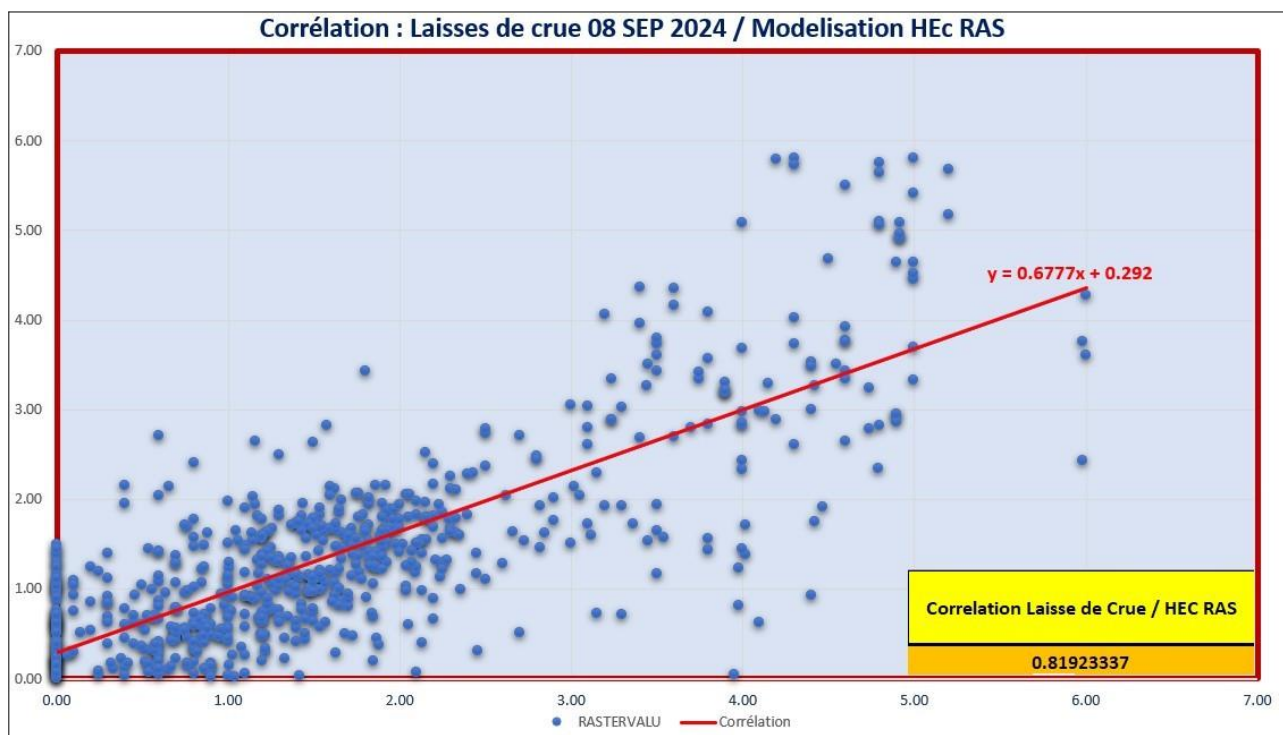


Figure 45: Corrélation entre les laisses de crue (08 sep 2024) et la modélisation HEC RAS (Ain Sefra)

Figure 44: Correlation entre les laisses de crue 08 septembre 2024 et la modelisation HECRAS (Ain Sefra)

Synthèse de la qualité du calage

Tableau 5: Taux de précision du calage

Localité	Corrélation	Points GPS
Aïn Sefra	0,80	971

Tableau 6: Taux de precision du calage

1. Interprétation scientifique :

Les résultats du calage hydraulique révèlent des coefficients de corrélation systématiquement supérieurs à 0,80, témoignant d'un accord remarquable entre les observations de terrain et les simulations transitoires 1D/2D produites par HEC-RAS. De telles valeurs confirment la capacité

du modèle à reproduire de manière robuste la dynamique réelle de la crue du 8 septembre 2024. Plus précisément, les corrélations traduisent une restitution fidèle :

- De la cinétique de montée des eaux, caractéristique des crues éclairs en contexte semi-aride, où les temps de réponse du bassin versant sont extrêmement courts ;
- Des débordements latéraux propres aux cônes alluviaux et aux éventails de pied de montagne, zones particulièrement sensibles aux dispersions d'énergie et aux redistributions de charge solide ;
- De la concentration longitudinale des écoulements dans les lits mineurs étroits, où les gradients topographiques amplifient les vitesses spécifiques ;
- Des phénomènes d'engorgement et d'accumulation hydraulique au niveau des dépressions naturelles et des points bas urbains.

Un tel niveau de cohérence entre mesures et simulation renforce fortement la crédibilité scientifique des cartes hydrodynamiques produites :

- Hauteurs maximales d'eau,
- Vitesses de propagation,
- Modalités spatio-temporelles de l'écoulement à l'échelle fine des micro-reliefs et des structures anthropiques.

Ces sorties validées constituent désormais un référentiel hydrodynamique fiable, indispensable pour :

- L'analyse détaillée des aléas d'inondation,
- La caractérisation quantitative du risque, via le croisement hauteur-vitesse,
- La conception rationnelle d'aménagements de protection et de stratégies d'adaptation durable dans la zone d'étude.

III.5. Analyse Intégrée des Résultats Hydrodynamiques du Modèle HEC-RAS :

Les simulations numériques réalisées avec HEC-RAS ont permis de reconstruire avec une grande précision la dynamique de la crue, en fournissant un ensemble de résultats spatialisés et temporellement cohérents pour chacune des localités de la zone d'étude. L'exploitation de ces sorties a porté sur plusieurs familles d'indicateurs hydrauliques, notamment : les hauteurs d'eau, les vitesses d'écoulement, les cartes de calage, ainsi que les niveaux de risque minimum et maximum, intégrés à leurs champs de vitesse correspondants. Cette approche globale permet de décrire de manière exhaustive le comportement de l'écoulement et la distribution spatiale des niveaux d'aléas.

III.5.1. Cartes de hauteurs d'eau (H_Eau) :

Les cartes de hauteurs d'eau dérivées du modèle fournissent une représentation fine de l'ampleur de l'inondation dans différents sites de la zone d'étude. Elles mettent en évidence :

- Les secteurs submergés de manière précoce, correspondant aux zones de faibles pentes ou aux dépressions topographiques ;
- Les couloirs préférentiels d'écoulement, notamment dans les lits mineurs et les chenaux secondaires ;
- Les zones de remous générées par les obstacles naturels ou anthropiques (ponts, remblais, ouvrages hydrauliques) ;
- Les profondeurs maximales atteintes, utiles pour quantifier la sévérité de l'aléa.

La distribution spatiale des hauteurs révèle des comportements hydrauliques différenciés selon les Oueds, mettant en lumière les spécificités morphologiques de chaque secteur (cônes alluviaux, lits resserrés, zones d'expansion latérale).

III.5.2. Cartes des vitesses d'écoulement (V_Eau) :

Les vitesses simulées apportent un éclairage essentiel sur la puissance destructrice potentielle des flux. Les cartes montrent notamment :

- Des zones de vitesses élevées dans les secteurs de resserrement ou de fortes pentes ;
- Des ralentissements progressifs en aval, traduisant la diffusion du flux et l'expansion de la crue ;
- Des points de turbulence et micro-variation à proximité d'infrastructures ;
- La formation de zones de stagnation associées aux dépôts potentiels de sédiments.

Ces résultats permettent d'identifier les emprises les plus exposées à des phénomènes de mobilisation des matériaux, d'arrachement des sols ou de déstabilisation des infrastructures.

III.5.3. Cartes de calage « hauteurs simulées / observées » :

Les cartes de calage visualisent la correspondance entre les hauteurs d'eau simulées et celles observées sur le terrain (traces de crue et repères hydrauliques). Elles mettent en évidence :

- Une cohérence spatiale élevée, confirmée par les corrélations $> 0,80$;
- Des écarts résiduels localisés, souvent liés à des incertitudes topographiques ou à la présence de micro-obstacles non représentés dans le modèle ;
- Une excellente reproduction des gradients verticaux dans les couloirs d'écoulement rapide.

Ces cartes constituent un élément fondamental pour la validation du modèle et renforcent la robustesse des sorties finales.

III.5.4. Cartographie du risque hydraulique « Risque Min & Risque Max » :

La combinaison des hauteurs et vitesses permet d'établir un diagnostic complet du risque hydraulique, sous forme de deux cartes complémentaires :

- Risque Minimal : zones inondables même dans les scénarios conservateurs ;
- Risque Maximal : extension possible de l'aléa dans des conditions aggravées.

Ces cartes tiennent compte :

- Des niveaux d'eau extrêmes simulés,
- Des vitesses critiques associées,
- Des capacités locales d'emménagement ou de dissipation,
- De la topographie fine et de l'occupation des sols.

Elles constituent un outil opérationnel majeur pour :

- La planification urbaine,
- L'identification des infrastructures vulnérables,
- La définition des zones à protéger prioritairement,
- La gestion proactive du risque.

1- Ain Sefra

Carte des vitesses d'écoulement d'Oued Ain Sefra

La carte des vitesses d'écoulement, issue de la modélisation hydrodynamique intégrant la topographie et les caractéristiques géométriques des lits d'Oued de la région d'Ain Sefra, montre la variation spatiale des vitesses le long de l'Oued traversant la ville.

Les vitesses sont représentées sous formes de gradients allant du bleu foncé qui indique des vitesses très élevées, pouvant atteindre localement 30 m/s, notamment au niveau d'Oued Ain Sefra et dans certains tronçons d'Oued El Breidj où la forte pente accentue l'énergie du flux.

Ces secteurs correspondent principalement à des zones critiques à risque très élevé, en particulier dans les zones urbanisées du centre-ville et au niveau de Dzira (passages sous ouvrages d'art, ainsi qu'aux segments où le lit de l'oued est rétréci ou obstrué par des constructions et des dépôts).

Alors que, les couleurs orange traduisent des vitesses plus faibles, généralement observées dans les parties élargies des lits d'Oueds (zones plus ouvertes ou en amont où le lit est large), où la pente diminue et le flux perd en intensité, ce qui permet de mieux caractériser les zones à risque plus modéré.

