

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر

UNIVERSITÉ DESAÏDA - Dr MOULAY TAHAR



Faculté de technologie

Département de génie civil et de l'hydraulique

PROJET DE FIN DE CYCLE

Présenté pour l'obtention du diplôme de master en hydraulique

Spécialité : hydraulique urbaine

Approche intégrée d'aménagement pour la gestion et protection du bassin versant de Wadi Boussemghoun, région d'El-Bayadh (Nord-Ouest, Algérie).

Présenté par :
SERRAI Hamra

Soutenu le 10 /06/2024, devant le jury composé de :

| | | | |
|-----|--------|-----------|-----------|
| Mr. | HAZZAB | Abdelkrim | Président |
| Mr. | AIMER | Hadj | Examineur |
| Mr. | TALBI | Djilali | Encadreur |

Année universitaire 2023/2024

**APPROCHE INTEGREE D'AMENAGEMENT
POUR LA GESTION ET PROTECTION DE WADI
BOUSSEMGHOUN, REGION D'EL BAYADH
(NORD-OUEST, ALGERIE).**

REMERCIEMENT

Remerciement

La réalisation de ce mémoire de fin d'études marque l'aboutissement de mon parcours universitaire de second cycle. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui m'ont soutenu et guidé tout au long de ce travail.

Tout d'abord, je remercie les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail. Je remercie tout particulièrement mon directeur de mémoire, Monsieur Djilali TALBI, pour sa disponibilité et ses conseils précieux son encouragement qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Je remercie également Monsieur Hadj AIMER pour son encadrement tout au long de mon parcours universitaire et pour son expertise et Monsieur Abdelkrim HAZZAB pour sa disponibilité et ses encouragements et ses conseils qui ont approfondi mes connaissances.

J'exprime également ma reconnaissance envers l'ensemble des enseignants du département, dont les conseils et le soutien m'ont permis d'achever avec succès mon cursus de formation de Licence et de Master.

Enfin, les mots me manquent pour exprimer toute ma gratitude envers ma famille, et tout particulièrement mon fils, pour son amour et sa présence indéfectibles qui sont pour moi une source constante de réconfort et de motivation.

RÉSUMÉ

RESUME

Le travail présenté dans ce mémoire vise à proposer une approche intégrée pour la gestion et la protection durable de l'oasis de Boussemghoun face aux défis environnementaux actuels et futurs. Cette étude pluridisciplinaire s'est attachée à analyser les caractéristiques physiographiques des bassins versants environnants, révélant les principales morphométriques de la zone d'étude. En particulier, la forme allongée des bassins favorise les crues, accentuant la vulnérabilité du Q'sar face aux événements extrêmes. Ces résultats soulignent la nécessité d'une stratégie intégrée combinant des solutions naturelles et des infrastructures.

La détermination des précipitations caractéristiques et des débits de crue pour différentes périodes de retour a été suivie par la simulation des surfaces inondées et a mis en évidence des impacts potentiels sur le Q'sar de Boussemghoun.

L'étude a permis de nouvelles perspectives sur la dynamique hydrologique de ce territoire fragile, tout en proposant des pistes concrètes pour sa sauvegarde. Dans le contexte du changement climatique, les résultats obtenus appellent à renforcer la surveillance du risque d'inondation et à consolider les ouvrages de protection prévus. Une telle approche systémique doit inclure une gestion concertée impliquant toutes les parties prenantes, assurant ainsi une réponse coordonnée et efficace.

La valorisation du patrimoine culturel et la sensibilisation des populations locales aux enjeux environnementaux sont également capitales pour garantir la pérennité de cet écosystème oasien. En somme, cette étude de cas met en évidence l'importance des études intégrées pour comprendre et renforcer la résilience des territoires arides face aux défis contemporains, offrant ainsi des principes applicables à la protection durable du patrimoine naturel et culturel du Sahara algérien.

Mots clés : Préservation du Oasis, Wadi Boussemghoun, Q'sar de Boussemghoun, région d'El-Bayadh, risques d'inondation, analyse hydrologique, modélisation hydraulique, HEC-RAS approche intégrée d'aménagement, écosystème local, biodiversité, gestion durable.

ABSTRACT

The study presented in this Master's thesis aims to propose an integrated approach for the sustainable management and protection of the Boussemghoun Oasis in the face of current and future environmental challenges. This multidisciplinary research focused on the analysis of the physiographic characteristics of the surrounding watersheds, revealing the main morphometric features of the study area. In particular, the elongated shape of the basins favors flash floods, increasing the Q'sar's vulnerability to extreme events. These findings highlight the need for an integrated strategy combining natural solutions and infrastructure.

The identification of characteristic rainfall and flood flows for different return periods was followed by the simulation of flooded areas, highlighting potential impacts on the Q'sar of Boussemghoun.

The study has provided new insights into the hydrological dynamics of this fragile area, while offering concrete solutions for its preservation. In the context of climate change, the findings call for the strengthening of flood risk monitoring and the reinforcement of planned protection structures. Such a systemic approach must include coordinated management involving all actors to ensure a coordinated and effective response.

The valorization of the cultural heritage and the sensitization of the local population to environmental issues are also crucial to ensure the long-term sustainability of this oasis ecosystem. In essence, this case study highlights the importance of integrated studies to understand and enhance the resilience of drylands in the face of contemporary challenges, and offers principles for the sustainable protection of the natural and cultural heritage of the Algerian Sahara.

Keywords: Oasis conservation, Wadi Boussemghoun, Q'sar of Boussemghoun, El-Bayadh region, flood risks, hydrological analysis, hydraulic modelling, HEC-RAS, integrated management approach, local ecosystem, biodiversity, sustainable management.

الملخص

تحمل هذه الدراسة المنجزة في إطار تحضير مذكرة نهاية الدراسة لنيل شهادة الماستر في اختصاص الري الحضري كـعنوان: دراسة واقتراح منهجية متكاملة لإدارة وحماية الحوض المائي لوادي بوسمغون، منطقة البيض (الشمال الغربي، الجزائر).

تهدف الدراسة المقدمة في هذه المذكرة إلى اقتراح خطة متكاملة لإدارة وحماية واحة بوسمغون بشكل مستدام في مواجهة التحديات البيئية الحالية والمستقبلية. وقد ركز هذا البحث متعدد التخصصات على تحليل الخصائص الفيزيوجرافية لحوضيات تصريف المياه المحيطة، مما كشف عن المعالم المورفومترية الرئيسية لمنطقة الدراسة. وعلى وجه الخصوص، تُشجع الشكل الممدود لحوضيات التصريف الفيضانات، مما يزيد من هشاشة القصر في مواجهة الأحداث المناخية والطبيعية القصوى. تُسلط هذه النتائج الضوء على ضرورة وضع استراتيجية متكاملة تجمع بين الحلول الطبيعية والبنية والهيكل التحتية.

تمت متابعة تحديد هطول الأمطار المميزة ومعدلات تدفق الفيضانات لفترة عودة مختلفة بمحاكاة المساحات المُغمرة، مما أظهر التأثيرات المحتملة على قصر بوسمغون.

أُتاحت الدراسة رؤى جديدة حول ديناميات المياه في هذه المنطقة الهشة، مع تقديم مسارات محددة لحمايتها. في سياق تغير المناخ، تدعو النتائج التي تم الحصول عليها إلى تعزيز مراقبة مخاطر الفيضانات وتوطيد أعمال الحماية المُخطط لها. يجب أن يشمل مثل هذا النهج النظامي إدارة مُنسقة تشمل المعنيين وجميع أصحاب المصلحة، مما يضمن استجابة مُنسقة وفعالة.

من جهة أخرى فإن هذه النتائج تُعتبر أيضًا تُمثّل التراث الثقافي من خلال توعية السكان المحليين بالتحديات البيئية الذي يمثل أمرًا بالغ الأهمية لضمان استمرارية البيئة الواحية. وباختصار، تُسلط دراسة الحالة هذه الضوء على أهمية الدراسات المتكاملة لفهم وتعزيز مرونة الأراضي القاحلة في مواجهة التحديات المعاصرة، مما يوفر مبادئ قابلة للتطبيق لحماية التراث الطبيعي والثقافي للصحراء الجزائرية بشكل مستدام.

الكلمات المفتاحية: حماية الواحة، واحة بوسمغون، قصر بوسمغون، منطقة البيض، مخاطر الفيضانات، نمذجة هيدروليكية، HEC-RAS، نهج متكامل، النظام البيئي المحلي، التنوع البيولوجي، الإدارة المستدامة.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

| | | |
|---------|---|----|
| I. | Introduction générale | 1 |
| II. | Premier chapitre : Les Oasis Sahariennes : havre bioclimatique et refuges de vie dans les régions arides | 4 |
| II.1 | Introduction du chapitre : | 4 |
| II.2 | Définitions et notions générales liées aux Oasis : | 4 |
| II.3 | L'Oasis : Un facteur de témoignage historique et culturel..... | 6 |
| II.4 | L'Oasis : Un laboratoire naturel pour la durabilité | 7 |
| II.5 | L'Oasis, carrefour de vie et de civilisations en milieu aride..... | 8 |
| II.6 | Typologie des Oasis. | 9 |
| II.7 | Les Oasis du Sahara algérien, îlots de vie et de biodiversité | 11 |
| II.8 | L'oasis saharienne, un triptyque Eau-Q'sar-Palmeraie dans un environnement aride | 12 |
| II.9 | Les Q'sours : Des monuments historiques témoins d'une civilisation ancestrale | 13 |
| II.10 | Système d'irrigation traditionnel dans les Oasis | 16 |
| II.11 | Les modes de système de de partage des eaux d'irrigation dans les Oasis. | 27 |
| II.11.1 | Mode de partage par volume | 28 |
| II.11.2 | Mode de partage par unité horaire (temps d'écoulement)..... | 29 |
| II.11.3 | Aperçu de comparaison entre les deux modes de partage des eaux dans les Oasis . | 30 |
| II.12 | Les réseaux de distribution dans le système de de partage des eaux d'irrigation dans les Oasis. 31 | |
| II.13 | Conclusion du chapitre | 32 |
| III. | Deuxième chapitre : Boussemghoun : Territoire Oasis et Q'sar, Localisation Administrative ancienne et Archéologie Saharienne Introduction du chapitre : | 34 |
| III.1 | Introduction du chapitre : | 34 |
| III.2 | Situation géographique | 35 |
| III.3 | Aperçu historique administratif de la commune de Boussemghoun | 37 |
| III.4 | La desserte routière de la commune de Boussemghoun..... | 37 |

| | | |
|--------|--|----|
| III.5 | Climat de la région de Boussemghoun | 38 |
| III.6 | Relief de la région Boussemghoun | 39 |
| III.7 | Population de la commune de Boussemghoun : | 40 |
| III.8 | L'Oasis de Boussemghoun | 41 |
| III.9 | Héritage culturel et historique des Q'sours dans la région de Boussemghoun..... | 43 |
| III.10 | Le Q'sar de Boussemghoun : | 44 |
| III.11 | La vie socioéconomique à Boussemghoun, | 46 |
| III.12 | Conclusion du chapitre | 48 |
| IV. | Troisième chapitre : Etude hydrologique..... | 49 |
| IV.1 | Introduction | 49 |
| IV.2 | Etude morphométrique | 50 |
| IV.2.1 | Considération morphométriques liées à l'étude hydrologique en vue la protection de l'Oasis de Boussemghoun et ses composants. | 50 |
| IV.2.2 | Détermination des principaux paramètres morphométriques du bassin versant de l'Wadi de Boussemghoun. | 52 |
| IV.2.3 | Analyse morphométrique du bassin de l'Wadi Boussemghoun..... | 56 |
| IV.2.4 | Analyse comparative avec d'autres bassins de la région | 57 |
| IV.3 | Paramètres et indicateurs requis pour l'étude hydrologique..... | 59 |
| IV.3.1 | Temps de concentration T_c : | 59 |
| IV.3.2 | Étude fréquentielle des pluies maximales journalières : | 61 |
| IV.4 | Etude de crue | 69 |
| IV.4.1 | Approches d'évaluation du débit des crues dans un bassin versant..... | 69 |
| IV.4.2 | Application sur le cas du bassin versant de l'Wadi Boussemghoun..... | 71 |
| IV.4.3 | Hydrogramme des crues..... | 72 |
| IV.5 | Modélisation hydraulique | 75 |
| IV.5.1 | Introduction..... | 75 |
| IV.5.2 | Modèle HEC-RAS | 76 |

| | | |
|--------|---|-----|
| IV.5.3 | Caractéristiques techniques de HEC-RAS..... | 77 |
| IV.5.4 | Modélisation des débits de crue pour différents périodes de retour | 77 |
| IV.6 | Conclusion du chapitre | 85 |
| V. | Quatrième chapitre : Mesures préventives de protection de l’Oasis de Boussemghoun | 87 |
| V.1 | Introduction : | 87 |
| V.2 | Mesures basées sur la nature | 88 |
| V.3 | Mesures basées sur le génie civil | 89 |
| V.4 | Les bassins de rétention..... | 91 |
| V.4.1 | Fonctionnalités et avantages | 91 |
| V.4.2 | Types de bassins de rétention..... | 91 |
| V.4.3 | Applications | 92 |
| V.4.4 | Enjeux et développements futurs | 92 |
| V.5 | Mise en œuvre de la stratégie de protection par l’implantation des bassins de rétention ... | 92 |
| V.5.1 | Sélection du site : | 93 |
| V.5.2 | Considérations de conception et de construction : | 94 |
| V.5.3 | Détermination du débit à gérer..... | 94 |
| V.5.4 | Calcul du volume de rétention nécessaire..... | 96 |
| V.5.5 | Prise en charge de gestion du volume de rétention..... | 96 |
| V.5.6 | Considérations relatives au nombre de bassins : | 97 |
| V.5.7 | Calcul du volume pour chaque bassin..... | 97 |
| V.5.8 | Dimensionnement de chaque bassin | 98 |
| V.5.9 | Calcul du débit de sortie et déduction du temps de fuite pour chaque bassin : | 99 |
| V.6 | Conclusion du chapitre..... | 100 |
| VI. | Conclusion Générale..... | 101 |
| VII. | Références bibliographiques : | 102 |

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau IV-1: Principaux paramètres morphométriques du bassin versant | 56 |
| Tableau IV-2 : Comparaison des caractéristiques morphométriques avec les bassins de la région .. | 58 |
| Tableau IV-3: Temps de concentration d'après les formules usuelles | 61 |
| Tableau IV-4 : Résultats de l'ajustement par la loi de Gumbel..... | 63 |
| Tableau IV-5: Intensités pour divers périodes de retour et différentes durées. | 66 |
| Tableau IV-6: Valeurs du Coefficient de la pente du bassin (C1)..... | 68 |
| Tableau IV-7 : Valeurs du coefficient lié à la nature du sol(C2)..... | 68 |
| Tableau IV-8: Valeurs du coefficient lié à la couverture végétale (C3) | 68 |
| Tableau IV-9 : Résultat du débit des crues estimé par différentes approche pour le bassin d'étude . | 71 |
| Tableau IV-10: Paramètres de l'hydrogramme de crue dans la zone d'étude | 73 |
| Tableau IV-11: Débits de crues pour différentes périodes de retour. | 74 |
| Tableau IV-12: Résultats de simulation :..... | 83 |

LISTE DES FIGURES ET DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES ET DES ILLUSTRATIONS

| | |
|---|----|
| Figure II-1: Une des structures du système d'irrigation traditionnel à Boussemghoun | 6 |
| Figure II-2: Schéma de la typologie des Oasis, selon Yves Clouet (Clouet, 1995)..... | 9 |
| Figure II-3: Classification des Oasis selon Yaël Kouzmine (Kouzmine, 2012)..... | 10 |
| Figure II-4: Les composantes de l'Oasis (Ansari, 2016), (Salhi, 2020)..... | 12 |
| Figure II-5: Facteurs déterminants dans l'implantation du Q'sar dans le Sahara (Ait Saadi, 2019) .. | 14 |
| Figure II-6: Typologie des Foggaras selon Zella & Smadhi (Zella & Smadhi, 2006), | 18 |
| Figure II-7: Typologie des Foggaras selon Remini et al. (Remini et al., 2010) | 19 |
| Figure II-8: Système de partage de l'eau dans les Oasis | 28 |
| Figure III-1: Situation géographique de la région d'étude : Boussemghoun dans son environnement | 36 |
| Figure III-2: Schéma représentatif de l'Oasis de Boussemghoun (Hadidi, 2020)..... | 41 |
| Figure III-3: Vue partielle de la palmeraie de Boussemghoun | 42 |
| Figure III-4: Les jardins de l'Oasis de Boussemghoun | 42 |
| Figure III-5: Le Q'sar de Boussemghoun..... | 44 |
| Figure IV-1: Destruction de digue au niveau du Wadi de Boussemghoun..... | 49 |
| Figure IV-2: Profil des altitudes de l'Wadi de Boussemghoun fonction de sa longueur. | 51 |
| Figure IV-3 : Série des Pjmax de la station pluviométrique de Boussemghoun de 1980-2020. | 62 |
| Figure IV-4 : Courbes d'ajustement de la série pluviométrique par la loi de Gumbel..... | 64 |
| Figure IV-5 : Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) à la station de Boussemghoun. | 67 |
| Figure IV-6: Courbes Durée-Débit-Fréquence (DDF) à la station de Boussemghoun..... | 67 |
| Figure IV-7 : Hydrogrammes de crue pour différentes périodes de retour..... | 75 |
| Figure IV-8: MNT de la région de Boussemghoun. | 78 |
| Figure IV-9 : Projection de la région d'étude (WGS/1984/UTM/Zone30N)..... | 79 |
| Figure IV-10: Incorporation du MNT dans HEC-RAS | 80 |
| Figure IV-11 : Visualisation de la simulation..... | 81 |
| Figure IV-12: Schémas de résultats de simulation..... | 82 |
| Figure IV-13: Etendue de l'inondation..... | 84 |
| Figure IV-14: Profondeurs d'eau simulées pour les différentes périodes de retour..... | 84 |
| Figure IV-15: Cartes des profondeurs d'eau pour les périodes de retour de 100 et 50 ans..... | 82 |
| Figure IV-16: Cartes des profondeurs d'eau pour les périodes de retour de 10 et 5 ans..... | 83 |

LISTE DES ABREVIATIONS, UNITES DE MESURES ET ACRONYMES

| Symbole | Désignation | Unité |
|--|---|----------------------|
| A_{orifice} | Surface de l'orifice du bassin de rétention | m ² |
| B_h | Relief du bassin. | M |
| C° | Degré Celsius. | °C |
| C_m | Constance de maintenance de canal. | km |
| Cr | Coefficient de ruissellement | |
| C_t | Coefficient de torrentialité. | / |
| DDF | Débit, durée, fréquence | |
| D_s | Dénivelé spécifique. | m |
| D_d | Densité de drainage. | km / km ² |
| D_t | Texture de drainage. | |
| E | Coefficient d'allongement | / |
| ET | Evapotranspiration. | |
| F_s H, h | Fréquence du flux. Hauteurs maximale et minimale. | / |
| H_{moy} | Hauteur moyenne | m |
| H_{5%}, H_{95%} | Altitude. | m |
| H_{50%} | Altitude médiane. | m |
| IDF | Intensité, durée, fréquence | |
| I_f | Indice d'infiltration. | |
| I_g | Indice de pente globale. | m/ km |
| K_C | Indice de compacité | |
| K_m | Kilomètre. | km |
| K_g | Coefficient de compacité de Gravelius | / |
| L_b | Longueur du bassin. | km |
| L_g | Longueur du ruissellement. | km |
| L_u | Longueur du flux | km |
| L_{sm} | Longueur moyenne du flux. | km |
| MR_n | Nombre de robustesse de Melton | / |
| P | Périmètre du bassin versant | |
| P_{moy} | Précipitations moyenne annuelle. | mm/an |
| R_b | Rapport de bifurcation. | / |
| R_{bm} | Rapport de bifurcation moyenne. | / |
| R_c | Coefficient de rondeur | / |
| R_{ho} | Coefficient de stockage hydrologique. | / |

| | | |
|------------|---|-----------------|
| Rn | Nombre de robustesse. | / |
| Rr | Rapport de relief. | |
| Rre | Relief relatif. | / |
| S | Superficie du bassin versant | Km ² |
| Sb | Pente globale du bassin. | ° |
| Nu | Nombre total de segments de cours d'eau de l'ordre de "u" | / |
| P | Périmètre du bassin. | km |
| Re | Rapport d'allongement. | / |
| Rc | Rapport de rondeur. | / |
| Rf | Facteur de forme. | / |
| T | Temps de fuite | |
| Tc | Temps de concentration. | Heures |
| V | Volume | m ³ |
| W | Largeur du bassin de rétention | m |

| Acronymes | Désignation |
|------------------|--|
| ha | Hectare |
| HECRAS | hydrologic- Engineering-Center's- River Analysis-system. |
| Km | Kilomètre |
| LULC | Land Use and Land Cover |
| Max | Maximum |
| MFD | Méthode des Flux Dominants |
| Min | Minimum |
| mm | Millimètre |
| MNT | Modèles Numériques du Terrain |
| NRRH | Agence nationale des ressources hydriques |
| Moy | Moyenne |
| Pan | Précipitations annuelle |
| PCT | Précipitation de courte durée |
| RMSE | Racine Carrée de la Moyenne des Carrés des Erreurs (Root Mean Squared Error) |
| SIG | Système d'information géographiques |
| Tan | Température annuelle |
| USGS | United States Geological Survey |
| UTM | Universal Transverse Mercator |

INTRODUCTION GENERALE

I. Introduction générale

L'Atlas saharien en Algérie abrite un patrimoine culturel diversifié. Les populations locales se sont adaptées à l'environnement en développant un mode de vie qui a prouvé son efficacité et sa longévité au fil des siècles ([Rezzoug & Remini, 2019](#)). Ce mode de vie est centré autour du concept de Q'sar, important monument architectural ancestral construit à proximité de sources d'eau, généralement des cours d'eau inter-mi-temps parfois pérennes appelés Wadis, alimentés soit par des sources, soit par des rivières provenant des régions montagneuses. Les Q'sars sont entourés d'oasis et de jardins qui garantissent l'approvisionnement de la population en cultures, fruits et légumes locaux ([Ait Saadi, 2019](#)).

Un exemple de ces Q'sars est le Q'sar de Boussemghoun, situé sur le territoire des Monts des ksour d'Algérie dans la wilaya d'El-Bayadh. Elle offre des avantages culturels, sociaux et économiques pour le développement durable de l'ensemble de la région. Ce patrimoine architectural offre également des atouts touristiques d'une qualité et d'un intérêt certains ([Saadi et al., 2017](#)).

Dans les régions sahariennes, le tourisme oasien est considéré comme le moteur du développement. Il constitue un support de croissance et une source de création de richesse, d'emplois et de revenus durables ([Youcef & Rachedine, 2017](#)). Dans le même contexte, la recherche d'opportunités de développement dans ces régions reste un défi constant pour les pouvoirs publics. Le développement socio-économique représente non seulement un facteur de stabilisation de la population mais aussi une opportunité de préserver les richesses du patrimoine de la région d'El-Bayadh.

Dans le cadre des actions de développement, le problème de la préservation des risques d'inondation se pose souvent. En effet, les inondations sont un phénomène imprévisible, surtout ces dernières années ([Boutaghane et al., 2022](#)). Leurs principales causes sont dues à plusieurs facteurs, principalement l'irrégularité de l'intensité des précipitations due au changement climatique et aux spécificités du bassin versant. Pour faire face aux aléas et risques d'inondation, des mesures structurelles consistant en des actions d'aménagement telles que la construction de digues de protection, d'ouvrages de contrôle des crues ou de canalisations d'évacuation peuvent être appliquées.

Dans notre cas où le Q'sar et l'Oasis environnante représentent une richesse à préserver, l'aménagement de Wadi de Boussemghoun est nécessaire. D'où l'objectif principal de la présente étude.

Dans ce cadre, la présente vise à proposer une approche intégrée pour la gestion et la protection durable de l'oasis de Boussemghoun, fondée sur une compréhension approfondie de son fonctionnement hydrologique et socio-écologique. Cet aménagement doit prévoir des actions de génie civil mais également des actions d'ingénierie végétale appropriées prenant en compte les caractéristiques hydrologiques du cours d'eau dans le Wadi, qui dépendent naturellement de la réponse hydrologique du bassin versant de Wadi de Boussemghoun.

Pour ce faire, l'étude est développée à travers des axes abordant successivement : (1) le rôle historique et l'importance des oasis sahariennes ([Vernet et al., 2013](#)), (2) les spécificités du territoire de Boussemghoun, de son Q'sar et de son oasis ([Saadi et al., 2017](#)), (3) l'étude hydrologique spécifique du bassin de Wadi Boussemghoun grâce à la collecte de données et à la modélisation ([Maidment, 1993](#)), ([Roushangar et al., 2021](#)) et (4) les mesures préventives de protection envisagées, combinant solutions naturelles et de génie civil, ([Yuan et al., 2024](#)).

L'objectif principal de ce mémoire se focalise donc sur la proposition d'une approche intégrée d'aménagement pour la gestion et la protection du Wadi Boussemghoun, en combinant des solutions fondées sur la nature et des mesures de génie civil. Cette approche vise à garantir la durabilité de l'oasis, à préserver son patrimoine et à renforcer sa résilience face aux risques d'inondation.

Sur le plan organisation, le mémoire s'articule autour de quatre chapitres qui abordent différents aspects de la problématique :

Le premier chapitre se penche sur l'importance historique et écologique des oasis sahariennes en tant que refuges de vie dans les régions arides. S'appuyant sur une riche collection de littérature, il souligne la sélection stratégique et la gestion des sources d'eau qui ont conduit à l'émergence de ces niches écologiques, favorisant des structures sociales et économiques complexes. Le chapitre met également en évidence le besoin urgent de comprendre le rôle des oasis dans le passé pour faire face aux défis environnementaux mondiaux actuels tels que le changement climatique, la surpopulation et la surconsommation. Il conclut sur la nécessité de développer des stratégies de gestion durable des ressources en eau et des écosystèmes oasiens ([Idda et al., 2021](#))

Le deuxième chapitre se focalise sur l'oasis de Boussemghoun, un témoignage vivant de l'ancienne organisation administrative de la région. Il la présente son contexte géographique, son histoire et son importance culturelle. Il met en évidence le rôle du Q'sar comme point de jonction pour les routes commerciales transsahariennes et l'importance du lieu de pèlerinage de la Zaouia Tijaniya. Il explore également les aspects architecturaux et archéologiques de l'oasis, ainsi que la diversité

économique de la région et la contribution de la population locale à la conservation du patrimoine , ([Hadidi, 2020](#)).

Le troisième chapitre se concentre sur l'étude hydrologique du bassin versant de Boussemghoun, en examinant les régimes de débit, les fréquences de crue et les zones de vulnérabilité. Il analyse la collecte de données hydrologiques, la calibration et la validation de modèles hydrologiques, ainsi que la cartographie des zones inondables et des zones de vulnérabilité à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG). Ce chapitre souligne l'importance de comprendre les dynamiques hydrologiques pour développer des stratégies de gestion durable des ressources en eau et de protection contre les risques d'inondation ([Coletta et al., 2024](#)).

Le quatrième et dernier chapitre discute de la mise en œuvre de mesures préventives efficaces pour protéger l'oasis de Boussemghoun contre les risques d'inondation. Ces mesures comprennent des solutions basées sur la nature telles que la restauration des zones humides et le reboisement, et des solutions d'ingénierie civile telles que la construction de murs de soutènement en béton et de bassins de rétention. Le chapitre souligne la nécessité d'une approche combinée, utilisant à la fois des solutions naturelles et des infrastructures d'ingénierie civile, pour une gestion durable et efficace des risques d'inondation, ([World Meteorological Organization \(WMO\), 2009](#)), ([Khodadad et al., 2023](#)),.

L'approche intégrée d'aménagement proposée dans ce mémoire vise à concilier les besoins de protection de l'oasis de Boussemghoun, de préservation de son patrimoine et de développement durable de la région. Cette approche est essentielle pour garantir la pérennité de cet écosystème précieux et son rôle vital dans le développement socio-économique de la région d'El-Bayadh.

A travers cette étude de cas, ce mémoire ambitionne de fournir des clés de compréhension applicables à la conservation des écosystèmes oasiens fragiles des régions arides, confrontées aux défis conjugués du changement climatique et de la pression anthropique croissante.

CHAPITRE PREMIER
LES OASIS SAHARIENNES : HAVRE
BIOCLIMATIQUE ET REFUGES DE VIE DANS
LES REGIONS ARIDES

II. Premier chapitre : Les Oasis Sahariennes : havre bioclimatique et refuges de vie dans les régions arides

II.1 Introduction du chapitre :

Depuis la préhistoire, l'homme du désert a dépendu des oasis pour leur survie ([Vernet et al., 2013](#)). L'émergence et l'établissement de ces niches écologiques ont été liées à la sélection stratégique des sources d'eau et à leur gestion, qui ont conduit au fil du temps à la construction de structures sociales et économiques complexes. Ces structures comprennent différentes formes d'agriculture, de commerce et d'échanges économiques, ainsi que d'hébergement et de structures institutionnelles. En effet, l'importance sociale et écologique des oasis ne s'est jamais limitée à leur environnement immédiat. Au contraire, elles ont fait partie de réseaux et de systèmes plus larges qui ont joué un rôle clé dans l'histoire et la géographie des zones arides ([Purdue et al., 2017](#)). Par exemple, les oasis du Sahara algérien ont joué un rôle crucial dans le développement de routes commerciales transsahariennes, servant de points de repos et de ravitaillement pour les caravanes ([Rahal Bouziane et al., 2010](#)).

Comprendre le rôle des oasis dans le passé peut fournir des informations qui sont toujours pertinentes aujourd'hui, alors que nous sommes confrontés à d'énormes défis environnementaux mondiaux, notamment le changement climatique, la surpopulation et la surconsommation ([Santoro, 2023](#)). En explorant le passé des interactions homme-environnement, nous pouvons en apprendre davantage sur les moyens efficaces et durables de gérer les ressources et de construire des systèmes socio-écologiques qui nous permettront de prospérer dans le futur ([Idda et al., 2021](#)).

II.2 Définitions et notions générales liées aux Oasis :

Le terme 'oasis', dérivé de l'égyptien ancien, signifie littéralement un 'espace habité'. C'est Hérodote qui l'a mentionné pour la première fois vers 450 av. J.-C., faisant référence aux oasis de l'Égypte ancienne ([Brunet et al., 1992](#)). Au fil du temps, sa définition a évolué, souvent de manière romantique, pour désigner les zones fertiles ou verdoyantes au cœur des régions arides, offrant ainsi un refuge, un soulagement ou un contraste agréable avec l'environnement désertique alentour.

Aujourd'hui, les oasis sont généralement classées en fonction de leur histoire, de leur gestion de l'eau ou de leurs conditions hydro-climatiques. Elles sont reconnues comme des espaces intensément cultivés situés dans des zones climatiques marquées par la rareté de l'eau ([Amrani,](#)

2023). D'un point de vue anthropologique, elles sont considérées comme des "terroirs" entièrement gérés par l'homme et dépendants d'une gestion sociotechnique de l'eau (Purdue et al., 2017).

L'appellation de l'Oasis met en lumière le contraste frappant entre ces îlots de verdure irrigués et l'aridité dominante du paysage désertique, soulignant leur rareté et leur importance (Gracier & Bravard, 2016).

Une revue de littérature synthétise la définition des oasis sahariennes comme étant des espaces fertiles et verdoyants nichés au cœur des régions arides, offrant un véritable refuge et un contraste agréable avec les paysages désertiques environnants (Battesti, 2005b).

Ces zones bénéficient de la présence de ressources en eau pérennes, faisant d'elles des lieux propices à l'établissement humain permanent et à une agriculture adaptée depuis les débuts de la domestication des plantes et des animaux (A.J. Mills, 2007).

De point de vue socioculturel, les oasis sont caractérisées par leur environnement peuplé d'agriculteurs sédentaires et sont souvent associées à l'économie de sociétés pastorales (Battesti, 2005b). Elles se distinguent par leur agriculture irriguée en milieu désertique ou semi-désertique et sont construites autour de l'arbre, principalement du palmier dattier (Santoro, 2023). Ainsi, l'espace Oasien comporte verticalement trois strates végétales. Sous les palmiers poussent les arbres fruitiers alors que le troisième étage, totalement à l'ombre est celui des cultures maraichères et fourragères. Horizontalement, la structure foncière de l'oasis se présente comme un puzzle au sein du paysage aride du Sahara (Otmane & Bendjelid, 2018).

Au-delà de simples zones cultivées, les oasis constituent des systèmes de production hydro-agropastoraux complexes, où l'agriculture irriguée coexiste et interagit étroitement avec l'élevage de chèvres, de chameaux et d'autres animaux domestiques (Clouet, 1995), (Gracier & Bravard, 2016). Cette symbiose entre les différentes activités de subsistance a permis le développement de structures socio-économiques et culturelles uniques, profondément ancrées dans la gestion collective des ressources rares que sont l'eau et les terres cultivables (Chaibou & Bonnet, 2019).

Les oasis représentent ainsi des refuges socio-environnementaux à long terme, soutenus par des sources d'eau pérennes dans des environnements autrement hostiles (Bouaziz et al., 2018). Leurs limites géographiques sont dynamiques, dépendant de la structure du système de production complexe géré, que ce soit collectivement ou individuellement, et intégré dans un contexte économique local à mondial. Toutefois, ces niches de vie se trouvent aujourd'hui soumises à des changements climatiques décisifs à court et à long terme, qui influencent leur productivité et leur durabilité, voir même leur existence (Hadeid et al., 2021).

En somme, le concept d'oasis renvoie à une zone géographique isolée par l'aridité environnante, mais caractérisée par la présence de sources d'eau permettant le développement de pratiques agricoles intensives. Les paysages désertiques entourant ces oasis les protègent des conditions environnementales extrêmes, telles que la chaleur excessive, les tempêtes de sable et le vent. Considérées comme des lieux de refuge, de halte et de stabilité, les oasis ont une longue histoire d'occupation et de gestion humaine, qui a contribué à la formation de structures sociales, économiques et culturelles complexes, intimement liées à leur environnement ([Idda et al., 2017](#)),

II.3 L'Oasis : Un facteur de témoignage historique et culturel

Les oasis, en tant qu'archives vivantes, témoignent de l'ingéniosité humaine et de l'adaptation aux environnements arides voir même désertique. Elles illustrent la résilience des sociétés face aux défis environnementaux et économiques, révélant des systèmes d'irrigation ancestraux et des pratiques agricoles durables qui ont permis la survie et le développement des communautés ([Amrani, 2017](#)).



Figure II-1: Une des structures du système d'irrigation traditionnel à Boussemghoun

Ces systèmes complexes reflètent une connaissance approfondie de l'hydrologie et de l'écologie locale, essentielle à la gestion des ressources en eau et à la conservation des sols dans des conditions extrêmes (Purdue et al., 2017). Les structures architecturales et les artefacts découverts dans ces oasis fournissent des indices sur les modes de vie, les échanges commerciaux et les influences culturelles qui ont traversé les siècles, enrichissant notre compréhension de l'histoire saharienne (Côte, 2002), (Hamamouche et al., 2015). En étudiant ces éléments, nous pouvons apprécier la capacité des sociétés sahariennes à créer des niches écologiques viables, démontrant une symbiose remarquable entre les besoins humains et les contraintes de leur environnement.

Dans le contexte de l'histoire et de la culture humaine, les oasis sahariennes, avec leurs paysages uniques et leurs traditions culturelles riches, constituent un patrimoine mondial précieux qu'il est essentiel de préserver. L'étude et la documentation de ces écosystèmes fragiles permettent de sensibiliser le public à leur importance et de mettre en place des stratégies de conservation efficaces

II.4 L'Oasis : Un laboratoire naturel pour la durabilité

Les oasis sahariennes offrent un cadre exceptionnel pour l'étude de la durabilité et la gestion des ressources dans des conditions arides. Ces écosystèmes uniques ont évolué grâce à des pratiques agricoles ingénieuses et des systèmes de gestion de l'eau adaptatifs qui ont permis aux communautés humaines de prospérer dans des environnements autrement inhospitaliers (Bouaziz et al., 2018). L'adaptation continue des sociétés oasiennes face aux variations climatiques et aux pressions environnementales fournit des exemples pertinents pour la recherche sur la résilience et la durabilité (Chaibou & Bonnet, 2019).

Les techniques agricoles traditionnelles, telles que la culture en terrasses et l'agroforesterie, optimisent l'utilisation de l'eau et préservent la fertilité des sols, tout en favorisant la biodiversité (Purdue et al., 2017). Les systèmes d'irrigation, souvent basés sur des foggaras, illustrent une gestion de l'eau ingénieuse, sophistiquée et durable, essentielle à la survie des oasis (Remini et al., 2010), (Remini, 2022).

L'étude des oasis sahariennes révèle également l'importance de la gouvernance locale et de la gestion communautaire dans la préservation des ressources naturelles. Les décisions collectives concernant l'allocation de l'eau et la maintenance des infrastructures hydrauliques sont cruciales pour l'équilibre écologique et social des oasis (Merzougui et al., 2008).

Face aux défis actuels tels que le changement climatique et la pression démographique, les oasis sahariennes continuent de s'adapter et de développer des stratégies innovantes pour maintenir leur

durabilité. Ces stratégies comprennent la diversification des cultures, l'introduction de technologies d'économie d'eau et la valorisation des savoir-faire locaux ([Amrani, 2017](#)).

En somme, Les oasis sahariennes constituent de véritables laboratoires naturels pour la recherche sur la durabilité et la gestion des ressources naturelles en environnement aride. L'étude des pratiques agricoles traditionnelles, des systèmes de gestion de l'eau et de l'adaptation au changement climatique nous offre des leçons précieuses pour le développement de solutions durables face aux défis environnementaux globaux.

L'ingéniosité et la résilience des populations des oasis sahariennes constituent une source d'inspiration pour le développement de solutions innovantes face aux défis du 21ème siècle. L'étude de leurs systèmes socio-économiques et de leurs modes de gouvernance peut nous éclairer sur la construction de sociétés durables et inclusives.

II.5 L'Oasis, carrefour de vie et de civilisations en milieu aride

Depuis des temps immémoriaux, les oasis ont joué un rôle crucial dans le développement des civilisations en zones arides. Ces points d'eau vitaux ont permis l'émergence de sociétés sédentaires et d'activités agricoles grâce à des techniques ancestrales de captage des eaux, telles que les puits à balancier et les foggaras (galeries drainantes souterraines) ([Remini et al., 2010](#)), ([Idda et al., 2017](#)).

Sur le plan socioculturel, les oasis se distinguent par leur agriculture irriguée en milieu désertique ou semi-désertique, construite autour de l'arbre emblématique, le palmier dattier([Santoro, 2023](#)). Elles abritent une structure végétale stratifiée, avec les palmiers surplombant les arbres fruitiers et les cultures maraîchères et fourragères au sol (([Charoy & Torrent, 1990](#)), ([Otmame & Bendjelid, 2018](#))). Cette organisation spatiale en puzzle au cœur du Sahara témoigne d'une cohabitation harmonieuse entre les populations sédentaires d'agriculteurs et les sociétés pastorales nomades ([Battesti, 2005b](#)).

Au-delà de leur rôle agricole, les oasis sont des carrefours de vie et de commerce, soutenant diverses activités telles que le pastoralisme, le tourisme, l'artisanat et l'industrie. Elles constituent également des refuges pour une riche biodiversité, abritant de nombreuses espèces de plantes et d'animaux adaptées aux conditions désertiques. Ainsi, les oasis jouent un rôle essentiel dans l'équilibre écologique des régions arides en fournissant des services écosystémiques vitaux ([Santoro, 2023](#)).

Grâce à leur position stratégique, les oasis ont facilité le développement des routes commerciales transsahariennes, servant de haltes aux caravanes traversant le désert. Elles ont ainsi contribué à l'essor des échanges et à la diffusion des connaissances entre les civilisations.

II.6 Typologie des Oasis.

De nombreuses études se sont penchées sur la recherche dans les oasis, abordant divers sujets en fonction des objectifs et des intérêts spécifiques. Cependant, les études les plus révélatrices portent sur l'ingéniosité des pratiques agricoles et l'exploitation des ressources en eau. Ces sujets suscitent un grand intérêt au sein de la communauté scientifique, notamment en raison de la rareté de l'eau et de la difficulté des terres pour l'agriculture. Ainsi, le succès des systèmes agricoles oasiens repose sur une utilisation durable des ressources disponibles et sur la capacité des habitants locaux à innover pour s'adapter aux conditions changeantes (Salhi, 2020).

Dans leurs études exploratoires sur les oasis, ces travaux ont proposé différentes typologies pour classer et distinguer les différents types d'oasis.

Selon Yves Clouet (Clouet, 1995), les oasis peuvent être classées en trois types en fonction de leur localisation, de leur taille et de leur fonction. Le premier type est constitué d'oasis intra-désertiques qui dépendent des eaux souterraines, tandis que le second type est constitué d'oasis de piémont qui puisent l'eau directement des rivières provenant des montagnes voisines. Le troisième type comprend les oasis situées dans les plaines inondables qui dépendent de barrages de stockage artificiels pour l'irrigation.

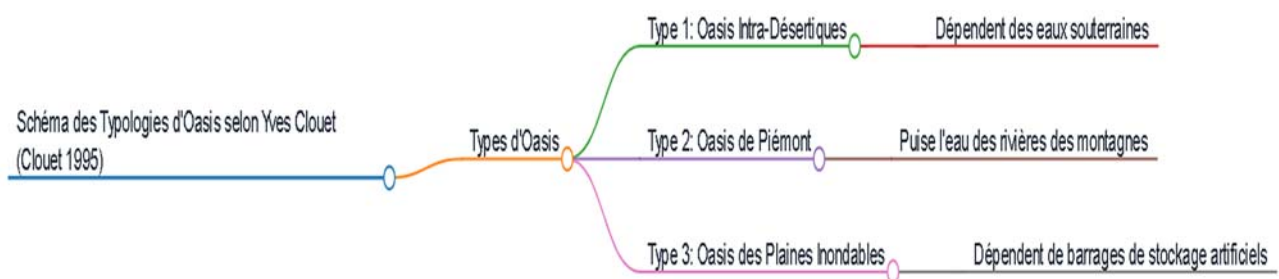


Figure II-2: Schéma de la typologie des Oasis, selon Yves Clouet (Clouet, 1995)

Ces trois types d'oasis sont également discutés dans (Lewicki, 1988) et sont similaires à ceux décrits dans (Clouet, 1995). Ce système de classification met en valeur la diversité des oasis et leur adaptabilité à différents environnements. Par exemple, les oasis intra-désertiques sont souvent

situées dans des zones où l'accès aux eaux de surface est limité, ce qui fait des eaux souterraines la principale source d'eau pour l'irrigation et l'usage domestique. En revanche, les oasis de piémont sont situées au pied des montagnes et ont un accès direct aux eaux de surface, ce qui leur permet de dépendre des rivières pour l'irrigation (Clouet, 1995).

De plus, les oasis situées dans les plaines inondables sont uniques en ce sens qu'elles dépendent de barrages de stockage artificiels pour l'irrigation. Ces barrages permettent de stocker de l'eau pendant les périodes de fortes pluies, qui peut ensuite être utilisée pour l'irrigation pendant les périodes plus sèches. Ce type d'oasis est moins répandu que les deux autres types, mais il est essentiel pour comprendre la diversité des oasis et leur adaptabilité aux différents environnements (Clouet, 1995).

Par ailleurs, Yaël Kouzmine (Kouzmine, 2012) propose une classification des oasis basée sur cinq catégories. La première catégorie est celle des oasis de montagne ; ceux-ci sont situés au pied des montagnes et dépendent principalement des précipitations. La deuxième catégorie est celle des oasis fluviales ; ils sont situés le long des rivières et dépendent du débit d'eau des montagnes. La troisième catégorie comprend les oasis recouvrant une nappe phréatique peu profonde. La quatrième catégorie est celle des oasis de Foggara, qui dépendent de sources d'eau souterraines situées dans des substrats rocheux. Enfin pour la dernière catégorie, Kouzmine fait référence aux oasis qui dépendent des eaux souterraines peu profondes extraites de puits artésiens et de puits peu profonds.

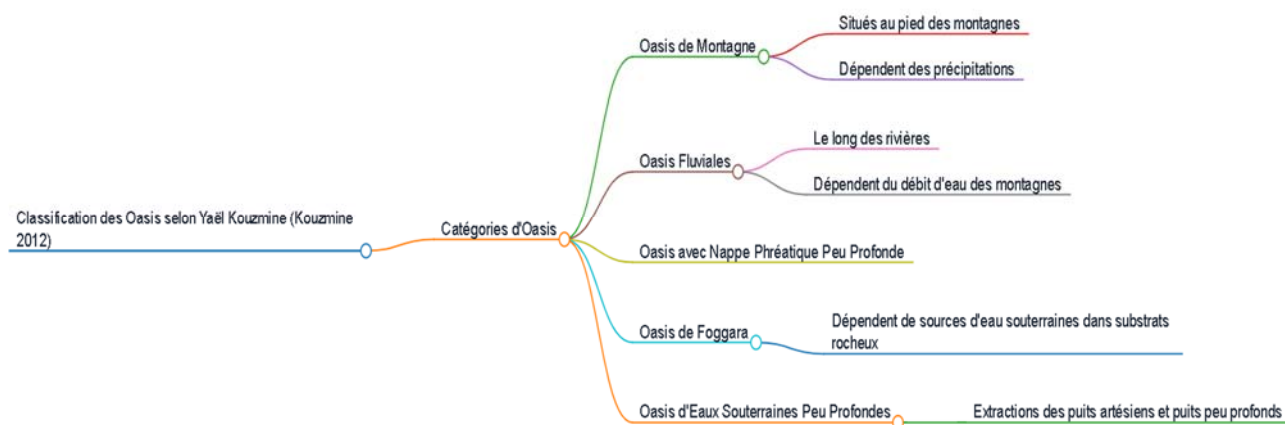


Figure II-3: Classification des Oasis selon Yaël Kouzmine (Kouzmine, 2012)

Cette classification met en valeur la diversité des oasis et leur adaptabilité à différents environnements. Par exemple, les oasis de montagne sont souvent situées dans des zones de

précipitations abondantes, tandis que les oasis fluviales dépendent de l'écoulement de l'eau des rivières. De plus, les oasis qui couvrent une nappe phréatique peu profonde sont uniques en ce sens qu'elles peuvent compter sur les eaux souterraines pour l'irrigation. Les oasis de Foggara sont particulièrement intéressantes car elles dépendent de sources d'eau souterraines situées dans des substrats rocheux.

De plus, les oasis souterraines peu profondes sont uniques dans la mesure où elles dépendent de puits artésiens et de puits peu profonds. Ces oasis sont moins courantes que les quatre autres catégories, mais elles sont essentielles pour comprendre la diversité des oasis et leur adaptabilité aux différents environnements.

L'importance de comprendre la typologie des oasis et leurs particularités réside dans la possibilité de concevoir des interventions qui prennent en compte leurs caractéristiques uniques.

II.7 Les Oasis du Sahara algérien, îlots de vie et de biodiversité

Les oasis du Sahara algérien constituent des écosystèmes uniques et fragiles, véritables îlots de vie au milieu des étendues arides (Côte, 2002). Elles jouent un rôle primordial pour la survie des communautés locales, représentant des zones de peuplement et d'activités économiques majeures dans un environnement hostile. En offrant des ressources en eau et en permettant le développement d'une agriculture diversifiée, ces oasis assurent la subsistance des populations sahariennes et abritent une riche biodiversité, servant de refuges pour de nombreuses espèces végétales et animales endémiques parfaitement adaptées aux conditions désertiques (Rahal Bouziane et al., 2010).

L'Algérie abrite un vaste patrimoine oasien caractérisé par une importante production dattiers. Le pays compte 93.000 hectares de palmeraies abritant plus de 10 millions de palmiers dattiers, soit 11% du total mondial (Rahal Bouziane et al., 2010). Cette richesse se répartit de manière inégale sur le territoire national. La majorité des oasis (60%) est concentrée dans les régions nord-est, où se situent les principales palmeraies des Zibans, de Wadi Righ, d'El Wadi et d'Ouargla. Les 40% restants se trouvent dans les régions sud-ouest, englobant notamment les oasis ancestrales du M'Zab, du Touat et du Gourara (Bouzaher, 1990). Certaines oasis revêtent un caractère isolé et une taille modérée, tandis que d'autres forment de véritables ensembles oasiens, tel que celui de Wadi Righ où 47 oasis s'étalent sur 150 km et rassemblent 1,7 million de dattiers (Bouzaher, 1990).

Il existe différents types d'oasis en Algérie, notamment les oasis intra-désertiques, de piémont, de plaine et de dépression, chacune avec ses propres caractéristiques géologiques, hydrologiques et écologiques (Rahal Bouziane et al., 2010). Les oasis de dépression, comme celles du Touat,

Gourara et Tidikelt, sont alimentées en eau par les foggaras. Les oasis intra-désertiques, situées au cœur du désert, dépendent des sources d'eau souterraines, à l'instar d'Ouargla d'Ouargla (Idder et al., 2013), (Idder et al., 2014) et de Chettma à Biskra (Benslimane, 2021) . Les oasis de piémont, telle qu'El Wadi, bénéficient de l'eau de ruissellement des massifs montagneux avoisinants (Benslimane, 2021). Quant aux oasis fluviales, elles sont approvisionnées en eau par les Wadis, comme celles du Ghoufi, du M'Zab (Benmamar et al., 2016), de Kenadesa à Béchar (Benmoussa et al., 2015) et de Boussemgoun (Hadidi, Remini, & Habi, 2018). Enfin, les oasis de plaine, comme celle d'Wadi Souf (Moulai & Yahaya, 2020), (Amrani, 2023)., sont alimentées par des nappes phréatiques superficielles.

Les dattes, issues de ces palmiers, constituent l'épine dorsale économique des communautés oasiennes et leur principale ressource, soutenant leur mode de vie traditionnel. Ces oasis ne sont pas seulement des lieux de production agricole mais aussi des centres de vie et de culture, jouant un rôle vital dans le maintien des sociétés locales (Rahal Bouziane et al., 2010).

II.8 L'oasis saharienne, un triptyque Eau-Q'sar-Palmeraie dans un environnement aride

Les oasis sahariennes représentent des caractéristiques géographiques distinctes qui abritent une végétation et une faune en dépit de la grande aridité des régions environnantes. Elles se structurent autour de trois éléments interdépendants : la source d'eau et son système traditionnel d'exploitation, le Q'sar (ou cité bioclimatique) et la palmeraie avec ses jardins (Ansari, 2016), (Salhi, 2020).

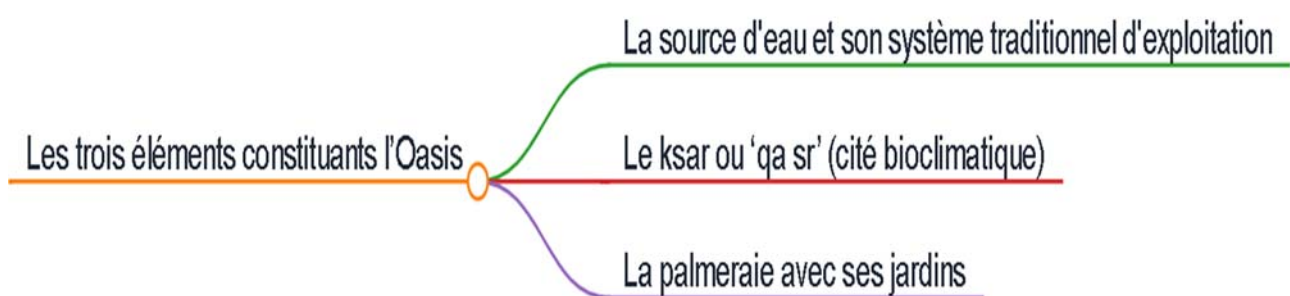


Figure II-4: Les composantes de l'Oasis (Ansari, 2016), (Salhi, 2020)

L'élément vital de l'oasis est sa source d'eau, dont l'exploitation et la distribution sont assurées par des systèmes traditionnels souvent constitués de canaux souterrains appelés qanats ou foggaras.

Développés et perfectionnés par les populations locales au fil des siècles, ces systèmes sont essentiels à la durabilité de l'oasis. La taille, le climat et la connectivité de l'oasis sont influencés par les changements temporels et les activités humaines.

Le Q'sar, ou qasr, représente la cité bioclimatique de la population oasienne. Construit avec des matériaux locaux comme les briques de terre crue, il est conçu pour atténuer les températures extrêmes du climat saharien. La dynamique de population de l'oasis, influencée par le nomadisme, reflète l'interpénétration des mondes méditerranéen et désertique dans ces zones frontalières (Lewicki, 1988).

La palmeraie, accompagnée de ses jardins, constitue le troisième élément essentiel d'une oasis. Une palmeraie comprend une palmeraie dattier qui joue un rôle essentiel dans le système socio-écologique des oasis. Il fournit de la nourriture, de l'ombre et d'autres ressources aux habitants humains et animaux. Les jardins entourant une palmeraie sont fréquemment utilisés pour la culture de diverses cultures, renforçant ainsi la sécurité alimentaire et améliorant les moyens de subsistance de la population locale, (Hamamouche et al., 2015).

En résumé, la source d'eau, le Q'sar ou (qasr), et la palmeraie avec les jardins sont les trois composantes principales de l'oasis dans les études sur les oasis sahariennes. Ces composantes sont interconnectées et interdépendantes, et le système traditionnel d'exploitation et de distribution de l'eau est essentiel à la durabilité de l'oasis. Pour promouvoir des actions de politique environnementale, cartographier la dynamique de l'oasis est un point de départ indispensable. La recherche sur les fonctions domestiques et agricoles des systèmes traditionnels de collecte des eaux de pluie devrait être intégrée pour mieux comprendre le système oasien dans son ensemble (Zhou et al., 2024).

II.9 Les Q'sours : Des monuments historiques témoins d'une civilisation ancestrale

Les Q'sours, pluriel de Q'sar, sont des ensembles architecturaux typiques des régions désertiques d'Afrique du Nord, notamment en Algérie, au Maroc et en Tunisie (Mahrou, 2011). Composés de maisons en pisé (mélange d'argile et de paille) ou en pierre, ils sont rassemblés de manière compacte au sein d'enceintes défensives de murs (Labtar & Belguernin, 2021). Historiquement, ces fortifications servaient de refuges aux populations berbères et arabes locales, offrant une protection contre les menaces extérieures, les conditions météorologiques extrêmes et l'empiétement des sables du désert (Bassoud et al., 2022).

L'établissement des Q'sours dans le Sahara algérien est étroitement lié à trois facteurs majeurs (Ait Saadi, 2019).



Figure II-5: Facteurs déterminants dans l'implantation du Q'sar dans le Sahara (Ait Saadi, 2019)

Le premier, et le plus important, est la disponibilité en eau. C'est ce facteur primordial qui a déterminé l'implantation initiale de ces cités et amené les populations à se regrouper en agglomérations. Le deuxième facteur est lié aux opportunités commerciales offertes par les routes caravanières. Les itinéraires empruntés autrefois par ces caravanes contournaient les zones difficiles comme les ergs et les massifs montagneux. Cela a permis aux populations sahariennes de s'implanter le long de ces routes, créant ainsi des sites de repos, de refuge et, à terme, de sédentarisation. Le troisième facteur est d'ordre religieux. En effet, la dimension religieuse a un impact significatif, favorisant le développement des cités autour de lieux de culte comme les zaouïas, et l'attraction des populations par les écoles coraniques et les figures religieuses. Enfin, l'insécurité a été un élément déterminant dans l'évolution des Q'sours à partir de la fin du IV^e siècle. Comme l'a souligné Alain Rémy (Ait Saadi, 2019), les événements historiques ont conduit à la concentration de la population dans des agglomérations fortifiées, marquant ainsi l'aboutissement de la civilisation urbaine dans la région saharienne .

Aussi, l'implantation stratégique du Q'sar dans le système hydraulique de l'oasis révèle une gestion judicieuse des ressources en eau. Son emplacement est toujours choisi en aval du cheminement hydraulique, reflétant une approche d'économie et de rationalisation de l'eau. Cette disposition permet d'assurer une utilisation prioritaire de l'eau pour les besoins domestiques au sein du Q'sar, avant que celle-ci ne soit acheminée vers les zones de cultures. Ainsi, la partie résidentielle du Q'sar se situe systématiquement en amont du terroir agricole, garantissant un approvisionnement en eau potable pour les habitants, tandis que l'eau restante alimente les activités agricoles en aval. Cette organisation spatiale judicieuse témoigne de la sagesse ancestrale des populations oasiennes dans la gestion durable de cette ressource vitale dans un environnement aride (Djeradi, 2012).

L'architecture des Q'sours témoigne d'une ingénieuse adaptation aux contraintes climatiques inhérentes à la région. Leur robuste construction, utilisant principalement des matériaux locaux comme l'argile, leur permet de résister aux températures extrêmes, aux vents de sable et aux faibles précipitations, (Ahriz et al., 2017).

L'aménagement du Q'sar et de ses terres environnantes est soigneusement planifié pour optimiser l'utilisation des ressources disponibles, telles que l'eau et les terres arables. Par ailleurs, la configuration compacte du Q'sar, avec ses ruelles étroites et ses murs épais, atténue la chaleur du désert en préservant des températures plus fraîches pendant la journée et en emprisonnant la chaleur la nuit. En plus, l'agencement des maisons contribue à créer des zones ombragées et des brises, augmentant ainsi le confort thermique des résidents (Djebbar, 2018).

Les systèmes de collecte des eaux pluviales et de gestion des ressources hydrauliques sont intégrés à leur architecture, permettant ainsi aux habitants de survivre dans cet environnement de stress hydrique (Ait Saasi et al., 2015)..

Au-delà de leur fonction défensive et bioclimatique, ces ensembles d'habitat groupé concentraient aussi les fonctions agricoles, commerciales et artisanales des populations. Ils disposaient fréquemment de cours centrales, de greniers surélevés pour le stockage des céréales, de puits d'approvisionnement en eau, de mosquées et parfois même d'écoles coraniques (Saadi et al., 2017), (Labtar & Belguernin, 2021) .

Leur valeur architecturale et patrimoniale exceptionnelle leur a valu d'être inscrits sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO, comme les Q'sours de la vallée de Mzab (Gueliane, 2020), ceux de Touggourt en Algérie (Bencherif, 2008). En effet, à travers leur architecture, leur organisation spatiale et le mode de vie communautaire qui leur est associé, les Q'sours continuent aujourd'hui de porter le patrimoine culturel berbère et arabe du Maghreb. Leur fondation au Moyen-Âge a permis aux populations sahariennes de développer des techniques remarquables d'adaptation à l'environnement aride et aux économies de subsistance. Malgré leur caractère défensif, ces cités fortifiées du désert témoignent d'une richesse culturelle patiemment construite à travers les siècles. Les Q'sours représentent ainsi de formidables témoins de l'histoire et de la culture des populations berbères et arabes nomades du Maghreb (Labtar & Belguernin, 2021).

II.10 Système d'irrigation traditionnel dans les Oasis

Dans les Oasis Saharienne, le système d'irrigation traditionnel exigeait historiquement des efforts collectifs et créait des liens entre les agriculteurs et les communautés, nécessitant une coordination optimale de l'approvisionnement en eau gérée par des règles et des obligations strictes. Dans de pareils cas, deux approches principales de gestion de l'eau étaient observées : la gestion centralisée favorisant le collectivisme vertical, et la coopération communautaire dans les petits systèmes d'irrigation favorisant des normes de coopération plus fortes. Ces normes collectivistes façonnées par l'agriculture d'irrigation préindustrielle ont persisté au fil des générations, influençant le comportement économique et l'innovation technologique (Bugge, 2020).

Dans ce contexte, le système d'irrigation traditionnel dans les Oasis des zones désertiques est basé sur un concept de partage de l'eau très strict. Il repose sur un principe fondamental, celui de la distribution équitable et rationnelle de cette précieuse ressource (Daoudi et al., 2017). Étant donné la rareté de l'eau dans ces régions désertiques, une gestion rigoureuse et communautaire s'est imposée au fil des siècles, (Fakhoury & Alhaddadin, 2023).

Ainsi, le principe du partage élaboré ne se limite pas à la simple répartition de l'eau disponible, mais il prend en compte des facteurs tels que la taille du terrain, le type de culture, et même les limitations physiques des agriculteurs, (Benslimane, 2021). Le partage de l'eau garantit que même les membres les plus défavorisés de la communauté reçoivent des quantités d'eau d'irrigation prévisibles, favorisant ainsi l'autosuffisance et cultivant un esprit de solidarité au sein de l'oasis, (Remini, 2019).

Les méthodes traditionnelles de partage de l'eau dans les oasis sahariennes, bien que complexes, sont conçues pour être à la fois justes et rigoureuses. Ces systèmes fonctionnent selon des calculs mathématiques définis afin d'assurer une distribution équitable (Benslimane, 2021). L'approche élaborée ne se limite pas à la simple répartition de l'eau disponible. En prenant en compte des facteurs tels que la taille du terrain, le type de culture, et même les limitations physiques des agriculteurs. Ce système complexe témoigne de l'ingéniosité et de la prévoyance des populations sahariennes, qui non seulement se sont adaptées à un environnement aride, mais ont également prospéré grâce à une gestion collaborative des ressources, (Otmene, 2016).

Diverses techniques de stockage d'eau et d'irrigation sont observées dans les oasis sahariennes. Ces techniques sont adaptées spécifiquement aux conditions topographiques et hydrologiques de chaque région, (Remini & Ouled belkhir, 2019).

Le système de foggara, est certainement le système d'irrigation traditionnel le plus ancestral. Ce système qui utilisé depuis plus de 20 siècles pour alimenter les oasis en eau, est un exemple remarquable de gestion durable de l'eau en zone aride. Malgré l'émergence de nouvelles techniques de collecte de l'eau, la foggara continue de fonctionner jusqu'à aujourd'hui, assurant la sécurité hydrique des oasis sans dégrader l'environnement. Plus de 1 000 foggaras exploitent constamment l'aquifère Continental Intercalaire sans en affecter la quantité ou la qualité. Ce système a permis le développement d'oasis de palmiers dattiers, dont les fruits sont aujourd'hui appréciés de tous, (Remini, 2023).

La foggara est définie comme étant un système hydraulique traditionnel utilisé depuis des millénaires dans les régions arides et désertiques pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau. Il s'agit d'une galerie souterraine à faible pente qui capte les eaux des nappes phréatiques peu profondes et les conduit par gravité sur de longues distances vers les oasis, les jardins et les palmeraies, (Idda et al., 2017).

La galerie est parfois équipée de puits verticaux espacés régulièrement, servant à l'aération, à l'entretien et parfois à la collecte de l'eau, (Senoussi et al., 2011)

Remini, (Remini, 2017) définit la foggara, comme étant un système de puits horizontal qui dispose d'une série de puits verticaux utilisés à la fois comme accès à la galerie principale et comme ouvertures d'aération. La galerie principale peut s'étendre sur une longueur dépassant les 17 km, tandis que le nombre de puits d'aération peut atteindre jusqu'à 900.

Ce système de foggara comporte généralement deux parties distinctes. La première partie concerne le drainage et le transport de l'eau, tandis que la seconde est dédiée au réseau de distribution. La partie du drainage et de transport est similaire pour toutes les foggaras présentes dans le Sahara Algérien. Tandis que la partie de distribution, qui comprend le réseau de Saguia, adopte deux modes différents. Il s'agit de la distribution par unité de volume, connue sous le nom de foggara volumétrique, et de la distribution par unité de temps, connue sous le nom de foggara horaire, (Remini, 2011).

Ce système ingénieux, d'origine probablement perse, permet d'exploiter durablement les ressources en eau souterraine de manière passive, sans recours à l'énergie humaine ou animale pour le pompage, (Idda et al., 2017). Il favorise également la recharge des nappes par les eaux d'infiltration, (Boutadara et al., 2020).

La foggara est particulièrement répandue dans les oasis du Sahara algérien où près de 1400 ont été creusées (Idda et al., 2017), mais on la retrouve aussi dans une trentaine de pays arides sous

diverses appellations : qanat en Iran, khattara/khattara au Maroc, karez en Afghanistan, etc. (Senoussi et al., 2011). La foggara est considérée comme l'une des plus belles inventions hydrauliques traditionnelles et un remarquable exemple d'adaptation aux milieux désertiques, (Idda et al., 2017). Certains ouvrages centenaires sont classés au patrimoine mondial de l'UNESCO, (Remini et al., 2010).

Sur le plan technique, le système de Foggara présente des variations notables selon les régions du Sahara algérien, témoignant de l'ingéniosité des populations locales à s'adapter aux spécificités de leurs environnements respectifs (Idda et al., 2021).

La littérature propose plusieurs typologie de Foggara. Sur la base de la nature et de l'exploitation de la ressource en eau, de la nature du sol et de sa topographie, Zella et Smadhi distinguent, (Zella & Smadhi, 2006), quatre types de Foggara dépendant de leurs Oasis, Soit :

1. Foggara de l'erg, où l'eau d'irrigation est extraite de la nappe phréatique à travers des puits et forages (Oasis de Ouargla).
2. Foggara des Ghouts où l'eau d'irrigation est puisée par capillarité (Oasis d'El Oued).
3. Foggaras fluviales où l'eau provient des Wadis (Oasis du Ghoufi, du M'Zab, de Wadi de Béchar).
4. Les oasis de dépression reçoivent leur eau des foggaras (Oasis d'Adrar, Timimoun).

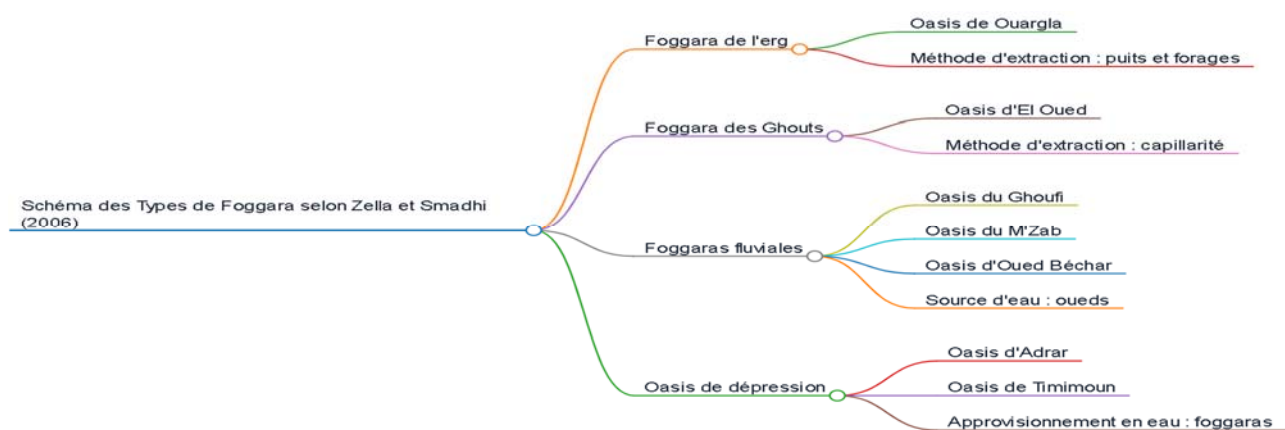


Figure II-6: Typologie des Foggaras selon Zella & Smadhi (Zella & Smadhi, 2006),

Plus tard, Dans une étude plus complète et plus exhaustive Remini et co-auteurs (Remini et al., 2010), considèrent que le système de Foggara en Algérie se présente sous forme de sept types. Ce chiffre a été revue dans une étude récente où l'auteur considère qu'il neuf type de Foggara qui sont illustrés comme suit (Remini, 2022) :

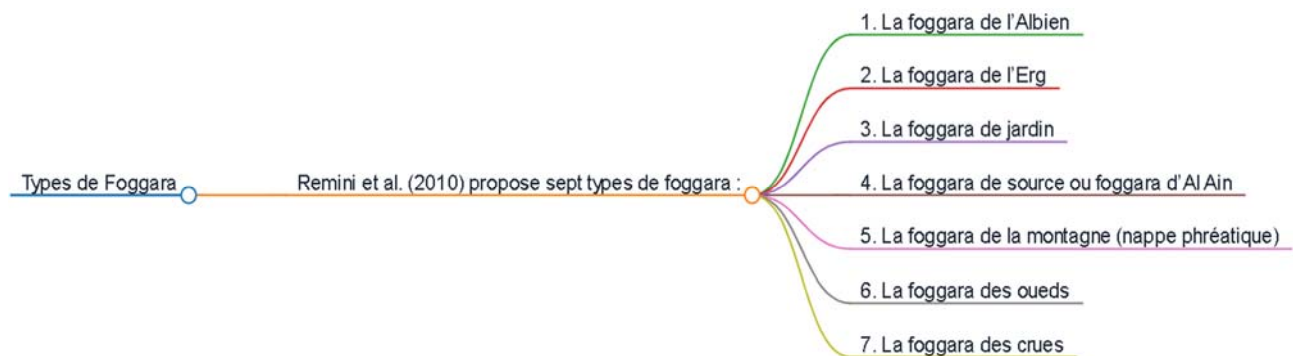


Figure II-7: Typologie des Foggaras selon Remini et al. (Remini et al., 2010)

1. La foggara de l'Albien : Aussi appelée "foggara classique". C'est le type qui utilise l'aquifère Continental Intercalaire, est considéré comme le plus connu et le plus décrit. Cette Foggara est située au sud-ouest du Grand Erg Occidental, où les Oasis associées sont Touat (Adrar), Gourara (Timimoun), Tidikelt dans la wilaya de In Salah où le plateau de Tademaït constitue un véritable château d'eau. (Khadraoui, 2007).

Ce système de Foggara, utilisé depuis plus de deux millénaires dans le Sahara algérien, est un exemple remarquable d'ingénierie hydraulique traditionnelle. Il est conçu pour acheminer l'eau des aquifères continental Intercalaire, vers les palmeraies et les jardins grâce à un écoulement gravitaire (Remini, 2022). La structure de la Foggara comprend une partie amont avec un réseau de galeries ramifiées qui s'adapte aux variations de l'approvisionnement en eau, et une partie aval avec un réseau de Saguia triangulaires qui distribue l'eau en fonction des droits d'eau des agriculteurs (Idda et al., 2021)..

Les galeries souterraines, légèrement inclinées, permettent à l'eau de s'écouler sur environ 10 km jusqu'aux jardins situés en dessous de la ligne piézométrique de l'aquifère (Boutadara et al., 2018).

En 2021, on comptait 1 890 foggaras dans la région, dont 1 815 captant spécifiquement les eaux sous la surface du plateau de Tademaït, couvrant une superficie de 15 000 km². Avec ses 3 000 km de galeries, le plateau de Tademaït sert de réservoir naturel aux oasis d'In Salah, Adrar et Timimoun, soulignant l'importance de ces structures dans la gestion des ressources en eau dans des environnements arides (Remini, 2022).

2. La foggara de l'Erg : La foggara de l'Erg est un type distinct de système d'eau de foggara traditionnel que l'on trouve dans certaines oasis sahariennes algériennes et qui puise dans les aquifères peu profonds situés sous les grandes régions des Ergs (mer de sable). Contrairement à la foggara de l'Albien, qui exploite une nappe plus profonde et saline, la foggara de l'Erg présente un débit constant tout au long de l'année et fournit une eau de meilleure qualité, moins salée ([Remini et al., 2010](#)).

En effet, l'alimentation de ces aquifères à la base des ergs est un processus naturel fascinant. Des millions de mètres cubes d'eau, drainés par de nombreux Wadis lors des crues intermittentes, s'infiltrant dans les dunes de sable du Sahara algérien. Ces eaux atteignent le fond des Ergs, formant ainsi un immense réservoir d'eau douce de très bonne qualité, naturellement filtrée par les dunes de sable. Ces réserves d'eau souterraine sont exploitées par les foggaras de l'Erg, caractérisées par des puits perdus creusés dans l'Erg, dont le nombre exact reste inconnu ([Remini, 2022](#)).

Ces systèmes de foggara sont constitués de galeries souterraines creusées au cœur même de l'erg pour accéder à la nappe aquifère et amener l'eau par écoulement gravitaire jusqu'aux oasis. Les galeries peuvent s'étendre sur plus de 10 km avec une multitude de puits d'aération verticaux. Contrairement aux foggaras albiens, les galeries de l'Erg Foggara sont étroites avec un canal d'alimentation en surface appelé fhel recouvert de pierres plates pour empêcher l'entrée du sable ([Remini, 2022](#)) .

Ce type de Foggara se trouve dans l'oasis de Tabelbala (Bechar). Des systèmes de foggara similaires basés sur l'erg ont ensuite été identifiés dans le Oasis de Ouled Said, près de Timimoun et à In Ghar et à Ezzaouia dans la région d'In Ghar (In salah) ([Mourad & Remini, 2018](#)), ([Mourad et al., 2021](#)),.

En effet, dans la région de Timimoun, 64 Erg Foggaras sont répertoriés dans des oasis comme Ouled Said et Aghled, avec une longueur de galerie combinée dépassant 100 km et plus de 1000 puits verticaux. À In Ghar, 11 foggaras puisent dans l'aquifère de l'Erg Meliana reconstitué par les crues des Wadis, avec plus de 36 km de galeries creusées et 2 600 puits d'aération facilitant l'écoulement de l'eau vers les jardins et les maisons de l'oasis ([Mourad & Remini, 2018](#)), ([Remini, 2022](#)).

3. La foggara de jardin : Il s'agit des foggaras d'infiltration. Ce type de foggara, spécifique au Sahara algérien, n'a pas encore été mentionné dans la littérature technique Avant qu'il soit révélé par Remini ([Remini et al., 2010](#)) . Il forme un système qui alimente directement un ou plusieurs jardins via un réservoir appelé "Madjen". Le système qui est équipé d'une petite "kasria" (orifice) pour contrôler les débits d'irrigation comporte de petites structures conçues pour capturer les eaux de drainage et d'infiltration des grandes foggaras albiennes et des zones irriguées avoisinantes. Leur structure, bien que similaire à celle des foggaras classiques, est plus modeste, avec des galeries d'une longueur généralement inférieure à 1,5 km et un nombre de puits ne dépassant pas le nombre de vingt (20), ([Remini, 2022](#)).

Son débit est généralement plus faible que celui des foggaras traditionnelles et elle est souvent située en aval de ces dernières. Contrairement aux foggaras classiques qui ont un débit constant, les foggaras de jardin ont un débit intermittent. Elles sont alimentées par les eaux de drainage et d'irrigation provenant des palmeraies des grandes foggaras. Alors que les foggaras traditionnelles perdent une partie de leur eau, les foggaras de jardin récupèrent une partie de l'eau infiltrée des canaux d'irrigation, appelés séguias, ainsi que des bassins de stockage (Madjens). La distribution de l'eau pour ce type de foggara est simple et ne nécessite pas de système de partage complexe ([Remini, 2022](#)).

Ce type de Foggara est localisé notamment des foggaras d'Agalou (20 puits), Zahzaa (15 puits), Akraf, Q'sar el Kadim, Q'sar el kadim, Oukala (abandonnée) et Bouchouk (abandonnée) ([Remini, Albergel, et al., 2015](#))

Ces foggaras appartiennent souvent à une seule famille et jouent un rôle crucial dans la récupération des eaux d'irrigation provenant des grands canaux et bassins de stockage ([Remini, Albergel, et al., 2015](#))

Leur existence témoigne de l'ingéniosité des populations oasiennes pour maximiser l'utilisation de l'eau dans des environnements arides, en exploitant même les moindres quantités disponibles. Cette pratique ancestrale reflète une profonde compréhension des cycles hydrologiques locaux et une adaptation remarquable aux conditions environnementales extrêmes du Sahara algérien ([Remini, 2022](#)).

4. La foggara de source ou foggara d'Al Ain, pluriel Ayounes, (source en Arabe) : La foggara d'El Ain, ou foggara de source, se distingue de la foggara classique par son mode de captage des eaux. En effet, elle puise directement dans les eaux de source naturelle. Les travaux de Remini ([Remini et al., 2010](#)) indiquent l'existence de 15 foggaras de ce type, réparties entre les oasis de Moghrar (Naama), Hannou à Adrar, les Oasis de Beni Ounif, Lahmar , Beni Abbes, et Taghit à Bechar), Ain Madhi (Laghout) et aussi les Oasis de stiten , de Mecheria Essghira et Boussemghoune à El Bayadh) et enfin l'Osis de Chetma à Biskra ([Remini & Hareche, 2021](#)). Ce système d'irrigation de sources représente une adaptation ingénieuse aux conditions hydrogéologiques locales et témoignent de la diversité des systèmes hydrauliques développés par les populations oasiennes.