Cette répartition révèle une augmentation du risque, notamment le long des berges urbanisées dans les secteurs à forte vitesse, où le potentiel de déstabilisation et de transport solide est élevé

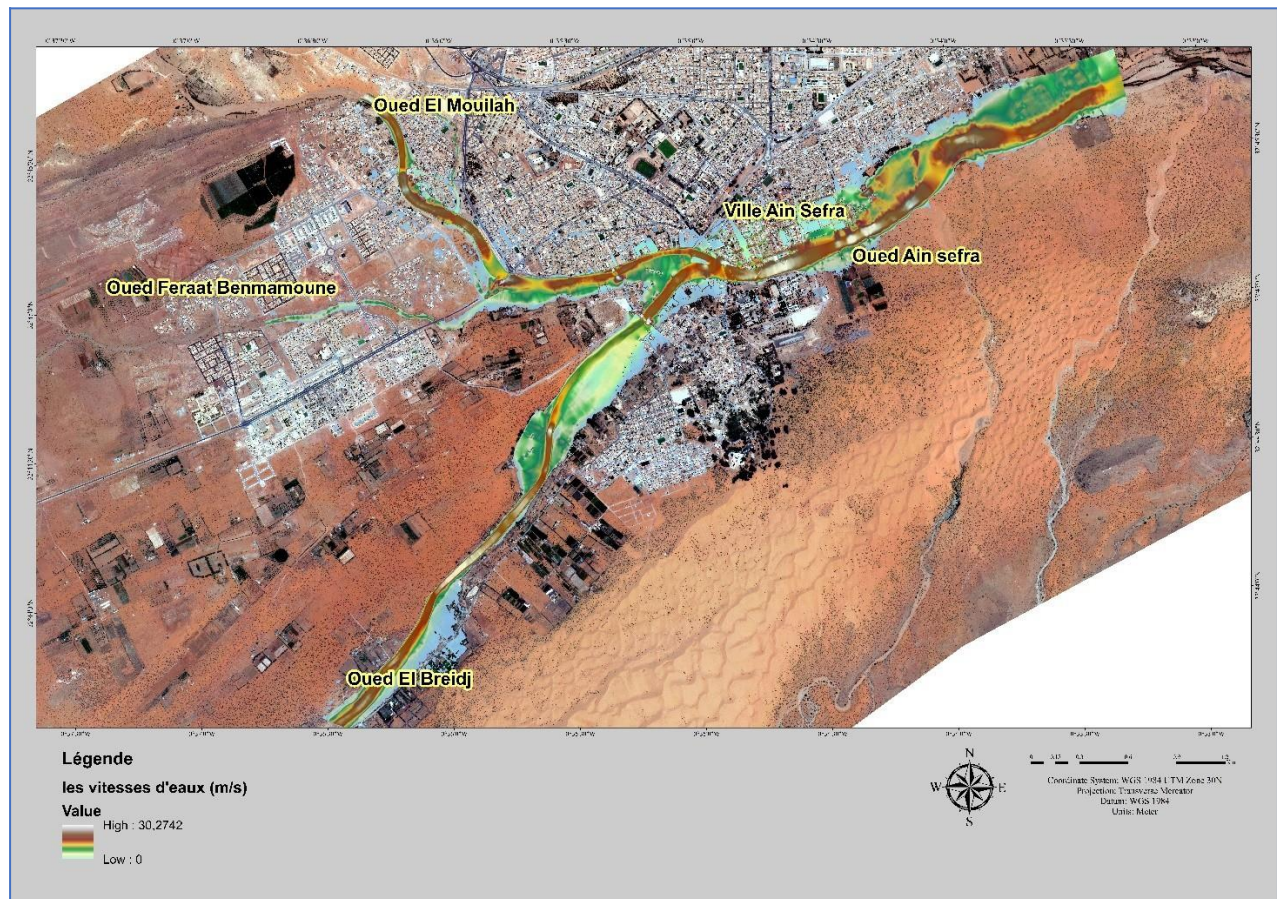


Figure 45: Carte des vitesses d'écoulement d'Ain Sefra

Figure 466: Carte des vitesses d'écoulement d'Ain Sefra

Carte des hauteurs d'eau d'Oued Ain Sefra

La carte présentée illustre la simulation des hauteurs d'eau lors de l'inondation et indique les variations de profondeur de la crue le long de l'oued. Elle met en évidence les zones submergées sur différents tronçons ainsi que les zones les plus vulnérables.

L'analyse et l'interprétation détaillées de cette représentation révèle clairement que les profondeurs les plus importantes, atteignant localement plus de 6 à 9 mètres (zones en violet), se concentrent particulièrement au niveau du lit majeur d'Oued Ain Sefra, d'Oued el Briedj et d'Oued Moulah ainsi qu'au point de confluence. Les zones urbanisées situées à proximité du cours d'eaux apparaissent particulièrement exposées à un risque élevé.

Par contre, au niveau des zones périphériques plus éloignées du lit présentent des hauteurs d'eau faibles à modérées (zones en bleu clair), traduisant un niveau de risque moins important, bien que toujours présent lors d'une crue exceptionnelle.

Il convient de signaler que les profondeurs les plus faibles (zones en bleu clair) se manifestent principalement en marges d'écoulement, sur les terrasses et zones légèrement surélevées.

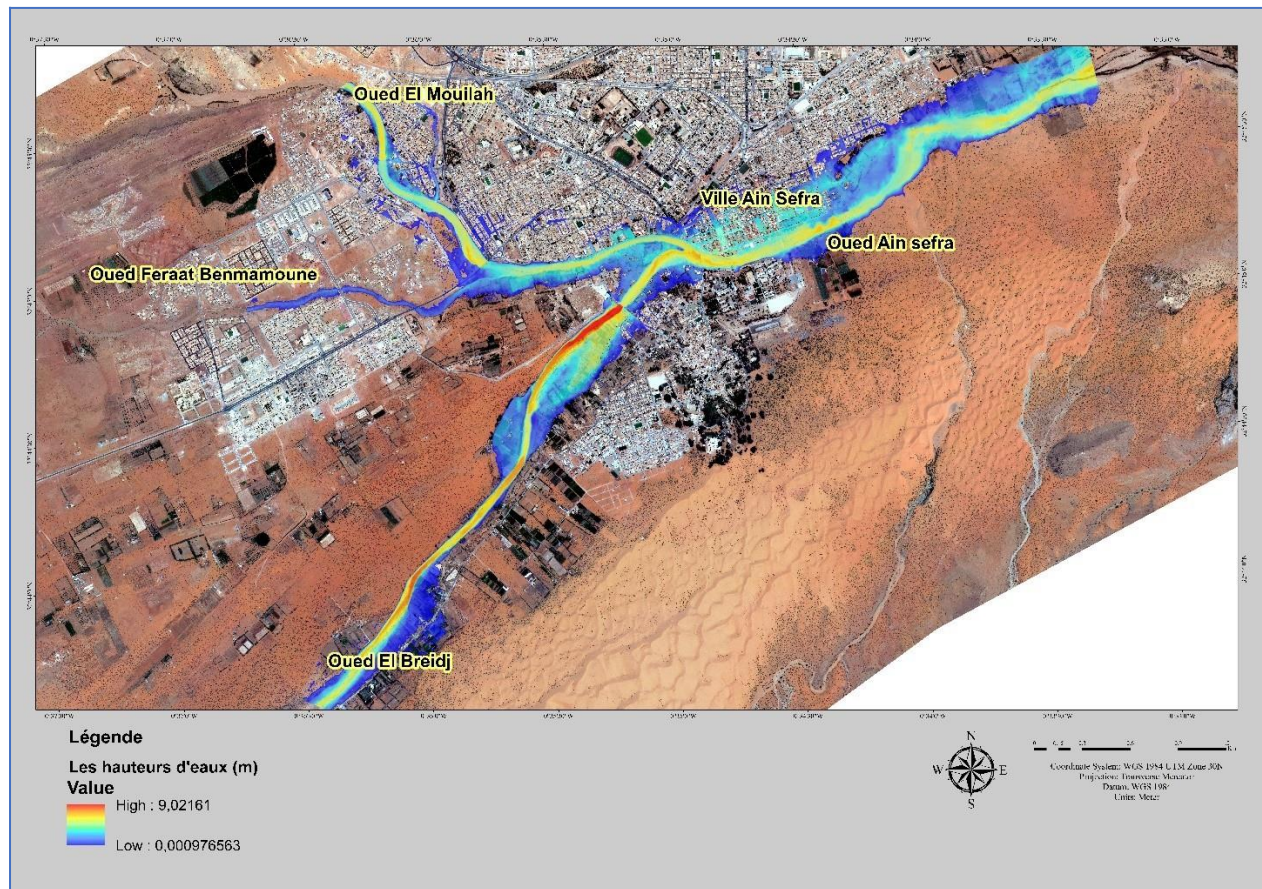


Figure 46: Carte des hauteurs d'eaux d'Ain Sefra

Figure 57 : Carte des hauteurs d'eaux d'Ain Sefra

III.5.5. Analyse comparative inter-sites

L'analyse croisée des résultats obtenus sur l'ensemble des sites étudiés met en évidence des divergences hydrodynamiques significatives, directement liées aux propriétés géomorphologiques et à l'organisation spatiale des systèmes d'écoulement. La superposition des champs de hauteurs et de vitesses simulées révèle que la réponse hydraulique de chaque site est fortement conditionnée par :

- **La configuration topographique locale**, qui contrôle les gradients d'énergie, les zones d'accélération et les secteurs potentiels d'accumulation ;
- **L'ampleur et la morphologie des cônes alluviaux**, influençant les processus de diffusion latérale, de déversement et de dispersion des flux ;
- **La largeur et la connectivité des lits mineurs**, déterminant la capacité d'advection longitudinale et la transition entre régimes d'écoulement ;
- **La présence et la typologie des aménagements hydrauliques et infrastructures anthropiques**, modifiant localement les conditions de confinement, de décharge ou de dissipation d'énergie ;
- **La nature et la capacité d'infiltration du substrat**, qui participent à moduler la concentration, la rétention ou l'atténuation des volumes d'eau transitant vers l'aval.

Cette analyse comparative met en évidence la manière dont chaque système hydro-géomorphologique développe une signature hydrodynamique propre, résultant de l'interaction entre les flux de surface, la structure du paysage et les forçages anthropiques. Elle permet ainsi d'identifier les mécanismes dominants de propagation, de concentration et d'amplification de la crue, tout en caractérisant les singularités hydrologiques spécifiques à chaque site de la zone d'étude.

III.5.6. Analyse du champ d'écoulement à l'aide des vitesses statiques et du suivi des particules

Vecteurs de vitesse statiques :

Les Vecteurs de vitesse statiques « Static Velocity Arrows » représentent de manière synthétique le champ de vitesses simulé, en indiquant à la fois la direction et l'intensité de l'écoulement sur la carte des hauteurs et des vitesses de la ville d'Aïn Sefra. Chaque flèche traduit la direction préférentielle du courant, tandis que sa longueur est proportionnelle à la magnitude de la vitesse locale, permettant d'identifier rapidement les zones d'écoulement rapide et les secteurs de ralentissement. Superposées à la distribution spatiale des hauteurs d'eau, ces flèches facilitent l'interprétation du comportement hydraulique lors des épisodes de crue, notamment au niveau du chenal principal, des zones d'expansion latérale et des secteurs sensibles à l'érosion ou au débordement.

Figure 47: vue globale de la carte des vecteurs de vitesse statistiques 'Ain Sefra'

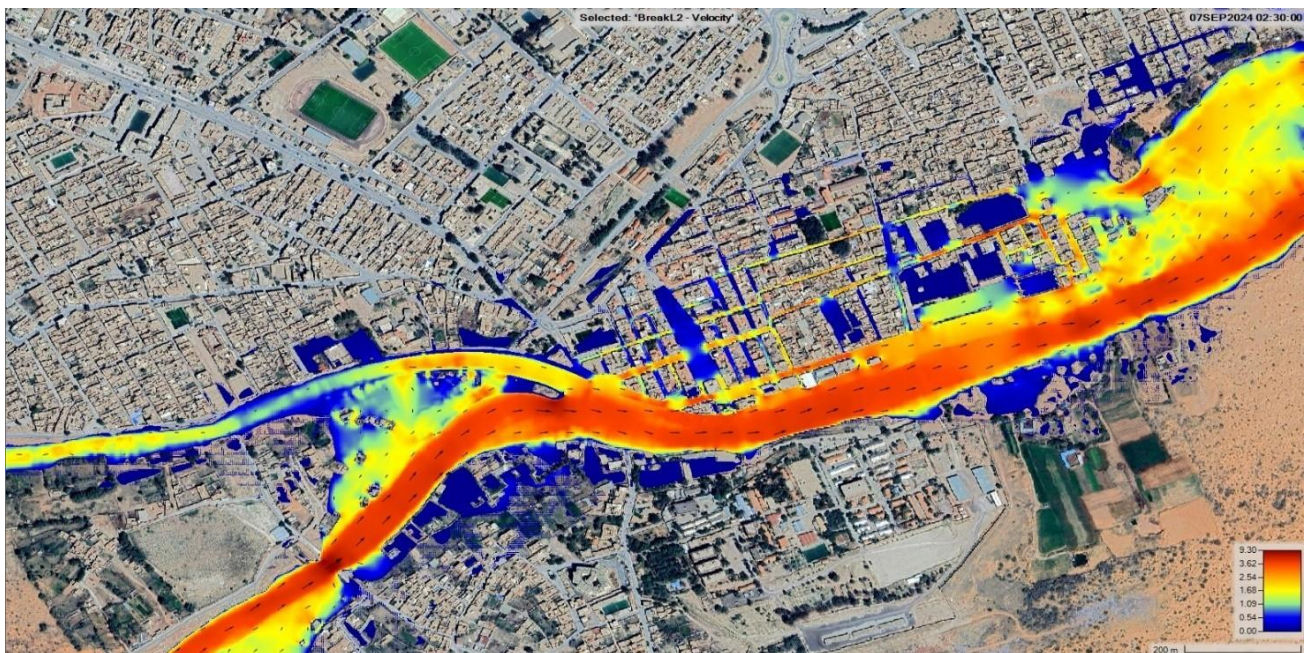


Figure 58: Vue Globale de la Carte des Vecteurs de vitesse statiques "Ain Sefra "

La figure 58 montre la répartition des vitesses d'écoulement, où les valeurs les plus élevées sont concentrées dans le chenal principal, tandis que des vitesses plus faibles sont observées sur les zones latérales et inondables. Les Static Velocity Arrows, superposées à la carte des vitesses, indiquent la direction dominante de l'écoulement et la variation spatiale de son intensité, facilitant l'identification des zones à fort potentiel d'érosion, de transport solide et de débordement hydraulique.

Pour bien illustrer les vecteurs de vitesse statique la figure 59 montre un zoom sur le centre-ville de Ain Sefra.

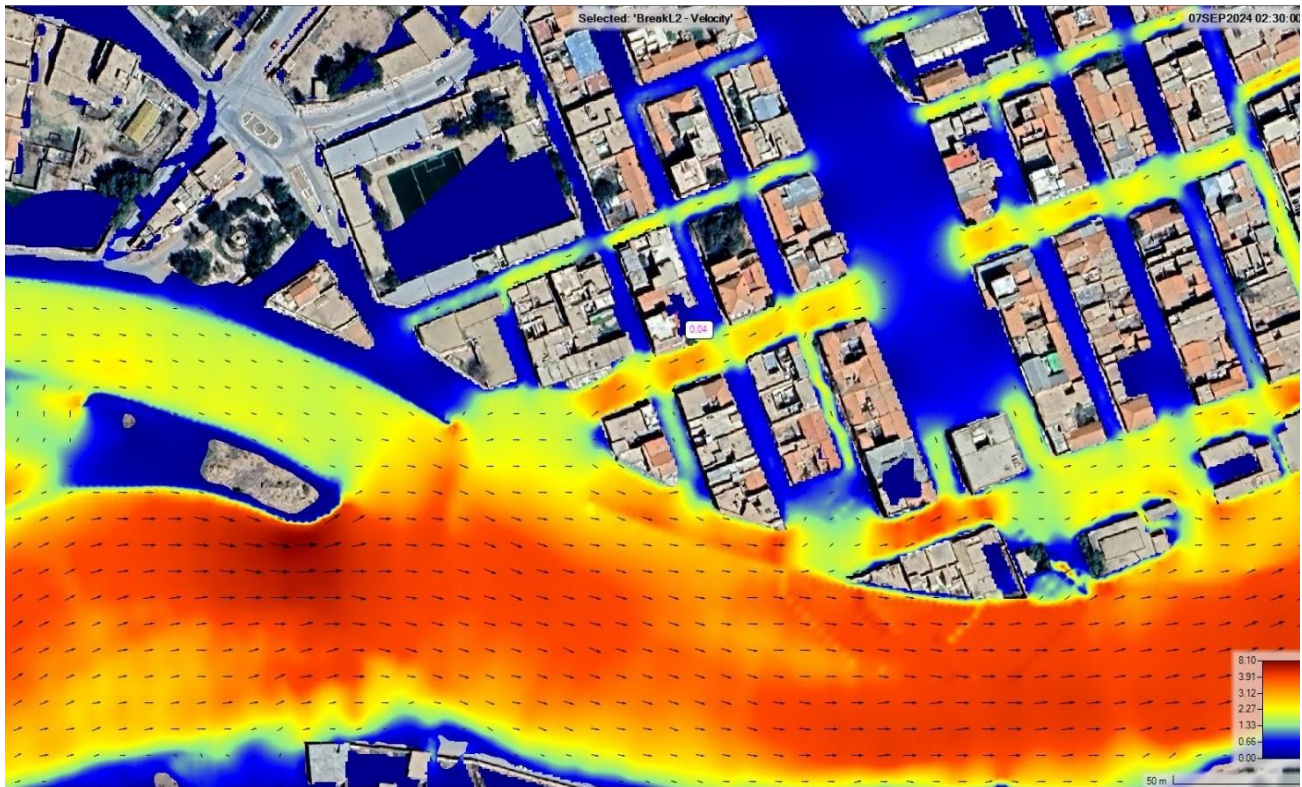


Figure 59: Zoom sur Vue Globale de la Carte des Vecteurs de vitesse statiques "Ain Sefra "

Figure 48: Zoom sur vue globale de la carte des vecteurs de vitesse statistique 'Ain Sefra'

Suivi de particules :

Le suivi des particules (Particle Tracing) constitue un outil avancé de visualisation permettant d'analyser la dynamique des écoulements à travers une approche lagrangienne, fondée sur le déplacement de particules d'eau virtuelles au sein du domaine hydraulique simulé. Basée sur le champ de vitesses calculé, cette méthode met en évidence les trajectoires préférentielles de l'écoulement et révèle les phénomènes de convergence, de divergence et de recirculation des flux à l'échelle globale du site étudié. La figure 60 d'une vue globale des hauteurs d'eaux avec le tracé du suivi de particules illustre ainsi les principaux chemins de propagation de l'eau lors des épisodes de crue et permet d'appréhender l'organisation générale des écoulements dans le lit de l'oued et ses zones d'expansion latérale.



Figure 49: la carte des hauteurs d'eaux avec le suivi des particules 'Ain Sefra'

Figure 60: La Carte des hauteurs d'eaux avec le suivi des particules "Ain sefra"

À une échelle plus fine, le Particle Tracing offre une compréhension approfondie de l'organisation spatiale des écoulements, en particulier dans les zones de transition entre le lit mineur et le lit majeur, ainsi qu'au voisinage des ouvrages hydrauliques et des secteurs urbanisés. Cette représentation qualitative complète efficacement les cartes de hauteurs et de vitesses, en facilitant l'identification des zones sensibles à l'accumulation des flux, aux fortes contraintes hydrodynamiques et aux débordements potentiels. La figure 61 d'un zoom de la vue des hauteurs d'eaux avec le tracé du suivi de particules met en évidence ces dynamiques locales et souligne l'influence de la topographie et des aménagements sur les trajectoires d'écoulement.