A Moghar (Naama), l'approvisionnement en eau domestique et l'irrigation ont été réalisés à l'aide de techniques traditionnelles de collecte de l'eau telles que les puits pendulaires et les foggaras. La foggara est alimentée par une source d'eau. Equipée d'une galerie de 300 m de longueur et d'un unique puits d'aération, la foggara de Moghrar est utilisée pour l'irrigation de la palmeraie ([Remini & Achour, 2017](#)), ([Hadidi, Remini, Habi, et al., 2018](#)).

En plus des foggaras de type albien qui captent les eaux de la nappe du Continental Intercalaire, l'oasis d'Adrar abrite également la foggara de Hennou, une foggara de source unique dans la région. Contrairement à la majorité des foggaras d'Adrar qui sont alimentées par la nappe profonde, la foggara de Hennou s'alimente d'une source d'eau naturelle et pérenne. Cette particularité fait de la foggara de Hennou un véritable joyau hydraulique local.

Quant à l'oasis de Beni Ounif, située dans la wilaya de Béchard, la foggara d'Al Ain est une source artésienne 'Aïn' ([Otmame, 2016](#)) . Cette dernière constitue la principale ressource en eau pour l'agriculture de l'oasis. Ce type de foggara, qui puise son eau directement d'une source naturelle plutôt que d'une nappe phréatique. L'acheminement de l'eau de l'Aïn vers les zones cultivées se fait par un système hydraulique complexe et ancestral. L'eau de la source est d'abord collectée dans une galerie souterraine, la foggara, d'une longueur impressionnante de plus de 1400 mètres. Ensuite, elle est distribuée via un réseau de canaux de surface appelés "Saguias", qui serpentent à travers les jardins et les palmeraies de l'oasis ([Rezzoug, 2014](#)) .

Dans l'oasis de Lahmar, l'approvisionnement en eau repose sur quatre foggaras, implantées dans la partie nord du Q'sar. Ces foggaras, nommées Ain Djemal, Omran et Tawirt Lahmar, jouent un rôle vital dans la gestion de l'eau de la région. Parmi celles-ci, la foggara de Tawirt se distingue comme

le plus grand, comportant 18 puits atteignant une profondeur maximale de 25 mètres, tandis que le plus petit, Omran, est constitué de quatre puits d'une profondeur de 6 mètres. À la sortie des foggaras, l'eau est acheminée vers les Madjens collectifs, où elle est stockée avant d'être distribuée aux différents propriétaires. Chaque propriétaire reçoit sa part d'eau via les Saguia, canaux d'irrigation qui permettent de répartir équitablement la ressource dans l'oasis, ([Remini, 2022](#)).

En revanche, l'oasis de Beni Abbes, dotée d'une importante source d'eau naturelle, a été le pilier du développement des palmeraies dans la région. La construction d'une galerie souterraine reliant la source aux jardins a grandement contribué à l'essor de l'agriculture et des palmeraies ([Remini et al., 2010](#)). Cependant, cette foggara, autrefois vitale pour l'irrigation, est malheureusement aujourd'hui laissée à l'abandon ([Merzougui et al., 2008](#)). Cette situation souligne l'importance de préserver et de maintenir ces systèmes d'irrigation traditionnels, véritables trésors du patrimoine culturel et agricole des régions désertiques ([Rezzoug & Remini, 2019](#)).

Quant à l'oasis de Taghit, dont les foggaras sont aussi du type de 'Ain', comptait autrefois 45 foggaras, en 2014, seulement 25 d'entre elles étaient encore en service, avec un débit total de 16 litres par seconde. Actuellement, seules 5 foggaras sont opérationnelles, mais leur débit est faible. Cette évolution souligne aussi les défis de gestion des ressources en eau auxquels est confrontée cette oasis ([Remini, 2022](#)).

À Boussemghoun, dans la wilaya d'El Bayadh, la nappe phréatique est très proche de la surface, à seulement 1 à 2 mètres de profondeur. Cette proximité de la nappe a donné naissance à de nombreuses sources naturelles d'eau qui jaillissent en surface ([Hadidi, Remini, & Habi, 2018](#)). On dénombre six foggaras alimentées par ces sources qui irriguent les palmeraies et les jardins de l'oasis.

Ces foggaras de source fonctionnent d'une manière similaire aux faljs (galeries drainantes) d'Oman. Elles captent l'eau des sources par un système de galeries souterraines et de séguia (canaux) à ciel ouvert qui acheminent l'eau par gravité vers les jardins et les Q'sars. Contrairement aux foggaras classiques où chaque propriétaire possède son propre bassin de stockage (Madjen), ces foggaras partagent un seul grand Madjen collectif pour stocker et distribuer l'eau ([Remini et al., 2010](#)).

Pour l'alimentation en eau potable du Q'sar de Boussemghoun, une dizaine de puits ont été creusés. Certains de ces puits se trouvent à l'intérieur de certaines maisons afin de puiser l'eau de la nappe peu profonde. Cependant, les débits de ces sources et puits ont fortement diminué depuis les années 1990 en raison de la surexploitation de la nappe ([Hadidi, 2020](#)).

Dans la même wilaya, d'autres foggara du même type sont identifiées au niveau la commune de Sttiten et la localité de Mecheria Essghira. Dans l'oasis de cette dernière, deux modestes foggaras dites "d'El Aïn" sont présentes. Chacune d'entre elles est équipée d'une galerie souterraine de 100 mètres de longueur, pourvue de trois puits d'aération. Ces deux foggaras ancestrales ont pour vocation d'irriguer les jardins de la palmeraie locale ([Remini, 2022](#)) .

L'oasis de Sttiten, également située dans la wilaya d'El Bayadh, comptait autrefois onze foggaras d'El Aïn exploitant dix-neuf sources alimentées par la nappe phréatique. Ces impressionnantes galeries drainantes permettaient d'approvisionner le Q'sar en eau et d'irriguer une vaste palmeraie composée de 640 jardins. Malheureusement, à l'heure actuelle, seule une foggara d'El Aïn de 100 mètres de longueur demeure en fonction ([Remini, 2022](#)).

A Laghouat, la Foggara de Ain Madhi est identifiée comme celle qui fait partie des Foggara dite 'Foggara Ain'. La source porte le nom de d'Ain Sidi Moein. Elle consiste en une galerie souterraine creusée dans la roche pour collecter l'eau de source. L'eau est transportée par gravité le long de galeries souterraines, avec des puits verticaux pour l'aération et l'entretien.

L'émergence d'un système d'irrigation de type Foggara 'Ain' dans la région de Chetma est le résultat de la présence de plus de sept sources d'eau naturelles. La générosité du débit de ces sources naturelles a incité les habitants à s'installer et à ériger leur communauté. La quantité d'eau ainsi produite est considérée comme un bien collectif, régi par des traditions anciennes qui garantissent un partage équitable entre les agriculteurs de l'oasis de Chetma. À cette fin, un réseau de drainage, de transport et de distribution, composé de plusieurs Saguia totalisant une longueur de 4 km et de 7 Meksem (diviseurs), forme le système de partage et de distribution de cette oasis ([Remini & Hareche, 2021](#)).

En plus de ces Foggara, il y'a la Foggara de Kenadsa qui puise son eau des résurgences au pied du massif d'El Barga. Ces résurgences sont des points où l'eau souterraine refait surface, alimentant ainsi le système de Foggara ([Remini et al., 2014](#)). Profitant de la topographie inclinée, les Foggaras de Kenadsa sont conçues sous forme d'une galerie souterraine d'une longueur moyenne de 150 m et à faible pente ([Benmoussa et al., 2015](#))

Appelée « Ain » (source d'eau), Ces foggaras sont une propriété familiale et portent le nom de chaque famille. Les sources d'eau découvertes par les premières familles sont devenues leurs propriétés ([Remini et al., 2014](#)).

5. La Foggara de la Montagne : La Foggara de la Montagne (également connue sous le nom de foggara de la nappe phréatique) est un système d'irrigation traditionnel qui prévalait autrefois dans le Sahara algérien. Cependant, ce type de foggara n'est plus opérationnel aujourd'hui. Les vestiges de quelques foggaras de ce type ont été identifiés, principalement dans la région de Béchar.

Le Djebel foggara, un exemple notable de ce type, s'approvisionne en eau à partir d'une nappe phréatique. Cette nappe phréatique est rechargée par le ruissellement des montagnes environnantes. La conception et la fonctionnalité du Djebel foggara présentent des similitudes frappantes avec d'autres systèmes d'irrigation traditionnels dans le monde, tels que la khattara marocaine, le qanat iranien et le kariz afghan (Remini et al., 2010).

Une caractéristique déterminante du système de foggara est sa variabilité saisonnière du débit d'eau. Pendant les périodes de pluie, coïncidant généralement avec les mois d'hiver, la foggara connaît des débits de pointe à mesure que la nappe phréatique se reconstitue. À l'inverse, dans la chaleur torride des mois d'été, le débit de la foggara diminue à mesure que la nappe phréatique recule, reflétant les rythmes naturels du climat saharien (Idda et al., 2021)..

Trois foggaras de montagne sont mentionnées par (Remini et al., 2010). Il s'agit des Oasis de Ouakda, Taghit et Lahmar. Ces foggaras qui se trouvent dans l'oasis de Taghit sont actuellement abandonnées. Ce type de foggara se localise au pied de Djebel Marhoma à Beni Abbes. Elle est caractérisée par une longueur de la galerie qui ne dépasse pas les 1 000 m. Elle est large par rapport aux foggaras de l'Albien.

Malgré leur déclin, les foggaras du Sahara algérien témoignent de l'ingéniosité des systèmes traditionnels de gestion de l'eau dans les régions arides. Leur héritage continue d'inspirer les approches modernes de l'utilisation durable de l'eau dans les environnements désertiques.

6. La foggara des Wadis : Ce type de foggara capte les eaux des Wadis, comme le falj du sultanat d'Oman. C'est un système d'irrigation traditionnel utilisé dans les régions arides et semi-arides, notamment dans les oasis du Sahara algérien. La longueur de cette foggara, creusée dans les sables grossiers des alluvions de l'Wadi, peut atteindre 1 500 mètres. Des puits d'aération et de maintenance, espacés de 20 à 50 mètres, ponctuent la galerie pour l'aérer, évacuer les matériaux et assurer un entretien régulier (Remini, 2022). La foggara des Wadis fonctionne uniquement en période de crues, généralement après les pluies hivernales.

C'est une foggara temporaire qui fonctionne en période humide en captant les eaux de la nappe d'inféoflux, c'est-à-dire les eaux souterraines qui s'écoulent sous le lit de l'Wadi (Remini, 2011).

Pour ce type de foggaras, le puits mère ainsi que les puits d'aération se trouvent dans le lit de l'Wadi, où les types de sols rencontrés sont généralement argilo-limoneux et parfois caillouteux. Ces foggaras sont vulnérables aux crues et à l'ensablement, les puits d'aération étant recouverts par les alluvions de l'Wadi lors des crues. Elles nécessitent donc un entretien régulier pour éviter leur destruction (Remini et al., 2010).

Autrefois, ce système d'irrigation était largement répandu dans les oasis du Sahara algérien, mais malheureusement, aucune foggara de ce type ne fonctionne actuellement. Elles ont été abandonnées suite à leur effondrement et à l'assèchement des Wadis, en raison des changements climatiques et de la surexploitation des ressources en eau. Ce type de foggara se localisait principalement dans les régions de Tindouf (Papy, 1959)

à Bechar et Tamanrasset, dans des oasis comme Lahmar (Remini et al., 2010), et dans Brezina dans la wilaya d'Elbayadh, et la localité de Sfisifa dans la wilaya de Naama (Remini, 2022).

Malgré leur abandon, ces foggaras représentent un patrimoine culturel et technique important, témoignant de l'ingéniosité des populations locales pour s'adapter à un environnement aride et exploiter de manière durable les ressources en eau limitées. Une inattention particulière doit être accordée à étude et leur préservation pour comprendre les systèmes d'irrigation traditionnels et les défis auxquels sont confrontées les oasis face aux changements environnementaux.

7. La Foggara des crues : La Foggara des crues, unique en Algérie et située dans la vallée de Mzab à Ghardaïa, est un exemple remarquable de l'ingéniosité des systèmes traditionnels de partage de l'eau dans les oasis du Sahara (Remini et al., 2012), (S. Madani, 2022). Conçue pour récupérer les eaux de crues, ce système hydraulique ancestral présente une organisation complexe et ingénieuse. L'eau est d'abord collectée dans une retenue appelée "Tissanbadh", équipée de 36 ouvertures permettant de réguler le débit. De là, l'eau est canalisée par cinq galeries souterraines d'environ 200 mètres de long, équipées de 38 puits d'aération permettant l'accès et l'entretien des ouvrages (Remini, 2018).

Ces galeries, aux sections variées (rectangulaires, triangulaires, complexes) adaptées aux conditions hydrologiques, convergent vers un point de répartition des eaux avant de rejoindre le réseau de Saguia irriguant les jardins. Le surplus des eaux de crue est récupéré en aval dans une autre retenue naturelle, appelée "ahbass", qui sert à la recharge artificielle de la nappe phréatique par infiltration (Remini, 2018).

Ce système ingénieux permet non seulement une utilisation efficace et équitable des eaux de crues rares mais cruciales, mais contribue également au maintien de la nappe phréatique, essentielle pour la durabilité de l'oasis dans cette région hyper-aride (Remini et al., 2012). Les eaux chargées en particules fines issues des crues servent aussi à l'amendement des sols des palmeraies (Remini, 2018).

Malgré sa dégradation due à des facteurs sociaux et environnementaux, ce système ancestral remarquablement bien adapté témoigne des savoirs et savoir-faire traditionnels développés par les populations sahariennes pour la captation et la répartition équitable des eaux de surface et souterraines (Remini et al., 2012). Les habitants du Mزاب ont ainsi pu développer une agriculture oasienne prospère grâce à cette gestion raisonnée des ressources en eau limitées (S. Madani, 2022).

II.11 Les modes de système de de partage des eaux d'irrigation dans les Oasis.

Fondamentalement, l'eau est reconnue comme la source essentielle de toute vie (Falkenmark, 2020). Dans les environnements arides du Sahara, elle revêt un caractère vital pour l'existence humaine et les activités socio-économiques (Burmil et al., 1999). C'est pourquoi les populations oasiennes accordent une importance capitale à la préservation, l'exploitation et l'utilisation rationnelle de cette ressource précieuse (Ammour et al., 2010). Au sein des oasis sahariennes, l'eau est distribuée de manière équitable parmi les membres de la communauté selon des méthodes de partage ancestrales minutieusement codifiées (Remini, 2019).

D'une manière générale, dans les Oasis saharienne en Algérie ou dans le reste des pays du Maghreb, les principes et logiques appliquées pour le partage de l'eau sont basés sur la coopération et la solidarité entre les communautés locales (T. Madani, 2006), (Janty, 2013), (Idda et al., 2017). Cette gestion communautaire de l'eau, garante d'une répartition juste et durable, reflète l'ingéniosité des populations oasiennes et leur adaptation remarquable aux contraintes des milieux arides (Zella & Smadhi, 2006), (Benmoussa et al., 2015). Ces mêmes principes sont observées dans d'autres régions du Monde (Aubriot, 2004). Parant de ces principes, des systèmes traditionnels, fruit d'un

savoir-faire séculaire sont mis en place. Ces systèmes qui se basent sur des règles ancestrales et des moyens techniques rudimentaires, reposent sur des unités de mesure et des tours d'eau réglementés avec une grande précision (Battesti, 2005a), (Remini, 2019), (Remini & Hareche, 2021)

La littérature donne des indications précises quant aux unités de mesure de l'eau utilisées dans le système de partage de l'eau dans l'oasis saharienne. Ce système de partage s'articule autour de deux différents modes qui s'appliquent parfois simultanément : la répartition par fraction de volume et la répartition par fraction ou unité horaire (temps d'écoulement), (Remini, 2011), (Haoui, 2021).



Figure II-8: Système de partage de l'eau dans les Oasis

II.11.1 Mode de partage par volume

La répartition volumétrique de l'eau dans les oasis sahariennes consiste à assigner à chaque copropriétaire une part proportionnelle du débit. Des dispositifs simples fabriqués sur place sont utilisés pour la répartition de l'eau. Ces dispositifs, tels que les répartiteurs traditionnels comme la gesseria ou la kasria, ainsi qu'un réseau complexe de séguias, sont des exemples caractéristiques de cette approche particulière. L'Oasis de Timinoun offre des illustrations remarquables de ces systèmes (Troussset, 1986). Le bénéficiaire a donc accès à la portion d'eau qui est déterminée en fonction de sa contribution à l'entretien de la foggara (Remini et al., 2010).

Les kasriates ou les gesserias, sont des structures de distribution d'eau disposées de manière pyramidale, avec une kasria principale au sommet. Cette kasria agit comme un bassin triangulaire équipé d'un répartiteur qui divise l'eau en plusieurs Saguias. Ces Saguias s'étendent en éventail dans toutes les directions, aboutissant à d'autres kasriates secondaires qui redistribuent l'eau vers d'autres Saguias, formant ainsi un réseau complexe qui irrigue les Guemouns, les jardins des oasis sahariennes (Remini, 2019), (Remini, 2023).

Cette méthode de partage d'eau volumétrique prévaut notamment dans les foggaras de type albienne, où l'eau est captée directement de la nappe phréatique, ainsi que dans les foggaras de l'erg

qui exploitent les nappes souterraines situées sous les ergs, et les foggaras des crues qui canalisent les eaux de ruissellement (Remini et al., 2010).

Les régions d'Adrar, Timimoun et In Salah sont les plus connues dans le monde où les foggaras fonctionnent avec un réseau de distribution volumétrique (Remini, 2022).

L'application généralisée de cette méthode de distribution dans les oasis sahariennes en Algérie souligne son importance et son adaptabilité aux différents types de foggaras, reflétant l'ingéniosité des systèmes traditionnels de partage de l'eau, fruit d'un long héritage ancestral profondément enraciné dans ces régions arides (Trousset, 1986).

Le partage de l'eau se fait en unités spécifiques : h'abba, qîrat... Ces unités sont calculées en fonction du diamètre d'ouverture du répartiteur, tout comme le doigt ou le quinaire dans le système modulaire romain (Trousset, 1986).

Pour la distribution volumétrique, les oasis de la Saoura utilisaient des règles graduées sur les madjens pour estimer les parts d'eau de chaque irrigant.

II.11.2 Mode de partage par unité horaire (temps d'écoulement)

La méthode de partage horaire (temps d'écoulement) est le deuxième mode ancestral de partage des eaux d'irrigation pratiqué dans certaines régions oasiennes du Sahara algérien. Cette méthode prévaut généralement dans le partage des eaux issues des foggaras, alimentées par des sources, des Wadis ou l'eau de ruissellement des montagnes (Remini et al., 2010). Selon les spécificités régionales, cette méthode de répartition est largement adoptée et pratiquée dans les oasis des wilayas de Béchar, Tindouf, El-Bayadh et Naama, permettant une distribution équitable des précieuses ressources en eau entre tous les bénéficiaires (Remini, 2022).

Dans ce système, chaque propriétaire reçoit la totalité du débit du puits ou de la source pendant un laps de temps donné et à intervalle fixe, et le calcul des parts d'eau se fait en unité de temps. Le procédé horaire le plus connu est basé sur la notion de "Nouba", qui signifie tour à tour. Ce processus implique une durée de temps suffisante pour irriguer complètement un jardin (Trousset, 1986).

La "Nouba" est une notion dont la durée dépend de l'oasis, de la saison de distribution et parfois des ayants droits (Remini & Achour, 2013). Elle désigne le cycle d'approvisionnement en eau qui se répète selon une rotation bi-hebdomadaire, permettant une alternance d'irrigation diurne et nocturne (Trousset, 1986).

La notion de 'Nouba' repose sur le principe de roulement, qui crée un ordre organisateur et structurant au sein des communautés. A titre d'exemple, dans l'Oasis de Boukaïs (Bechar), chaque ayant droit voit son tour pour l'eau d'irrigation se répéter tous les 22 jours (Fellah et al., 2014). Dans certains cas, la notion de 'Nouba' correspond à l'unité fondamentale de partage de l'eau. C'est le cas dans l'Wadi R'hir à Oargla où l'irrigation se fait par les eaux extraites des puits artésien. Une Nouba représente l'utilisation de l'eau du puits pendant une demi-journée (Trousset, 1986) .

Dans le système de mesure du temps, la "Nouba" est fractionnée en unités plus petites, appelées 'Kharroubà'. Deux types de 'Kharroubà' sont utilisés en fonction du mode de répartition : (1) Kharrouba diurne : Sa valeur varie en fonction des saisons et de la durée d'ensoleillement pendant la journée. Elle mesure des intervalles irréguliers dans le temps. (2) Kharrouba nocturne : Cette unité est constante et correspond à deux doigts sur la barre de graduation du « Majen ». La durée de la 'Kharroubà' dépend de l'Oasis. Dans l'oasis de Boukaïs, elle est équivalent à un temps de 30 minutes pour un volume d'eau spécifique (Fellah et al., 2014). En revanche, elle est de 45 minutes, dans les Oasis de Beni-Ounif (Béchar) (Rezzoug, 2014) et celle de Sefissifa (Naama) (Derdour et al., 2022).

II.11.3 Aperçu de comparaison entre les deux modes de partage des eaux dans les Oasis

La différence principale entre la foggara horaire et la foggara volumétrique réside dans le mode de répartition de l'eau au niveau du réseau de distribution en aval de la galerie souterraine. Bien que la gestion obéisse à des lois coutumières similaires basées sur les droits déterminés par la contribution aux travaux, le partage effectif de l'eau diffère.

Dans le cas de la foggara volumétrique, le principe est celui du partage par unité de volume. Chaque ayant-droit reçoit sa part d'eau d'irrigation sous forme d'un volume défini. L'irrigation des différents jardins peut alors s'effectuer en parallèle, chacun recevant son eau directement de la kasria (bassin de répartition). Le réseau de distribution d'une foggara volumétrique est relativement complexe, composé de kasrias (bassins répartiteurs), de Madjens (petits bassins de stockage individuels) et de plusieurs kilomètres de Saguias (canaux d'amenée). Chaque propriétaire possède son propre Madjen situé au point le plus haut de son jardin pour permettre l'écoulement gravitaire de l'eau (Remini, 2019).

A l'inverse, dans une foggara horaire, il n'y a qu'un seul grand Madjen collectif situé à l'entrée de la palmeraie. L'eau est libérée par tours d'un temps déterminé pour chaque ayant-droit, qui doit

irriguer son jardin durant cette période allouée. Le réseau de Saguia présente alors des sections homogènes ([Remini, 2019](#)).

La foggara volumétrique, avec son réseau triangulaire complexe permettant une irrigation parallèle, se rencontre principalement dans les oasis du Touat, du Gourara et du Tidikelt. C'est un système ingénieux mais plus complexe que la foggara horaire pour répartir équitablement les volumes d'eau entre les différents bénéficiaires.

II.12 Les réseaux de distribution dans le système de de partage des eaux d'irrigation dans les Oasis.

Le système foggara est composé de deux parties principales : l'amont et l'aval. La partie amont est composée d'une galerie souterraine équipée d'une multitude de puits de ventilation qui captent l'eau souterraine et la transportent vers le réseau de distribution. La partie aval représente le réseau de distribution, qui partage et distribue l'eau à l'aide de différents éléments ([Remini, Achour, et al., 2015](#)), ([Remini, 2017](#)).

Pour chaque mode, qu'il soit volumétrique ou horaire, correspond un réseau spécifique de distribution.

En mode volumétrique, le débit d'une foggara est divisé en plusieurs étapes à l'aide d'un réseau de distribution triangulaire. Ce réseau s'adapte mieux au milieu aride que les autres réseaux, maillés et ramifiés, puisqu'il est conçu de telle manière que le débit de la foggara à l'entrée de la kasria se divise en plusieurs étages pour finalement atteindre le débit le plus faible. Cela ne peut se faire que par un réseau triangulaire. Tous les ouvrages hydrauliques du réseau sont dimensionnés en tenant compte du réseau triangulaire. La conception du réseau d'une foggara volumétrique est ainsi triangulée et l'irrigation est réalisée simultanément ([Remini, 2023](#)).

Les dimensions des structures sont liées aux débits. A chaque étape de la division du débit, les ouvrages (Kasria, Saguia et Madjen) sont dimensionnés en fonction desquels peuvent assurer l'écoulement d'un filet d'eau. Il en est de même pour les Madjens, qui sont dimensionnés en fonction du débit alloué à chaque copropriétaire. Quelles que soient les dimensions du Madjen, le remplissage de ce dernier s'effectue en 24 heures. Chaque Madjen assure l'irrigation d'une zone de la palmeraie sans excès ni déficit d'eau ([Remini, 2017](#)).

En mode horaire, l'irrigation est effectuée en utilisant le débit horaire. La conception du réseau comprend un grand Madjen central partagé, connecté à plusieurs kilomètres de canaux d'irrigation

(Saguias), avec une capacité suffisamment grande pour se remplir en 24 heures. Les Saguias se terminent par un réseau secondaire (Masraf) qui distribue l'eau aux parcelles ([Rezzoug, 2014](#)). Le réseau de distribution de la foggara en mode horaire est un réseau maillé et ramifié. Un réseau maillé et ramifié est utilisé dans la distribution des eaux de surface par les copropriétaires des foggaras qui possèdent des forages qui pompent l'eau des puits souterrains. Avec le développement des forages, l'irrigation est désormais plus diversifiée et variée et ne dépend plus uniquement du système foggara. Contrairement au mode volumétrique, aucun réseau triangulaire de foggara n'est nécessaire en mode horaire pour assurer la distribution de l'eau ([Remini, 2023](#)).

D'une manière générale, le réseau de distribution d'eau des oasis de foggara pourra être volumétrique ou horaire, chacun avec ses outils de mesure et de distribution d'eau, et la conception du réseau est déterminée en conséquence ([Remini, 2019](#)).

II.13 Conclusion du chapitre

En conclusion, le chapitre met en lumière l'importance vitale des oasis sahariennes comme havres bioclimatiques et refuges de vie dans les régions arides. Ces écosystèmes uniques ont évolué grâce à des pratiques agricoles ingénieuses et une gestion de l'eau adaptative, permettant aux communautés humaines de prospérer malgré les conditions environnementales difficiles¹.

En effet, l'étude des oasis sahariennes offre donc des leçons précieuses pour le développement de solutions durables face aux défis environnementaux globaux, soulignant l'ingéniosité et la résilience des populations des oasis sahariennes comme source d'inspiration pour le futur.

Les oasis sahariennes représentent bien plus que de simples zones de culture au cœur des étendues désertiques. Elles incarnent l'harmonie subtile entre l'ingéniosité humaine et les contraintes naturelles, fruit d'une longue coexistence avec un environnement aride. Chaque aspect de la vie dans ces havres de verdure est intimement lié à la gestion judicieuse de la rare et précieuse ressource qu'est l'eau.

Cette relation symbiotique se manifeste à travers les systèmes ancestraux de captage et de partage de l'eau, témoignant de l'adaptation remarquable des populations oasiennes. Les foggaras, ces galeries drainantes souterraines, illustrent la profonde compréhension de l'hydrologie locale et la capacité à acheminer les eaux des nappes phréatiques vers les lieux de vie. Parallèlement, les mécanismes communautaires de répartition équitable de cette ressource vitale assurent la pérennité de ces écosystèmes fragiles.

Au cœur de cette gestion avisée de l'eau se dresse le Q'sar, véritable citadelle abritant tout un savoir-faire hydraulique accumulé au fil des siècles. Plus qu'un simple refuge défensif, ces imposantes structures incarnent un centre névralgique dédié à la distribution rationnelle de l'eau aux habitations et aux terres cultivées alentour.

Le chapitre met en relief que les oasis ne sont pas que des prouesses techniques de maîtrise de l'eau. Elles constituent de véritables conservatoires de la biodiversité, où les modes traditionnels d'irrigation par canaux et bassins permettent d'entretenir un écosystème agricole riche en palmeraies et jardins. Cette polyculture oasienne durable régénère naturellement les sols et optimise une utilisation parcimonieuse de l'eau disponible.

C'est cette symbiose subtile entre l'Homme et la Nature qui a permis aux oasis de prospérer pendant des siècles au cœur des régions les plus inhospitalières. Aujourd'hui, face aux défis environnementaux contemporains, ces havres de vie aride recèlent des leçons inestimables de résilience et de durabilité inspirantes pour les générations futures. Préserver ce patrimoine unique, c'est perpétuer l'esprit d'adaptation et d'équilibre qui a façonné ces îlots de verdure au fil du temps.

CHAPITRE DEUXIEME
BOUSSEMGHOUN : TERRITOIRE OASIS ET
Q'SAR, LOCALISATION ADMINISTRATIVE
ANCIENNE ET ARCHEOLOGIE SAHARIENNE

III. Deuxième chapitre : Boussemghoun : Territoire Oasis et Q'sar, Localisation Administrative ancienne et Archéologie Saharienne

Introduction du chapitre :

III.1 Introduction du chapitre :

Au cœur des Hauts Plateaux occidentaux de l'Algérie dans la wilaya d'El-Bayadh, Boussemghoun émerge comme un témoignage vivant de l'ancienne organisation administrative de la région. Son Q'sar, bâti sur une colline stratégique entre le djebel Tanout et le djebel Tamedja, a longtemps servi de point de jonction pour les routes commerciales transsahariennes, favorisant ainsi les échanges et le développement économique local ([Saadi et al., 2017](#)).

Le rôle social de Boussemghoun est également significatif. La présence d'une annexe de la Zaouia Tijaniya, un lieu de pèlerinage pour les adeptes de cette confrérie soufie, souligne l'importance spirituelle du Q'sar. Ce centre religieux attire des visiteurs de toute l'Afrique, renforçant le statut de Boussemghoun comme un lieu de rayonnement culturel et de rencontre interculturelle ([Benali, 2004](#)).

Sur le plan archéologique, Boussemghoun offre un aperçu précieux des pratiques de construction et d'urbanisme adaptées aux conditions arides du Sahara. Son architecture saharienne, avec ses ruelles étroites et ses bâtiments en pierre, témoigne de l'ingéniosité des populations locales face aux défis environnementaux ([Saadi et al., 2017](#)).

La palmeraie de Boussemghoun, véritable écrin de verdure au milieu des étendues désertiques, est non seulement une source de subsistance pour la population mais aussi un élément clé dans la préservation de la biodiversité régionale. La culture des grenades et d'autres fruits, ainsi que l'élevage, contribuent à la diversité économique de l'oasis (Hadidi, Remini, & Habi, 2018),

Enfin, la population de Boussemghoun, héritière d'une riche tradition berbérophone, est le pilier du développement régional. Les Semghouniens, avec leur profonde connaissance de l'environnement et leur attachement à la terre, sont les gardiens de ce patrimoine unique. Leur rôle dans la conservation et la valorisation de l'oasis est essentiel pour assurer un développement durable et respectueux des équilibres naturels et culturels ([Bouhadjar, 2016](#)), ([Hadidi, 2020](#)).

III.2 Situation géographique

Boussemghoun est une commune située au Sud-Ouest d'El-Bayadh, dans la partie occidentale des Hauts Plateaux algériens. Elle se trouve à environ 500 km au Sud-Ouest d'Alger et à 190 km d'El-Bayadh.

La commune s'étend sur une superficie de 58 910 ha, soit 589,1 km². Elle est délimitée au nord par la commune de Chellala, au sud et au sud-est par la commune d'El-Biodh Sidi Cheikh, et à l'Ouest et au Sud-Ouest par la commune d'El-Bnoud et la wilaya de Naama. Boussemghoun est connue pour son Q'sar, une forteresse bâtie en harmonie avec la nature et le climat de la région. Le Q'sar reposait sur l'argile comme principal matériau de construction et il se dresse encore aujourd'hui malgré la migration de la population vers le nouveau village.

En effet, après l'indépendance, les habitants ont commencé à s'installer dans de nouvelles maisons en ciment dans le village de Boussemghoun, implanté dans le prolongement du côté Nord du Q'sar. Aujourd'hui, personne n'habite dans l'ancien palais, transformé en une attraction historique et touristique.

Le village de Boussemghoun, qui se situe au sein de cette commune, à 1 148 m d'altitude, est du type d'architecture saharienne, formé par un ensemble bien homogène de maisons à terrasses, à vérandas et à cours intérieures. Il est construit sur une colline entre le djebel Tanout et le djebel Tamedia, dont les sommets sont parfois enneigés en hiver, dans une oasis verdoyante arrosée par Wadi Seffah.

L'architecture traditionnelle est de type saharien, organisée autour d'un Q'sar trapézoïdal de 3,04 ha, protégé par une palmeraie de 39 ha (Saadi et al., 2017). Le Q'sar de Boussemghoun est un monument historique, classé comme patrimoine culturel par l'arrêté du wali N°347 du 05/04/2016. Il est également un lieu de pèlerinage pour les fidèles de la confrérie soufie Tijaniyya, fondée par Sidi Ahmed El-Tidjani, qui y vécut au XVIII^e siècle. Il est aujourd'hui transformé en attraction touristique, qui offre aux visiteurs un aperçu fascinant de l'histoire et de la diversité culturelle de cette région saharienne.

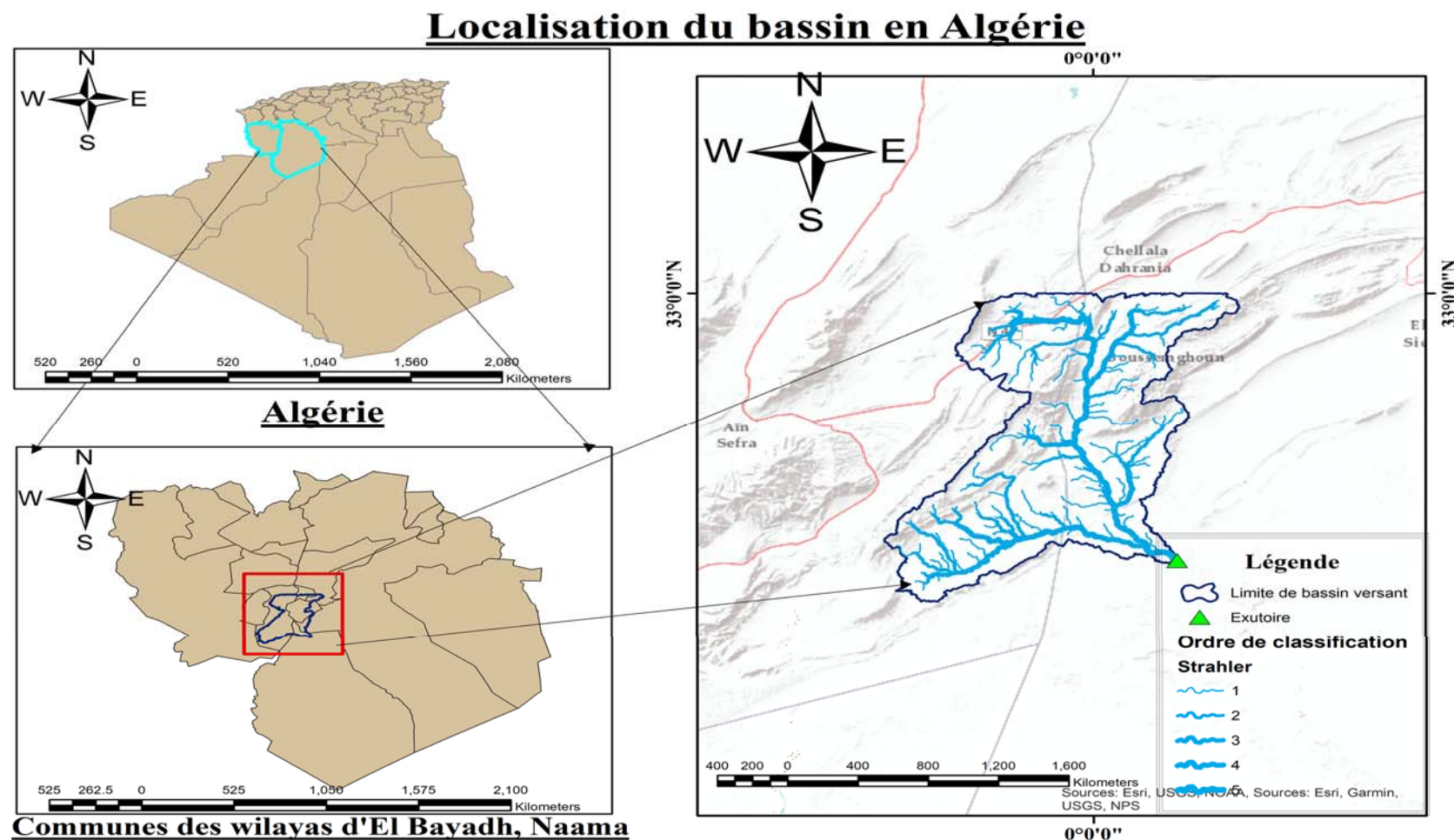


Figure III-1: Situation géographique de la région d'étude : Boussemghoun dans son environnement

III.3 Aperçu historique administratif de la commune de Boussemghoun

Du point de vue de l'historique administratif, la commune de Boussemghoun existait depuis 1956, où elle dépendait de Ain Sefra (Boussemghoun fière de ses origines ([Chekar, 2012](#)) .

Du point de vue historique administratif, la commune de Boussemghoun existe depuis 1956. À l'origine, elle dépendait d'Ain Serfa. En 1963, la commune de Boussemghoun, qui englobait la région d'Asla, a été rattachée à l'arrondissement d'Ain Serfa, relevant du département de Saida, conformément au décret n° 63-189 du 16 mai 1963. Ce décret constitue le premier texte officiel de l'État algérien indépendant qui réorganise les communes issues de la période de la colonisation française. Il maintient la division de l'Algérie en quinze départements et précise la répartition des communes algériennes par département et par arrondissement. En 1974, le décret n° 74-143 du 12 juillet 1974, fixant les limites territoriales et la composition de la wilaya de Saida, place la commune de Boussemghoun sous l'égide de la Daïra d'El Abiodh Sidi Cheikh. Puis, en 1984, suite à l'organisation territoriale du pays régie par la loi n° 84-09 du 4 février 1984, Boussemghoun est promue au statut de Daïra et fait désormais partie de la wilaya d'El-Bayadh. Les limites de la commune de Boussemghoun sont définies par les dispositions du décret n° 84-365 du 19 décembre 1984, qui précise la composition, la consistance et les limites territoriales des communes constituantes chacune des 48 wilayas. Ainsi, la commune de Boussemghoun est composée de six localités : Boussemghoun, Ouled Abdelkrim, Ouled Ben Djelloul, Ouled Hadj Bahous, Ouled Sidi Ahmed Medjdoub (en partie) et Semaghna.

Depuis le jeudi 28 décembre 2023, la daïra et la commune de Boussemghoun fait partie de la wilaya déléguée d'El Abiodh Sidi Cheikh, nouvellement créée.

III.4 La desserte routière de la commune de Boussemghoun

La desserte routière de la commune de Boussemghoun est servie grâce à un réseau routier qui au service du développement local. En effet, la commune de Boussemghoun dispose d'un réseau routier relativement développé qui lui permet de se connecter aux villes et villages environnants, ainsi qu'aux principales routes nationales du pays. Cette desserte routière joue un rôle important dans le développement économique et social de la commune en facilitant le transport des produits locaux, en encourageant le tourisme et l'investissement, et en permettant l'accès aux services essentiels tels que l'éducation et la santé. Le premier axe routier de cette desserte est formé à travers la connexion vers le nord qui est assurée par la route nationale n°47. Cette route stratégique permet

la connexion à d'autres routes nationales importantes, notamment la n°6 et la n°111, ouvrant ainsi l'accès vers les grandes villes du nord de l'Algérie (Benali, 2004).

Du côté sud, une route relie Boussemghoun à la commune d'El Abiodh Sidi Cheikh, facilitant les échanges et la circulation entre les deux localités. Cette route permet également de desservir les villages et hameaux situés sur son tracé.

Deux routes secondaires partent de la route reliant Boussemghoun à El Abiodh Sidi Cheikh et se dirigent vers l'ouest. La première mène à la commune d'Ain Warqa, offrant une alternative pour se connecter à la route nationale n°47 et à la route nationale n°6. La seconde route dessert la commune de Labnoud, commune de la wilaya d'El-Bayadh.

Par conséquent, le développement du réseau routier représente un atout majeur pour la dynamique économique et sociale locale. Son amélioration constitue donc un levier important de croissance et d'attractivité pour la commune. L'amélioration du réseau routier dans les régions des Q'sars de l'Atlas saharien algérien en général et celui de l'environnement de Boussemghoun contribuera à renforcer la connectivité de la commune et à améliorer la qualité de vie de ses habitants (Kouzmin, 2008).

III.5 Climat de la région de Boussemghoun

Le climat de la région de Boussemghoun est typique à celui des régions désertiques du Sahara septentrional où durant les dernières décennies l'été est extrêmement chauds et les hivers sont doux à frais (Belaroui et al., 2014).

La région se distingue par son bioclimat, oscillant entre aridité et semi-aridité. Elle connaît des précipitations souvent irrégulière, remarquables en automne et au printemps, tandis que l'été, période la plus chaude, est marqué par des pluies minimales voire inexistantes (Bouarfa et al., 2022).

Dans leurs travaux Saadi et coauteurs, (Saadi et al., 2017), spécifient que le climat de Boussemghoun qui se caractérise plutôt par une aridité prédominante, oscillant entre les influences désertiques du Sahara et les influences du Telle des hautes plaines steppiques. Les auteurs indiquent que les hivers sont généralement frais, avec des températures minimales avoisinant les 5°C, et marqués par des précipitations faibles et irrégulières. Les étés, en revanche, sont chauds et secs, avec des températures maximales pouvant atteindre fréquemment 45°C, voire exceptionnellement dépasser les 48°C, avec des moyennes de l'ordre de 35°C en juillet-août. Malgré ces conditions

climatiques rigoureuses, la région abrite une diversité remarquable de faune et de flore adaptées à cet environnement aride ([Ait Saadi, 2019](#)).

Cependant, et d'après des constatations personnelles, le vent constitue l'un des éléments les plus marquants du climat de Boussemghoun, soufflant régulièrement et pouvant atteindre des vitesses considérables, façonnant ainsi le paysage et influençant les modes de vie des populations locales

Le climat aride et les précipitations faibles façonnent un paysage désertique, caractérisé par des plaines arides et des montagnes escarpées. La végétation est clairsemée et adaptée aux conditions xériques, composée principalement de plantes résistantes à la sécheresse telles que les palmiers, les acacias et les buissons épineux ([Médail & Quézel, 2018](#)).

III.6 Relief de la région Boussemghoun

Les montagnes qui entourent la région de Boussemghoun sont les montagnes du Djebel Amour, parmi lesquelles on trouve le Djebel Temedda au sud-ouest, culminant à 1989 mètres, le Djebel Assaga dont la hauteur atteint 1272 mètres au nord-est, et le Djebel Ouziri au Sud-Ouest, s'élevant à 1424 mètres. Le Djebel Tenout (1 947 mètres), situé au nord-est, domine les autres montagnes. En contrebas du Tenout, tout comme au pied du Tamedda (1 800 mètres), court une colline parallèle. Au sud, la vallée de Boussemghoun offre une vue sur le Djbel Medaouar, une montagne riche en carrières de plâtre. Le climat de la région est influencé par ces reliefs montagneux, et la montagne El Medouer permet l'entrée généreuse des vents chauds venant du sud ,([Bouhadjar, 2016](#)).

Du point de vue géologie, la région présente une géologie complexe et variée. Selon l'étude présentée dans le document fourni par Azil et al. (2021), la région est composée de formations géologiques issues des ères Mésozoïque et Cénozoïque. Les matériaux géologiques du bassin de Boussemghoun sont majoritairement d'origine mésozoïque, recouvrant ainsi une grande partie de la région. Cette formation sédimentaire est caractérisée par une série crétacée représentant la formation géologique la plus étendue du bassin versant de Wadi Ech-Chergui, couvrant 60,75% de sa superficie totale. Ce groupe couvre également la région Sud-Ouest et la partie Centre-Est du bassin versant, notamment les régions de Wadi Es-Smar et Wadi Djedid. La série jurassique représente le deuxième ensemble lithologique en importance dans le bassin de Boussemghoun, couvrant 29,9% de la superficie totale. Elle est dominée par les calcaires et forme principalement les hautes topographies du bassin, telles que les formations de Djebel Afzouz, Djebel Bou Lerhfad, et Djebel Noukrila. Les séries pléistocène et holocène, représentant l'ère cénozoïque, sont peu présentes dans le bassin versant de Boussemghoun, couvrant seulement environ 8,3% de sa

superficie totale. Les roches de cette période, telles que les moraines, les tillites et les sédiments fluviatiles, peuvent présenter une certaine dureté due à la compression glaciaire, tandis que les roches holocènes comprennent principalement des dépôts de sédiments lacustres, alluviaux et éoliens ainsi que des dépôts de sols.

III.7 Population de la commune de Boussemghoun :

Selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2008, la population de la commune de Boussemghoun est évaluée à 3 795 habitants contre 3520 en 1996 (Bouhadjar, 2016) . En 2015, la population s'élève à environ 3 819 habitants en 2015, soit une densité de 6,4 hab./km². Cette densité s'est vue augmentée à 7.6 hab./km², puisque le dernier recensement de 2022 a estimé la population locale à 4500 habitants (ONS : Office National des Statistiques, 2022).

L'organisation sociale et économique de la population de Boussemghoun est fortement influencée par son histoire et son environnement. Après l'indépendance, la région a connu une densification rapide et des bouleversements structurels qui ont affecté son écosystème. Cela s'est traduit par la dégradation progressive de l'agriculture de l'oasis, l'abandon partiel des terres, l'exode rural, et la transformation de l'oasis en une petite ville avec de nouvelles fonctions

Sur le plan social, la communauté de Boussemghoun, comme d'autres communautés de la région, est caractérisée par un système social basé sur des liens familiaux forts qui servent de base à l'organisation sociale locale. Ces liens familiaux sont essentiels pour la gestion de l'eau et des ressources communautaires (Daoudi et al., 2017).

La population est majoritairement berbérophone, avec une minorité arabe, et Ils ont conservé leurs traditions et leurs coutumes, comme les fêtes religieuses, les mariages, les chants et les danses (Chekar, 2012).

L'économie repose principalement sur l'agriculture, notamment la culture des dattes, des arbres fruitiers tels que les grenadiers et les figuiers, ainsi que d'autres cultures vivrières. L'eau provenant de sources locales telles qu'Ain Legda, Ain Ouled Messisa, Ain Srinidia et Ain Joumane est essentielle pour l'irrigation des terres agricoles. De plus, les habitants exploitent également des puits pour l'eau potable et domestique.

En plus de l'agriculture, une grande partie de la population pratique l'élevage, mais aussi du tissage et de l'artisanat.

La diversification des cultures et des activités économiques est un enjeu important pour assurer la durabilité économique dans un contexte en évolution. A noter que durant les dernières décennies, ces activités sont en déclin avec la sécheresse, le surpâturage et l'exode rural vers les grandes villes (Hadeid, 2009).

III.8 L'Oasis de Boussemghoun

Les oasis des Monts des ksour, véritables joyaux écologiques riches et variés, bénéficiant de la présence d'une diversité végétale et de ressources en eau précieuses, essentielles à la subsistance des populations locales. Ces oasis jouent un rôle primordial dans la préservation de la biodiversité et dans la conservation des régions désertiques de l'Ouest algérien (Habi et al., 2019).

Ces oasis abritent une grande diversité de cultures, notamment des palmiers dattiers de qualité exceptionnelle, ainsi qu'une variété d'arbres fruitiers tels que le figuier, l'abricotier, l'olivier, le grenadier, le pommier et le poirier. Grâce à la présence de sources d'eau, ces oasis ont favorisé le développement de vergers et de villages sédentaires, offrant ainsi des conditions favorables à la vie et à la prospérité des habitants locaux.

Parmi les palmeraies les plus remarquables de cette région, celles de Moghrar Tahtani , de Tiout , de Boussemghoun sont distinguée. Ces deux oasis, ainsi que celle de Foukani, sont classées comme zones humides d'importance internationale selon les critères de la Convention de Ramsar (Ait Saadi, 2019), (Benaradj et al., 2021)

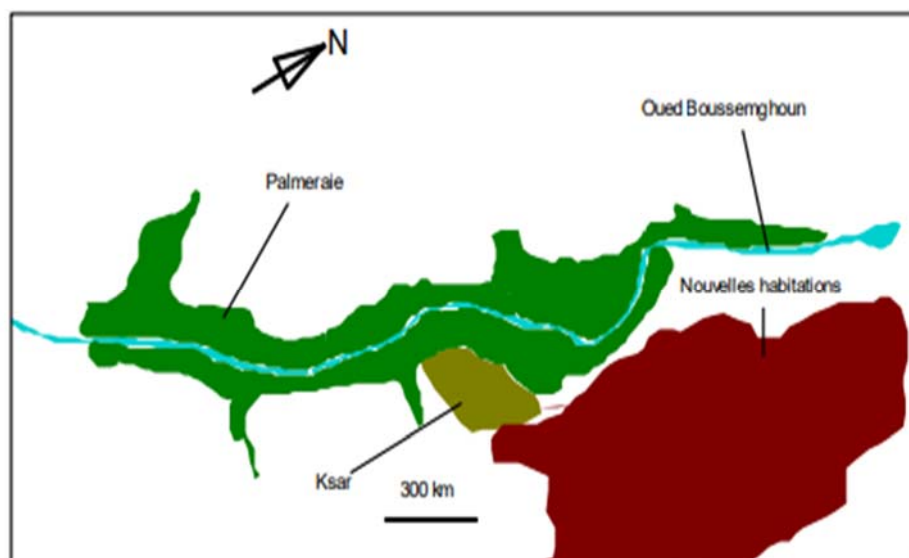


Figure III-2: Schéma représentatif de l'Oasis de Boussemghoun (Hadidi, 2020)

Ainsi, Boussemghoun, autrefois connue comme une oasis prospère, abrite encore aujourd'hui un Q'sar (ksar) et une palmeraie, vestiges de sa riche histoire.



Figure III-3: Vue partielle de la palmeraie de Boussemghoun.

La palmeraie de Boussemghoun est un exemple représentatif des oasis traditionnelles du Sahara septentrional. Elle s'étend sur une longueur de 4 km le long de Wadi de Samh ou Wadi de Boussemghoun, à l'ouest de la ville. Le sort des habitants y était étroitement lié, car c'était l'un des principaux facteurs qui les ont aidés à s'installer et à façonner leur mode de vie. Gérée de manière collective par environ 250 familles, la palmeraie de Boussemghoun présente un système d'irrigation ancestral alimenté par 6 sources naturelles et 32 puits creusés ([Hadidi, Remini, & Habi, 2018](#)).



Figure III-4: Les jardins de l'Oasis de Boussemghoun

Dans les années 1970, pour faire face aux défis posés par les aléas climatiques et afin de mieux gérer les ressources hydriques, un barrage a été construit en amont de Wadi Boussemghoun. L'objectif principal de cette infrastructure hydraulique était d'améliorer l'irrigation des jardins oasiens et de réguler les crues potentiellement dommageables pour les cultures. Cependant, aujourd'hui, le barrage est hors service en raison de son ensablement.

III.9 Héritage culturel et historique des Q'sours dans la région de Boussemghoun

Parmi les Q'sours des hauts plateaux de l'Ouest Algérien, ceux des Monts des ksour, dont la chaîne montagneuse porte le nom, se démarquent par leur architecture distincte, leur organisation spatiale particulière et leur mode de vie communautaire. Ils continuent de porter le riche patrimoine culturel berbère et arabe du Maghreb. Fondés au Moyen Âge, ces cités fortifiées dans les régions désertiques ont été le berceau de techniques ingénieuses d'adaptation à l'environnement aride et aux économies de subsistance. Malgré leur vocation défensive, ces Q'sours sont également des témoins d'une histoire culturelle riche et diversifiée, façonnée au fil des siècles ([Saadi et al., 2017](#)).

Dans la wilaya d'El-Bayadh, huit Q'sours se distinguent : Chellala, El Ghasoul, Arbaouet, Brizina, Krakda, Stiten, et Boualem. Certains d'entre eux ont bénéficié d'opérations de restauration, tels que le Q'sar de Boussemghoun, le Q'sar de Chellala et le Q'sar de Arbaouet. Ces Q'sours, avec leur architecture traditionnelle et leur histoire ancienne, offrent un aperçu fascinant de la culture et de l'histoire locales. ([Bouhadjar, 2016](#))

La région de Boussemghoun, où plusieurs Q'sars sont situés, dont l'un est toujours préservé aujourd'hui, possède une histoire riche et ancienne remontant à des époques lointaines. À travers les âges, cette région a porté plusieurs noms successifs, reflétant les mouvements et les tribus qui l'ont traversée : d'abord "Wadi Al-Idhan", puis "Wadi Al-Safah", pour finalement devenir "Boussemghoun", en hommage au saint Sidi Boussemghoun. Chacun de ces noms renvoie à une époque spécifique de l'histoire locale.

Des vestiges archéologiques témoignent de la présence de sept palais le long des rives de la vallée. Ces palais, répartis de part et d'autre de la vallée, ont été le théâtre de conflits entre différentes tribus, souvent liés aux questions de frontières et d'accès à l'eau d'irrigation. L'arrivée de saint Sidi Boussemghoun, dont le village et le Q'sar actuel portent le nom, a favorisé l'apaisement des

tensions et la mise en place d'une organisation sociale plus équitable pour la répartition des ressources en eau (APS, 2018), (Bourouayah, 2019).

III.10 Le Q'sar de Boussemghoun :

Le Q'sar de Boussemghoun, également connu sous le nom de "Q'sar El A Sâad" ou "le Q'sar du Bonheur", est un joyau d'un ancien village fortifié, construit sur une colline entre deux montagnes le djebel Tanout et le djebel Tameda et entouré d'une oasis verdoyante (Saadi et al., 2017). Outre, le lieu qui est géographiquement et climatologiquement favorable pour son implantation, La religion a joué un rôle significatif dans l'existence, le développement et le rayonnement du Q'sar de Boussemghoun. L'influence de zaouïa a donné au Q'sar l'opportunité de devenir un sites de pèlerinage (Ait Saadi, 2019).



Figure III-5: Le Q'sar de Boussemghoun

Le Q'sar de Boussemghoun autant que cité traditionnelle dans le Sahara algérien est un exemple remarquable de l'architecture et de la planification urbaine caractéristiques de la région des Monts de ksour. Sa construction sur une colline et son environnement naturel font de ce Q'sar un site unique à étudier pour comprendre l'organisation sociale et la vie quotidienne des habitants de l'époque (Saadi et al., 2017). L'architecture traditionnelle de ce Q'sar est un témoin précieux de l'art de construction et de conservation des habitats anciens dans la région, mettant en lumière

l'importance de maintenir le cachet architectural traditionnel des lieux historiques pour préserver le patrimoine culturel et architectural de l'Algérie , (Djebbar, 2018), (Bousnina, 2021).

L'histoire du Q'sar de Boussemghoun remonte à la période préhistorique, comme en témoignent les gravures rupestres découvertes dans la région. Il a connu plusieurs noms et plusieurs influences culturelles, notamment berbère, arabe et islamique. Il a été cité par plusieurs historiens et géographes, comme Ibn Khaldoun, Ibn Hawqal ou El Bekri (Ait Saadi, 2019) .

Dans le concept de Q'sar, la porte est l'image emblématique de cette double fonction de communication et de protection assurée par l'enceinte (Djeradi, 2012). Dans ce contexte, le Q'sar de Boussemghoun est doté de trois portes stratégiquement placées : d'un côté, elles donnent sur les routes menant à la vallée, tandis que de l'autre côté, elles s'ouvrent vers l'extérieur. Ces portes, fabriquées en bois de palmier, sont munies généralement d'une serrure constituée d'un bâton rond et épais. La principale porte, désignée sous le nom de "Bab al-Quabli", tire son appellation du terme "Quabli" qui fait référence à la direction sacrée de la Kaaba à la Grande Mosquée de La Mecque, en Arabie Saoudite. C'est en effet la direction vers laquelle se tournent tous les musulmans lors de leurs prières, où qu'ils soient dans le monde. Cette porte principale, située du côté du palais, est un point d'accès majeur pour le commerce et les tribus qui viennent au palais pour leurs divers besoins. La deuxième porte, nommée "Bab Al-Dahahrani", donne directement sur la vallée, en opposition au Qibla. Elle est localisée du côté ouest et est également connue sous le nom de "Bab At Nasi". Cette porte facilite l'entrée et la sortie des paysans du palais. Enfin, la troisième porte, qualifiée de secondaire, est positionnée du côté sud et répond au nom de "Bab Tamadla at Taboun". Les trois portes se ferment chaque jour au coucher du soleil jusqu'à l'aube du lendemain (Ait Saadi, 2019).

D'une forme qui trapézoïdale et avec une superficie de 3,04 hectares, le Q'sar de Boussemghoun se distingue par son architecture typique des Q'sours sahariens. Il est constitué de sept quartiers qui renferment des habitations en terre, traversées par des ruelles étroites et sinueuses (Ait Saadi, 2019).

Les maisons sont construites avec des matériaux locaux, comme la pierre, la brique crue, le bois de palmier et le roseau. Elles sont décorées avec des motifs géométriques et floraux, et disposent de cours intérieures et de terrasses. En règle générale, ces maisons présentent une uniformité dans leur architecture : typiquement, chaque demeure se compose d'un ou deux étages, avec une cour centrale exposée au niveau supérieur.

Les maisons sont disposées en rangées le long des côtés de la cour. Au rez-de-chaussée, les pièces sont dédiées au stockage des outils agricoles, du bois de chauffage, du fourrage pour le bétail, ainsi qu'à des installations similaires à une étable pour les animaux domestiques. Une pièce

particulièrement spacieuse et sombre, appelée "garde-manger", est réservée au stockage des provisions annuelles de la famille. À l'étage supérieur, les chambres et les biens de la famille trouvent leur place. Une caractéristique distincte de cet étage est la présence d'une pièce spéciale, le "hall", de forme rectangulaire et plus large que les autres, destinée à accueillir les invités. Ce hall est soigneusement aménagé, avec un plafond réalisé en bois de palmier sculpté, agrémenté de "carnaf" pour combler les espaces entre les poutres. Les ruelles sont étroites, (recouvertes) en grandes parties couvertes. Comme dans un véritable labyrinthe sombre et désert. Elles aboutissent au centre du bourg, à un carrefour bordé de grossiers bancs de pierre. Le Q'sar est protégé des rafales du vent et du soleil par la palmeraie qui s'étend, sur 39 hectares. La palmeraie fournit de l'ombre et des dattes, ainsi que d'autres cultures, comme les grenades, les abricots, les prunes et les légumes, (Benali, 2004).

Actuellement, le Q'sar de Boussemghoun est aujourd'hui un lieu de tourisme saharien, qui offre aux visiteurs un cadre naturel et authentique, ainsi qu'un témoignage vivant de la civilisation oasienne. Il est classé comme patrimoine culturel algérien depuis 2016.

III.11 La vie socioéconomique à Boussemghoun,

La vie socioéconomique à Boussemghoun fut jusqu'à des date récentes liée à l'Oasis. Elle est profondément enracinée dans l'agriculture traditionnelle. La région, caractérisée par un climat aride et des terres cultivables limitées, témoigne de la résilience et de l'ingéniosité de ses habitants pour préserver leur mode de vie séculaire (Saadi et al., 2017).

Dans ce contexte, l'agriculture représente le pilier central de l'économie locale, offrant aux résidents de Boussemghoun un moyen de subsistance vital. Malgré les défis imposés par le climat sec et les ressources limitées, les habitants ont su adapter leurs pratiques agricoles de manière durable (Hadidi, 2020).

Les terres agricoles de Boussemghoun se divisent en deux catégories distinctes : les terres situées dans la vallée proche du palais et les terres, plantées de palmiers et les jardins de l'Oasis laissées en jachère. Cette répartition reflète une gestion judicieuse des ressources naturelles disponibles.

La production agricole à Boussemghoun est diversifiée, avec une prédominance des dattes et des grenades. Les dattes, en particulier, occupent une place centrale dans l'économie locale, malgré les défis posés par la sécheresse et les maladies affectant les palmiers.

La récolte des dattes suit un processus méticuleux, comprenant les étapes de pollinisation, de redressement des palmiers et enfin de récolte, marquant ainsi les saisons et les rythmes de la vie agricole. Chaque famille possède ses propres terres, transmises généralement de génération en génération, reflétant un lien profond avec la terre ([Bouhadjar, 2016](#))

Cependant, Boussemghoun ne se limite pas à l'agriculture. En effet, cette activité est complétée par l'élevage du bétail, une pratique ancestrale qui continue de jouer un rôle crucial dans l'économie locale. Les éleveurs de la région sont réputés pour la qualité de leur bétail, notamment les ovins et les caprins, qui sont élevés tant pour leur viande que pour leur lait. Cette tradition d'élevage reflète non seulement l'attachement aux pratiques ancestrales mais aussi la volonté de diversifier les sources de revenus.

Au-delà de ces activités traditionnelles, Boussemghoun est également un point d'intérêt pour le tourisme religieux. Le Q'sar de Boussemghoun, un village fortifié traditionnel, est le site d'une annexe de la zaouïa Tijaniyya, l'une des confréries soufies les plus influentes en Afrique du Nord. Ce lieu spirituel attire des visiteurs de toute la région et même de l'étranger, venus se recueillir et participer aux rituels et festivités religieuses. La présence de cette zaouïa contribue non seulement à l'activité économique par le biais du tourisme mais renforce également l'identité culturelle et spirituelle de Boussemghoun ([Youcef & Rachedine, 2017](#)).

Ces diverses activités économiques sont le reflet d'une région qui, tout en préservant ses traditions, s'adapte et se développe pour répondre aux besoins contemporains. Boussemghoun est un exemple de la manière dont les communautés rurales peuvent diversifier leurs économies tout en restant fidèles à leur héritage. Cette capacité d'adaptation et de résilience est cruciale pour assurer la pérennité de la vie économique et culturelle de la région.

En somme, Boussemghoun offre un riche panorama d'activités économiques, allant de l'agriculture à l'élevage, en passant par le tourisme religieux. Cette diversité témoigne de la créativité et de l'ingéniosité des habitants pour exploiter les ressources disponibles tout en préservant leurs traditions ancestrales. Cette combinaison harmonieuse entre tradition et adaptation est la clé de la vitalité économique et culturelle de Boussemghoun. Ce qui distinguent les habitants qui ont su perpétuer leur mode de vie et leurs traditions au fil des générations, témoignant d'une résilience et d'une adaptation remarquables ([Benali, 2004](#)).

III.12 Conclusion du chapitre

En conclusion, ce chapitre a permis d'explorer la riche histoire, la géographie et le patrimoine culturel de Boussemghoun, un territoire emblématique des régions présaharienne algérienne. Situé au cœur des hauts plateaux occidentaux dans les lieux des Monts de ksour, cet ancien carrefour commercial transsaharien abrite une oasis dotée d'un Q'sar qui témoignent de l'ingéniosité des populations locales face aux défis de l'environnement aride.

L'oasis verdoyante, avec sa palmeraie et ses sources d'eau précieuses, incarne la capacité des populations à exploiter durablement les ressources naturelles rares. Sa biodiversité, composée de dattiers, d'arbres fruitiers et de cultures vivrières, témoigne de la richesse écologique de cette région désertique. La gestion collective de cette oasis reflète la cohésion sociale et les savoirs ancestraux transmis de génération en génération.

Par ailleurs, le Q'sar bâti sur une colline stratégique, offre un aperçu fascinant de l'architecture et de l'urbanisme sahariens traditionnels, adaptés aux contraintes climatiques. Son classement comme patrimoine culturel souligne l'importance de préserver ces vestiges historiques. Parallèlement, la zaouia Tijaniya confère à Boussemghoun une dimension spirituelle en tant que lieu de pèlerinage pour cette confrérie soufie.

Bien que confrontée à des défis environnementaux croissants, la population de Boussemghoun, héritière d'une riche tradition berbérophone, demeure le pilier du développement régional. Son attachement à la terre et sa connaissance de l'environnement sont essentiels pour assurer un développement durable, respectueux des équilibres naturels et culturels.

Enfin, le relief montagneux avec les djebels de la région comme Bram, Tanout et celui de Tameda imposent des sommets parfois enneigés en hiver, offre un contraste saisissant avec les étendues désertiques environnantes. Façonné par un climat aride mais influencé souvent par des vents chauds du sud, ce paysage fascinant contribue à la richesse et à la diversité d'un écosystème qui devient de plus en plus fragile.

En somme, Boussemghoun constitue un patrimoine vivant, une oasis témoin de la résilience et de l'adaptation des populations sahariennes face aux contraintes de leur environnement et un Q'sar monument architectural ancestral. L'engagement de préservation et de valorisation de ce riche patrimoine est essentiel pour perpétuer à la fois l'héritage culturel et écologique unique, tout en inspirant des solutions durables pour relever les défis actuels et futurs.

CHAPITRE TROISIEME

ETUDE HYDROLOGIQUE

IV. Troisième chapitre : Etude hydrologique

IV.1 Introduction

L'étude hydrologique présente un préalable avec un intérêt certain pour toute démarches liées à la gestion des risques des inondations. Dans le contexte de la protection de l'oasis de Boussemgoun dans la région semi-aride du Nord-Ouest de l'Algérie, elle constitue un volet essentiel de toute approche envisagée. En effet, comprendre les caractéristiques hydrologiques du bassin versant est fondamental pour développer des stratégies de gestion durable des ressources en eau et de protection contre les risques d'inondation ([Boutaghane et al., 2022](#)).

Les études spécialisées mettent en avant que "l'analyse des caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant est cruciale pour la mise en place de mesures de gestion et de protection efficaces", ([Tomer, 2014](#)). Cette affirmation est soutenue par de nombreuses études qui soulignent l'importance de la collecte de données hydrologiques détaillées et de leur analyse pour évaluer les régimes de débit, les fréquences de crue et les zones de vulnérabilité dans un bassin versant ([Khan & Zaheer, 2022](#)).



Figure IV-1: Destruction de digue au niveau du Wadi de Boussemgoun

L'approche hydrologique implique généralement plusieurs étapes clés. D'abord, la collecte de données météorologiques et hydrologiques, telles que les précipitations, les températures, et les débits des cours d'eau. Ces données sont essentielles pour calibrer et valider les modèles hydrologiques utilisés dans les simulations ([Maidment, 1993](#)), ([Roushangar et al., 2021](#)). Ensuite, l'utilisation de modèles numériques, comme le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ou

le modèle HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System), permet de simuler les écoulements et de prédire les débits de crue , (Feldman, 2000)

La modélisation hydrologique offre plusieurs avantages, notamment la capacité de tester différents scénarios de gestion et de prédire les impacts potentiels du changement climatique sur les régimes hydrologiques (Gosain et al., 2006). De nombreuses études ont démontré que les modèles hydrologiques peuvent être utilisés pour évaluer les effets des changements d'utilisation des terres et du climat sur les débits de crue, ce qui est important pour la planification à long terme et la gestion des risques.

En outre, la cartographie des zones inondables et des zones de vulnérabilité à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG) permet de visualiser les impacts potentiels des crues et de mieux planifier les interventions , (Evelpidou et al., 2023). Cette cartographie, couplée à des modèles hydrodynamiques, peut fournir des informations détaillées sur la propagation des crues et les zones à risque, facilitant ainsi la prise de décision pour les mesures de protection (Merwade et al., 2008).

Enfin, les études hydrologiques intègrent souvent des considérations socio-économiques pour évaluer l'impact des inondations sur les communautés locales et pour développer des stratégies de gestion participatives. Ainsi, la gestion intégrée des ressources en eau, qui prend en compte à la fois les aspects hydrologiques et les besoins des communautés, est essentielle pour assurer la durabilité des oasis (Coletta et al., 2024).

IV.2 Etude morphométrique

IV.2.1 Considération morphométriques liées à l'étude hydrologique en vue la protection de l'Oasis de Boussemghoun et ses composants.

D'un point de vue hydrologique, l'Oasis est fortement dépendante de la réponse hydrologique du bassin versant de Wadi Boussemghoun. C'est pourquoi l'étude hydrologique présentée dans ce chapitre revêt une importance particulière.

En effet, la dynamique hydrologique de l'Oasis est intimement liée aux processus hydrologiques qui se déroulent au niveau de son bassin versant. L'analyse approfondie de ces processus, notamment les modalités de la réponse hydrologique du bassin, permet de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de l'Oasis et, par conséquent, d'en améliorer la gestion et la préservation.

Cette étude hydrologique constitue donc un élément essentiel pour appréhender de manière globale les enjeux liés à la pérennité de l'Oasis, tant sur le plan écologique qu'en termes de mise en valeur

des ressources en eau. En effet, la protection vise l'oasis avec le Q'sar, la palmeraie et les jardins. L'effort est donc concentré sur le bassin qui abrite l'oasis. D'où la nécessité de déterminer les caractéristiques du bassin versant de Wadi Boussemghoun, qui correspond à la zone de l'étude hydrologique de ce chapitre.

Les caractéristiques principales du bassin versant incluent la superficie, la pente, le périmètre, la longueur et d'autres paramètres physiques.

Le bassin de Boussemghoun en amont de Wadi Rharbi, se situe entre 32°30'0" et 33°0'0" nord, 0°20'0" ouest et 0°20'0" Est. Les coordonnées de l'exutoire sont : X = 0,146988 et Y = 32,500921.

La superficie de bassin versant est 222,75 km² et son périmètre est 81. 85 km.

L'Wadi qui draine le bassin a un profil en long qui s'étend sur une longueur de $L_b = 11.2$ Kilomètre. La dénivelée de l'Wadi est de 1022 m en amont et elle décroît pour atteindre 958 m en Aval (Voir figure (IV-1)).

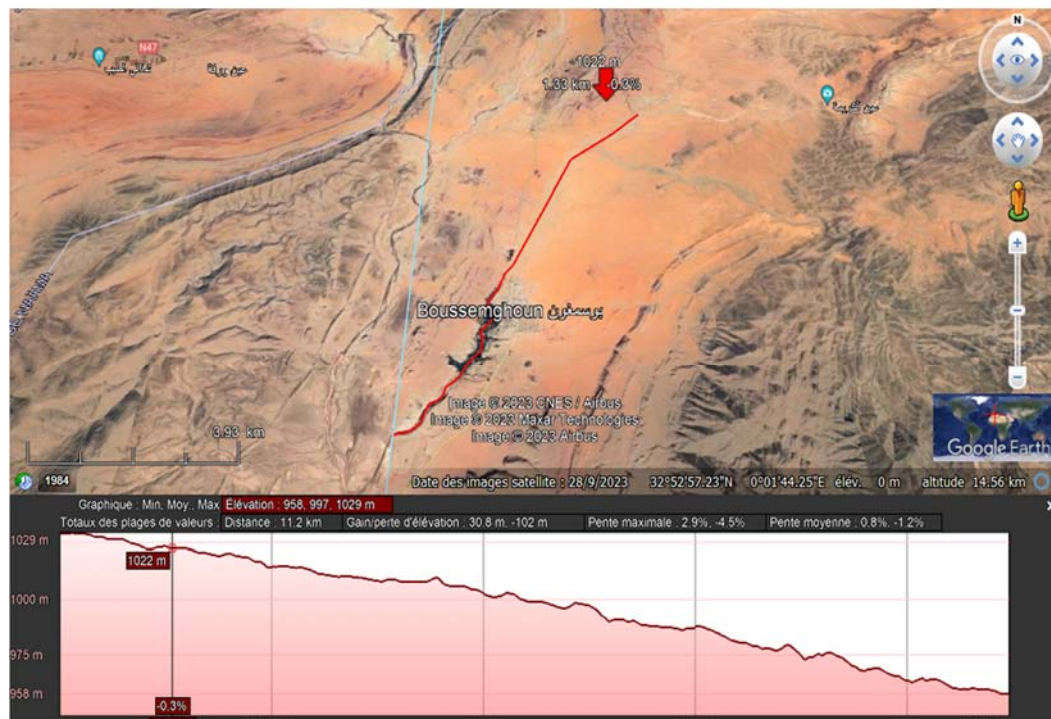


Figure IV-2: Profil des altitudes de l'Wadi de Boussemghoun fonction de sa longueur.

IV.2.2 Détermination des principaux paramètres morphométriques du bassin versant de l'Wadi de Bousseghoun.

IV.2.2.1 Indice de compacité d'un bassin versant : K_c

L'indice de compacité d'un bassin versant K_c est un indicateur qui permet de quantifier la forme d'un bassin versant en comparaison avec un cercle, qui est considéré comme la forme la plus compacte. Cet indice est utile en hydrologie pour évaluer les caractéristiques de drainage et la réponse hydrologique d'un bassin versant.

Pour déterminer l'indice de compacité K_c d'un bassin versant, on utilise la formule suivante :

$$K_c = P / 2 * (\sqrt{\pi S} = (0.28 * P) / \sqrt{S} \quad \text{IV-1}$$

Où

- P est le périmètre du bassin versant,
- S est la superficie du bassin versant.

Le calcul donne pour le cas du bassin versant de l'Wadi de Bousseghoun :

$$K_c \approx 1.55$$

IV.2.2.2 Le coefficient de rondeur : R_c

Le coefficient de rondeur R_c d'un bassin versant est une mesure de la forme d'un bassin versant par rapport à un cercle. Il donne une indication de la rondeur du bassin versant, ce qui peut influencer la réponse hydrologique. Il est déterminé par l'expression suivant :

$$R_c = 4\pi S / P^2 \quad \text{IV-2}$$

Où :

- S est la superficie du bassin versant,
- P est le périmètre du bassin versant,
- π est la constante mathématique Pi (environ 3.14159).

Le coefficient de rondeur R_c pour un bassin versant de Boussemghoun dont la superficie de 222.74 km² et le périmètre de 81.85 km est égal à : 0.417.

$$R_c \approx 0.417$$

Un coefficient de rondeur proche de 1 indique une forme très circulaire, tandis qu'une valeur plus faible indique une forme plus allongée.

IV.2.2.3 Le coefficient d'allongement : E

Le coefficient d'allongement E d'un bassin versant est une mesure de la forme du bassin en comparant la longueur du bassin avec le diamètre d'un cercle ayant la même superficie. Il indique à quel point le bassin est allongé par rapport à une forme circulaire. Il est déterminé par la formule suivante :

$$E = (\sqrt{S/\pi}) / L_b \quad \text{IV-3}$$

Où :

- S est la superficie du bassin versant,
- L_b ; est la longueur du bassin versant, souvent mesurée le long du cours principal du bassin depuis l'amont jusqu'à l'exutoire.

Avec une superficie de 222.74 km² et une longueur de 11.2 km, le coefficient d'allongement E du bassin versant de l'Wadi Boussemghoun, est :

$$E \approx 1.5$$

Un coefficient d'allongement supérieur à 1 indique que le bassin versant est relativement allongé par rapport à un cercle.

IV.2.2.4 Détermination du rectangle équivalent d'un bassin versant

Le concept de "rectangle équivalent" d'un bassin versant est utilisé pour simplifier les formes irrégulières des bassins versants en une forme rectangulaire qui a la même superficie et un périmètre proportionnel. Ce rectangle simplifié facilite les calculs hydrologiques et les analyses morphologiques. Le rectangle équivalent doit avoir la même superficie (S) que le bassin versant et un périmètre proportionnel (P).

Pour déterminer les dimensions du rectangle équivalent, il est utile de connaître les relations entre la longueur (L) et la largeur (W) du rectangle. Le rectangle doit satisfaire les conditions suivantes :

$$L * W = S \quad \text{et} \quad 2(L + W) = P \quad \text{IV-4}$$

Les dimensions du rectangle équivalent pour un bassin versant de 222.74 km² de superficie et de 81.85 km de périmètre sont approximativement :

1. $L_1=38.00$ km et $W_1=5.86$ km,
2. $L_2=2.93$ et $W_2=76.03$ km.

Ces deux solutions sont des représentations possibles du rectangle équivalent, selon l'orientation choisie pour les dimensions du rectangle.

Il faut noter que le calcul pour les deux solutions, reflète la forme allongée suggérée par l'indice de compacité élevé ($K_c=1.55$).

Les deux paires sont valides, mais pour convention et simplification, souvent la plus grande dimension est associée à la longueur (L) et la plus petite à la largeur (W).

Donc Le choix pour le reste du calcul est le suivant :

La longueur du rectangle équivalent (ou rectangle de Gravelius) : $L=38.00$ km

La largeur du rectangle équivalent (ou rectangle de Gravelius) : $W=5.86$ km.

IV.2.2.5 Calcule de l'indice de pente globale I_g :

L'indice de pente globale I_g d'un bassin versant est une mesure de l'inclinaison moyenne du terrain.