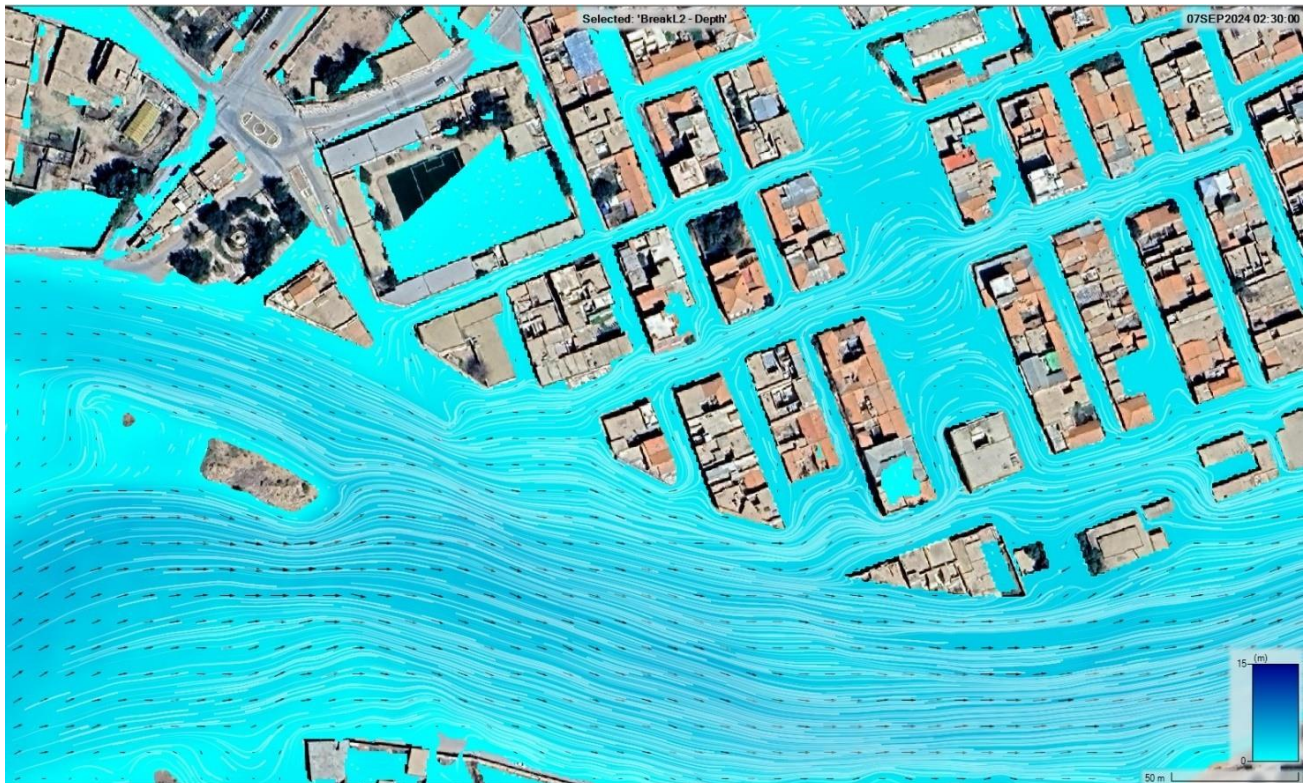


Figure 50: Zoom sur les hauteurs d'eaux avec le suivi des particules 'Ain Sefra'

Figure 61: Zoom sur les hauteurs d'eaux avec le suivi des particules "Ain sefra"

2- Cartographie de l'aléa d'inondation

L'aléa du risque d'inondation est évalué et hiérarchisé en fonction de l'intensité des phénomènes, considérée à travers la hauteur d'eau (H_{Eau}) et la vitesse d'écoulement (V_{Eau}). Les vitesses de courant sont traitées comme des facteurs aggravants, pouvant modifier la classification initiale basée sur la seule hauteur d'eau. Ainsi, même lorsque la hauteur reste inférieure à 0,5 mètre, le risque peut être classé comme élevé si la vitesse représente un danger pour les personnes ou les biens.

Les seuils de l'aléa, utilisés pour conditionner la circulation humaine et automobile, sont présentés sous forme de hauteur et de vitesse et sont fixés selon les recommandations du Plan de Prévention du Risque d'Inondation (P.P.R.I.) adopté en France [DDRM, 2016] (Figure 62).

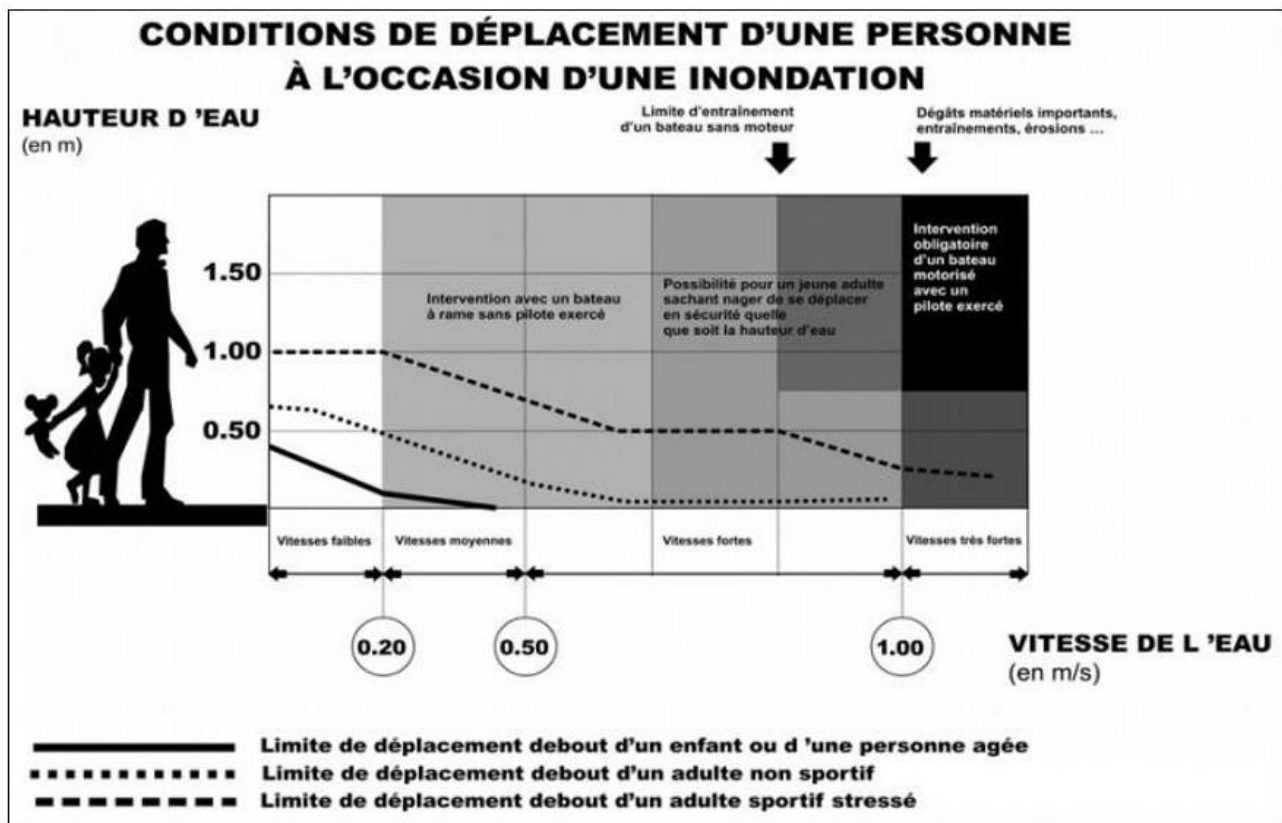


Figure 62: Danger du déplacement des personnes lors d'une crue [source : DDRM, 2016]

Les seuils adoptés pour la classification sont conformes aux recommandations des plans de prévention des risques hydrauliques, traduits ici pour les conditions locales :

- ✚ Hauteur (m) : Faible <0.2 ; Moyen 0.2–0.6 ; Modéré→Élevé 0.6–1.2 ; Élevé 1.2–1.8 ; Élevé→Très élevé 1.8–2.5 ; Très élevé >2.5
- ✚ Vitesse (m/s) : Faible <0.3 ; Moyen 0.3–0.8 ; Modéré→Élevé 0.8–1.3 ; Élevé 1.3–1.8 ; Élevé→Très élevé 1.8–2.5 ; Très élevé >2.5

1. Mécanisme de croisement des couches

La hiérarchisation de l'aléa en niveaux faible, moyen, élevé ou très élevé est réalisée par le croisement des informations de hauteur et de vitesse pour chaque site (Figure 63). Cette méthode permet de traduire les champs simulés par HEC-RAS en cartes thématiques de risque hydraulique, reflétant la combinaison des deux paramètres critiques.

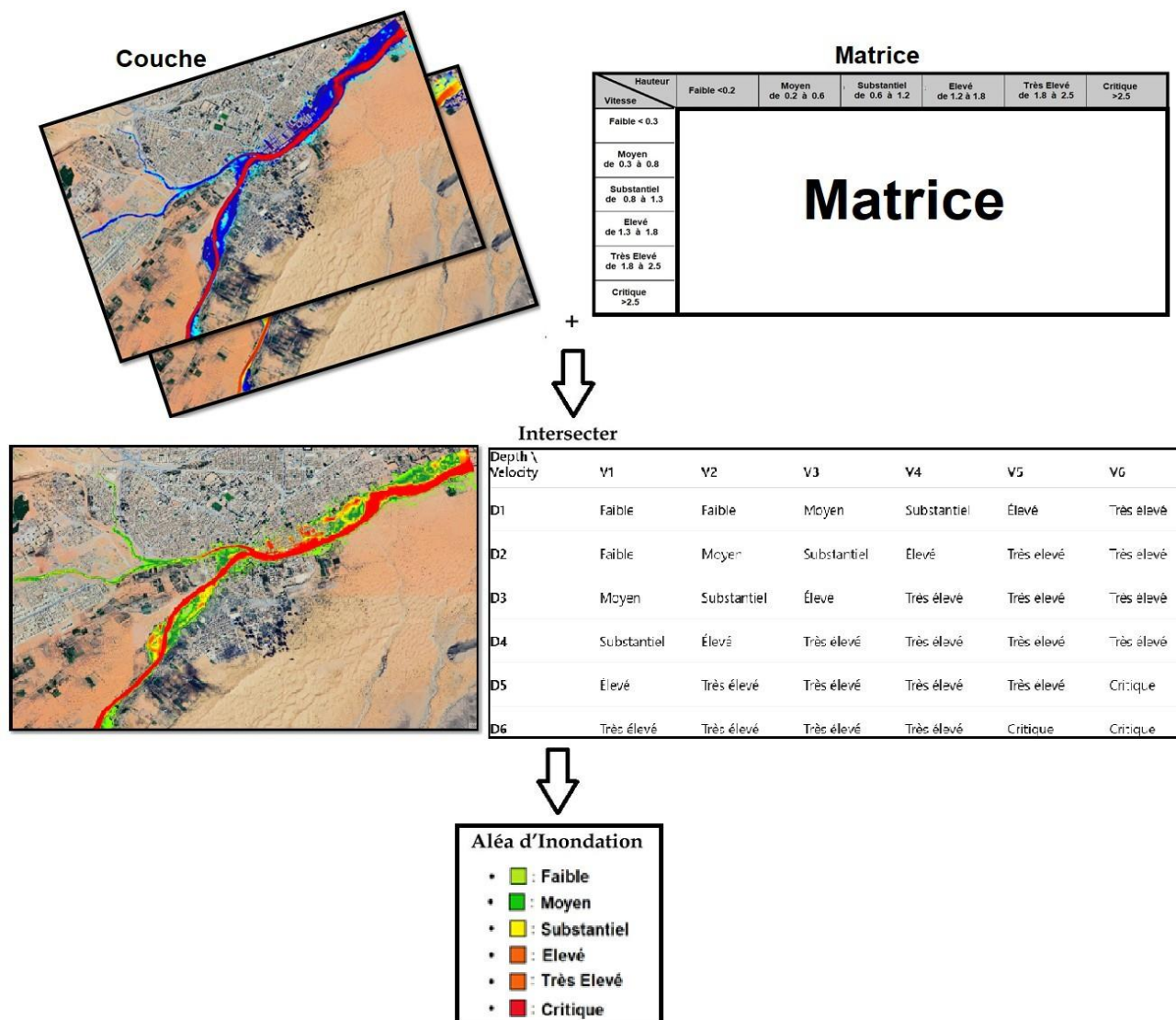


Figure 63: Croisement des couches thématiques pour la réalisation de la carte de l'aléa d'inondation pour Aïn Sefra.

L'ampleur du risque est synthétisée dans le tableau 6, qui illustre l'ordre de croisement des couches et les niveaux correspondants d'aléa.

Hauteur Vitesse	Faible <0.2	Moyen de 0.2 à 0.6	Substantiel de 0.6 à 1.2	Elevé de 1.2 à 1.8	Très Elevé de 1.8 à 2.5	Critique >2.5
Faible < 0.3						
Moyen de 0.3 à 0.8						
Substantiel de 0.8 à 1.3						
Elevé de 1.3 à 1.8						
Très Elevé de 1.8 à 2.5						
Critique >2.5						

Tableau 7: classification de l'alea par croisement hauteur-vitesse

Tableau 6: Classification de l'aléa par croisement Hauteur-Vitesse

Légende :

- ■ : Faible
- ■ : Moyen
- ■ : Substantiel
- ■ : Elevé
- ■ : Très Elevé
- ■ : Critique

2. Établissement des cartes de l'aléa :

L'approche adoptée fournit des informations spatiales détaillées, permettant de mieux comprendre la problématique du risque d'inondation sur les quatre sites étudiés. Les cartes finales montrent clairement la délimitation des zones inondables après l'exportation des résultats de simulation, avec la classification des niveaux de risque correspondants (Tableau 6).

L'utilisation d'un MNT de très haute résolution, combiné à des images satellitaires fines, garantit une précision élevée dans la représentation du risque et permet de suivre l'évolution du nombre de riverains potentiellement affectés (Figures 50 au 53). Cette approche rend possible une analyse détaillée et fiable du risque, indispensable pour la planification urbaine et la protection des populations dans site de la zone inondable.

Carte de risque d'inondation d'Oued Aïn Sefra

La carte de risque d'inondation de la région d'Aïn Sefra a été établie à partir de l'analyse croisée des hauteurs d'eau maximales simulées et des vitesses d'écoulement issues de la modélisation hydraulique bidimensionnelle (HEC-RAS 2D). Cette approche intégrée permet une caractérisation fine de l'aléa hydraulique en tenant compte à la fois de l'intensité de la submersion et de la dynamique des écoulements. Les secteurs où se combinent des hauteurs d'eau élevées et des vitesses importantes correspondent aux zones de danger hydraulique fort, présentant un risque élevé pour la sécurité des personnes, la stabilité des infrastructures et le fonctionnement des équipements urbains.

L'analyse spatiale met en évidence une concentration des niveaux d'aléa les plus élevés le long des principaux axes d'écoulement traversant la zone urbaine, notamment l'Oued Aïn Sefra,

l'Oued El Breidj et l'Oued El Mouilah. Les classes de risque fort à très fort (représentées par les teintes orange et rouge) sont principalement localisées au niveau des lits majeurs, des zones de débordement préférentiel et des secteurs de convergence des écoulements. Ces zones concernent des secteurs sensibles tels que Dzira, le cimetière Sidi Boudjemaa, Chaabat Mouilah, ainsi que l'axe principal de l'Oued Aïn Sefra, où les simulations indiquent des conditions hydrauliques sévères susceptibles de provoquer des dommages structuraux, des phénomènes d'érosion localisée et des submersions rapides.

À l'opposé, les zones classées en aléa moyen à faible, représentées par des nuances de bleu, correspondent majoritairement aux secteurs situés en retrait des vallées actives et bénéficiant de conditions topographiques plus favorables. Ces zones sont caractérisées par des hauteurs d'eau limitées et des vitesses modérées, traduisant un potentiel de danger réduit pour les crues de référence. Toutefois, la carte met également en évidence une urbanisation significative en zones inondables, ce qui accroît la vulnérabilité globale du territoire et renforce la nécessité d'une prise en compte stricte du risque d'inondation dans les documents de planification et d'aménagement.

Dans une perspective de PPRI, cette carte constitue un outil d'aide à la décision essentiel pour la délimitation des zones réglementaires, la hiérarchisation des enjeux exposés et la définition de mesures de prévention et de protection adaptées, telles que la maîtrise de l'urbanisation, l'aménagement des zones d'expansion des crues et le renforcement de la résilience des infrastructures existantes face aux événements hydrologiques extrêmes.

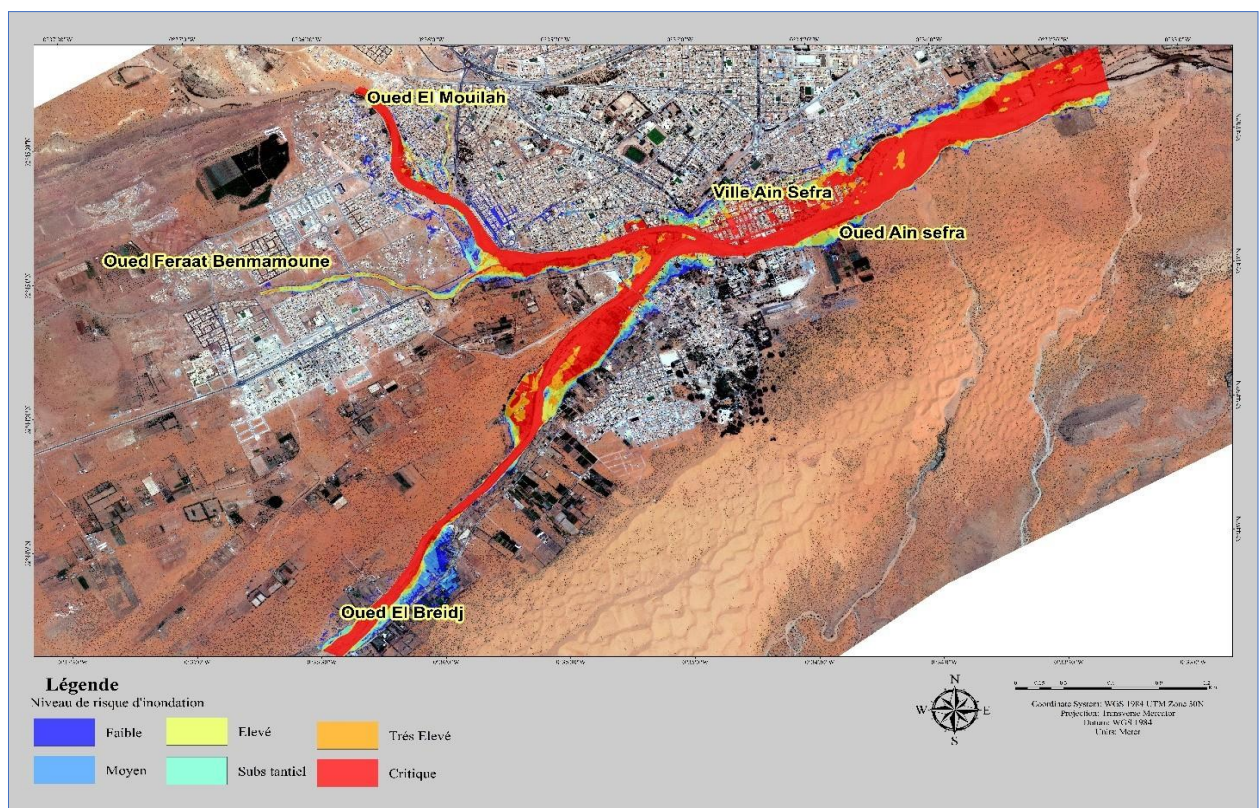


Figure 64: Carte de risque d'inondation d'Ain Sefra

Figure 51: carte de risque d'inondation d'Ain Sefra

III.6. Analyse hydrodynamique du risque d'inondation à Aïn Sefra et évaluation de l'efficacité des aménagements hydrauliques

La ville d'Aïn Sefra, localisée dans un environnement aride à dynamique hydrologique contrastée, est soumise à des régimes de crues torrentielles caractérisés par une forte variabilité spatio-temporelle et une réponse hydrologique rapide des bassins versants. Dans ce cadre, l'analyse du risque d'inondation s'appuie sur une approche intégrée combinant la modélisation hydrodynamique sous HEC-RAS 2D et l'exploitation avancée des données issues des Systèmes d'Information Géographique (SIG).

L'exploitation de la carte de risque avant aménagement (Figure 64) met en évidence une organisation spatiale du danger étroitement liée aux axes d'écoulement principaux. Toutefois, l'analyse fine révèle que les impacts les plus sévères et les dommages les plus significatifs se concentrent au niveau du site de l'ancienne ville, localisé à la confluence des oueds El Breidj et El Mouileh. Cette zone constitue un point névralgique où les apports hydrauliques convergent, générant une amplification locale des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement. Les secteurs urbanisés implantés dans ce contexte apparaissent ainsi comme des zones critiques de concentration de l'aléa, traduisant une forte incompatibilité entre l'occupation du sol et la dynamique fluviale naturelle.

L'analyse couplée des champs de hauteurs d'eau (Figure 57) et des vitesses d'écoulement (Figure 58), issus de la simulation initiale, met en évidence une signature hydrodynamique caractéristique des systèmes à confluence non maîtrisée. Plus précisément, au niveau de l'ancienne ville, la superposition des ondes de crue en provenance des deux oueds engendre :

- Des hauteurs d'eau particulièrement élevées, accentuées par des effets de mise en charge et de ralentissement local des écoulements,
- Des vitesses fortement contrastées, combinant des zones de stagnation liées à la perte d'énergie à la confluence et des zones d'accélération induites par la contraction des écoulements.

Cette configuration traduit une dissipation énergétique inefficace, amplifiée par les interactions hydrauliques complexes au niveau de la confluence, ainsi qu'une expansion latérale marquée des écoulements vers les zones urbanisées adjacentes. Sur le plan hydraulique, cela se traduit par une capacité de transport insuffisante face aux débits convergents, entraînant une surcharge rapide du lit mineur et des débordements généralisés, particulièrement critiques dans le secteur de l'ancienne ville.