Il est déterminé en utilisant les altitudes maximale et minimale du bassin ainsi que la longueur du cours d'eau principal. L'indice de pente globale permet de comprendre l'énergie potentielle de l'écoulement de l'eau et peut influencer la vitesse de ruissellement et l'érosion. L'indice de pente globale I_g est déterminé par la formule suivante :

$$I_g = [(H_{\max} - H_{\min}) / L] * 100 \quad \text{IV-5}$$

Où :

- H_{\max} ; est l'altitude maximale du bassin versant,
- H_{\min} ; est l'altitude minimale du bassin versant,
- L_b ; est la longueur du cours d'eau principal,

- I_g ; est exprimé en pourcentage (%).

L'indice de pente globale I_g du bassin versant, avec une altitude maximale de 1029 mètres, une altitude minimale de 958 mètres et une longueur du cours d'eau principal de 11.2 kilomètres, est de :

$$I_g \approx 6.34\%$$

A priori cette valeur indique une pente relativement faible du bassin versant, ce qui peut suggérer un écoulement plus lent de l'eau et potentiellement moins d'érosion par rapport à un bassin versant avec un indice de pente plus élevé.

IV.2.2.6 Facteur de forme F :

Le facteur de forme F est un indice morphométrique qui mesure la forme d'un bassin versant. Il est défini comme le rapport de la superficie du bassin versant (S) au carré de la longueur maximale du bassin (L). Le facteur de forme aide à évaluer la forme du bassin, où un bassin avec un facteur de forme élevé tend à être circulaire, et un bassin avec un facteur de forme faible tend à être plus allongé.

Le facteur de forme F est déterminé par l'expression suivante :

$$F = S / L^2 \quad \text{IV-6}$$

Avec une superficie de 222.74 km² et une longueur maximale du bassin (L) : 34.46 km (choisie pour représenter la longueur du bassin), le coefficient d'allongement E du bassin versant de l'Wadi Bousseghoun, est :

$$F \approx 0.19$$

Un coefficient d'allongement supérieur à 1 indique que le bassin versant est relativement allongé par rapport à un cercle.

Le tableau suivant regroupe les principaux paramètres morphométriques du bassin de Boussemghoun.

Tableau IV-1: Principaux paramètres morphométriques du bassin versant

| Caractéristique du bassin versant de l'Wadi Boussemghoun | Symbole | Unité | Valeur |
|--|---------------------|--------------------|----------|
| Surface | (S) | [km ²] | 884.66 |
| Périmètre | (P) | [km] | 237.56 |
| Indice de compacité | (K _c) | [/] | 1.55 |
| Coefficient de rondeur | (R _c) | [/] | 0.19 |
| Coefficient d'allongement | (E) | [/] | 0.85 |
| Pente moyen | (P _{moy}) | [%] | 6.34 |
| Longueur du cours d'eau principal | (L _b) | [km] | 11.2 |
| Longueur du rectangle équivalent | (L) | [km] | 38.00 |
| Largeur du rectangle équivalent | (W) | [km] | 5.86 |
| Hauteur maximale du drain du cours d'eau principal | H _{max} | [m] | 1029 |
| Hauteur minimale du drain du cours d'eau principal | H _{min} | [m] | 958 |
| Hauteur moyenne | H _{moy} | [m] | 997 |
| Les hauteurs (H5%, H95%) | H5%/ H95% | [m] | 1022/965 |
| Indice de Pente globale | I _g | % | 6.34 |
| Facteur de forme du bassin(F) | F | [/] | 0.19 |

IV.2.3 Analyse morphométrique du bassin de l'Wadi Boussemghoun.

Le Tableau IV-1, donne les principales caractéristiques morphométriques du bassin de l'Wadi Boussemghoun, dans la région d'El-Bayadh, au nord-ouest de l'Algérie. Ces caractéristiques morphologiques sont les clés qui influencent le comportement hydrologique.

La lecture des résultats indique que le bassin présente des caractéristiques morphométriques distinctives qui influent sur son comportement hydrologique.

D'une part, avec une superficie de 222,75 km², le bassin exhibe une taille moyenne. Sa forme, cependant, se distingue par un faible indice de compacité ($K_c \approx 1,55$), un faible facteur de forme (0,19) et un faible coefficient de rondeur ($R_c \approx 0,19$), ce qui lui confère une forme allongée. Cette configuration est souvent le signe d'une caractéristique topographique dominante ou d'une structure géologique, telle qu'une ligne de faille, qui guide l'écoulement de l'eau dans une direction spécifique.

De plus, la pente moyenne du bassin, de 6,34%, indique un terrain moyennement raide. Cette pente contribue à une réponse plus rapide du ruissellement, conduisant potentiellement à des débits de pointe plus élevés et à des temps de décalage plus courts dans l'hydrogramme.

Ces caractéristiques morphologiques ont un impact significatif sur le comportement hydrologique du bassin. La pente raide favorise une transformation rapide des précipitations en ruissellement de

surface, augmentant le risque de débits de pointe importants lors d'épisodes pluvieux intenses. La forme allongée peut concentrer le flux dans des canaux spécifiques, accentuant encore le risque de débits localisés élevés.

Par conséquent, l'hydrogramme du bassin de l'Wadi Boussemghoun se caractérise par une branche ascendante abrupte et un temps de pointe relativement court, ce qui indique une réponse rapide aux précipitations. La forme allongée peut également influencer la branche de récession (diminution du débit), en fonction du réseau de canaux et des caractéristiques d'infiltration du bassin. Enfin, la pente raide contribue probablement à un temps de décalage plus court, rendant le bassin plus vulnérable aux crues soudaines.

En conclusion, bien que de taille modérée, le bassin de l'Wadi Boussemghoun est potentiellement sujet à une génération de ruissellement rapide et à des débits de pointe élevés en raison de sa forme allongée et de son terrain modérément escarpé. Cette combinaison de facteurs le rend vulnérable aux crues soudaines lors d'épisodes de pluie intenses.

Pour mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin de l'Wadi Boussemghoun et son potentiel de risque d'inondation, des recherches plus approfondies sont nécessaires. Cela inclut une analyse topographique détaillée, une modélisation pluie-débit et des mesures sur le terrain. Ces informations contribueront à affiner l'évaluation du risque d'inondation et à développer des stratégies d'atténuation efficaces pour la région.

IV.2.4 Analyse comparative avec d'autres bassins de la région

L'analyse des caractéristiques morphologiques des bassins versants de Wadi Boussemghoun, avec celui de l'Wadi Deffa et de l'Ain Sefra est illustrée dans le tableau (IV-2). La lecture du tableau met en évidence des différences notables qui influencent leurs comportements hydrologiques respectifs.

L'analyse indique qu'en terme de superficie, le bassin d'Wadi Boussemghoun (222,75 km²) est plus petit que celui d'Wadi Deffa (294,70 km²) et celui d'Ain Sefra (432,00 km²). Cette différence de taille a un impact significatif sur les volumes de ruissellement générés. Un bassin plus grand, comme celui d'Ain Sefra, génère généralement des volumes de ruissellement plus importants, ce qui entraîne des débits de pointe plus importants et des temps de réponse plus longs que des bassins plus petits comme celui d'Wadi Boussemghoun.

Tableau IV-2 : Comparaison des caractéristiques morphométriques avec les bassins de la région

| Caractéristique | Bassin versant | | |
|--|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | Wadi Boussemghoun | Wadi Deffa (Otmani et al., 2023) | Ain Sefra (Derdou et al., 2022) |
| Superficie du bassin (S) | 222,75 km ² | 294,70 km ² | 432,00 km ² |
| Périmètre (P) | 81,85 km | 103,80 km | 133,50 km |
| Longueur du cours d'eau (L) | 11,2 km | 16,5 km | 23,1 km |
| Indice de compacité (K _c) | 1,55 | 1,28 | 1,19 |
| Facteur de forme (F) | 0,19 | 0,25 | 0,33 |
| Coefficient de rondeur (R _c) | 0,19 | 0,30 | 0,35 |
| Pente moyenne (P _{moy}) | 6,34% | 4,50% | 5,25% |
| Altitude maximale | 1029 m | 980 m | 1150 m |
| Altitude minimale | 958 m | 920 m | 930 m |
| Altitude moyenne | 997 m | 950 m | 1040 m |

Concernant le périmètre, le bassin de l'Wadi Boussemghoun (81,85 km) a un périmètre plus court que celui de l'Wadi Deffa (103,80 km) et de Ain Sefra (133,50 km). Un périmètre plus long indique une limite plus complexe, ce qui peut conduire à des modèles de ruissellement et à des taux d'infiltration plus variables.

De même, la longueur du cours d'eau principal est différente pour les trois bassins : 11,2 km pour Wadi Boussemghoun, 16,5 km pour Wadi Deffa et 23,1 km pour Ain Sefra. Les Wadis les plus longues, comme celui de Ain Sefra, entraînent généralement des temps de parcours plus longs pour l'eau, ce qui peut prolonger la durée des inondations.

L'indice de compacité (K_c) est également un facteur différenciateur. Le bassin de l'Wadi Boussemghoun (K_c = 1,55) présente un indice de compacité plus élevé que celui Wadi Deffa (K_c = 1,28) et Ain Sefra (K_c = 1,19). Des valeurs plus élevées indiquent une forme moins compacte et plus allongée, conduisant à des temps de réponse plus lents aux précipitations et à des débits de pointe potentiellement moins intenses.

Le facteur de forme (F) suit une évolution similaire : 0,19 pour le bassin de l'Wadi Boussemghoun, 0,25 pour celui de l'Wadi Deffa et 0,33 pour le bassin de Ain Sefra. Un facteur de forme inférieur implique une forme allongée, contribuant à un processus de ruissellement plus lent et plus étalé par rapport aux bassins circulaires.

Le coefficient de rondeur (R_c) révèle une configuration moins circulaire pour le bassin de l'Wadi Boussemghoun (R_c = 0,19) par rapport à celui de l'Wadi Deffa (R_c = 0,30) et de Ain Sefra (R_c =

0,35). Des coefficients de rondeur plus faibles indiquent un bassin moins circulaire et plus allongé, ce qui affecte la concentration et le timing du débit.

Enfin, la pente moyenne (P_{moy}) est de 6,34% pour le bassin de l'Wadi Boussemghoun, 4,50% pour celui d'Wadi Deffa et 5,25% pour celui de Ain Sefra. Des pentes plus abruptes, comme celle d'Wadi Boussemghoun, entraînent un ruissellement plus rapide et des temps de latence plus courts, augmentant ainsi les débits de pointe et les risques d'érosion.

En conclusion, la compréhension de ces caractéristiques morphologiques permet de prédire les comportements hydrologiques et de gérer efficacement les ressources en eau. Le bassin de l'Wadi Boussemghoun, avec sa forme allongée et ses pentes modérées, est moins sujet aux inondations rapides mais plus sensible à l'érosion. En revanche, les bassins de l'Wadi Deffa et de l'Ain Sefra, avec leurs formes et tailles variées, présentent des réponses hydrologiques différentes qui doivent être prises en compte dans les stratégies régionales de gestion des ressources en eau.

IV.3 Paramètres et indicateurs requis pour l'étude hydrologique

IV.3.1 Temps de concentration T_c :

La détermination du temps de concentration est un élément important dans les études hydrologiques, car elle renseigne sur la vitesse de réponse d'un bassin versant aux précipitations. Le temps de concentration, noté T_c , est défini comme le temps nécessaire à une goutte d'eau, partant du point du bassin versant le plus éloigné d'un point de vue hydraulique, pour atteindre l'exutoire.

Autrement dit, c'est le temps nécessaire à l'ensemble du bassin pour contribuer à l'écoulement à l'exutoire. Ce paramètre est essentiel pour comprendre la dynamique de l'eau au sein du bassin, notamment pour :

- 1) L'estimation du débit de pointe : Le temps de concentration influence directement la forme de l'hydrogramme, la courbe qui représente le débit d'une rivière en fonction du temps. Un temps de concentration court est associé à un hydrogramme avec une branche ascendante raide et un pic de débit plus élevé, tandis qu'un temps de concentration long conduit à un pic de débit plus petit mais plus étalé dans le temps.
- 2) Pour le choix de la méthode de calcul d'hydrogramme : La méthode de calcul d'hydrogramme à utiliser dépend du temps de concentration. Pour des temps de

concentration courts, des méthodes de calcul simples comme la méthode rationnelle peuvent être appliquées. Pour des temps de concentration longs, des modèles hydrologiques plus complexes sont nécessaires pour représenter l'infiltration et le stockage de l'eau dans le bassin.

- 3) L'Évaluation des risques d'inondation : le temps de concentration est un facteur important dans l'estimation du risque d'inondation. Un temps de concentration court augmente le risque de crues soudaines, car le bassin réagit rapidement aux précipitations, générant des débits de pointe élevés en peu de temps.

Plusieurs formules empiriques et semi-empiriques sont utilisées pour déterminer le temps de concentration d'un bassin versant ; T_c .

Parmi les plus courants, on peut citer :

- 1) Formule de Kirpich : Cette formule est basée sur la longueur du cours d'eau principal (L_b) et la pente moyenne du bassin (I_g). Le temps est donné en heure :

$$T_c = 0.0195(L_b^{0.77} / I_g^{0.385}) \quad \text{IV-7}$$

- 2) Formule de Giandotti : Cette formule prend en compte la superficie du bassin en km^2 , la longueur du cours d'eau principal L_b en km, et la différence entre l'altitude maximale et minimale du bassin en mètres. Le temps est donné en heure.

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L_b}{0.8\sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}} \quad \text{IV-8}$$

- 3) Formule de Sokolovski : Cette formule d'aspect simple permet de déterminer le temps de concentration en se basant sur la longueur du cours d'eau principal (L_b) et la vitesse d'écoulement dans le cours d'eau correspondant. Le temps est donné en heure.

$$T_c = L_b / (3.6 * V_r) \quad \text{IV-9}$$

- 4) Formule Synthétique : Comme pour la première formule, cette dénommée synthétique est basée sur la longueur du cours d'eau principal (L_b) et la pente moyenne du bassin (I_g). Le temps est donné en heure.

$$T_c = 0.6615 * L_b^{0.77} * I_g^{-0.385} \quad \text{IV-10}$$

Pour le cas du bassin de l'Wadi Boussemghoun, L'application des données correspondante donne les résultats du tableau suivant :

Tableau IV-3: Temps de concentration d'après les formules usuelles

| Auteurs | Formules | T_c (Heure) |
|------------------------|--|---------------|
| Formule de Kirpich | $T_c = 0.0195 \times L^{0.77} \times I_g^{-0.385}$ | 3.11 |
| Formule de Sokolovski | $T_c = L_b / (3.6 * V_r)$ | 2.07 |
| Giandotti | $(4\sqrt{S} + 1.5L) / (0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}})$ | 16.90 |
| Formule de SYNTHETIQUE | $T_c = 0.6615 \times L^{0.77} \times I_g^{-0.385}$ | 12.79 |

La sélection de la formule appropriée dépend des caractéristiques spécifiques du bassin et des données disponibles. Une estimation précise du temps de concentration, tenant compte de la topographie, de la géomorphologie, et de l'utilisation des sols, est indispensable pour une gestion hydrologique efficace et pour minimiser les risques liés aux inondations , ([Pramana & Harisuseno, 2024](#)).

Parmi les résultats obtenus dans le tableau. Nous optons pour le résultat issu de loi de Formule de Synthétique car c'est la formule qui donne un résultat intermédiaire. Donc : Le temps de concentration utilise dans l'étude est :12.79 heures

IV.3.2 Étude fréquentielle des pluies maximales journalières :

IV.3.2.1 Données pluviométriques

Les données pluviométriques utilisées pour cette étude proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Ces données consistent en des enregistrements des précipitations maximales journalières collectées pendant 41 ans, de 1980 à 2020. Ces relevés sont issus de la station pluviométrique située à Boussemghoun, sous le code 130329.

Les coordonnées géographiques de cette station sont les suivantes : X (Km) 344.8, Y (Km) 343.8, à une altitude de 1310 mètres. L'examen de ces informations permet de construire des courbes Hauteur-Durée-Fréquence (IDF) spécifiques au bassin de Boussemghoun.

Sur la figure (IV-2), sont illustrés, les résultats des précipitations P_{jmax} de la station pluviométrique de Boussemghoun de 1980-2020

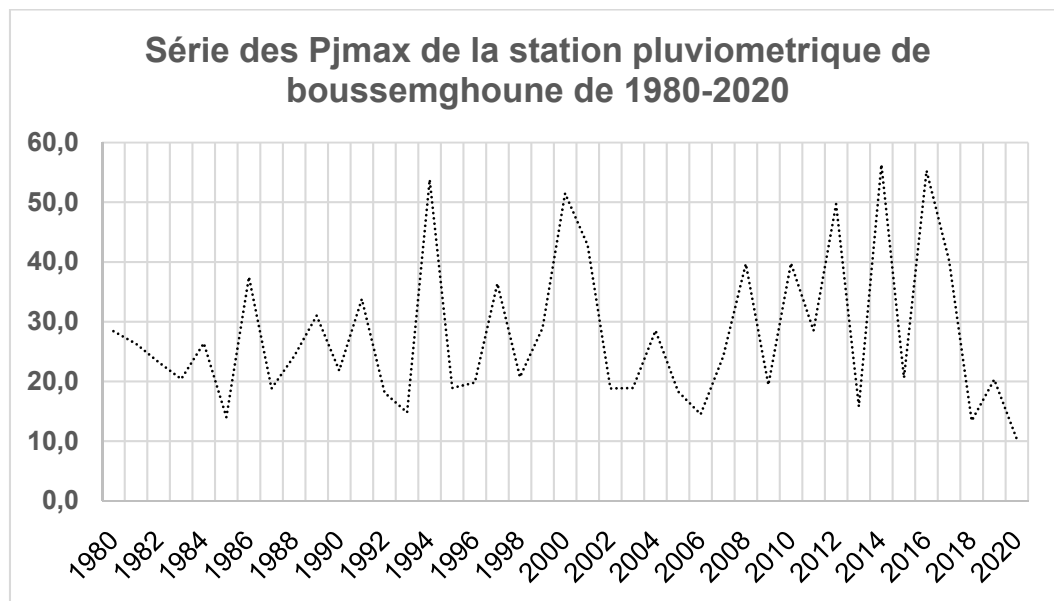


Figure IV-3 : Série des P_{jmax} de la station pluviométrique de Boussemghoun de 1980-2020.

IV.3.2.2 Choix de la loi d'ajustement

L'étude des précipitations maximales journalières est un élément essentiel de la compréhension du comportement hydrologique d'un bassin versant. L'objectif principal est de déterminer la probabilité d'occurrence de pluies intenses et d'en extrapoler les valeurs pour des périodes de retour données, permettant ainsi d'évaluer les risques d'inondation. Dans ce contexte, la distribution de Gumbel, reconnue pour son efficacité dans la modélisation des phénomènes extrêmes en hydrologie, est souvent utilisée (V. Te Chow, 1951).

Le choix de la méthode d'ajustement des séries pluviométriques à la distribution de Gumbel est essentiel pour obtenir des résultats précis et fiables. La méthode des moments est l'une des techniques les plus courantes pour cet ajustement. Cette méthode utilise les moments statistiques des données (moyenne, variance, etc.) pour estimer les paramètres de la distribution de Gumbel (Koutsoyiannis, 2004).

L'utilisation d'un logiciel spécialisé tel que Hyfran Plus permet d'automatiser et de faciliter le processus d'ajustement. En effet, Hyfran Plus offre des fonctionnalités avancées pour l'analyse des données pluviométriques, incluant des tests de qualité des données, la sélection de la meilleure distribution statistique, l'estimation des paramètres de la distribution choisie et le calcul des probabilités d'occurrence (Ashkar & Mahdi, 2006).

Ainsi, l'approche d'analyse des précipitations maximales journalières, ainsi décrite contribue à une meilleure compréhension des risques hydrologiques et à une gestion plus efficace des ressources en eau du bassin versant (Koutsoyiannis, 2004).

La distribution de Gumbel se caractérise par sa fonction de répartition :

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

IV-11

Où

y : est une variable réduite définie comme $y = a(x - x_0)$.

Avec : $1/a$ représenté la pente de la droite de Gumbel, et x_0 l'ordonnée à l'origine, tandis que x symbolise la valeur des précipitations maximales journalières. La transformation des probabilités en variables réduites de Gumbel se fait via la relation

$$y = -\ln(-\ln(F(x)))$$

Les résultats de l'ajustement par la loi de Gumbel sont synthétisés dans le Tableau (IV-4), qui donne les périodes de retour, les variables réduites, les niveaux de précipitations, les probabilités associées, ainsi que les ajustements correctifs nécessaires.

Tableau IV-4 : Résultats de l'ajustement par la loi de Gumbel.

| Période de retour | Variable Réduit | Précipitations (mm) | Probabilité | Correction intervalle fixe |
|-------------------|-----------------|---------------------|-------------|----------------------------|
| Année | YT | XT'(mm) | F(xT) | XT (mm) |
| 2 | 0.3665 | 25.8668 | 0.5000 | 29.2295 |
| 5 | 1.4999 | 36.8219 | 0.8000 | 41.6087 |
| 10 | 2.2504 | 44.0751 | 0.9000 | 49.8049 |
| 25 | 3.1985 | 53.2396 | 0.9600 | 60.1608 |
| 50 | 3.9019 | 60.0384 | 0.9800 | 67.8434 |
| 75 | 4.3108 | 63.9901 | 0.9867 | 72.3088 |
| 100 | 4.6001 | 66.7869 | 0.9900 | 75.4692 |
| 500 | 6.2136 | 82.3818 | 0.9980 | 93.0914 |

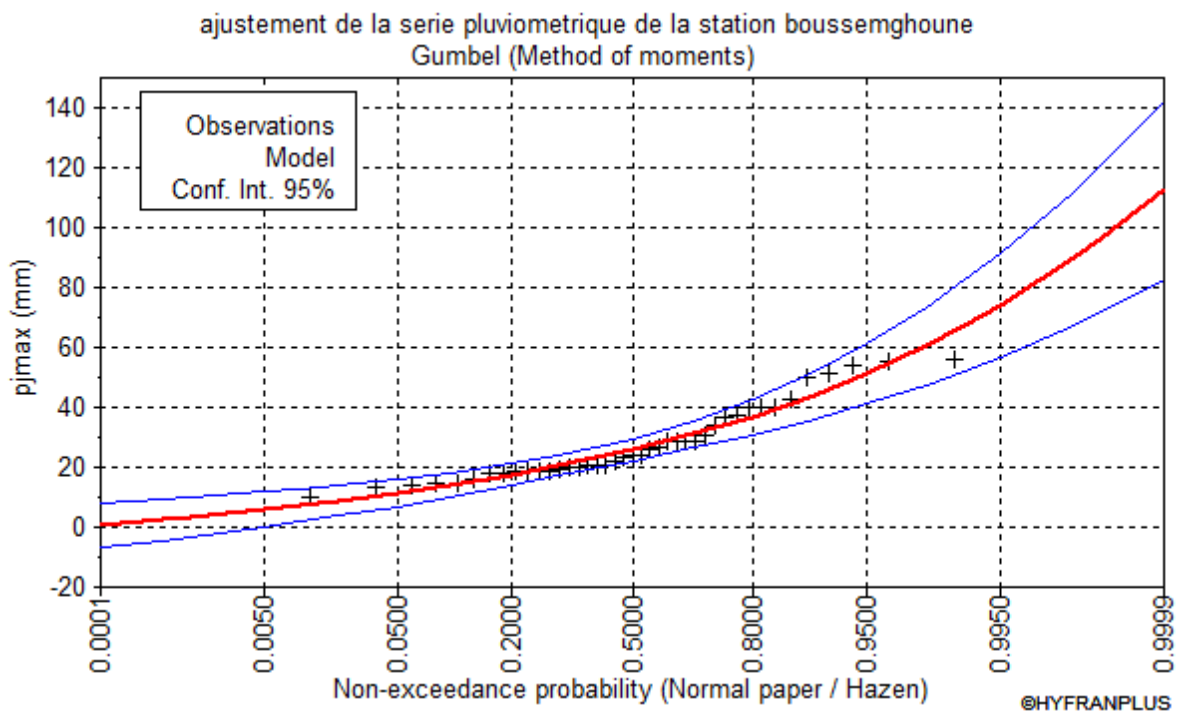


Figure IV-4 : Courbes d'ajustement de la série pluviométrique par la loi de Gumbel.

IV.3.2.3 Pluie de courte durée et intensités maximales à différentes fréquences

Dans le contexte des études hydrologiques des bassins versants, l'estimation précise des précipitations exceptionnelles à court terme, en particulier des précipitations de moins de 24 heures, est importante. Négliger ou sous-estimer ces précipitations intenses et de courte durée peut conduire à des erreurs importantes dans la conception et la gestion des infrastructures hydrauliques, ainsi que dans l'évaluation des risques d'inondation (Montanari & Koutsoyiannis, 2012).

Pour résoudre ce problème, les chercheurs utilisent souvent la relation de Montanari, qui établit un lien statistique entre les précipitations exceptionnelles à court terme et les précipitations quotidiennes maximales dans une région donnée (Montanari, 2007) ; (Montanari & Koutsoyiannis, 2012).

Cette approche permet d'affiner les estimations des événements pluvieux intenses et à court terme, qui sont particulièrement pertinents pour la conception des systèmes de drainage urbain, les mesures d'atténuation des inondations et l'évaluation des potentiels de crues soudaines (Brocca et al., 2009), (Viglione et al., 2010),

L'incorporation de données pluviométriques exceptionnelles à court terme, obtenues grâce à la relation de Montanari ou à des méthodes similaires, peut améliorer considérablement la précision des modèles hydrologiques et la fiabilité des évaluations des risques d'inondation. Ceci, à son tour,

soutient des stratégies de gestion de l'eau plus efficaces et la mise en œuvre de mesures d'atténuation appropriées pour réduire l'impact des événements météorologiques extrêmes sur les communautés et les infrastructures, (Brocca et al., 2009), (Montanari & Koutsoyiannis, 2012).

La relation de Montanari qui établit le lien entre les précipitations et la pluie maximale journalière fréquentielle est donnée par l'expression suivant

$$P_{ct} = P_{j\max} * \left(\frac{24}{t}\right)^b \quad \text{IV-12}$$

Où :

- P_{ct} : représente la pluie de courte durée, ayant la même fréquence que $P_{j\max}$
- $P_{j\max}$: est la pluie maximale journalière pour différentes fréquences
- t : est la durée en heures,

L'exposant b dépend des conditions climatiques. Il est calculé en fonction des coordonnées de la station météorologiques et des précipitations maximales (X , Y , Z , $P_{j\max}$) selon l'équation :

$$b = 3.10^{-5}X + 94.10^{-5}Y - 9.10^{-5}Z + 24.10^{-4} * P_{j\max} - 0.03$$

Pour déterminer les intensités maximales de précipitations pour différentes périodes de retour, on utilise la formule suivante :

$$I = (a * T^b) / t^c \quad \text{IV-13}$$

- I : est l'intensité (mm/h),
- T : est la période de retour (années),
- t : est la durée de la pluie (min).

Enfin, nous avons l'équation d'intensité valide pour le bassin : $I = (110.1517 * T^{0.204222}) / t^{0.61639}$

Les résultats obtenus à partir de cette relation sont présentés dans le tableau ci-dessous. Celui-ci illustre les intensités maximales de précipitations pour diverses périodes de retour et différentes durées.

Tableau IV-5: Intensités pour divers périodes de retour et différentes durées.

| IDF | | | | | | | | |
|----------|---|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Temps | Fréquence (années) – Intensité (mm / min) | | | | | | | |
| (Minute) | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 75 | 100 | 500 |
| 5 | 47.67 | 57.62 | 66.51 | 80.39 | 92.79 | 100.91 | 107.10 | 149.42 |
| 10 | 31.09 | 37.59 | 43.38 | 52.44 | 60.53 | 65.82 | 69.86 | 97.47 |
| 15 | 24.22 | 29.27 | 33.79 | 40.84 | 47.14 | 51.27 | 54.41 | 75.91 |
| 20 | 20.28 | 24.52 | 28.30 | 34.21 | 39.48 | 42.94 | 45.57 | 63.58 |
| 25 | 17.68 | 21.37 | 24.66 | 29.81 | 34.41 | 37.42 | 39.71 | 55.41 |
| 30 | 15.80 | 19.10 | 22.04 | 26.64 | 30.75 | 33.44 | 35.49 | 49.52 |
| 35 | 14.37 | 17.36 | 20.04 | 24.23 | 27.96 | 30.41 | 32.28 | 45.03 |
| 40 | 13.23 | 15.99 | 18.46 | 22.31 | 25.75 | 28.01 | 29.73 | 41.47 |
| 45 | 12.30 | 14.87 | 17.17 | 20.75 | 23.95 | 26.05 | 27.64 | 38.57 |
| 50 | 11.53 | 13.94 | 16.09 | 19.45 | 22.44 | 24.41 | 25.91 | 36.14 |
| 55 | 10.87 | 13.14 | 15.17 | 18.34 | 21.16 | 23.02 | 24.43 | 34.08 |
| 60 | 10.30 | 12.46 | 14.38 | 17.38 | 20.06 | 21.81 | 23.15 | 32.30 |
| 120 | 6.72 | 8.13 | 9.38 | 11.34 | 13.08 | 14.23 | 15.10 | 21.07 |
| 180 | 5.24 | 6.33 | 7.30 | 8.83 | 10.19 | 11.08 | 11.76 | 16.41 |
| 240 | 4.38 | 5.30 | 6.12 | 7.39 | 8.53 | 9.28 | 9.85 | 13.74 |
| 300 | 3.82 | 4.62 | 5.33 | 6.44 | 7.44 | 8.09 | 8.59 | 11.98 |
| 360 | 3.42 | 4.13 | 4.76 | 5.76 | 6.65 | 7.23 | 7.67 | 10.70 |
| 480 | 2.86 | 3.46 | 3.99 | 4.82 | 5.57 | 6.05 | 6.43 | 8.97 |
| 720 | 2.23 | 2.69 | 3.11 | 3.76 | 4.34 | 4.72 | 5.00 | 6.98 |
| 1080 | 1.74 | 2.10 | 2.42 | 2.93 | 3.38 | 3.67 | 3.90 | 5.44 |
| 1440 | 1.45 | 1.76 | 2.03 | 2.45 | 2.83 | 3.08 | 3.26 | 4.55 |

La figure (IV-5), présente les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) à la station de Boussemghoun.

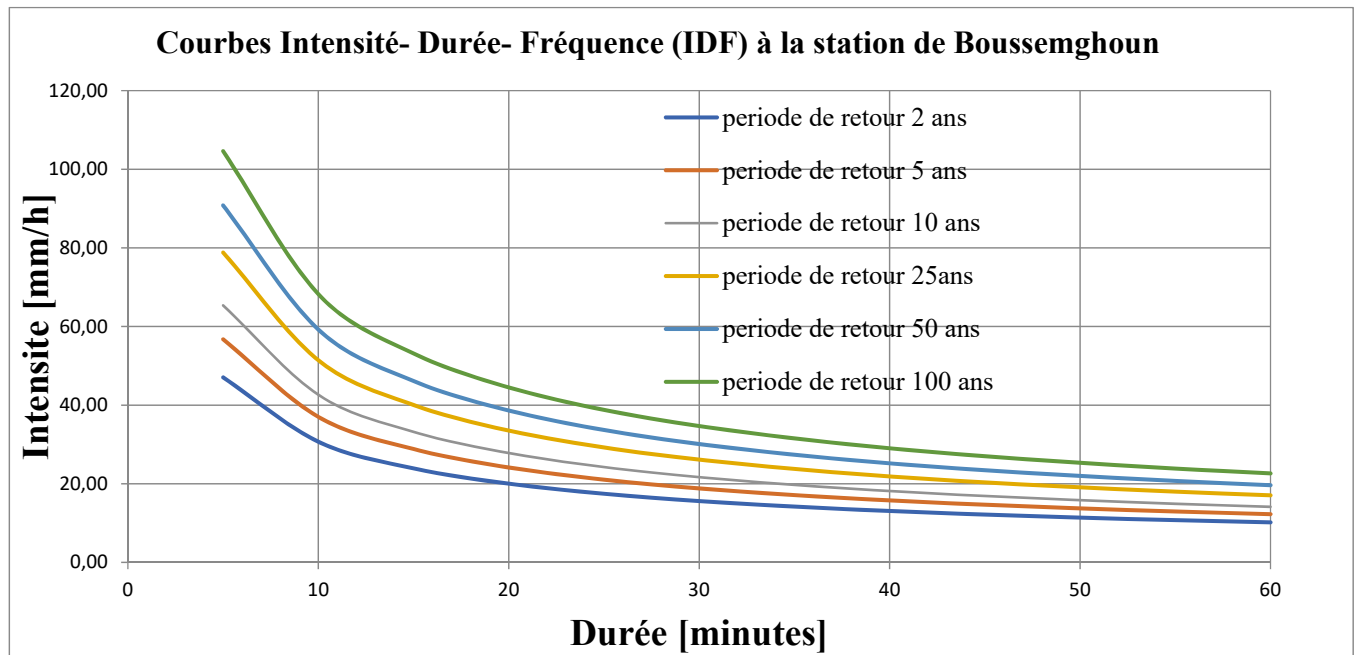


Figure IV-5 : Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) à la station de Boussemghoun.

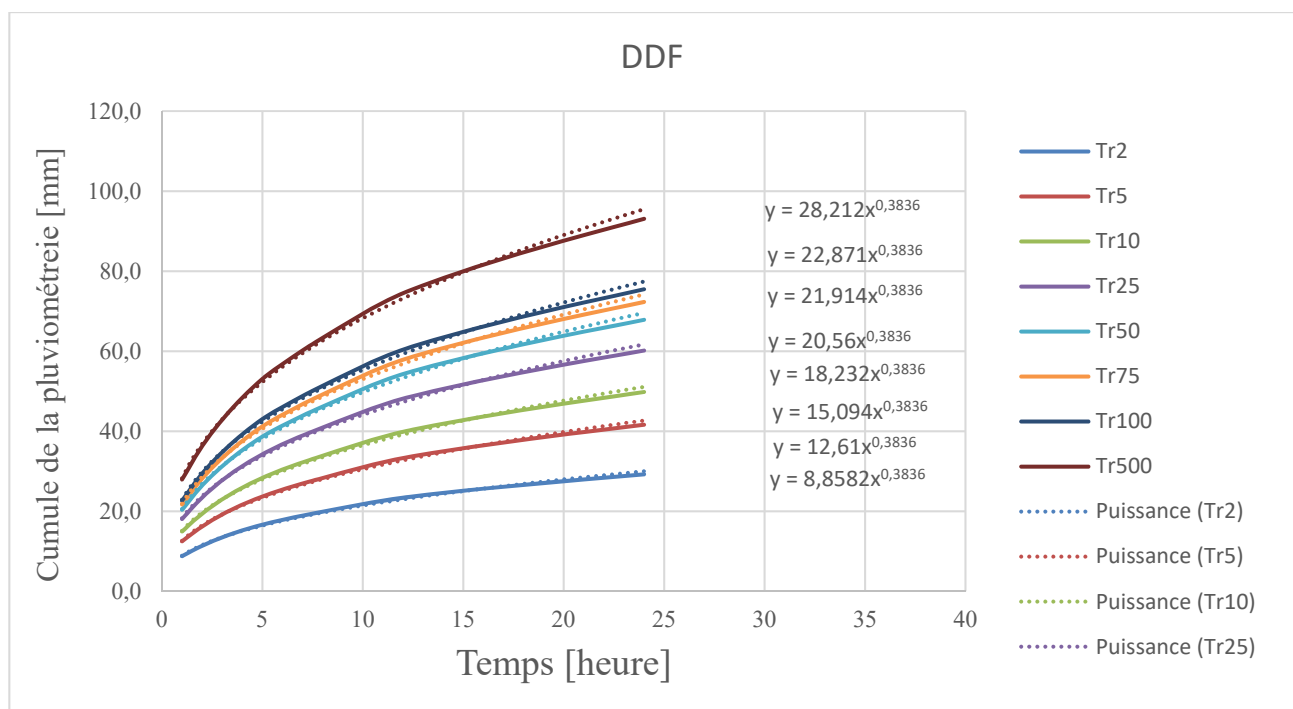


Figure IV-6: Courbes Durée-Débit-Fréquence (DDF) à la station de Boussemghoun

IV.3.2.4 Le coefficient de ruissellement, un paramètre clé pour l'analyse hydrologique des bassins versants

Le coefficient de ruissellement, noté C_r , joue un rôle essentiel dans l'application des méthodes empiriques d'estimation des débits de pointe du ruissellement à l'échelle d'un bassin versant. Ce coefficient est défini comme le ratio entre le volume de ruissellement et la précipitation totale lors d'un épisode pluvieux. La valeur du coefficient de ruissellement C_r est influencée par de nombreux facteurs, tels que l'intensité des précipitations, les caractéristiques du sol (texture, perméabilité, teneur en eau), la pente du terrain et le couvert végétal (Maidment, 1993). Ainsi, C_r peut varier de manière significative au sein d'un même bassin, en fonction des variations de ces différents paramètres, ainsi que des caractéristiques spécifiques des événements pluvieux et des types de surface impliqués (D'Alberto & Lucianetti, 2019).

La méthode préconisée par Kenessey permet d'estimer le coefficient de ruissellement global C comme la somme de trois coefficients partiels : C_1 fonction de la pente du bassin, C_2 en fonction de la nature du sol, et C_3 lié à la couverture végétale du bassin versant, soit : $C_r = C_1 + C_2 + C_3$ (Decsi et al., 2022). Les tableaux (IV-6), (IV-7), (IV-8) donnent les détails liés aux composantes du coefficient du ruissellement.

Tableau IV-6: Valeurs du Coefficient de la pente du bassin (C_1).

| Pente | Valeurs du Coefficient de la pente du bassin (C_1). | | |
|------------------|---|------|------|
| $\leq 3.5\%$ | 0.01 | 0.03 | 0.05 |
| Entre 3.5 et 11% | 0.06 | 0.08 | 0.11 |
| Entre 11 et 35 % | 0.12 | 0.16 | 0.2 |
| $>35\%$ | 0.22 | 0.26 | 0.3 |

Tableau IV-7 : Valeurs du coefficient lié à la nature du sol(C_2).

| Nature du sol | Valeurs du Coefficient lié à la nature du sol(C_2). | | |
|----------------|---|------|------|
| Imperméable | 0.22 | 0.26 | 0.3 |
| Peu perméable | 0.1 | 0.15 | 0.2 |
| Perméable | 0.06 | 0.08 | 0.1 |
| Très perméable | 0.03 | 0.04 | 0.05 |

Tableau IV-8: Valeurs du coefficient lié à la couverture végétale (C_3)

| Couverture Végétale | Valeurs du Coefficient lié à la couverture végétale (C_3). | | |
|-----------------------------|--|------|------|
| Rocheux | 0.22 | 0.26 | 0.3 |
| Prairie | 0.17 | 0.21 | 0.25 |
| Labours champs | 0.07 | 0.11 | 0.15 |
| Forêt et territoire sableux | 0.03 | 0.04 | 0.05 |

Dans le cas de l'étude menée, l'approche décrite a permis d'obtenir une valeur de coefficient de ruissellement global $Cr = 0,42$.