L'analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT) met en évidence des discontinuités morphologiques, notamment des pentes faibles et des dépressions locales dans la zone de confluence, favorisant les phénomènes de rétention temporaire et d'étalement des eaux. Par ailleurs, l'envasement des chenaux contribue à la réduction du rayon hydraulique et à

l'augmentation de la rugosité (coefficient de Manning), ce qui accentue l'élévation des lignes d'eau et aggrave les conditions d'inondation dans ce secteur déjà fortement contraint.

Dans une logique de réduction ciblée du risque au niveau des zones les plus critiques, et en particulier du site de l'ancienne ville situé à la confluence des oueds El Breidj et El Mouileh, un ensemble cohérent d'aménagements hydrauliques a été intégré au modèle. Ces interventions visent explicitement à corriger les dysfonctionnements hydrodynamiques observés au droit de cette confluence, considérée comme un point de concentration majeur des écoulements.

Afin d'évaluer de manière rigoureuse l'impact de ces aménagements sur le comportement hydraulique du système, ceux-ci ont été intégrés dans le modèle numérique à travers une modification du Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Dans le cadre de la modélisation hydrodynamique, une étape essentielle a consisté en la modification du Modèle Numérique de Terrain (MNT) afin de représenter fidèlement les aménagements hydrauliques projetés. Cette démarche a reposé sur une intervention ciblée sur la géométrie des oueds, sans altération des zones hors lit. Plus précisément, les corrections ont porté sur l'abaissement des altitudes au niveau des chenaux afin de simuler les opérations de curage, ainsi que sur l'élargissement localisé des sections hydrauliques pour améliorer la capacité d'écoulement.

Une attention particulière a été accordée à la reproduction de la configuration en curage en cascade, intégrée directement dans le MNT modifié. Cette approche permet de représenter de manière réaliste la succession de paliers et de ruptures de pente, favorisant une dissipation progressive de l'énergie et une meilleure maîtrise des écoulements. Ainsi, le MNT modifié ne constitue pas une simple correction géométrique, mais une véritable traduction spatiale des aménagements hydrauliques envisagés.

La comparaison entre le MNT initial et le MNT modifié met en évidence des transformations significatives de la morphologie des oueds, se traduisant par une augmentation du volume utile d'écoulement et une amélioration des conditions de transit hydraulique. Ces modifications ont été directement intégrées dans le modèle HEC-RAS 2D, permettant d'évaluer de manière cohérente et réaliste l'impact des aménagements sur le comportement hydrodynamique global du système, comme le montre la figure 65.

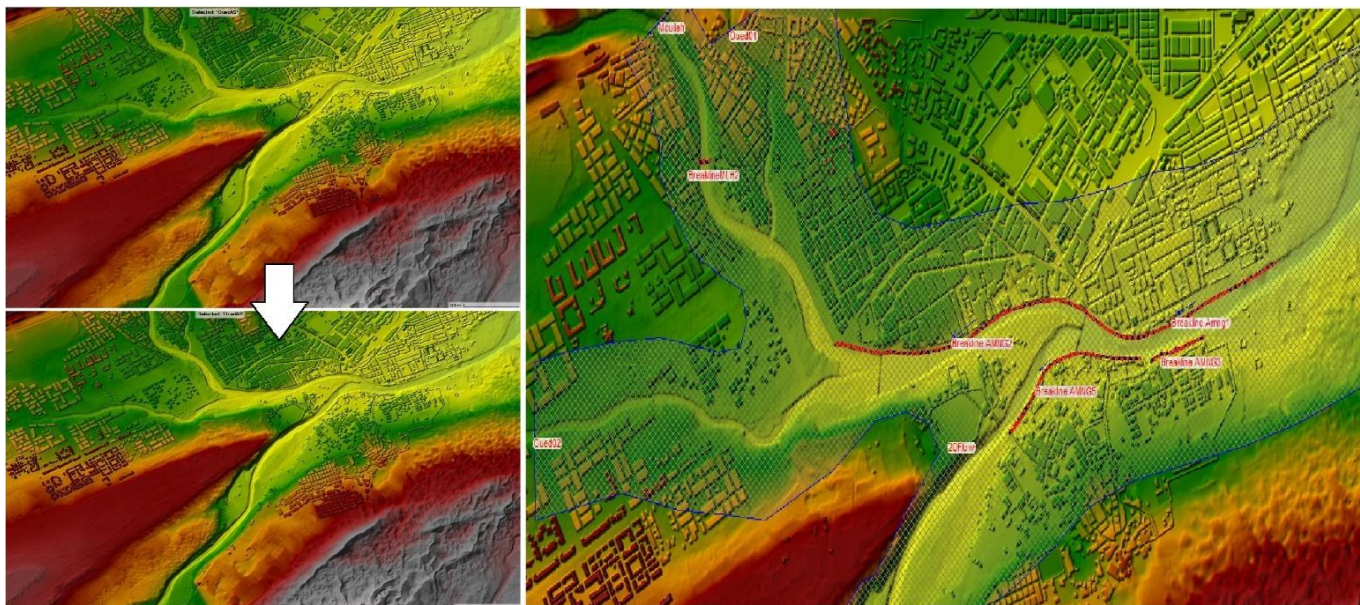


Figure 52: du MNT initial vers un MNT modifié après intégration des aménagements

Figure 65 : du MNT initial vers un MNT modifié après intégration des aménagements

Le curage généralisé de l'oued Mouileh, combiné au recalibrage des sections hydrauliques et à l'approfondissement du lit de l'oued Aïn Sefra, permet d'augmenter significativement la capacité de transit des écoulements. Par ailleurs, la mise en place d'un mur de soutènement de 5,5 m agit comme un dispositif de confinement latéral, particulièrement efficace dans les zones urbanisées proches de la confluence. L'intégration de bassins de rétention en amont joue également un rôle déterminant en réduisant les effets de synchronisation des pics de crue issus des deux oueds.

Dans ce cadre, les débits de référence, estimés par le HPE après prise en compte de ces aménagements, s'établissent comme suit :

- Chaabat El Mouileh : **40 m³/s**
- El Handjir : **110 m³/s**
- El Mouileh : **623 m³/s**
- El Breidj : **530 m³/s**

Ces conditions hydrauliques, intégrant l'effet de laminage des crues, ont été injectées dans le modèle hydrodynamique afin d'évaluer la réponse du système aménagé.

Les résultats de la simulation post-aménagement (Figures 5 et 6) mettent en évidence une amélioration substantielle du fonctionnement hydraulique, en particulier au niveau de la confluence El Breidj – El Mouileh. Les cartes des hauteurs d'eau montrent une réduction nette des tirants d'eau dans le secteur de l'ancienne ville, traduisant une diminution de l'effet de mise en charge observé dans la situation initiale. Cette évolution indique une meilleure capacité du système à évacuer les débits convergents sans accumulation excessive.

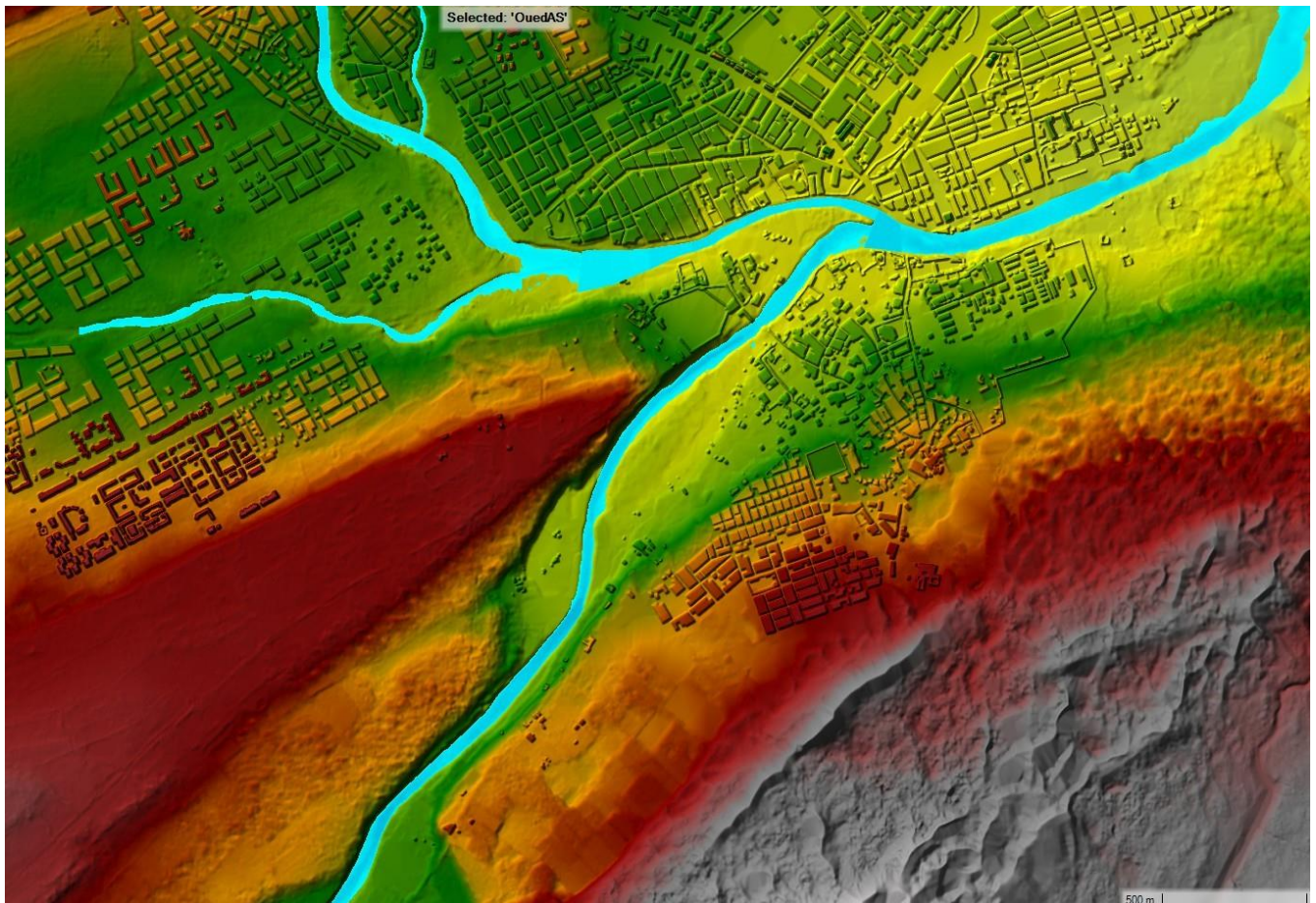


Figure 53: carte des hauteurs d'eau après l'aménagement

Figure 66 : Carte des hauteurs d'eau après aménagement

Parallèlement, l'analyse des vitesses d'écoulement (Figure 67) révèle une réorganisation structurée du champ de vitesse au niveau de la confluence. Les écoulements, auparavant caractérisés par des interactions turbulentes et des zones de recirculation, deviennent plus alignés et dirigés suivant un axe préférentiel. Cette canalisation hydraulique limite les phénomènes de divergence et réduit significativement l'expansion latérale vers les zones urbanisées.