IV.4 Etude de crue

Les études et analyses des crues jouent un rôle important dans les évaluations hydrologiques des bassins versants. Une évaluation rigoureuse des inondations est essentielle pour une planification efficace, la conception des infrastructures hydrauliques et la cartographie des risques d'inondation (Smith & Ward, 1998). Diverses méthodes statistiques et hydrologiques ont été développées pour modéliser et mesurer avec précision les phénomènes d'inondation. Ces méthodes sont déterminantes pour comprendre comment les débits de pointe et les volumes de crue varient spatialement et temporellement au sein d'un bassin versant (V.-T. Chow et al., 1988)

Le choix de la méthode d'estimation des crues dépend de facteurs tels que les caractéristiques du bassin versant, la disponibilité des données, les objectifs de la modélisation et la responsabilité des enquêteurs de l'étude (Reed, 1999). Les méthodes empiriques sont préférées lorsque des enregistrements hydrométéorologiques limités sont disponibles, tandis que les modèles pluie-débit conviennent aux bassins versants jaugés (Boughton & Droop, 2003). Les hyétographes et les hydrogrammes issus de modèles de simulation de précipitations fournissent un aperçu des processus de génération de ruissellement (Beven & Kirkby, 1979). Des modèles de routage hydrologique sont ensuite utilisés pour acheminer les vagues de crue à travers les canaux fluviaux et les plaines inondables (Bates, 2012) .

IV.4.1 Approches d'évaluation du débit des crues dans un bassin versant

Pour cette étude, nous avons choisi d'adopter une approche empirique en utilisant plusieurs formules bien établies pour évaluer les crues. Les principales lois employées dans notre analyse sont les suivantes :

IV.4.1.1 Formule de Mallet-Gauthier :

Cette méthode évalue les débits de pointe en se basant sur des caractéristiques spécifiques du bassin versant et des précipitations historiques. Elle est particulièrement utile pour les bassins versants de taille moyenne, où les variables géomorphologiques jouent un rôle crucial dans la dynamique du ruissellement. La formule est fonction de la surface du bassin (S en kilomètre carré), la longueur du talweg principal (L_b en kilomètre), un coefficient k qui dépend des caractéristiques du bassin

($k=1.5$), un coefficient régional (A généralement égal à 25), de la pluviométrie moyenne annuelle ($P_{moy/annuelle}$ en millimètre) et de la période de retour (T en année). L'expression de Mallet-Gauthier est donnée comme suit :

$$Q_{\max} = 2 * k * \text{Log}(1 + A * P_{moy/annuelle}) \frac{S}{\sqrt{L_b}} (\sqrt{1 + 4 * \text{Log}T - \text{Log}S}) \quad \text{IV-14}$$

IV.4.1.2 Formule de Turazza :

Cette formule est adaptée aux conditions hydrologiques spécifiques de la région. Elle intègre des paramètres comme la taille du bassin versant et les données pluviométriques, fournissant ainsi une estimation précise du débit de crue dans les bassins versants méditerranéens.

$$Q_{\max} = (C_r * P_{tc} * S) / (3.6 * T_c) \quad \text{IV-15}$$

La formule de Turazza, permet d'estimer le débit maximum de la crue (Q_{\max} en mètre cube par seconde) en tenant compte de la surface du bassin versant (S en kilomètre carré), de la pluie durant la période correspondant au temps de concentration (P_{tc} en millimètre), Du temps de concentration (T_c) et du coefficient de ruissellement (C_r).

IV.4.1.3 Formule de Giandotti :

Cette méthode offre une approche simplifiée pour déterminer le débit de crue (Q_{\max} en mètre cube par seconde) en fonction de la superficie du bassin (S en kilomètre carré), de la longueur du cours d'eau principal (L_b en kilomètre), de la hauteur totale des précipitations durant le temps de concentration (P_t en millimètre), de la différence entre les altitudes moyennes et minimales (en mètre) et d'un coefficient topographique (K). Elle est particulièrement appréciée pour sa simplicité d'application et son adaptabilité à différents types de bassins versants. L'expression de cette formule est la suivante :

$$Q_{\max} = (K * S * P_t * \sqrt{H_{moy} - H_{min}}) / (4 * \sqrt{S} + 1.5L_b) \quad \text{IV-16}$$

IV.4.1.4 Formule de Sokolovski :

Cette formule est utilisée pour estimer le débit de crue en tenant compte de la forme du bassin versant et de ses caractéristiques hydrologiques spécifiques. Elle analyse les crues (Q_{\max} en mètre cube par seconde) qui est estimé en considérant la hauteur des précipitations durant le temps de concentration (P_{tc} en millimètre), le temps de concentration (T_c en heures). La superficie du bassin (S en kilomètre carré) associée à un coefficient fonction de la taille du bassin versant et la nature du sols ($f=0.65$) et un autre coefficient en fonction de la taille du bassin versant et la nature du sols ($C=0.65$) La formule est efficace pour les bassins avec une topographie complexe et où les variations de précipitations peuvent être significatives.

$$Q_{\max} = (0.28 * S * P_{tc} * C * f) / T_c \quad \text{IV-17}$$

Ces méthodes fournissent des outils robustes pour évaluer le risque de crues en fonction des données disponibles et des caractéristiques régionales. Elles sont particulièrement utiles dans les contextes où les données détaillées sont limitées, offrant ainsi des solutions pragmatiques et efficaces pour une planification et une gestion efficace des ressources hydrauliques.

IV.4.2 Application sur le cas du bassin versant de l'Wadi Boussemghoun.

L'application des approches dévaluation du débit des crues aux données du bassin versant de l'Wadi Boussemghoun a abouti aux résultats illustrés dans le tableau (IV-9).

Tableau : Résultat du débit des crues estimé par déférentes approche pour le bassin d'étude

| Période de retour (ans) | | 100 | 50 | 10 | 5 |
|-----------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Fréquence (%) | | 1 | 2 | 10 | 20 |
| Q_{\max} [$m^3 / seconde$] | Mallet Gauthier | 464.81 | 420.64 | 293.49 | 216.86 |
| | Giandotti | 202.42 | 181.88 | 133.52 | 111.53 |
| | Turazza | 150.42 | 135.16 | 99.22 | 82.88 |
| | Sokolovski | 281.58 | 253.01 | 185.73 | 155.15 |

L'examen des résultats obtenus par diverses méthodes révèle que la formule de Mallet-Gauthier produit des résultats excessifs, ce qui pourrait entraîner un surdimensionnement des infrastructures prévues. De même, les résultats de la méthode de Giandotti ont été écartés pour éviter le risque de sous-dimensionnement. Quant à la méthode de Turazza, elle a été rejetée car elle donne également

des résultats insatisfaisants, probablement en raison du fait qu'elle néglige plusieurs paramètres essentiels du bassin versant.

En revanche, la méthode de Sokolovski se distingue par sa capacité à intégrer divers facteurs essentiels tels que la superficie du bassin, le temps de concentration, ainsi que les coefficients de forme, de la taille du bassin versant et de la nature du sol, en plus des précipitations associées au temps de concentration. Grâce à cette approche, la méthode de Sokolovski permet une modélisation plus complète et précise des phénomènes hydrologiques.

Ainsi, pour notre modélisation de l'hydrogramme de crue, nous avons choisi d'utiliser les débits de crues dérivés selon la loi de Sokolovski. Cette décision nous permet de réaliser une analyse plus exhaustive et précise, garantissant une meilleure représentation des dynamiques hydrologiques du bassin versant.

IV.4.3 Hydrogramme des crues

L'hydrogramme de crue est une représentation graphique essentielle dans les études hydrologiques d'un bassin versant, fournissant des informations cruciales sur les caractéristiques d'une crue, telles que sa forme, sa durée, son volume et son débit de pointe, qui est souvent utilisé comme débit de projet pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Dans notre étude, l'hydrogramme de crue est établi en utilisant la méthode de Sokolovski, qui se base sur deux équations paraboliques : l'une pour la montée de la crue et l'autre pour la décrue. La montée de la crue est modélisée par une équation parabolique, tandis que la décrue suit une autre équation parabolique distincte. Ces équations permettent de tracer l'hydrogramme de manière détaillée et de capturer les variations du débit au cours du temps.

En considérant les paramètres du digramme de la crue définis comme suit :

Q_{\max} = débit de pointe (m³/s), $Q_m(t)$ = décharge instantanée lors de la montée (m³/s) $Q_d(t)$ = décharge instantanée lors de la décrue (m³/s) t_m = temps jusqu'au pic (heure), t_d = temps entre le pic et la fin de la décrue (en heure).

Les deux équations de la montée et de la chute lors de la crue sont données comme suit :

a) Equation de la montée de la crue :

$$Q_m(t) = Q_{\max} (1/t_m)^m \text{ Pour } t \in [0 - t_m] \quad \text{IV-18}$$

b) Equation de la partie ascendante de la crue :

$$Q_m(t) = Q_{\max} \left[(t_d - t) / t_d \right]^n \text{ Pour } t \in [t_m - t_b] \quad \text{IV-19}$$

Rappelons que pour le cas de la présente étude, le temps de concentration utilise est : 12.79 heures.

Ainsi, les paramètres clés de l'hydrogramme de crue sont comme suit :

- Temps de montée (tm): Le temps nécessaire pour atteindre le débit de pointe (Qmax). Pour le cas d'étude, $t_m = t_c = 12.79$ h.
- Temps de descente (td) : Le temps nécessaire pour revenir au débit initial après le pic de crue. Il est déterminé par l'expression $t_d = \gamma * t_m$, avec γ : Un coefficient qui dépend de la capacité de régulation du bassin versant. Il est considéré comme étant égal ; $\gamma = 2.25$. Ce qui donne : $t_d = 2.25 * t_m = 28.77$ h.
- Temps de base (tb) : La durée totale de la crue. Dans le cas de la présente étude, $t_b = t_m + t_d = 41.56$ h.

Le tableau (IV-10), regroupe les paramètres clés de l'hydrogramme de crue.

Tableau IV-9: Paramètres de l'hydrogramme de crue dans la zone d'étude

| Paramètre de l'hydrogramme de crue | Symbole | Durée [heure] |
|------------------------------------|---------|---------------|
| Temps de concentration | tc | 12.79 |
| Temps de la montée de la crue | tm | 12.79 |
| Temps de la descente de la crue | td | 28.77 |
| Durée totale de la crue | tb | 41.59 |

Les débits de crue des différentes périodes de retour du bassin versant sont représentés dans le tableau.

Tableau IV-10: Débits de crues pour différentes périodes de retour.

| Pour Qmax 1% | | | Pour Qmax 2% | | Pour Qmax 10% | | Pour Qmax 20% | |
|--------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| T (h) | Q (m3/s) monté de la crue | Q (m3/s) de décrue | Q (m3/s) monté de la crue | Q (m3/s) de décrue | Q (m3/s) montée de la crue | Q (m3/s) de la décrue | Q (m3/s) monté de la crue | Q (m3/s) de la décrue |
| 0.00 | 0.00 | | 0 | | 0.000 | | 0 | |
| 1.50 | 3.87 | | 3.48 | | 1.584 | | 2.55 | |
| 2.50 | 10.76 | | 9.67 | | 4.401 | | 7.10 | |
| 3.50 | 21.09 | | 18.95 | | 8.626 | | 13.91 | |
| 4.50 | 34.86 | | 31.32 | | 14.259 | | 22.99 | |
| 7.50 | 96.82 | | 87.00 | | 39.609 | | 63.87 | |
| 8.50 | 124.37 | | 111.75 | | 50.876 | | 82.03 | |
| 9.50 | 155.35 | | 139.59 | | 63.551 | | 102.47 | |
| 10.00 | 172.13 | | 154.67 | | 70.416 | | 113.54 | |
| 10.50 | 189.78 | | 170.52 | | 77.634 | | 125.18 | |
| 11.00 | 208.28 | | 187.15 | | 85.204 | | 137.38 | |
| 11.50 | 227.64 | | 204.55 | | 93.126 | | 150.15 | |
| 12.00 | 247.87 | | 222.72 | | 101.400 | | 163.49 | |
| 12.50 | 268.96 | | 241.67 | | 110.026 | | 177.40 | |
| 12.79 | 281.58 | | 253.01 | | 115.190 | | 185.73 | |
| 0.00 | | 281.58 | | 253.01 | | 115.190 | | 185.73 |
| 1.00 | | 253.23 | | 227.53 | | 103.591 | | 167.03 |
| 2.00 | | 226.84 | | 203.83 | | 92.798 | | 149.63 |
| 3.00 | | 202.36 | | 181.83 | | 82.782 | | 133.48 |
| 4.00 | | 179.71 | | 161.47 | | 73.515 | | 118.53 |
| 5.00 | | 158.81 | | 142.69 | | 64.965 | | 104.75 |
| 6.00 | | 139.60 | | 125.43 | | 57.106 | | 92.08 |
| 7.00 | | 122.00 | | 109.62 | | 49.908 | | 80.47 |
| 8.00 | | 105.95 | | 95.20 | | 43.342 | | 69.88 |
| 9.00 | | 91.37 | | 82.10 | | 37.378 | | 60.27 |
| 10.00 | | 78.19 | | 70.26 | | 31.988 | | 51.58 |
| 11.00 | | 66.35 | | 59.62 | | 27.143 | | 43.76 |
| 12.00 | | 55.77 | | 50.11 | | 22.814 | | 36.78 |
| 13.00 | | 46.37 | | 41.67 | | 18.971 | | 30.59 |
| 14.00 | | 38.10 | | 34.23 | | 15.586 | | 25.13 |
| 15.00 | | 30.87 | | 27.74 | | 12.630 | | 20.36 |
| 16.00 | | 24.62 | | 22.13 | | 10.073 | | 16.24 |
| 17.00 | | 19.28 | | 17.32 | | 7.887 | | 12.72 |
| 20.00 | | 7.98 | | 7.17 | | 3.263 | | 5.26 |

La représentation correspondante est donnée dans la figure suivante :

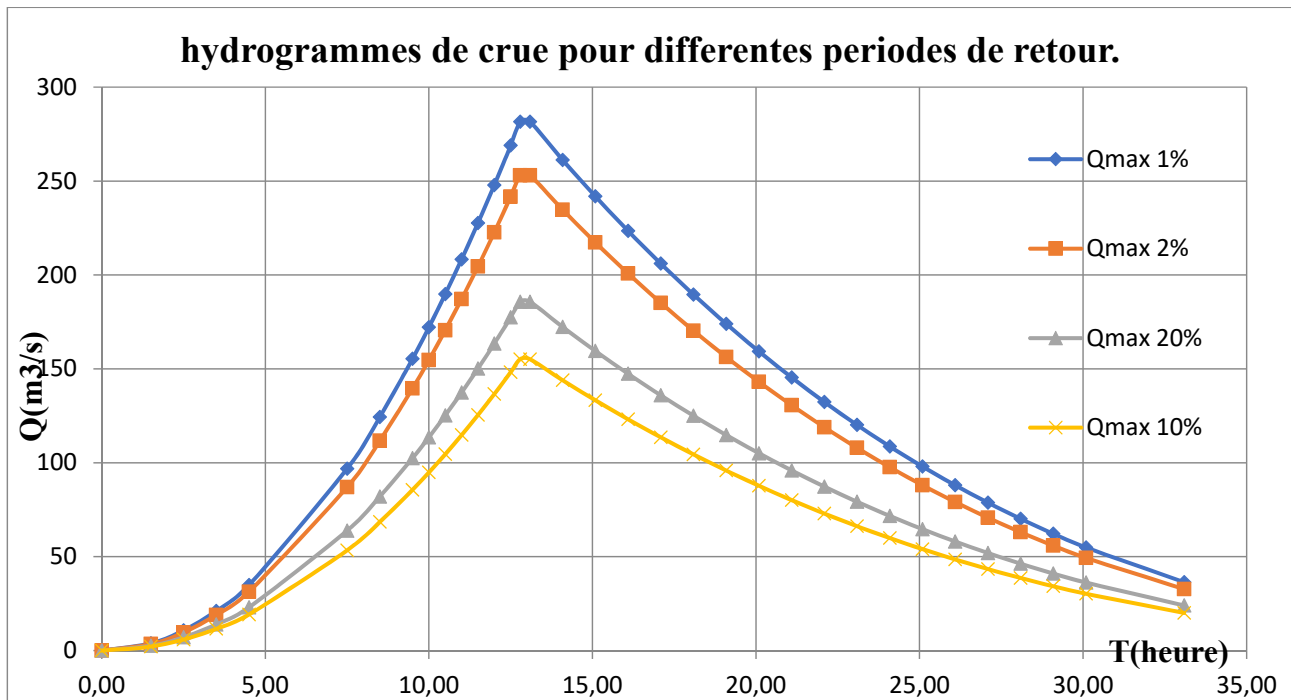


Figure IV-7 : Hydrogrammes de crue pour différentes périodes de retour

IV.5 Modélisation hydraulique

IV.5.1 Introduction

La modélisation hydraulique est un outil clé dans la gestion et la planification des ressources en eau, permettant la simulation des systèmes hydrologiques dans diverses conditions (Dingman, 2015). Il utilise des modèles mathématiques représentant les processus physiques régissant le mouvement et la distribution de l'eau dans les environnements naturels et anthropisés. Que ce soit pour la prévision des crues, l'optimisation de l'exploitation des barrages, la conception des réseaux de distribution d'eau ou l'évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau, la modélisation hydraulique joue un rôle essentiel en intégrant les données historiques, les observations actuelles et les prévisions météorologiques pour soutenir une prise de décision éclairée (Novak et al., 2010).

Ces modèles fonctionnent en appliquant des équations mathématiques qui respectent les lois de conservation de la masse et de la quantité de mouvement pour décrire le comportement des fluides et la dynamique des crues. Selon le contexte spécifique du projet et les objectifs visés, les utilisateurs peuvent opter pour des modèles de différentes dimensions (1D, 2D, etc.), des techniques de calcul variées (volumes finis, différences finies, etc.), des types de maillage (structurés, non

structurés, etc.), et diverses équations modélisatrices (Onde cinématique, Onde de diffusion, Muskingum, etc.),(Teng et al., 2017) .

Les modèles 1D sont efficaces pour représenter les processus dans les canaux, tandis que les modèles 2D sont préférés pour une analyse détaillée de la dynamique des vagues de crue sur les plaines inondables, en raison de leur capacité à simuler avec précision des flux complexes, (Hou et al., 2013). Bien que les modèles 2D nécessitent une quantité substantielle de données et des calculs intensifs, leur utilisation s'est largement répandue, comme en témoigne la littérature, grâce à leurs nombreuses applications (Freni et al., 2010).

Dans ce sillage, la littérature indique la capacité 2D de HEC-RAS a été largement exploitée, offrant une variété d'applications grâce à ses différentes complexités de schématisation.

IV.5.2 Modèle HEC-RAS

Le logiciel HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System), développé par le centre d'ingénierie hydrologique du Corps des ingénieurs de l'armée américaine, a été introduit en 1995 comme un outil de modélisation hydraulique des cours d'eau. Conçu à l'origine pour aider à la modélisation des écoulements fluviaux et à la conception d'ouvrages hydrauliques associés aux cours d'eau, HEC-RAS répond à de nombreux besoins en ingénierie hydraulique (ShahiriParsa et al., 2016).

Reconnu pour sa flexibilité, le logiciel permet de simuler des écoulements en (1D) et (2D), ce qui le rend indispensable pour l'étude détaillée de la dynamique des écoulements au sein des cours d'eau et des plaines inondables. HEC-RAS offre notamment la possibilité de représenter finement la topographie et de tenir compte des interactions entre les écoulements principaux et de débordement (Lea et al., 2019).

HEC-RAS est largement utilisé par les professionnels pour l'analyse hydromorphologique des cours d'eau, l'évaluation quantitative du risque d'inondation et la conception optimale d'ouvrages hydrauliques. Sa robustesse et son ergonomie ont contribué à sa popularité mondiale auprès des agences publiques, des universités et des bureaux d'études privés

Dans un contexte de changement climatique accentuant les crues extrêmes, HEC-RAS offre un outil clef pour la modélisation des événements hydrométéorologiques exceptionnels et l'élaboration de stratégies de gestion du risque inondation (Korkmaz, 2022).

IV.5.3 Caractéristiques techniques de HEC-RAS

HEC-RAS est un logiciel avancé conçu pour modéliser les écoulements des cours d'eau, utilisant des approches en une dimension (1D) et deux dimensions (2D). Cette flexibilité le rend adapté à divers types d'écoulements et répond aux exigences spécifiques des projets d'ingénierie hydraulique.

1. **Écoulement permanent** : Pour simuler les conditions stables et uniformes d'écoulement, HEC-RAS utilise le principe de conservation de l'énergie, complété par les équations de pertes de charge basées sur la méthode de Manning. Cette méthode est particulièrement efficace pour analyser des situations où le débit reste constant sur la durée, comme dans le cas des canaux régulés ou des rivières à débit uniforme (Díaz, 2005, U. S. Army Corps of Engineers, 2010).
2. **Écoulement non-permanent** : Dans les scénarios où l'écoulement varie avec le temps, comme lors d'inondations ou de crues éclair, HEC-RAS utilise les équations de Saint-Venant. Ces équations, traitées par une méthode de différences finies, permettent de modéliser des régimes d'écoulement transitoires et variables, capturant les variations de débit et les changements rapides des conditions de l'écoulement (Teng et al. , 2017).

IV.5.4 Modélisation des débits de crue pour différents périodes de retour

Dans la présente étude, nous avons examiné une méthode simplifiée pour la modélisation hydrodynamique en utilisant HEC-RAS 6.1.3. L'outil RAS Mapper, intégré à la version récente de HEC-RAS 6.1, a démontré sa capacité à réaliser des simulations hydrodynamiques complexes.

Ainsi, la cartographie des zones inondables est produite par le RAS Mapper au lieu de l'outil traditionnellement utilisé, HEC-GeoRAS. L'exactitude de cette méthode simplifiée est vérifiée en simulant les vitesses et les niveaux de la surface de l'eau pour des périodes de retour de 5, 10, 50, et 100 ans, en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) pour les comparaisons.

Pour configurer et utiliser le modèle HEC-RAS 2D pour simuler les inondations pour différents débits de périodes de retour, plusieurs étapes clés sont suivies. Tout d'abord, la zone d'étude est précisément délimitée et les données nécessaires sont collectées, incluant les relevés topographiques, les caractéristiques des sols, les usages du sol, et les historiques des précipitations et des débits. Un modèle numérique de terrain (MNT) est ensuite créé à partir de ces données. Un maillage 2D est généré pour la zone d'étude afin de résoudre les équations d'écoulement. Les conditions aux limites hydrauliques sont spécifiées, reflétant les scénarios de débits de périodes de retour. Le modèle HEC-RAS est paramétré avec les coefficients de rugosité et les paramètres de

contrôle des simulations. Les simulations sont ensuite exécutées pour les différents scénarios, produisant des hydrogrammes de crue et des cartes d'inondation. Les résultats sont analysés pour comprendre les dynamiques d'inondation et identifier les zones à risque. Le modèle est validé et calibré en comparant les résultats avec des données observées, et les paramètres sont ajustés si nécessaire. Enfin, les méthodes, les paramètres et les résultats sont documentés et communiqués aux parties prenantes pour une gestion éclairée des risques et la planification des infrastructures hydrauliques.

IV.5.4.1 Les données topographiques

Le téléchargement de données de Modèle Numérique de Terrain (MNT) depuis un site d'étude peut être déterminant pour des simulations hydrauliques. Le MNT ALOS 12.5, provenant de la mission satellite japonaise "Advanced Land Observing Satellite" (ALOS), offre une résolution de 12,5 mètres, ce qui le rend idéal pour une modélisation détaillée du relief.

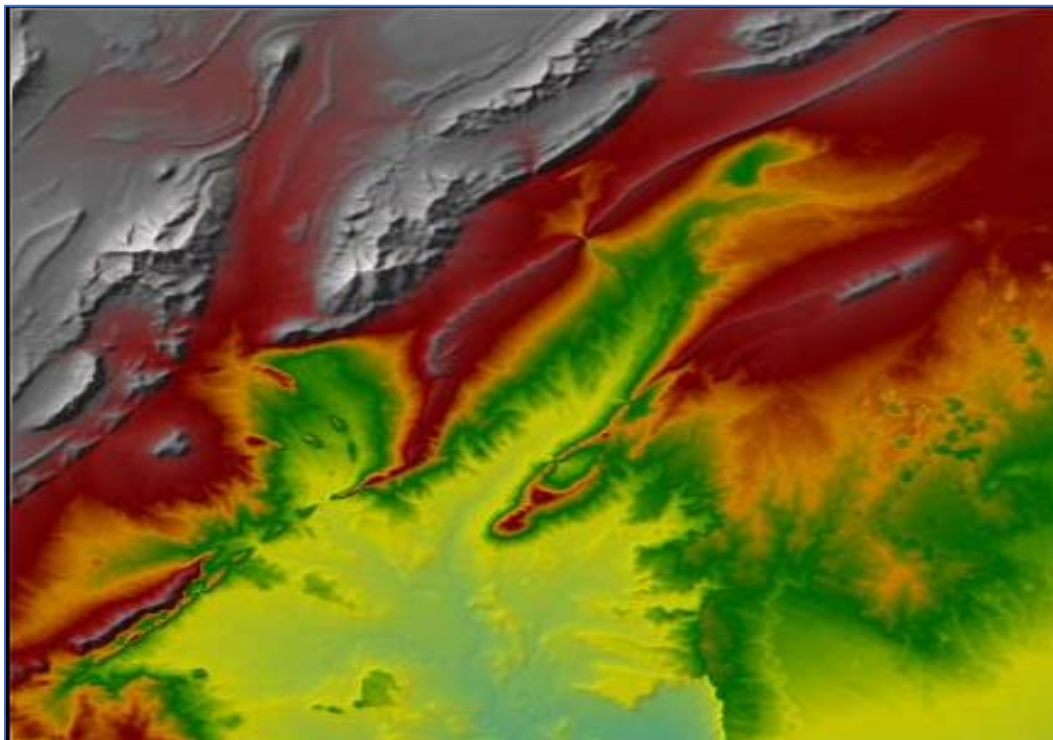


Figure IV-8: MNT de la région de Boussemghoun.

1. Projection de la région

Avant de débuter toute modélisation, il est essentiel de définir la projection cartographique adéquate pour la région étudiée. Cela garantit que les données spatiales sont correctement alignées et représentées. Choisissez une projection qui minimise la distorsion pour la zone d'étude spécifique, souvent une projection locale ou régionale est préférée pour les études hydrologiques. La projection de la région de Boussemghoun WGS_1984_UTM_Zone_30N

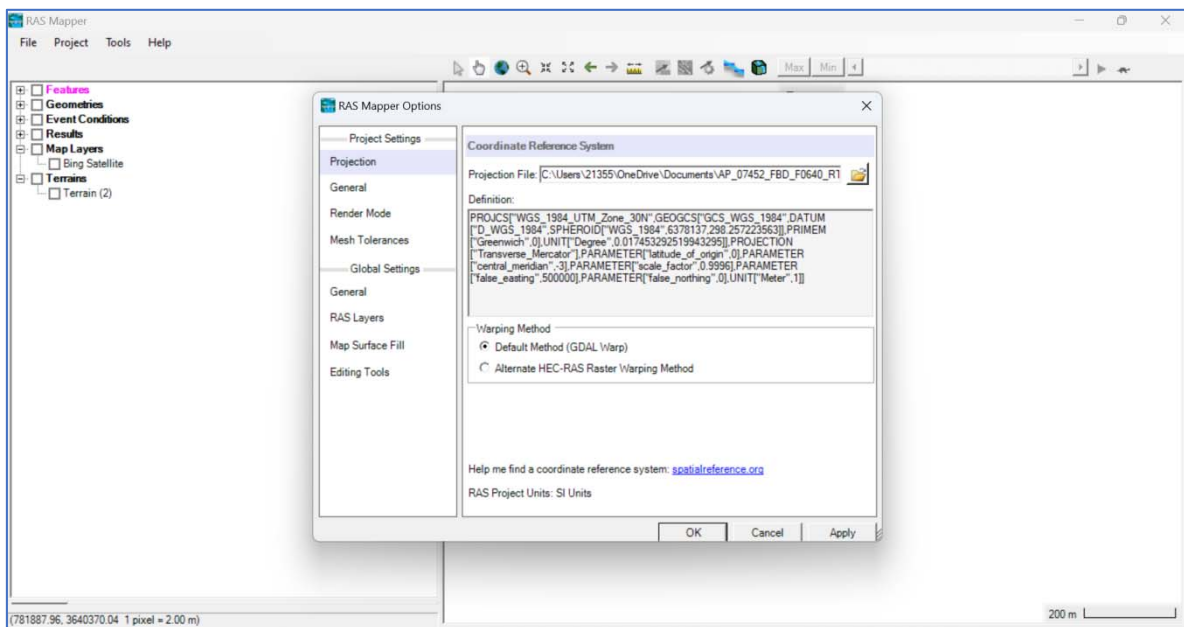


Figure IV-9 : Projection de la région d'étude (WGS/1984/UTM/Zone30N)

2. Ajout du MNT dans le logiciel

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) est importé dans HEC-RAS pour servir de base à la simulation hydraulique. Ce MNT est obtenu du satellites ALOS avec une résolution de 12.5m. Le MNT est converti au format requis par HEC-RAS (généralement un fichier raster ou GRID). Le MNT permet au logiciel de comprendre et de modéliser la topographie de la région, essentielle pour analyser l'écoulement de l'eau.

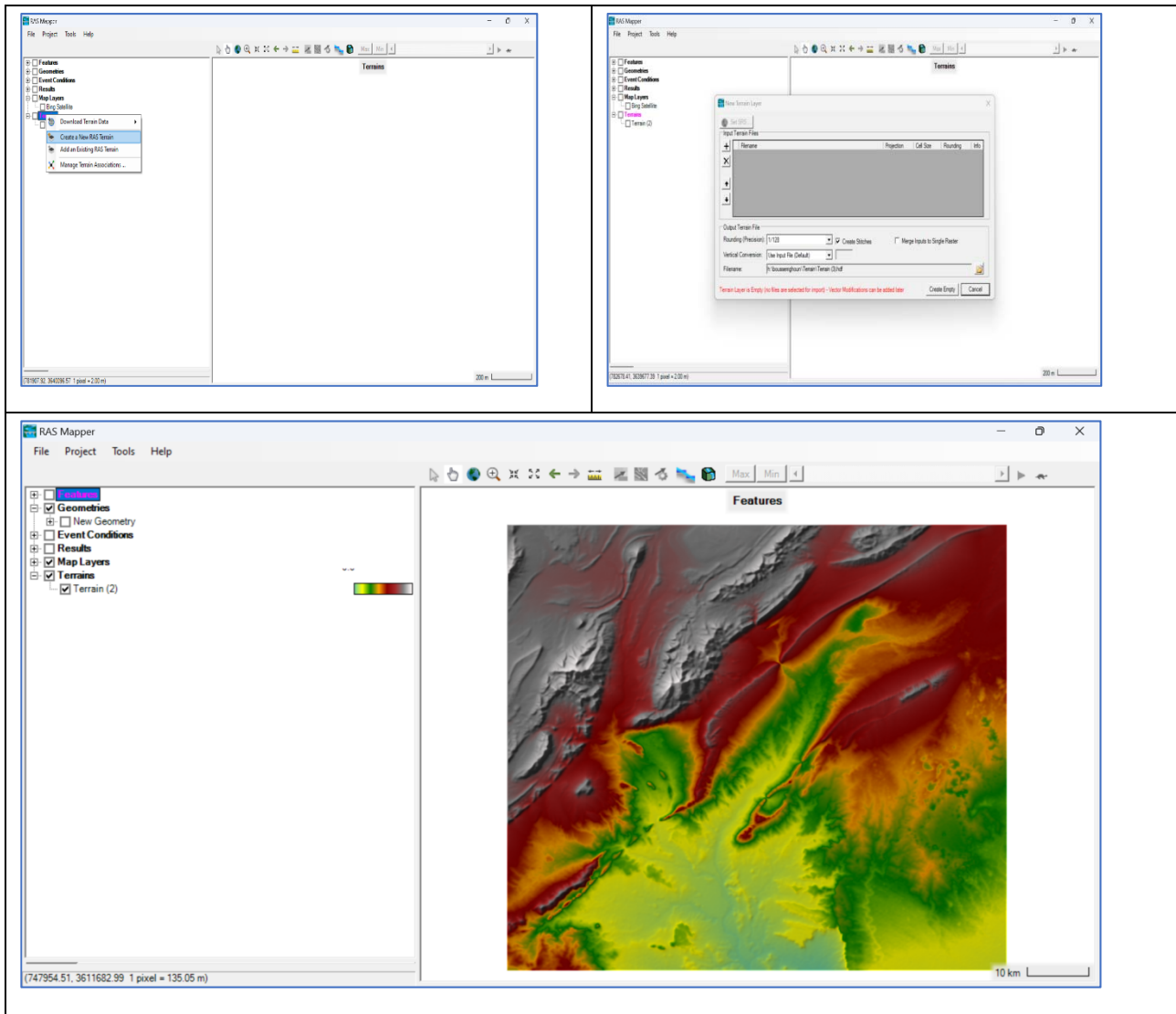


Figure IV-10: Incorporation du MNT dans HEC-RAS

3. Délimitation de la surface 2D et définition des conditions limites

Délimitation de la surface 2D : Définissez la zone géographique à modéliser en 2D dans le logiciel. Cette surface doit englober toutes les zones potentiellement impactées par les inondations, selon les débits étudiés.

1. Pour représenter avec précision des zones urbaines, l'espacement moyen des points de calcul du maillage flexible est de 5 m ;
2. Les lignes de fracture qui représentent le cours d'eau principal est utilisée pour générer des cellules qui s'alignent avec les lignes de fracture ;
3. Une solution d'onde de diffusion 2D est utilisée pour la simulation ;
4. L'intervalle du temps de calcul est fixé à cinq (5) secondes.

4. Conditions Limites en Modélisation Hydraulique

Les conditions limites sont une composante importante dans la configuration d'un modèle hydraulique, car elles déterminent comment l'eau entre, traverse et quitte la zone d'étude. Pour établir ces conditions dans HEC-RAS 2D, il est nécessaire de définir précisément les flux entrants (conditions amont) et les niveaux d'eau ou les relations de décharge aux frontières de la zone d'étude (conditions aval). Les conditions amont incluent généralement les hydrogrammes de débits provenant des rivières ou des précipitations directes sur le bassin versant. Les conditions aval, quant à elles, peuvent être des hydrogrammes de débits sortants, des niveaux d'eau fixes, ou des relations de hauteur-débit établies pour les exutoires. La définition précise de ces conditions est essentielle pour garantir que le modèle représente fidèlement le comportement hydrodynamique du système étudié, assurant ainsi la fiabilité et la précision des simulations.

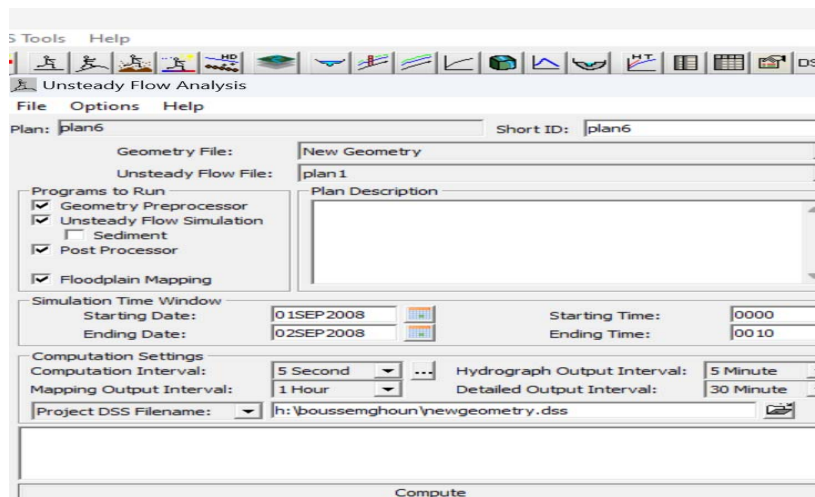


Figure IV-11 : Visualisation de la simulation

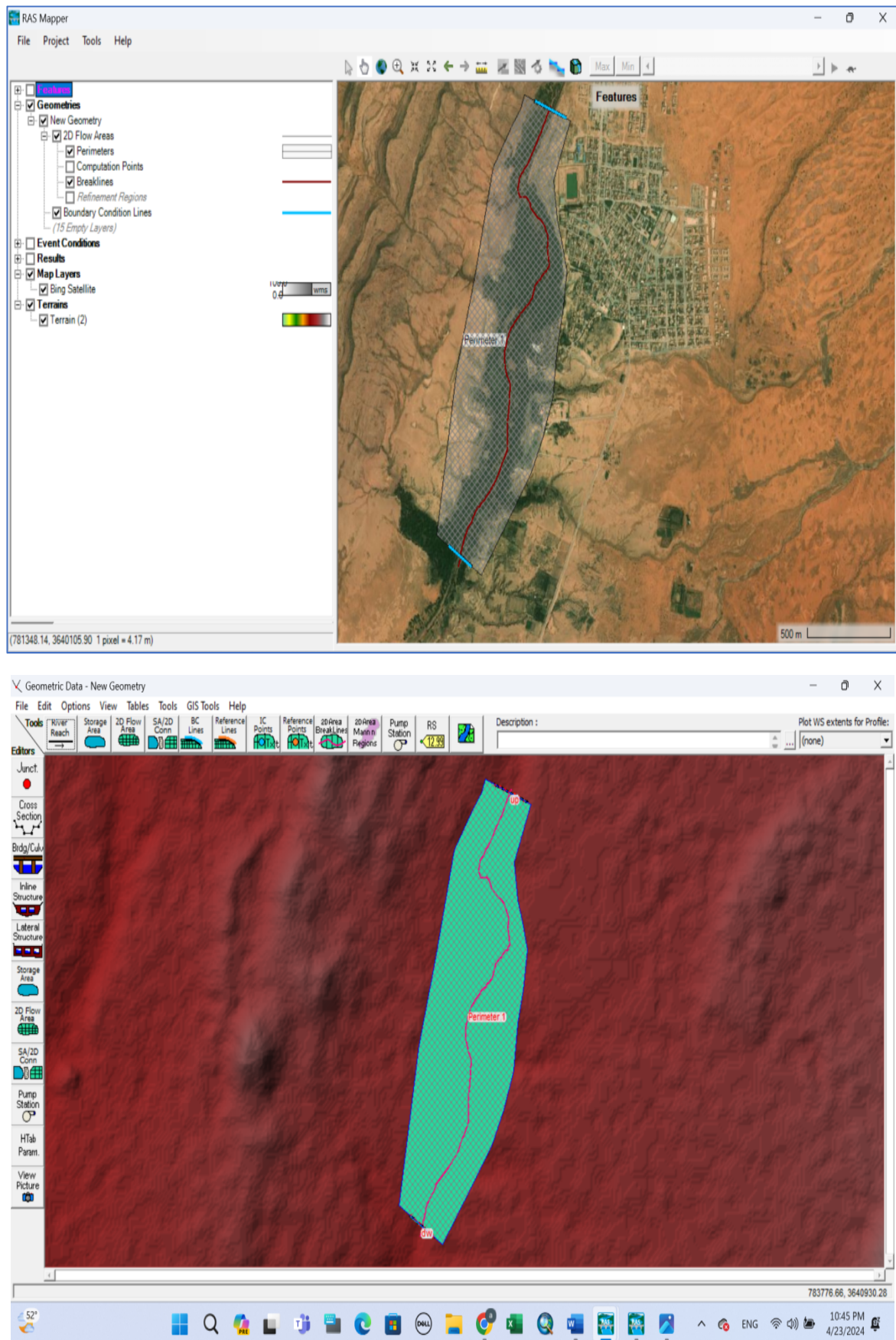


Figure IV-12: Schémas de résultats de simulation.

5. Simulation Hydraulique avec HEC-RAS

Une fois que la région d'étude est correctement délimitée, que le modèle numérique de terrain (MNT) est intégré, et que la surface de modélisation ainsi que les conditions limites sont définies, la simulation peut être initiée. Ainsi, la simulation dans HEC-RAS est lancée afin de visualiser le comportement de l'eau en fonction des différents scénarios de débit.

Cette étape permet de surveiller les étendues d'inondation, les profondeurs d'eau, et les vitesses d'écoulement à travers la région modélisée.

Ces étapes constituent le cœur de la configuration et de l'utilisation de HEC-RAS pour une analyse d'inondation. Elles garantissent que le modèle repose sur des données topographiques précises (MNT) et des conditions hydrologiques réalistes, ce qui est essentiel pour obtenir des résultats fiables et utilisables dans la gestion des risques d'inondation et la planification des infrastructures hydrauliques.

6. Résultat des simulations hydraulique pour les différents périodes de retour

Pour une compréhension approfondie et complète des défis hydrauliques auxquels le bassin de Boussemghoun est confronté, ainsi que des mesures de protection nécessaires pour le Q'sar et la palmeraie, il est essentiel d'examiner en détail les données issues des simulations hydrauliques. Ces données incluent les surfaces inondées, les débits correspondants pour différentes périodes de retour, ainsi que la distance entre ces étendues d'eau et le Q'sar.

Le tableau récapitulatif ci-dessous présente ces éléments, suivi d'une présentation de l'impact des inondations et d'une analyse approfondie :

Tableau: Résultats de simulation :

| Période de Retour (Ans) | Débit [m³/s] | Hmax [Mètre] | Surface Inondée [hectare] | Distance du Q'sar [Mètre] | Impact sur le Q'sar |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 100 | 289.76 | 6.42 | 31.83 | 0 (touchant le mur) | Inondation directe |
| 50 | 253.01 | 5.46 | 25.55 | 0 (touchant le mur) | Inondation directe |
| 10 | 185.73 | 5.16 | 22.77 | 23 | Proche, risque élevé |
| 5 | 155.15 | 4.99 | 21.21 | 39 | Moins menacé |

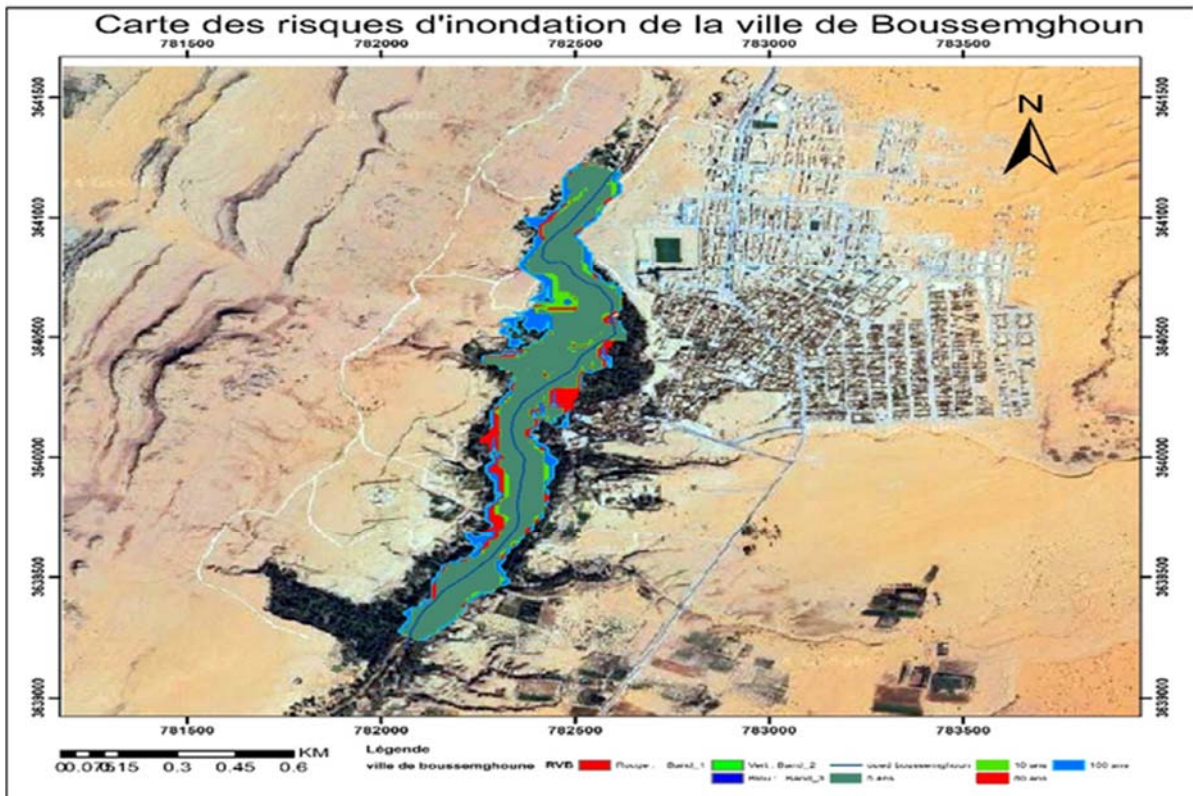


Figure IV-13: Etendue de l'inondation

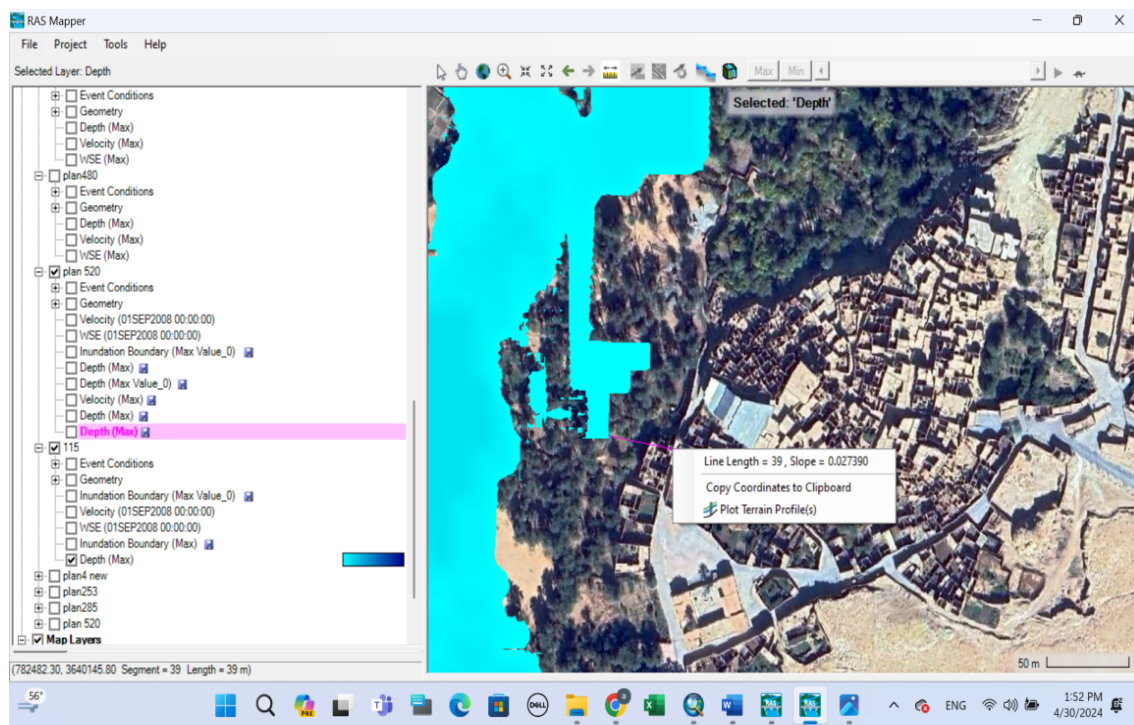


Figure IV-14: Profondeurs d'eau simulées pour les différentes périodes de retour.

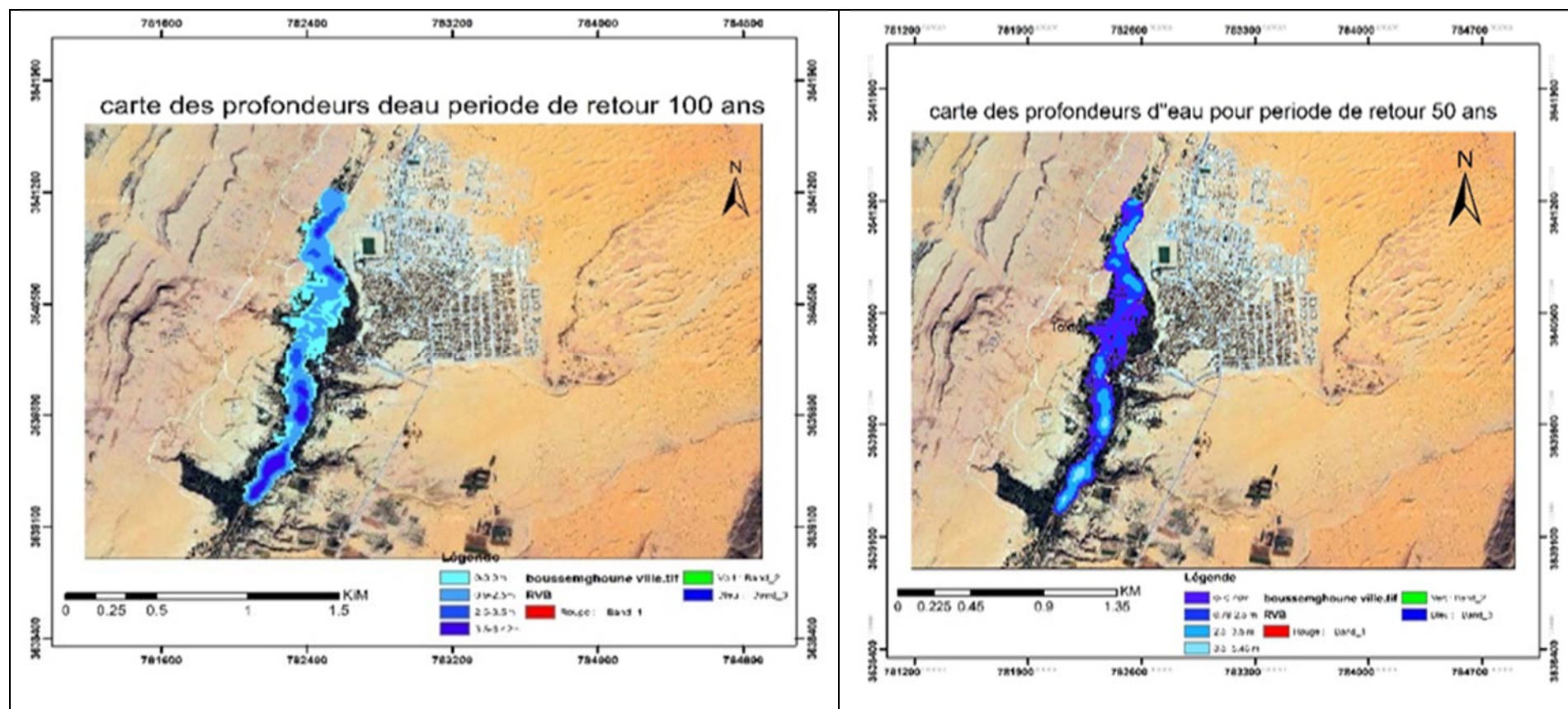


Figure IV-15: Cartes des profondeurs d'eau pour les périodes de retour de 100 et 50 ans.

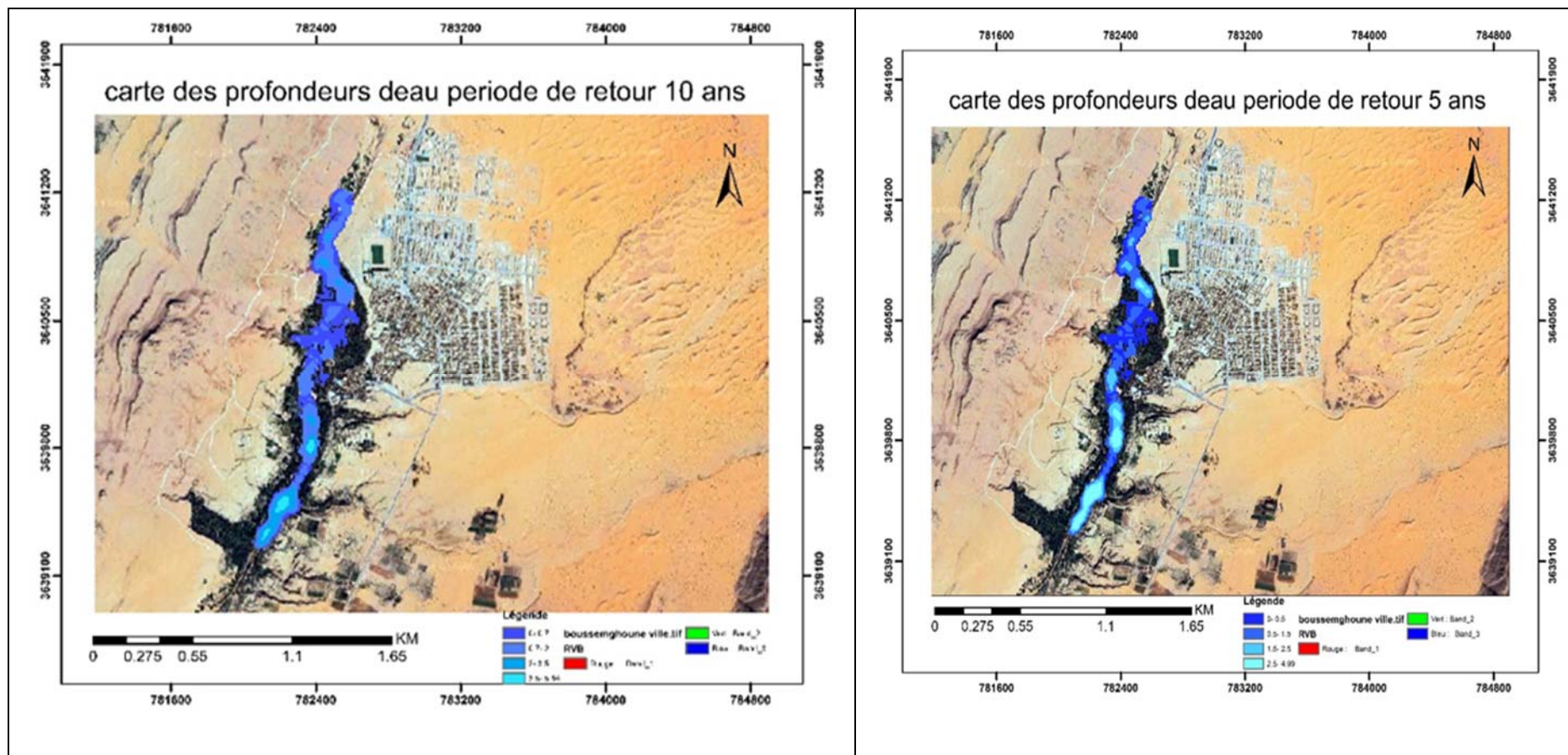


Figure IV-16: Cartes des profondeurs d'eau pour les périodes de retour de 10 et 5 ans.

7. Analyse des résultats des simulations hydrauliques.

Une lecture exhaustive des résultats de la simulation des crues révèle une corrélation directe entre la période de retour et l'impact potentiel sur le Q'sar de Boussemghoun. Les débits maximaux simulés pour les différentes périodes de retour montrent une augmentation progressive du risque d'inondation.

Dans ce contexte les travaux de Chow et al. ([V.-T. Chow et al., 1988](#)) soulignent l'importance de prendre en compte les périodes de retour des crues pour établir des stratégies de gestion des risques efficaces. De plus, les directives de la WMO ([World Meteorological Organization, 2009](#)) recommandent des évaluations régulières des risques d'inondation pour protéger les infrastructures critiques et les populations locales, ([World Meteorological Organization \(WMO\), 2009](#)).

Le tableau (IV-12) et les figures (IV-11), (IV-12) reflètent clairement l'importance de faire une analyse approfondie de l'augmentation des débits et des surfaces inondées avec l'allongement des périodes de retour. Cela révèle une vulnérabilité accrue du Q'sar lors d'événements hydrologiques plus rares et plus intenses.

Ainsi, pour une période de retour de 100 ans, le débit atteint 289,76 m³/s avec une surface inondée de 31,83 hectares, impactant directement le mur du Q'sar et causant une inondation directe. Une crue similaire pour une période de retour de 50 ans génère un débit de 253,01 m³/s et inonde une surface de 25,55 hectares, également touchant le mur du Q'sar et entraînant une inondation directe. Ces valeurs montrent que pour des événements de grande envergure, le Q'sar est directement menacé, mettant en évidence la vulnérabilité de la structure historique face aux crues extrêmes. Ces observations se trouvent conformes aux conclusions des études hydrologiques sur la vulnérabilité des bassins versants arides aux événements pluvieux intenses, ([Franchini et al., 2023](#)).

Pour une période de retour de 10 ans, le débit diminue à 185,73 m³/s avec une surface inondée de 22,77 hectares, la distance au Q'sar étant de 23 mètres. Bien que le Q'sar ne soit pas directement touché, il reste à un risque élevé d'inondation. Enfin, une période de retour de 5 ans présente un débit de 155,15 m³/s, inondant 21,21 hectares, et une distance de 39 mètres du Q'sar, ce qui réduit le risque d'inondation directe mais maintient une menace notable.

Pour mieux comprendre l'impact des différentes périodes de retour sur le bassin de Boussemghoun, il est fortement indiqué de considérer aussi les hauteurs d'eau générées lors de ces événements, particulièrement dans les sections principales du cours d'eau, en amont et en aval de l'oasis.

En effet, lors des crues, en plus du risque d'impact sur le Q'sar, il y a aussi le risque engendré par l'augmentation des débits qui génère des courants de flux chargés de solide ravageant sur leur

chemin les cultures des jardins dans l'Oasis. Les résultats de simulation présentés dans le tableau (IV-12), montrent également que la hauteur d'eau générée varie de manière significative en fonction des périodes de retour considérée. Ces variations indiquent clairement que les événements pluviaux plus rares et plus intenses produisent des inondations plus hautes et potentiellement plus destructrices. Par exemple, pour une période de retour de 100 ans, la hauteur d'eau atteint des niveaux critiques (6.42 mètres), entraînant des inondations directes et sévères, particulièrement dangereuses pour les jardins des cultures de fellah dans l'Oasis, les infrastructures hydraulique ancestrales de la région, et les habitations situées près des cours d'eau. À l'inverse, pour des périodes de retour plus courtes, telles que 5 ou 10 ans, les hauteurs d'eau sont moins élevées, mais restent significatives, posant des risques considérables pour les zones proches de l'Wadi de Boussemghoun.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'une gestion adéquate des risques d'inondation dans le bassin versant de l'Wadi de Boussemghoun. Des mesures préventives telles que la construction de digues, l'aménagement des lits de rivières, la protection du Q'sar à travers la construction de murs de soutènement en béton et la mise en place de systèmes d'alerte précoce sont cruciales pour minimiser les dommages potentiels et protéger le Q'sar et ses habitants.

D'autres mesures qui relèvent des solutions naturelles sont fortement conseillées. Parmi les solutions basées sur la nature, il y'a la restauration des zones humides et la reforestation qui peuvent jouer un rôle déterminant dans la régulation et la réduction du volume d'eau atteignant le Q'sar et les jardins dans l'Oasis.

IV.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté une étude hydrologique détaillée du bassin versant de l'Wadi Boussemghoun, abritant l'oasis éponyme dans la région d'El-Bayadh.

Différentes analyses ont tout d'abord été menées. L'analyse morphométrique détaillée du bassin a permis de calculer des paramètres essentiels tels que l'indice de compacité ($K_c=1,55$), le coefficient de rondeur ($R_c=0,417$) et le coefficient d'allongement ($E=1,5$). Ces indicateurs révèlent une forme allongée du bassin, favorisant une concentration rapide des écoulements et une réponse hydrologique rapide aux précipitations.

La détermination du rectangle équivalent du bassin ($L=38$ km, $l=5,86$ km) et le calcul de la pente moyenne ($I_g=6,4\%$) confirment cette tendance, avec un potentiel élevé de ruissellement et de crues soudaines. La comparaison avec d'autres bassins de la région met en évidence des différences morphologiques qui se traduisent par des comportements hydrologiques distincts

Les paramètres climatiques ont également été étudiés, notamment via l'ajustement statistique des séries pluviométriques à la loi de Gumbel.

Les méthodes de calcul usuelles ont ensuite été appliquées pour estimer les débits de crue pour diverses périodes de retour. La méthode de Sokolovski a été retenue comme la plus adaptée.

La modélisation hydraulique réalisée avec le logiciel HEC-RAS, en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) et des données topographiques précises, a permis de simuler les surfaces inondées, les profondeurs d'eau et les vitesses d'écoulement pour des périodes de retour de 5, 10, 50 et 100 ans. Les résultats des simulations mettent en évidence une corrélation directe entre la période de retour et l'impact potentiel sur le Q'sar de Boussemgoun, avec un risque accru d'inondation directe pour des événements pluvieux plus rares et plus intenses.

Au travers de cette étude exhaustive, ce chapitre a démontré l'importance de combiner approches statistiques et outils de modélisation avancée pour une évaluation fiable du risque d'inondation dans les bassins arides. Ses résultats constituent des éléments déterminants pour le dimensionnement des ouvrages de protection envisagés.

Cette étude hydrologique approfondie fournit des bases solides pour la gestion intégrée du bassin de l'Wadi Boussemgoun et la sauvegarde durable de son précieux patrimoine culturel oasien.

CHAPITRE QUATRIEME
MESURES PREVENTIVES DE PROTECTION DE
L'OASIS DE BOUSSEMGHOUN

V. Quatrième chapitre : Mesures préventives de protection de l'Oasis de Boussemghoun

V.1 Introduction :

Les résultats de la modélisation hydraulique pour le bassin de Boussemghoun montrent clairement que lors des crues, l'étendue et les hauteurs d'eau varient considérablement en fonction des périodes de retour, avec des inondations plus sévères pour les événements pluviaux rares et intenses. Ces résultats fournissent des informations essentielles pour la mise en place de mesures de prévention et de protection, visant à mieux préparer les populations locales et à préserver le patrimoine historique et culturel de l'oasis de Boussemghoun.

Pour la protection des composantes de l'oasis — le Q'sar, la palmeraie avec ses jardins, et les infrastructures hydrauliques ancestrales — contre les risques d'inondation, il est impératif de mettre en œuvre des mesures préventives efficaces. Ces mesures peuvent être classées en deux catégories principales : les solutions basées sur la nature et les solutions de génie civil.

Les solutions basées sur la nature, telles que la restauration des zones humides et la reforestation, jouent un rôle crucial dans la réduction du volume d'eau atteignant le Q'sar. Ces méthodes augmentent la capacité d'infiltration et de rétention des sols, ce qui diminue le ruissellement de surface (Khodadad et al., 2023). En améliorant la capacité naturelle du bassin versant à absorber et à retenir l'eau, ces solutions contribuent à réduire l'impact des crues. Selon les études de (V.-T. Chow et al., 1988), l'amélioration des infrastructures naturelles dans les bassins versants peut significativement atténuer les effets des inondations.

En complément des solutions naturelles, des mesures de génie civil sont également déterminantes (Yuan et al., 2024). La construction de murs de soutènement en béton autour du Q'sar peut offrir une protection robuste contre les inondations. Ces murs peuvent être conçus pour résister aux forces hydrauliques des crues et empêcher l'eau d'atteindre les structures vulnérables. De plus, la construction de bassins de rétention permettra de contrôler et de minimiser l'impact des crues lors des fortes pluies. Ces bassins peuvent temporairement stocker les eaux de crue et les libérer de manière contrôlée, réduisant ainsi le risque d'inondation. De nombreuses études soulignent l'importance de telles infrastructures pour la gestion efficace des crues dans les zones vulnérables , (Nguyen et al., 2024).

Ces actions devraient viser à maintenir les débits en dessous de ceux observés pour une période de retour de 5 ans, période durant laquelle le Q'sar reste moins menacé, avec une distance de 39 mètres entre lui et l'étendue des inondations.

En intégrant ces mesures préventives, il est possible de protéger le patrimoine historique et culturel du Q'sar tout en améliorant la gestion des eaux dans l'ensemble du bassin, renforçant ainsi la résilience face aux défis climatiques futurs. La World Meteorological Organization ([World Meteorological Organization \(WMO\), 2009](#)), recommande une approche combinée, utilisant à la fois des solutions naturelles et des infrastructures de génie civil, pour une gestion durable et efficace des risques d'inondation.

V.2 Mesures basées sur la nature

Pour protéger le Q'sar et la palmeraie de Boussemghoun, il est vivement recommandé de mettre en place des solutions fondées sur la nature. Ces solutions incluent notamment la restauration des zones humides et la reforestation, deux approches qui offrent des avantages significatifs pour la gestion des eaux et la réduction des risques d'inondation, ([Mabrouk et al., 2023](#)).

Dans ce contexte, la restauration des zones humides s'évère comme une stratégie clé. Les zones humides agissent comme des éponges naturelles, absorbant et stockant de grandes quantités d'eau lors des événements pluvieux. Cela permet de réguler le flux d'eau et de réduire la vitesse et le volume des crues en aval. En plus de leur capacité d'absorption, les zones humides soutiennent une biodiversité riche, ce qui améliore la résilience de l'écosystème face aux variations climatiques. Mitsch et Gosselink ont démontré que les zones humides restaurées peuvent considérablement diminuer les pics de crue et réduire les risques d'inondation dans les bassins versants, ([Mitsch & Gosselink, 2015](#)) .

La reforestation, ou la plantation d'arbres et de végétation native, est une autre solution efficace. Les racines des arbres améliorent la structure du sol, augmentant sa capacité à infiltrer l'eau et réduisant le ruissellement de surface. En outre, la végétation joue un rôle essentiel dans la stabilisation des sols et la prévention de l'érosion, ce qui est particulièrement important dans les zones sujettes aux crues. La couverture végétale ralentit également le débit des eaux de surface, ce qui diminue la charge sur les infrastructures en aval et réduit les risques d'inondation. Les travaux de Bradshaw et al. ([Bradshaw et al., 2007](#)) soulignent l'importance de la reforestation qui offre une opportunité pour augmenter la capacité de rétention d'eau des sols, contribuant ainsi à une gestion plus efficace des crues.

En améliorant la capacité naturelle du bassin versant à absorber et à retenir l'eau, ces solutions fondées sur la nature contribuent à réduire l'impact des crues. Elles offrent une approche durable et écologique, favorisant non seulement la protection contre les inondations, mais aussi la conservation de l'écosystème local. De plus, elles peuvent être intégrées avec d'autres stratégies de gestion des eaux pour une approche holistique et résiliente. Au passage, nous signalons les recommandations de La World Meteorological Organization (World Meteorological Organization (WMO), 2009), qui souligne l'importance d'intégrer des solutions basées sur la nature dans les plans de gestion des risques d'inondation pour maximiser leur efficacité et durabilité.

V.3 Mesures basées sur le génie civil

Outre les solutions fondées sur la nature, l'utilisation de techniques basées sur le génie civil s'avère également essentielle pour protéger efficacement l'oasis d'Wadi Boussemghoun, dont le Q'sar, la palmeraie, ses jardins et les infrastructures hydrauliques ancestrales. Ces techniques sont essentielles pour garantir la résilience de l'oasis face aux graves inondations.

Parmi ces solutions de génie civil, la construction de murs de soutènement en béton autour du Q'sar et l'aménagement de bassins de rétention sur les deux rives du cours d'eau sont fortement recommandées.





Figure V-1: Construction de mur de soutènement en béton autour du Q'sar de Boussemghoun

La construction de murs de soutènement autour du Q'sar répond à plusieurs objectifs. Ces murs offrent avant tout une protection solide contre les eaux de crue, les empêchant d'atteindre les fondations du Q'sar et de provoquer des dommages structurels. Ceci est particulièrement déterminant à la lumière des récentes inondations, comme celle du 17 mai 2023, qui ont constitué des menaces importantes pour l'intégrité du Q'sar. Les murs de soutènement peuvent être conçus pour résister aux forces hydrauliques, assurant ainsi la protection et la stabilité à long terme des structures historiques (Smith, 2013).

En effet, dans le contexte de la protection de l'Oasis de Boussemghoun, les bassins de rétention sont des ouvrages qui doivent être conçus pour atténuer les impacts des crues extrêmes, notamment celles avec une période de retour de 100 ans, en les réduisant à des niveaux comparables à une période de retour de 5 ans. Cette approche minimise non seulement l'impact des inondations majeures, mais favorise également une gestion plus durable et respectueuse de l'environnement des ressources en eau locales.

V.4 Les bassins de rétention

Les bassins de rétention, également connus sous le nom de bassins de régulation, jouent un rôle capital dans la gestion moderne des eaux pluviales, en particulier dans les zones arides et semi-arides comme celles des oasis sahariennes d'Algérie. Ces structures sont conçues pour recueillir et stocker temporairement les eaux de pluie et le ruissellement avant de les relâcher à un débit contrôlé dans les systèmes de drainage naturels ou artificiels. Leur objectif principal est de mitiger les impacts des événements pluvieux importants, tels que les inondations et l'érosion, tout en améliorant la qualité de l'eau qui est finalement déchargée dans l'environnement ([Gupta, 2017](#)).

Dans le contexte des oasis sahariennes, les bassins de rétention sont particulièrement essentiels pour protéger les Q'sours, les palmeraies, et les infrastructures hydrauliques ancestrales , ([Hadidi, Remini, & Habi, 2018](#))

V.4.1 Fonctionnalités et avantages

Les bassins de rétention offrent plusieurs avantages multifonctionnels. Tout d'abord, ils réduisent les pics de débit lors des événements pluvieux, prévenant ainsi les inondations en aval. De plus, en favorisant la sédimentation, ils permettent de piéger les sédiments et les polluants, améliorant ainsi la qualité de l'eau. Enfin, ces bassins offrent également des bénéfices écologiques et esthétiques en créant des habitats pour la faune et la flore, et en s'intégrant comme éléments paysagers qui contribuent à la biodiversité locale ([Leopold, 1968](#)) .

V.4.2 Types de bassins de rétention

Il existe plusieurs types de bassins de rétention, adaptés aux besoins spécifiques des régions arides et semi-arides. Les bassins à sec se vident complètement après un événement pluvieux, assurant une capacité maximale pour les prochains événements. Les bassins à eau permanente, souvent appelés étangs de rétention, maintiennent une certaine quantité d'eau en permanence, offrant ainsi des avantages supplémentaires pour la biodiversité et le paysage ([Hunt & Doll, 2000](#)) . La conception de ces structures varie en fonction des conditions hydrologiques et topographiques locales, des objectifs de gestion des eaux pluviales, et des réglementations environnementales en vigueur.

V.4.3 Applications

Les bassins de rétention sont utilisés dans une variété de contextes. Ils sont intégrés dans les zones urbaines et suburbaines pour gérer les eaux de ruissellement, souvent dans des développements résidentiels, industriels et les infrastructures routières. Dans les zones rurales, ils sont utilisés pour contrôler l'érosion et améliorer la recharge des aquifères, ce qui est particulièrement déterminant dans les régions sahariennes où les ressources en eau sont limitées ([Idder et al., 2014](#)), ([Keyvanfar et al., 2021](#)),

V.4.4 Enjeux et développements futurs

La conception et la gestion des bassins de rétention continuent d'évoluer vers une plus grande durabilité et multifonctionnalité. L'intégration de techniques de bio-ingénierie, telles que les zones humides artificielles et la végétation indigène, permet de renforcer la capacité de rétention et de traitement des eaux, ([Choi et al., 2024](#)).

De plus, l'adoption de technologies avancées pour la modélisation et la gestion en temps réel des bassins de rétention aide à optimiser leur efficacité et leur fonctionnement, particulièrement dans des contextes climatiques extrêmes ([Khatri et al., 2008](#)).

En résumé, les bassins de rétention constituent une composante essentielle des stratégies de gestion des eaux pluviales dans les oasis sahariennes d'Algérie. Ils offrent des solutions efficaces pour contrôler le ruissellement urbain, protéger les infrastructures historiques et culturelles, et améliorer la santé écologique des communautés locales, ([Bouchetouf & Benabdeli, 2021](#)).

V.5 Mise en œuvre de la stratégie de protection par l'implantation des bassins de rétention

La conception et la construction de bassins de rétention constituent une stratégie de génie civil pour la protection contre les risques d'inondation particulièrement dans les écosystèmes oasiens fragiles des régions arides et semi-arides ([Hornich, 2017](#)). L'emplacement approprié des bassins de rétention doit soigneusement prendre en compte à la fois les caractéristiques morphologiques du canal de l'Wadi et du terrain environnant, ainsi que les conditions hydrologiques locales ([Acheampong et al., 2023](#)).

Pour l'Oasis d'Wadi Boussemghoun, les bassins de rétention peuvent être construits en amont des zones peuplées, situés à l'entrée de l'oasis, afin de sauvegarder efficacement le Q'sar et la précieuse palmeraie des eaux de crue destructrices ([Kamal El-Din, 1990](#)). Cet emplacement stratégique

permet d'intercepter le ruissellement de surface avant d'atteindre les jardins irrigués et les fragiles infrastructures hydrauliques de l'oasis, exploitant les bassins pour agir comme des barrières naturelles contre les crues soudaines lors des fortes périodes pluvieuses

Un dimensionnement et une conception appropriés des bassins sont également essentiels pour garantir une capacité adéquate de stockage des eaux de crue sans compromettre la sécurité des bassins ni endommager leurs remblais en terre pendant les périodes de précipitations. Dans l'ensemble, l'approche des bassins de rétention s'avère efficace à la fois pour atténuer les risques d'inondation et pour préserver le système socio-écologique complexe des oasis sahariennes, une approche qui est pertinente pour des environnements arides similaires dans le monde entier ([Ling et al., 2013](#)).

V.5.1 Sélection du site :

La sélection des sites pour les bassins de rétention repose sur une analyse hydrologique détaillée, intégrant des données topographiques et des modélisations du ruissellement de surface. Ce processus inclut des simulations des événements de crue avec une période de retour de cinq ans, garantissant que les bassins sont conçus pour gérer des volumes d'eau substantiels typiques de tels intervalles. Les dépressions naturelles ou les terres moins productives sont privilégiées pour l'emplacement de ces bassins. Cette approche minimise l'impact sur les terres agricoles et habitables, réduisant ainsi la charge économique associée à l'acquisition de terres et aux travaux de terrassement. En utilisant des zones naturellement basses, les coûts de construction sont également considérablement réduits, rendant le projet plus économiquement viable ([Emamgholizadeh et al., 2018](#)).

Dans le contexte de l'oasis d'Wadi Boussemghoun, l'emplacement stratégique des bassins de rétention est déterminant pour la sauvegarde du Q'sar et de la palmeraie avec ses jardins et infrastructures hydrauliques ancestrales. Par ailleurs, la conception et la construction de ces bassins doivent intégrer des exigences hydrauliques et écologiques pour assurer la continuité du fleuve et le passage des animaux, comme le souligne les réglementations des aménagements des cours d'eau (La loi n°05 – 12 du 04 août 2005 relative à l'eau).

Ainsi, la localisation des bassins est projetée dans des zones présentant des dépressions naturelles ou des terrains moins propices à l'agriculture, afin de minimiser l'impact sur les surfaces cultivées tout en réduisant les coûts liés aux terrassements. Leur emplacement doit être donc choisi judicieusement pour intercepter les principaux axes d'écoulement sans perturber à la fois le

fonctionnement hydraulique traditionnel de l'oasis et sans risque d'impact sur les activités de culture des habitants, ([Idder et al., 2014](#)), ([Benslimane, 2021](#)).

Leur taille qui est fonction du volume à réguler est définie pour pouvoir retenir les volumes d'eau correspondant aux crues extrêmes, en tenant compte de la pente des fonds et des berges pour assurer une vidange progressive et éviter les risques d'érosion.

V.5.2 Considérations de conception et de construction :

Les bassins de rétention sont conçus pour stocker temporairement les eaux de crue et les libérer lentement, réduisant ainsi le débit de pointe et prévenant les inondations en aval. La conception doit tenir compte de la capacité nécessaire pour accueillir les volumes d'eau attendus et intégrer des dispositifs de contrôle de la sédimentation pour maintenir la fonctionnalité des bassins ([Scholz, 2019](#)).

En outre, des matériaux de construction disponibles localement, tels que la pierre et la terre compactée, sont utilisés pour construire les bassins de rétention. Cette approche réduit non seulement les coûts, mais garantit également que les structures sont bien adaptées à l'environnement local et durables à long terme.