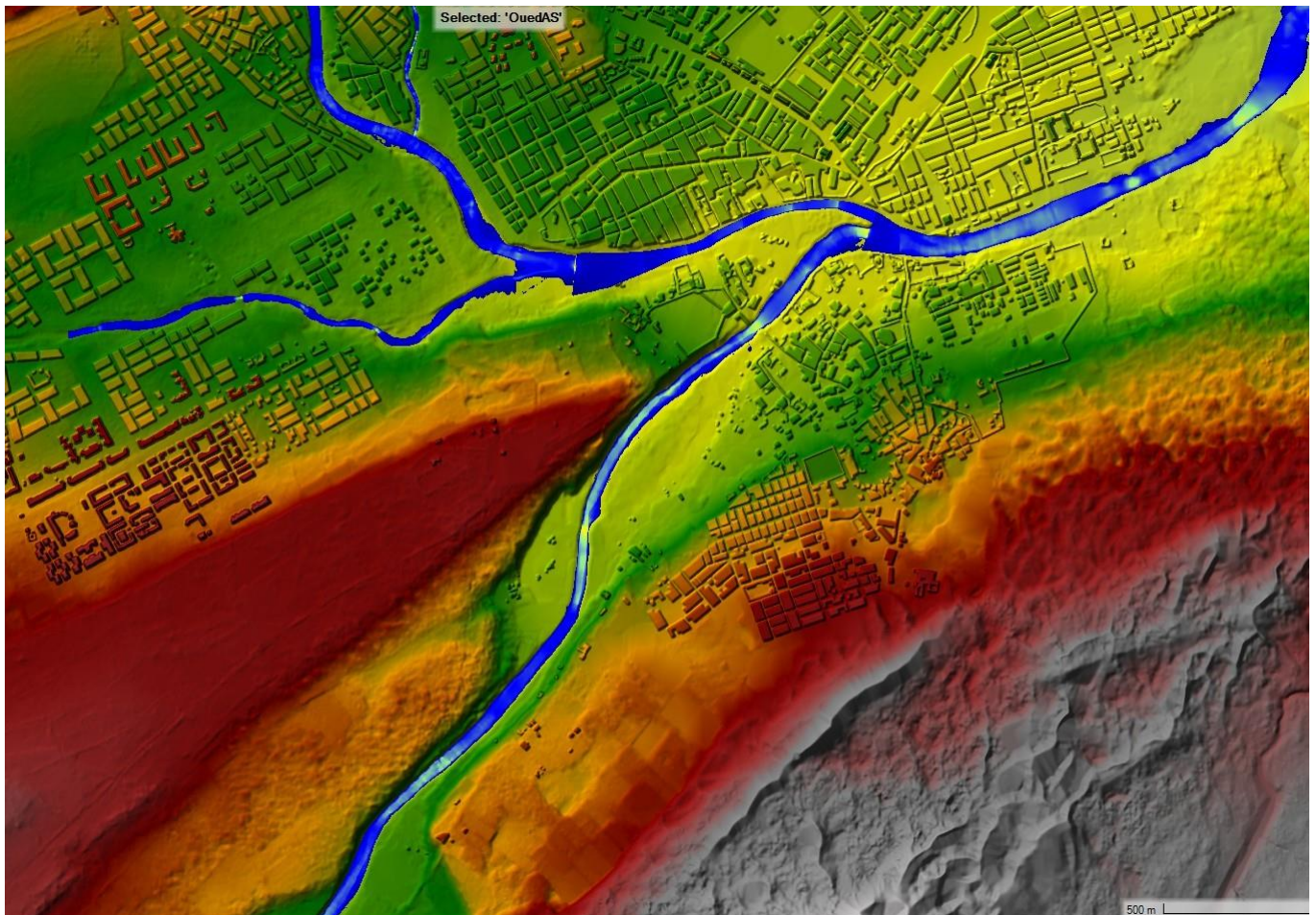


Figure 54: carte des vitesses après l'aménagement

Figure 67 : Carte des vitesses après aménagement

D'un point de vue hydrodynamique, les aménagements ont permis de désynchroniser partiellement les apports de crue et de réduire les effets d'interférence entre les deux oueds. La confluence évolue ainsi d'un point de surcharge hydraulique vers une zone de transit maîtrisé, où les écoulements sont efficacement redistribués dans le lit mineur.

L'analyse comparative avant/après au niveau de l'ancienne ville met en évidence :

- Une diminution significative des hauteurs d'eau,
- Une atténuation des zones de stagnation,
- Une réduction des gradients de vitesse extrêmes,
- Et une limitation des débordements latéraux.

Dans ces conditions, et pour les débits considérés, la modélisation montre que les écoulements au niveau de la confluence rejoignent leur lit mineur de manière contrôlée, sans générer de submersion critique du tissu urbain environnant. Cela traduit une amélioration directe du niveau de protection hydraulique dans la zone historiquement la plus exposée.

Néanmoins, cette reconfiguration hydraulique induit également une augmentation locale des vitesses dans certains tronçons recalibrés, notamment en aval de la confluence. Cette accélération, bien que favorable à l'évacuation des crues, peut engendrer une intensification des contraintes de cisaillement, susceptible de provoquer des processus d'érosion localisée ou de déstabilisation des berges si aucune protection complémentaire n'est envisagée.

Par ailleurs, la robustesse du système reste conditionnée par la durabilité des aménagements. L'absence d'entretien, notamment en matière de gestion sédimentaire, pourrait entraîner une perte progressive de capacité hydraulique et un retour à des conditions proches de l'état initial.

Conclusion

L'approche intégrée combinant modélisation hydrodynamique sous HEC-RAS 2D et analyse spatiale sous SIG a permis de caractériser avec un haut niveau de précision les mécanismes de genèse, de propagation et de concentration des inondations dans le contexte hydrologique complexe d'Aïn Sefra. Les résultats obtenus montrent clairement que la dynamique des crues est fortement contrôlée par la configuration morphologique de la vallée et, plus particulièrement, par la zone de confluence entre les oueds El Breidj et El Mouileh, identifiée comme le principal foyer de surcharge hydraulique et de débordement.

L'analyse avant aménagement met en évidence un fonctionnement hydrodynamique instable caractérisé par une superposition des ondes de crue, une augmentation locale des hauteurs d'eau, des zones de stagnation et des débordements latéraux affectant directement le tissu urbain de l'ancienne ville. Cette configuration traduit une inadéquation entre les capacités hydrauliques naturelles du système et les volumes transitant lors des épisodes extrêmes.

L'intégration des aménagements hydrauliques proposés dans le modèle numérique, à travers une modification cohérente du Modèle Numérique de Terrain (MNT), a permis d'évaluer quantitativement leur impact sur le comportement global du système. Les opérations de curage, le recalibrage des sections hydrauliques, l'approfondissement des lits, la mise en place de bassins de rétention ainsi que l'ajout d'ouvrages de confinement latéral ont profondément reconfiguré le régime d'écoulement.

Les simulations post-aménagement montrent une amélioration hydraulique significative, se traduisant par :

- Une réduction importante des hauteurs d'eau dans les secteurs urbanisés critiques ;
- Une diminution des débordements et de l'extension des zones inondées ;
- Une meilleure canalisation des écoulements au niveau de la confluence ;
- Une atténuation des phénomènes de stagnation et de dissipation énergétique ;
- Ainsi qu'une amélioration globale de la capacité de transit des oueds.

Les résultats démontrent également que les bassins de rétention jouent un rôle majeur dans le laminage des hydrogrammes et dans la réduction partielle de la synchronisation des pics de crue entre les deux oueds. Cette désynchronisation contribue directement à limiter les effets de surcharge hydraulique observés dans la situation initiale.

Toutefois, malgré l'efficacité notable des aménagements, les simulations révèlent également certaines contraintes hydrodynamiques secondaires, notamment une augmentation locale des vitesses dans certains tronçons recalibrés. Cette accélération peut engendrer des risques d'érosion des berges et nécessiter des mesures complémentaires de protection et de stabilisation. De plus, la pérennité des performances hydrauliques reste fortement dépendante de l'entretien régulier des ouvrages, du contrôle de l'envasement et de la gestion sédimentaire des chenaux.

Dans cette perspective, la réduction durable du risque d'inondation à Aïn Sefra ne peut reposer uniquement sur des solutions structurelles. Elle doit s'inscrire dans une stratégie intégrée associant :

- Le suivi morphodynamique des oueds ;
- La maintenance continue des aménagements hydrauliques ;
- La maîtrise de l'urbanisation dans les zones exposées ;
- Le développement de systèmes d'alerte et de gestion de crise ;
- Ainsi que le renforcement de la résilience territoriale face aux événements hydrologiques extrêmes.

En définitive, cette étude démontre l'intérêt majeur des outils de modélisation hydrodynamique avancée pour l'aide à la décision, l'évaluation des scénarios d'aménagement et l'optimisation des stratégies de protection contre les inondations. Elle met également en évidence la nécessité d'une approche multidisciplinaire et évolutive, intégrant simultanément les dimensions hydrauliques, morphologiques, territoriales et climatiques dans la gestion du risque d'inondation en milieu semi-aride.

Conclusion

Conclusion générale

Cette étude a permis de développer une approche intégrée et multi-échelle combinant données topographiques de très haute résolution, modélisation hydrodynamique transitoire sous HEC-RAS 2D, analyse spatiale sous SIG et validation multi-source afin de reconstituer et d'analyser avec précision la crue du 08 septembre 2024 dans le bassin d'Aïn Sefra. La méthodologie mise en œuvre constitue un cadre scientifique robuste pour la compréhension du fonctionnement hydrologique et hydraulique des systèmes torrentiels en milieu semi-aride, en cohérence avec les avancées récentes en modélisation hydraulique des crues complexes.

L'intégration de données topographiques et géomorphologiques à très haute résolution spatiale, associée à une modélisation hydraulique transitoire avancée, a permis de reproduire fidèlement les mécanismes de propagation des écoulements, les zones de débordement ainsi que les interactions entre la dynamique fluviale et les zones urbanisées. Le calage du modèle à partir des observations de terrain, des relevés GPS et des traces hydrauliques a confirmé la capacité du modèle à restituer avec précision les conditions réelles de l'événement.

Les résultats obtenus mettent en évidence la forte réactivité hydrodynamique du bassin d'Aïn Sefra, caractérisée par des temps de réponse très courts, une concentration rapide des écoulements et une forte sensibilité aux effets de confluence. L'analyse détaillée des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement a montré que la zone de l'ancienne ville, située à la confluence des oueds El Breidj et El Mouileh, constitue le principal secteur de vulnérabilité hydraulique, où les interactions entre les ondes de crue provoquent une amplification locale du risque d'inondation.

L'un des apports majeurs de ce travail réside dans l'intégration et l'évaluation hydrodynamique des aménagements hydrauliques proposés. Contrairement à une approche purement descriptive du risque, cette étude a permis de tester quantitativement l'efficacité des solutions d'aménagement à travers leur intégration directe dans le Modèle Numérique de Terrain et dans le modèle hydraulique HEC-RAS 2D. Les simulations post-aménagement démontrent une amélioration significative du fonctionnement hydraulique global du système.

Les opérations de curage, de recalibrage des sections hydrauliques, d'approfondissement des lits, ainsi que l'intégration de bassins de rétention et d'ouvrages de protection latérale ont permis :

- une réduction importante des hauteurs d'eau dans les zones urbanisées ;
- une diminution de l'extension des zones inondées ;
- une amélioration de la capacité de transit des écoulements ;
- une meilleure canalisation hydraulique au niveau de la confluence ;

- et une réduction des effets de surcharge hydraulique responsables des débordements majeurs.

Les résultats montrent également que les bassins de rétention jouent un rôle essentiel dans le laminage des crues et dans la désynchronisation partielle des pics de débit provenant des différents sous-bassins versants. Cette réduction des interactions hydrodynamiques à la confluence constitue un facteur déterminant dans l'amélioration du niveau global de protection hydraulique de la ville.

Cependant, l'étude met également en évidence certaines limites et contraintes associées aux aménagements. L'augmentation locale des vitesses dans certains tronçons recalibrés peut favoriser des phénomènes d'érosion ou de déstabilisation des berges. De plus, la durabilité des performances hydrauliques dépend fortement de l'entretien régulier des chenaux, de la gestion sédimentaire et du contrôle de l'urbanisation future dans les zones exposées.

Ainsi, cette étude confirme que la réduction durable du risque d'inondation ne peut reposer exclusivement sur des solutions structurelles. Une gestion efficace doit intégrer simultanément :

- les aménagements hydrauliques ;
- le suivi morphodynamique des oueds ;
- les politiques d'aménagement du territoire ;
- les systèmes d'alerte précoce ;
- ainsi que les stratégies de résilience territoriale face aux événements extrêmes et aux changements climatiques.

Au-delà du cas d'Aïn Sefra, ce travail propose une méthodologie transférable à d'autres bassins semi-arides soumis à des phénomènes de crues torrentielles rapides. Il démontre l'intérêt des approches couplées hydrologie-hydraulique-SIG pour la compréhension des processus hydrodynamiques complexes et pour l'aide à la décision dans le cadre de la gestion intégrée du risque d'inondation.

En définitive, cette recherche constitue une contribution scientifique et opérationnelle majeure pour la planification territoriale, la conception d'aménagements hydrauliques adaptés et le renforcement de la résilience des zones urbaines exposées aux inondations dans un contexte de variabilité climatique croissante et d'intensification des événements extrêmes.

Tables aux & Sources

Figure 1: Les composants de la vallee fluviale	4
Figure 2: Decomposition du risque d'inondation en alea et vulnerabilite	5
Figure 3: illustration des dommages causes par l'inondation de septembre 2024	24
Figure 4: situation geographique de la wilaya de Naama	28
Figure 5: Situation geographique de la ville de Ain Sefra	29
Figure 6: infrastructure de la region d'etude vue sur image spatiale	31
Figure 7: points d'eau de la region d'etude (puits et forages)	31
Figure 8: pourcentage des classes de densite de drainage.....	32
Figure 9: densite du reseau hydrographique.....	33
Figure 10: direction de flux global souterrain.....	34
Figure 11: carte geologique de la zone d'etude.....	37
Figure 12: modele numerique de terrain du bassin versant d'Ain Sefra	41
Figure 13: carte des pentes du Bassin versant d'Ain Sefra	41
Figure 14: Carte d'exposition des versants d'Ain Sefra	42
Figure 15: Carte geologique du Bassin versant d'Ain Sefra	43
Figure 16: carte du reseau lineamentaire	43
Figure 17: carte des precipitations moyennes annuelles de la region de Naama	46
Figure 18: precipitations moyennes annuelles de Naama	47
Figure 19: Carte des isohyetes	48
Figure 20: carte des temperatures moyennes annuelles maximales de Naama	49
Figure 21: hymidite relative de la region de Naama(1981-2020)	50
Figure 22: carte des vitesses et directions des vents de la region de Naama (1981-2020)	51
Figure 23: lames d'eau precipitees et ecoules au niveau de l'oued Ain Sefra	53
Figure 24 : Confluence Oued Breidj-Oued Tirkount (19/10/2007).....	56
Figure 25: Degats de la crue de 19 Octobre 2007.....	57
Figure 26: Carte de l'occipation du sol du site d'etude	62
Figure 27: Zoom sur la carte de l'occupation du sol de la region de Ain sefra.....	63
Figure 28: carte de localisation des dtations de mesurs	68
Figure 29: Zoom sur les laisses de crue au niveau du centre-ville.....	70
Figure 30: fusion de l'image PANavec les Multispectrales.....	89
Figure 31: carte manning d'Ain sefra	90
Figure 32: carte d'occupation du sol d'Ain Sefra.....	91
Figure 33: carte de la nature du sol d'Ain sefra	92
Figure 34: carte des parametres du sediment.....	94
Figure 35: calcul du debit de calage a la confluence des deux affluents Tinkourt et Mouileh.....	101
Figure 36: calcul du debit de calage de l'oued el Breidj.....	101
Figure 37: carte de regeneration de la crue survenue le 08septembre 2024	102
Figure 38: points GPS des laisses de crue.....	103
Figure 39: vue globale de a geometrie Mixte en 1D<<profile>> et 2D<<Mesh>>	104
Figure 40: realisation de la geometrie mixte 1D/2D	105
Figure 41: VUE globale de la geometrie des Oueds de Ain Sefra	108
Figure 42: Zoom sur un secteur specifique 'Centre-ville Ain Sefra'	108
Figure 43: vue 3D de la geometrie 'Ain Sefra'.....	109
Figure 44: Correlation entre les laisses de crue 08 septembre 2024 et la modelisation HECRAS (Ain Sefra).....	117
Figure 45: Carte des vitesses d'ecoulement d'Ain Sefra.....	121
Figure 46: Carte des hauteurs d'eaux d'Ain Sefra	122
Figure 47: vue globale de la carte des vacteurs de vitesse statistiques 'Ain Sefra'	124
Figure 48: Zoom sur vue globale de la carte des vecteurs de vitesse statistique 'Ain Sefra'	125
Figure 49: la carte des hauteurs d'eaux avec le suivi des particules 'Ain Sefra'	126
Figure 50: Zoom sur les hauteurs d'eaux avec le suivi des particules 'Ain Sefra'	127
Figure 51: carte de risque d'inondation d'Ain Sefra	132
Figure 52: du MNT initial vers un MNT modifie apres integration des aménagements.....	135
Figure 53: carte des hauteurs d'eau apres l'amenagement	136
Figure 54: carte des vitesses apres l'amenagement.....	137
Tableau 1: crues observees du 28/12/1984 au 01/01/1985 dans l'Est Algerien	20
Tableau 2 : Fenetre de HEC RAS pour les entrees des parametres du sediment.....	95
Tableau 3: repartition des 7 classes granulometriques	96
Tableau 4: tableau de parametres granulometriques du lit	97
Tableau 5: combinaison des modeles (1Det2D)	110
Tableau 6: Taux de precision du calage	117
Tableau 7: classification de l'alea par croisement hauteur-vitesse.....	130

La liste des abréviations ;

Abréviation	Signification
AEP	Alimentation en Eau Potable
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
ArcGIS	Arc Geographic Information System
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
DEM	Digital Elevation Model
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
IDD	International Disaster Database
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
ONM	Office National de la Météorologie
ONU	Organisation des Nations Unies
SIG	Système d'Information Géographique
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Drone)
GPS	Global Positioning System
QGIS	Quantum Geographic Information System
1D	Modèle Unidimensionnel
2D	Modèle Bidimensionnel
3D	Modèle Tridimensionnel
EDF	Électricité de France
CETMEF	Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales
METL	Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement
MATE	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
km ²	Kilomètre carré
m ³ /s	Mètre cube par seconde
mm	Millimètre
m	Mètre

Bibliographie :

- Ambroise, B. (1999). *Analyse et modélisation des systèmes hydrologiques*. Paris : Éditions Tec & Doc.
- Bachelard, G. (1979). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- Bates, P. D., Anderson, M. G., Hervouet, J. M., & Hawkesbury, L. (1998). Hydraulic modeling of floodplain flows.
- Bates, P. D., & De Roo, A. P. J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236, 54–77.
- Carroll, R. W. H., et al. (2000). Floodplain contaminant transport modeling.
- EDF (1993). *Modélisation hydraulique des écoulements à surface libre*. Electricité de France.
- Ervine, D. A., & MacLeod, A. B. (1999). River floodplain flow interactions.
- Farissier, P. (1992). Numerical modeling using mixed finite elements.
- Hardy, R. J., et al. (2000). Sediment transport and hydraulic modelling.
- Hervouet, J. M., & Van Haren, L. (1996). Recent advances in numerical methods for hydraulic modelling.
- Hingray, B. (1999). Hydraulic storage cell modelling approaches.
- J.O.R.A. (2004). Loi n°04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. *Journal Officiel de la République Algérienne*.
- Kauark Leite, L. A. (1990). *Modélisation des systèmes environnementaux*.
- Lahlah, S. (2004). Inventaire des inondations en Algérie. *Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)*.
- METL/CETMEF (1999). *Guide de modélisation hydraulique des zones inondables*.
- Protection Civile (2009). *Les inondations en Algérie : causes, typologie et gestion des risques*.
- Werner, M. G. F. (2001). Floodplain mapping and hydraulic post-processing techniques.
- Whigham, D. F., & Young, C. A. (2001). Ecological dynamics of floodplains.
- Wilson, C. A. M. E., et al. (2002). Hydraulic modelling and flood risk assessment.

Référence du logiciel utilisé

- [HEC-RAS Hydraulic Reference Manual](#). Hydraulic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.