Les considérations environnementales sont primordiales dans la conception de ces bassins. L'intégration des bassins dans le paysage naturel contribue à minimiser les perturbations écologiques et améliore la valeur esthétique de la zone. En plus de la fonction de la filtration naturelle des eaux, l'approche soutient également la faune locale et fournit des espaces de loisirs à la communauté.

Enfin, un entretien régulier est crucial pour garantir l'efficacité des bassins de rétention. Cela inclut des inspections périodiques, le retrait des sédiments et la gestion de la végétation. De plus, des systèmes de surveillance doivent être établis pour suivre la performance des bassins et effectuer les ajustements nécessaires ([Shrestha, 2012](#)).

V.5.3 Détermination du débit à gérer

Le dimensionnement d'un bassin de rétention nécessite de déterminer avec précision le volume d'eau à retenir, en se basant sur des méthodes hydrologiques éprouvées ([Yahiaoui et al., 2011](#)).

Ceci nécessite la connaissance des débits à gérer lors des événements des crues extrêmes. L'approche rigoureuse du calcul des débits et volumes de fuite permet d'implanter dans l'Wadi

Boussemghoun des bassins de rétention surdimensionnés, garantissant une protection fiable des enjeux en aval.

Dans cette étude, les débits de pointe ont été estimés par une analyse statistique combinant données pluviométriques et débits associés. Cette approche a permis de déterminer les débits caractéristiques associés à diverses périodes de retour, dont celles retenues pour dimensionner le bassin de rétention, à savoir 100 ans et 5 ans. Le débit différentiel entre ces deux échéances extrêmes a ainsi pu être calculé afin de définir précisément la capacité de stockage requise pour l'ouvrage.

Le choix des périodes de retour de 100 ans et 5 ans pour le dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations résulte d'une analyse risque-aléa établie. En effet, un événement centennal correspond à un aléa hydrométéorologique exceptionnel présentant un risque avéré d'inondation majeure compte tenu de l'intensité des précipitations et des débits de crues associés. À l'inverse, une crue cinquantennale représente un aléa plus fréquent dont l'occurrence statistique est suffisamment courte pour être généralement considérée comme un événement ne produisant que des effets mineurs, sans dommages significatifs sur les biens et les personnes.

Ainsi, le dimensionnement des ouvrages sur la base de cette différence entre les scénarii centennal et cinquantennal vise donc à protéger de manière robuste contre les aléas exceptionnels tout en limitant les surcapacités inutiles face aux crues fréquentes

Les valeurs de débit de point correspondantes permettent de calculer la capacité volumique requise pour le(s) bassin(s), égale à la différence entre les volumes ruisselés pour les deux périodes considérées.

Débit pour une période de retour de 100 ans : 289,76 m³/s

Débit pour une période de retour de 5 ans : 155,15 m³/s

Ainsi, avec un débit estimé à 289,76 m³/s pour un événement centennal et 155,15 m³/s pour un épisode cinquantennal, le volume additionnel à retenir est :

$$\Delta Q = Q_{r100} - Q_{r5} \quad \text{V-1}$$

Ce qui donne :

$$\Delta Q = 289.76 - 155.15. \text{ Soit ; } \Delta Q = 134.61 \text{ m}^3/\text{s}.$$

La différence de débit à gérer est donc : $\Delta Q = 134.61 \text{ m}^3/\text{s}$.

V.5.4 Calcul du volume de rétention nécessaire

Le calcul du volume de rétention nécessite de déterminer le débit différentiel entre un événement pluvieux rare et un autre fréquent. Dans le cadre de l'étude hydrologique sur l'oasis d'Wadi Boussemghoun, les débits de pointe ont été estimés à 289,76 m³/s et 155,15 m³/s respectivement pour un aléa centennal et cinquantennal.

La soustraction de ces débits caractéristiques ($\Delta Q = 289,76 \text{ m}^3/\text{s} - 155,15 \text{ m}^3/\text{s} = 134,61 \text{ m}^3/\text{s}$) permet d'établir le débit excédentaire à 134,61 m³/s à retenir par les ouvrages. Une durée moyenne de 30 minutes a ensuite été supposée pour un orage intense afin de pouvoir appliquer la formule de continuité débit-temps-volume et déterminer précisément la capacité volumique requise pour les bassins de rétention.

Le volume peut être approximé à l'aide de la formule :

$$V = \Delta Q * t \quad \text{V-2}$$

Où : t est la durée en secondes.

La conversion en secondes de la durée considéré (30 minutes) donne : $t=30 \times 60=1\ 800$ secondes

Le volume requis est donc : $V=134,61 \text{ m}^3/\text{s} \times 1800 \text{ s}=242,298 \text{ m}^3$

V.5.5 Prise en charge de gestion du volume de rétention

La prise en charge de gestion du volume de rétention repose sur une stratégie de division du volume total de rétention en plusieurs bassins.

Dans le contexte du bassin versant de l'Wadi Boussemghoun, diviser le volume total des eaux de rétention en plusieurs bassins distincts est une stratégie qui vise à maximiser l'efficacité de la gestion des eaux de crue tout en minimisant les impacts environnementaux et sociaux. Cette approche assure une répartition équilibrée de la capacité de rétention sur l'ensemble du bassin versant, ce qui est convaincant pour gérer les débits de pointe et les volumes d'eau lors d'événements pluvieux intenses. Chaque bassin est conçu pour fonctionner à la fois indépendamment et en synergie avec les autres, offrant ainsi une flexibilité et une redondance accrues dans le système de gestion des crues. Cette division favorise également l'intégration écologique et esthétique des bassins dans le paysage local, réduisant les perturbations écologiques et offrant des avantages supplémentaires tels que des habitats pour la faune et des espaces récréatifs pour la communauté.

V.5.6 Considérations relatives au nombre de bassins :

Le dimensionnement des bassins a considéré pour la prise en charge du volume de rétention lors des crues extrêmes, est subordonné au nombre de bassins. Dans le contexte de la présente étude, le nombre choisi est de (08) huit. Le choix de huit bassins est le résultat d'une analyse minutieuse et de la prise en compte des facteurs suivants :

1. Taille du bassin versant et hydrologie : La taille et la topographie du bassin versant de l'Wadi Boussemghoun influencent le nombre de bassins nécessaires pour capter et gérer efficacement les eaux de crue.
2. Rentabilité : Le coût de construction et d'entretien des bassins doit être mis en balance avec les avantages de l'atténuation des inondations.
3. Disponibilité et utilisation des terres : La disponibilité de terres appropriées pour la construction du bassin et les impacts potentiels sur les utilisations existantes des terres sont des considérations cruciales.

Compte tenu du volume de rétention total nécessaire, la stratégie consiste à diviser ce volume entre plusieurs bassins afin de maximiser l'efficacité et de minimiser les impacts environnementaux et sociaux. En divisant le volume total de rétention en huit bassins distincts, nous obtenons une répartition équilibrée et une meilleure gestion des crues.

V.5.7 Calcul du volume pour chaque bassin

Chaque bassin doit être conçu pour gérer un volume correspondant à 1/8 du volumen total de rétention ; soit : $V/8$

Compte tenu du volume de rétention total nécessaire, la stratégie consiste à diviser ce volume entre plusieurs bassins afin de maximiser l'efficacité et de minimiser les impacts environnementaux et sociaux. En divisant le volume total de rétention en huit bassins distincts, nous obtenons une répartition équilibrée et une meilleure gestion des crues.

Chaque bassin doit être conçu pour gérer un volume correspondant à 1/8 du volumen total de rétention ; soit : $V/8$

Le volume total nécessaire est de 242 298 m³. En divisant ce volume par 8, le volume pour chaque bassin sera :

$$V_{Bas\ sin} = V / 8 = (242298 / 8) = 30287.25m^3$$

V.5.8 Dimensionnement de chaque bassin

La conception de bassins de rétention pour la protection contre les inondations dans les régions arides et semi-arides, comme l'oasis d'Wadi Boussemghoun, nécessite une prise en compte attentive des conditions morphométriques, hydrologiques locales et environnementales.

Ainsi, plusieurs considérations techniques sont prises en compte. Ces considérations incluent la topographie de l'Wadi, l'environnement et l'aspect techno-économique. La forme choisie est donc rectangulaire avec une longueur (L_B) qui représente le double de la largeur (W_B). La configuration rectangulaire optimise la surface du bassin pour un stockage efficace de l'eau tout en assurant la stabilité structurelle et la facilité de construction.

Par ailleurs, le rapport de forme longueur/largeur de 2 retenu permet de maximiser l'emprise au sol tout en limitant les coûts de terrassement.

La profondeur (D) est supposée égale à 3 mètres pour chaque bassin. Le choix d'une profondeur de 3 mètres pour les bassins de rétention résulte d'une analyse techno-économique approfondie. Cette dimension offre en effet un compromis optimal entre capacité de stockage et facilité de maintenance.

Des ouvrages plus profonds permettraient certes d'accroître les volumes de rétention mais nécessiteraient des travaux de terrassement et des infrastructures d'exploitation (échelle d'accès, dispositifs de pompage...) plus coûteuses à mettre en œuvre et à entretenir.

À l'inverse, des bassins moins profonds seraient plus économiques à construire mais pourraient présenter un risque de sous-dimensionnement face à des aléas hydrologiques exceptionnels.

Par conséquent, une cote de 3 mètres apparaît comme représentant le meilleur rapport performance /coût, garantissant à la fois une capacité de stockage adaptée aux enjeux de protection tout en favorisant des interventions de maintenance simplifiées et durables dans le temps.

Par conséquent et en tenant compte de ce qui précède, La surface (A_B) requise pour chaque bassin est : $A_B = L_B * W_B$

En conservant une profondeur de 3 mètres pour chaque bassin, la surface de base nécessaire pour chaque bassin est :

$$A_B = L_B * W_B = \frac{V_{Bas\ sin}}{D} = \frac{30287.25}{3} = 10095.75 \text{ m}^2$$

En tenant compte du fait que la longueur est le double de la largeur : $L_B = 2 * W_B$

Les résultats correspondants sont les suivants : $W_B = 70.05 \text{ m}$, $L_B = 2 * W_B = 71.05 * 2 = 142.1 \text{ m}$

V.5.9 Calcul du débit de sortie et déduction du temps de fuite pour chaque bassin :

Lors de la conception de tels ouvrages conçus pour gérer les flux lors des crues dans le but de protéger les éléments constitutifs de l'Oasis d'Wadi Boussemghoun (le Q'sar et la palmeraie avec ses jardins et infrastructures hydrauliques ancestrales), plusieurs paramètres hydrologiques doivent être étudiés avec attention. Le débit de sortie de chaque bassin de rétention qui est un élément capital et revêt une importance déterminante en termes de paramètre hydrologique fondamental pour la régulation des eaux de crue. Il conditionne ainsi l'efficacité de la protection contre les inondations.

Sa détermination permet d'évaluer le débit de fuite, de prévoir les zones d'inondation potentielles, et d'évaluer l'impact du bassin de rétention sur l'environnement et les écosystèmes locaux.

Pour déterminer le débit de sortie, les paramètres suivants sont considérés : Surface de la sortie : 0,5 m², Coefficient de décharge (C) : 0,6 et la Hauteur d'eau moyenne (H) : 2 mètres.

- **Volume de chaque bassin** V_{Bassin} : 30287.25 m³
- **Aire de l'orifice de sortie** A_{orifice} : 0.5 m² pour chaque bassin
- **Coefficient de décharge de l'orifice** C_{orifice} : 0.6
- **Hauteur moyenne d'eau** H : 2 mètres (au début de la vidange)

Le débit de sortie (Q_{sortie}) est calculé à l'aide de l'équation de débit à l'orifice :

$$Q_{\text{sortie}} = C_{\text{orifice}} * A_{\text{orifice}} * \sqrt{2 * g * H}$$

$$g = (9,81 \text{ m/s}^2)$$

Après remplacement des paramètres de l'équation de la décharge par leur valeur, le résultat est

$$\text{comme suit : } Q_{\text{sortie}} = 0.6 * 0.5 * \sqrt{2 * 9.81 * 2} \approx 1.88 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q_{\text{sortie}} \approx 1.88 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Une fois le débit de sortie (Q_{sortie}) déterminé, le temps de fuite (T_{fuite}) peut être déduit à partir de la

$$\text{formule suivante : } T_{\text{fuite}} = Q_{\text{sortie}} * V$$

L'application pour les données du cas du système adopté pour la protection contre les risques d'inondation dans l'Oasis de l'Wadi de Boussemghoun donne la valeur du temps de fuite égale à :

$$T_{fuite} = 1.88 * 30287.25 = 16110.23 \text{ secondes} \approx 4.5 \text{ heures}$$

V.6 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté une analyse détaillée des différentes mesures de protection susceptibles d'être mises en place pour prévenir les risques d'inondation dans l'oasis de Boussemgoun.

Deux grandes catégories de mesures ont été passées en revue : les solutions basées sur la nature et les solutions de génie civil. Concernant les approches naturelles, la restauration des zones humides et la reforestation se sont avérées particulièrement pertinentes pour améliorer la capacité du bassin versant à absorber et ralentir les eaux de crues.

Cependant, dans le contexte des événements pluvieux extrêmes pouvant affecter l'oasis, les techniques de génie civil telles que les murs de soutènement et les bassins de rétention apparaissent comme des solutions complémentaires indispensables pour assurer une protection robuste face aux inondations majeures.

Dans ce contexte une grande partie du chapitre s'est concentrée sur la conception détaillée de bassins de rétention, en déterminant les paramètres hydrologiques clés tels que le débit de pointe, le volume de rétention nécessaire ou les débits de sortie. Une analyse approfondie a permis de choisir le nombre optimal de bassins, leur dimensionnement et leur localisation stratégique dans le bassin versant.

En combinant une approche naturelle et une stratégie de génie civil rationnellement dimensionnée, cette étude a démontré qu'il était possible de protéger efficacement le précieux patrimoine culturel et écologique de l'oasis, tout en renforçant la résilience de ce fragile écosystème oasien face aux aléas climatiques futurs. Cette démarche intégrée apparaît tout à fait transposable à d'autres contextes similaires dans les régions arides et semi-arides d'Algérie.

CONCLUSION GÉNÉRALE

VI. Conclusion Générale.

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire de Master a exploré la problématique de la gestion et de la protection de l'Oasis située dans le bassin versant de Wadi Boussemmghoun. Une oasis saharienne située dans la région d'El-Bayadh, au Nord-Ouest de l'Algérie. L'étude s'est concentrée sur l'analyse des risques d'inondation auxquels est confrontée cette oasis précieuse, en mettant en évidence les défis liés à la préservation de son patrimoine culturel, historique et environnemental.

L'étude a débuté par une exploration du rôle historique et social des oasis sahariennes, soulignant leur importance pour les populations du désert et leur contribution aux échanges commerciaux transsahariens. Elle a ensuite mis en lumière la richesse culturelle et architecturale de l'oasis de Boussemmghoun, avec son Q'sar, sa palmeraie et ses infrastructures hydrauliques ancestrales.

L'analyse morphométrique du bassin de la zone d'étude, a permis de comprendre les caractéristiques physiographiques et hydrologiques de ce système complexe. L'étude a révélé une forme allongée du bassin, une pente moyenne et une faible densité de drainage, favorisant une réponse hydrologique rapide aux précipitations et un risque élevé de débits de pointe importants lors d'événements pluvieux intenses.

L'étude hydrologique a mis en évidence la nécessité d'une gestion efficace des ressources en eau et de la protection contre les risques d'inondation. L'analyse fréquentielle des pluies maximales journalières a permis de déterminer les précipitations caractéristiques pour différentes périodes de retour, tandis que la modélisation hydraulique avec le logiciel HEC-RAS a permis de simuler les surfaces inondées, les profondeurs d'eau et les vitesses d'écoulement pour différentes périodes de retour. Les résultats de la modélisation ont confirmé la vulnérabilité du Q'sar de Boussemmghoun aux inondations, avec un risque accru d'inondation directe pour des événements pluvieux plus rares et plus intenses.

Face aux résultats préoccupants de la modélisation hydraulique, qui révèlent des risques élevés d'inondation menaçant directement le Q'sar et la palmeraie de l'Oasis d'Oued Boussemmghoun, il est impératif de mettre en œuvre des mesures préventives de protection dans les plus brefs délais. La priorité doit être donnée à la construction de murs de soutènement autour du Q'sar, afin de le protéger des crues les plus importantes, ainsi qu'à l'aménagement de bassins de rétention stratégiquement placés pour laminer les débits de pointe.

Par ailleurs, il est essentiel d'encourager la restauration des zones humides et la reforestation à l'échelle du bassin versant, dans le but d'améliorer la capacité d'infiltration et de rétention des sols, réduisant ainsi le ruissellement et atténuant l'intensité des crues. De plus, l'élaboration de plans d'urgence et de systèmes d'alerte précoce, en étroite concertation avec les populations locales, permettra de mieux les préparer et de réduire les impacts en cas d'inondation.

Enfin, une campagne de sensibilisation des communautés riveraines à la gestion durable des ressources en eau et à la protection de l'environnement s'avère primordiale pour garantir l'appropriation et la pérennité des mesures mises en place

Au-delà des actions immédiates, il est nécessaire d'approfondir l'analyse hydrologique de la région en intégrant des données climatiques récentes et des scénarios de changement climatique, afin de mieux comprendre les impacts potentiels sur les risques d'inondation. De même, le développement de modèles de simulation numérique plus précis permettra d'optimiser les mesures de protection et d'évaluer leur efficacité à long terme.

La mise en place de systèmes de surveillance et de suivi sera également primordiale pour évaluer l'efficacité des interventions, adapter les stratégies en fonction des besoins et garantir la durabilité des aménagements. Par ailleurs, il sera essentiel d'étudier attentivement l'impact de ces interventions sur l'écosystème local et la biodiversité, afin de minimiser les impacts négatifs et de maximiser les bénéfices écologiques.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

VII. Références bibliographiques :

- A.J. Mills. (2007). The Oases. In *The Egyptian World* (pp. 77–84). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203820933-12>
- Acheampong, J. N., Gyamfi, C., & Arthur, E. (2023). Impacts of retention basins on downstream flood peak attenuation in the Odaw river basin, Ghana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101364. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2023.101364>
- Ahriz, A. ., Zemmouri, N., & Fezzai, S. (2017). Ksour of the Sahara desert as a great lesson of sustainable urban design in hot desert Oases. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 3(11), 109–118. <https://doi.org/10.7324/IJASRE.2017.32568>
- Ait Saadi, M. H. (2019). *L'urbanisme en milieu aride : environnement et développement durable - Cas des ksour de Boussemghoun et Tiout*. [Université Mohamed Khider – Biskra]. <http://thesis.univ-biskra.dz/4729/>
- Ait Saasi, H., Remini, B., & Farhi, A. (2015). Le ksar de Tiout (Algérie) la maitrise de la gestion de l'eau et de la protection de l'environnement. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782*, 24(January), 243–261. https://www.researchgate.net/profile/Boualem-Remini/publication/341165335_LE_KSAR_DE_TIOUT_ALGERIE_LA_MAITRISE_DE_L_A_GESTION_DE_L'EAU_ET_DE_LA_PROTECTION_DE_L'ENVIRONNEMENT/links/6341e5bcff870c55ce0e7a88/LE-KSAR-DE-TIOUT-ALGERIE-LA-MAITRISE-DE-LA-GESTION-
- Ammour, F., Touil, Y., Kettab, A., & Houli, S. (2010). Measures aimed at ensuring the rational use of water and soil resources and the preservation of oasis potential in the basin of Ouargla, Algeria. *AQUA Mundi, December*. <https://doi.org/10.4409/Am-022-10-0023>
- Amrani, K. (2017). Quelle durabilité pour les oasis du Sahara algérien? *Sesame*, 2(2), 52–57. <https://www.cairn.info/revue-sesame-2017-2-page-52.htm?contenu=article>
- Amrani, K. (2023). Typologie des oasis algériennes : pour une meilleure considération de ces espaces fertiles dans un milieu aride. Cas de la palmeraie de Ouargla. *Vertigo*, 23(1). <https://doi.org/10.4000/VERTIGO.40171>
- Ansari, T. (2016). Foggara a traditional system of groundwater exploitation in south-west. In The International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) (Ed.), *20th Congress of the Asia Pacific Division of the International Association for Hydro*

- Environment Engineering & Research* (pp. 1–27). The International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR). <https://www.iahr.org/library/info?pid=9342>
- APS. (2018). 'El-Bayadh : Ksar Bousmegoun : un chef-d'œuvre qui a besoin d'être restauré et réhabilité. APS. <https://www.aps.dz/ar/regions/61833-2018-10-29-15-13-16>
- Ashkar, F., & Mahdi, S. (2006). Fitting the log-logistic distribution by generalized moments. *Journal of Hydrology*, 328(3–4), 694–703. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2006.01.014>
- Aubriot, O. (2004). Segmenter le temps d'irrigation à l'image de la société locale. In *L'eau, miroir d'une société* (CNRS Edidt, pp. 139–182). CNRS Éditions. <https://doi.org/10.4000/BOOKS.EDITIONSCNRS.41217>
- Bassoud, A., Hamid, K., Abderrahmane, M., & Abdelmalek, B. (2022). Bâtiments construits en adobe salin, durabilité centenaire et confort thermique dans un climat désertique. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(2), 1–9. <https://doi.org/10.26168/AJCE.40.2.36>
- Bates, P. D. (2012). Integrating remote sensing data with flood inundation models: how far have we got? *Hydrological Processes*, 26(16), 2515–2521. <https://doi.org/10.1002/HYP.9374>
- Battesti, V. (2005a). *Jardins au désert , Évolution des pratiques et savoirs oasiens , Jérid tunisien* (IRD Éditio). <https://shs.hal.science/halshs-00004609v2>
- Battesti, V. (2005b). Les acteurs des natures oasiennes et leurs ressources. In *Jardins au désert* (IRD Éditio, pp. 295–336). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/BOOKS.IRDEDITIONS.10178>
- Belaroui, K., Djediai, H., & Megdad, H. (2014). The influence of soil, hydrology, vegetation and climate on desertification in El-Bayadh region (Algeria). *Desalination and Water Treatment*, 52(10–12), 2144–2150. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.782571>
- Benali, M. (2004). *Boussemghoun : escape confrérique et pratiques linguistiques : etude socio anthropologique et linguistique d'une communauté berbérophone au sud ouest algérien* (Dar-el-Gh). Dar el gharb.
- Benaradj, A., Boucherit, H., Benniou, R., & Bouarfa, S. (2021). Systèmes de production dans l'oasis d'Asla (Naama, Algérie). *Revue Des BioRessources*, 10(1), 55–74. https://www.researchgate.net/profile/Bouarfa-Said/publication/351707248_SYSTEMES_DE_PRODUCTION_DANS_L'OASIS_D'ASLA_NAAMA_ALGERIE/links/60a57ca4299bf1061340b994/SYSTEMES-DE-PRODUCTION-DANS-LOASIS-DASLA-NAAMA-

- ALGERIE.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6
- Bencherif, C. (2008). Touggourt ou la dynamique d'une ville aux sept ksour. *Sciences & Technologie. D, Sciences de La Terre*, 28, 9–18. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/58193>
- Benmamar, S., Poulard, C., Berreksi, A., Paquier, A., & Sioussiou, R. (2016). From the hydraulic system of ancestral M'Zab to Sustainable Urban Drainage Systems for the management of floods. *Novatech, October 2008*, 6. <https://core.ac.uk/download/pdf/199282842.pdf>
- Benmoussa, Y., Rezzoug, C., Remini, B., & Belhadj, M. (2015). Ressources et partage de l'eau dans l'oasis de Kenadsa (sud-ouest Algérien); approche historique et constat. *Cinq Continents*, 5(11), 81–92. <https://doi.org/https://nbnresolving.org/urn:nbn:de:0168-ssaoar-453565>
- Benslimane, A. (2021). Les méthodes traditionnelles d'irrigation dans les Oasis d'Algérie Une étude d'anthropologie sociale. *Revue Des Études Culturelles, Linguistiques et Artistiques*, 555–587. <https://democraticac.de/?p=74222>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bouarfa, S., Farhi, Y., Youb, O., Boultf, M., Djoudi, W., & Faci, M. (2022). Spatio-temporal assessment of drought in the semi-arid region of Algerian steppe through index and remote sensing. *Journal of Water and Land Development*, 53, 210–218. <https://doi.org/10.24425/JWLD.2022.140799>
- Bouaziz, A., Hammani, A., Kuper ARTICLE RECHERCHE, M. DE, Article, R., & Kuper, M. (2018). Les oasis en Afrique du Nord : dynamiques territoriales et durabilité des systèmes de production agricole. *Cahiers Agricultures*, 27(1), 14001. <https://doi.org/10.1051/CAGRI/2017063>
- Bouchetouf, S., & Benabdeli, K. (2021). Water resources and food security in Algeria: Diagnosis and new strategy proposition. *African Journal of Agricultural Research*, 17(3), 414–424. <https://doi.org/10.5897/ajar2020.15125>
- Boughton, W., & Droop, O. (2003). Continuous simulation for design flood estimation—a review. *Environmental Modelling & Software*, 18(4), 309–318. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00004-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00004-5)
- Bouhadjar, S. (2016). *Approche sociolinguistique des noms des lieux en Algérie Cas de la*

- toponymie de Boussemghoun* [Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen].
<https://www.semanticscholar.org/paper/Approche-Sociolinguistique-des-Noms-des-Lieux-en-de-Bouhadjar/2344c927c7db5737d91c95a44329e1b612700a42>
- Bourouayah, M. (2019). Ksar Boussemghoun : Émancipation historique et patrimoine parfumé. *Echorouk*. <https://www.echoroukonline.com/التراث-عشق-التاريخ-وبوسمغون>
- Bousnina, M. (2021). Marqueur identitaire et vecteur de transmission : l'architecture en toub, un patrimoine en danger. *Cadernos Do Arquivo Municipal*, 16, 137–152.
<https://doi.org/10.4000/ARQUIVOMUNICIPAL.606>
- Boutadara, Y., Remini, B., & Benmamar, S. (2018). The foggaras of Bouda (Algeria): from drought to flood. *Applied Water Science*, 8(6). <https://doi.org/10.1007/S13201-018-0822-7>
- Boutadara, Y., Remini, B., & Benmamar, S. (2020). Quand les Foggaras d'Adrar se réveillent. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2602-7828*, 41, 149–180.
<https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/125/17/1/115501>
- Boutaghane, H., Boulmaiz, T., Lameche, E. K., Lefkir, A., Hasbaia, M., Abdelbaki, C., Moulahoum, A. W., Keblouti, M., & Bermad, A. (2022). Flood Analysis and Mitigation Strategies in Algeria. In M. S. Tetsuya Sumi, Sameh A. Kantoush (Ed.), *Natural Disaster Science and Mitigation Engineering: DPRI reports* (pp. 95–118). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4_3
- Bouzaher, A. (1990). Création d ' oasis en Algérie. In *CIHEAM: Options Méditerranéennes* (Vol. 328). <https://om.ciheam.org/om/pdf/a11/CI901507.pdf>
- Bradshaw, C. J. A., Sodhi, N. S., Peh, K. S. H., & Brook, B. W. (2007). Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. *Global Change Biology*, 13(11), 2379–2395. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2007.01446.X>
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., & Morbidelli, R. (2009). Antecedent wetness conditions based on ERS scatterometer data. *Journal of Hydrology*, 364(1–2), 73–87.
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2008.10.007>
- Brunet, R., Ferras, R., & Théry, H. (1992). *Les Mots de la géographie : dictionnaire critique* (Pays édit). RECLUS. <http://geoprodig.cnrs.fr/items/show/82494>
- Buggle, J. C. (2020). Growing collectivism: irrigation, group conformity and technological divergence. In *Journal of Economic Growth* (Vol. 25, Issue 2). Springer US.
<https://doi.org/10.1007/s10887-020-09178-3>

- Burmil, S., Daniel, T. C., & Hetherington, J. D. (1999). Human values and perceptions of water in arid landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 44(2–3), 99–109. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(99)00007-9)
- Chaibou, M., & Bonnet, B. (2019). The arid pastoral and oasis farming system. In *Farming Systems and Food Security in Africa* (Vol. 4890, pp. 450–481). NS -
- Charoy, J., & Torrent, H. (1990). Origine, gestion de l'eau, évaluation des aquifères dans les oasis. : *CIHEAM, Options Méditerranéennes*, 11, 229–235. <http://om.ciheam.org/om/pdf/a11/CI901498.pdf>
- Chekar, A. (2012). Boussemghoun fière de ses origines. *L'Expression*, 1. <https://www.djazairess.com/fr/lexpression/160441>
- Choi, H. ;, Jeon, M. ;, Geronimo, F. K. ;, Kim, L.-H. ;, Min, J.-H., Choi, H., Jeon, M., Geronimo, F. K., Kim, L.-H., & Min, J.-H. (2024). Evaluation of the Performance of Nature-Based Constructed Wetlands for Treating Wastewater from Various Land Uses in Korea. *Water* 2024, Vol. 16, Page 381, 16(3), 381. <https://doi.org/10.3390/W16030381>
- Chow, V. Te. (1951). A general formula for hydrologic frequency analysis. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 32(2), 231–237. <https://doi.org/10.1029/TR032I002P00231>
- Chow, V.-T., Maidment, D. R., & Mays, L.-W. (1988). *Applied Hidrology* (McGraw-Hill (ed.); McGraw-Hil). https://priodeep.weebly.com/uploads/6/5/4/9/65495087/applied_hydrology_chow_v_t_maidment_dr_mays_l_w_-_copy.pdf
- Clouet, Y. (1995). Les Oasis. *Mappemonde*, 4, 44–48.
- Coletta, V. R., Pagano, A., Zimmermann, N., Davies, M., Butler, A., Fratino, U., Giordano, R., & Pluchinotta, I. (2024). Socio-hydrological modelling using participatory System Dynamics modelling for enhancing urban flood resilience through Blue-Green Infrastructure. *Journal of Hydrology*, 636, 131248. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.131248>
- Côte, M. (2002). Des oasis aux zones de mise en valeur : l'étonnant renouveau de l'agriculture saharienne. *Méditerranée*, 99(3), 5–14. <https://doi.org/10.3406/MEDIT.2002.3253>
- D'Alberto, L., & Lucianetti, G. (2019). Misinterpretation of the Kenessey method for the determination of the runoff coefficient: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 64(3), 288–296. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1578965>
- Daoudi, A., Lejars, C., & Benouniche, N. (2017). La gouvernance de l'eau souterraine dans le

- Sahara algérien : enjeux, cadre légal et pratiques locales. *Cahiers Agricultures*, 26(3), 10. <https://doi.org/10.1051/CAGRI/2017021>
- Decsi, B., Ács, T., Jolánkai, Z., Kardos, M. K., Koncsos, L., Vári, Á., & Kozma, Z. (2022). From simple to complex – Comparing four modelling tools for quantifying hydrologic ecosystem services. *Ecological Indicators*, 141, 109143. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2022.109143>
- Derdou, A., Bouanani, A., Kaid, N., Mukdasai, K., Algelany, A. M., Ahmad, H., Menni, Y., & Ameer, H. (2022). Groundwater Potentiality Assessment of Ain Sefra Region in Upper Wadi Namous Basin, Algeria Using Integrated Geospatial Approaches. *Sustainability (Switzerland)*, 14(8), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su14084450>
- Derdour, A., Belam, N., & Chebab, W. (2022). Traditional irrigation system and methods of water Harvesting in the Oasis of Sfisifa Ksour mountains -Algeria. *Larhyss Journal*, 2022(49), 17–35.
- Díaz, R. G. (2005). Analysis of Manning coefficient for small-depth flows on vegetated beds. *Hydrological Processes*, 19(16), 3221–3233. <https://doi.org/10.1002/hyp.5820>
- Dingman, S. L. (2015). Chapter 1: Hydrology: Basic concepts and challenges. In *Physical Hydrology* (Waveland P, pp. 3–45). Waveland Press, Inc. https://engrasad.weebly.com/uploads/1/4/2/1/14213514/lec_1-introduction.pdf
- Djebbar, E.-B. (2018). Ksours in Algeria, Lessons of environmental performance for a more sustainable futur. *International Journal of Human Settlements*, 2(3), 32–51.
- Djeradi, M. A. (2012). L’architecture ksourienne (Algérie) entre signes et signifiants. *L’architecture Vernaculaire*, 36–37. http://www.pierreseche.com/AV_2012_ameur_djeradi.htm
- Emamgholizadeh, S., Bateni, S. M., & Nielson, J. R. (2018). Evaluation of different strategies for management of reservoir sedimentation in semi-arid regions: a case study (Dez Reservoir). *Lake and Reservoir Management*, 34(3), 270–282. <https://doi.org/10.1080/10402381.2018.1436624>
- Evelpidou, N., Cartalis, C., Karkani, A., Saitis, G., Philippopoulos, K., & Spyrou, E. (2023). A GIS-Based Assessment of Flood Hazard through Track Records over the 1886–2022 Period in Greece. *Climate 2023, Vol. 11, Page 226*, 11(11), 226. <https://doi.org/10.3390/CLI11110226>
- Fakhoury, E. S., & Alhaddadin, E. R. (2023). *Conservation of Oasis Ecosystems in the MENA Region under Water Stress* (Issue June).

- <https://www.kas.de/documents/264147/264196/Conservation+of+Oasis+Ecosystems+in+the+MENA+Region+under+Water+Stress.pdf/7b28c843-daac-d33e-8f13-b2fb65224232?version=1.1&t=1692805264626>
- Falkenmark, M. (2020). Water resilience and human life support - global outlook for the next half century. *International Journal of Water Resources Development*, 36(2–3), 377–396. <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1693983>
- Feldman, A. (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual* (U. A. C. of Engineers (ed.)). https://books.google.dz/books/about/Hydrologic_Modeling_System_HEC_HMS.html?id=rQo_HAAACAAJ&redir_esc=y
- Fellah, A.-H., Madani, M., Mekkaoui, A., & Bekhada, R. (2014). Modèle de gestion durable de l'eau : Cas de l'oasis de Boukaïs (Bechar, SW algérien). *Revue Des Régions Arides*, 35(3), 1171–1178. https://www.researchgate.net/publication/357736410_Influence_des_eaux_residuairees_de_tannerie_sur_le_poids_de_la_matiere_seche
- Franchini, M., Beylich, A. A., Nabinejad, S., & Schüttrumpf, H. (2023). Flood Risk Management in Arid and Semi-Arid Areas: A Comprehensive Review of Challenges, Needs, and Opportunities. *Water*, 15(17), 3113. <https://doi.org/10.3390/W15173113>
- Freni, G., La Loggia, G., & Notaro, V. (2010). Uncertainty in urban flood damage assessment due to urban drainage modelling and depth-damage curve estimation. *Water Science and Technology*, 61(12), 2979–2993. <https://doi.org/10.2166/WST.2010.177>
- Gosain, A. K., Rao, S., & Basuray, D. (2006). Climate Change Impact Assessment on Hydrology of Indian River Basins. *Current Science*, 90(3), 346–353. <https://doi.org/https://www.jstor.org/stable/24091868>
- Gracier, G., & Bravard, J. (2016). Qu ' est-ce qu ' une oasis ? Réflexions géographiques sur un objet-limite. In C. Z.-C. Gaëlle Tallet (Ed.), *Le Myrte et la Rose* (Issue January, p. 20). Presses Universitaires de Montpellier. https://www.researchgate.net/publication/290435844_Qu'est-ce_qu'une_oasis_Reflexions_geographiques_sur_un_objet-limite
- Gueliane, N. (2020). *Les nouveaux ksours de la vallée du M'Zab (1995-2016)*. (Issue 33) [Équipe Monde arabe Méditerranée|CITERES]. <https://doi.org/10.4000/EMAM.3048>
- Gupta, R. S. (2017). *Hydrology & hydraulic systems*. WAVELAND PRESS, INC.

- https://www.academia.edu/download/78890647/1.2._Hydrology_and_Hydraulic_Systems_Ram_S._Gupta_Waveland_Press_2016_.pdf
- Habi, M., Boutkhal, M., & Hamel, M. (2019). Impact de la dynamique agricole sur la durabilité des périmètres agricoles traditionnels: cas des oasis des monts du Ksour - Algérie. *DigitAR - Revista Digital de Arqueologia, Arquitectura e Artes*, 5, 331–347. https://doi.org/10.14195/2182-844X_5_18
- Hadeid, M. (2009). Politiques de développement régional dans les Hautes Plaines occidentales algériennes : un bilan mitigé. *Développement Durable et Territoires*. <https://doi.org/10.4000/DEVELOPPEMENTDURABLE.8190>
- Hadeid, M., Ghodbani, T., Dari, O., & Bellal, S. A. (2021). Saharan agriculture in the algerian oasis: Limited adaptation to environmental, social and economic changes. *Climate Change and Water Resources in Africa: Perspectives and Solutions Towards an Imminent Water Crisis*, 239–253. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61225-2_11
- Hadidi, A. (2020). *Les oasis de Tiout, Boussemghoun et Moghrar (Sud-Ouest d'Algérie) ressources en eau et développement durable* [Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –]. <https://theses-algerie.com/5907684824983886/these-de-doctorat/universite-abou-bekr-belkaid---tlemcen/les-oasis-de-tiout-boussemghoune-et-moghrar-sud-ouest-d-algerie-ressources-en-eau-et-developpement-durable->
- Hadidi, A., Remini, B., & Habi, M. (2018). Evolution of capture technologies of water in the oases: Moghrar, Tiout and Boussemghoun (Algeria). *Journal of Water and Land Development*, no. 37(1), 57–63. <https://doi.org/10.2478/JWLD-2018-0025>
- Hadidi, A., Remini, B., Habi, M., & Saba, D. (2018). The oasis of Moghrar (southwest Algeria): water resources and management. *Water Supply*, 18(6), 2108–2117. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.027>
- Hamamouche, M. F., Kuper, M., & Lejars, C. (2015). Émancipation des jeunes des oasis du Sahara algérien par le déverrouillage de l'accès à la terre et à l'eau. *Cahiers Agricultures*, 24(6), 412–419. <https://doi.org/10.1684/AGR.2015.0777>
- Haoui, S. (2021). Identification of the traditional irrigation system of pre-colonial oasis networks in the Western Zab (Algeria, Wilaya of Biskra). *Revue Des Mondes Musulmans et de La Méditerranée*, 149, 213–236. <https://doi.org/10.4000/REMMM.16049>
- Hornich, R. (2017). Design, construction and operation of flood retention basins in Styria (Austria).

- Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 6(1), 51–66.
<http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
<http://fiskal.kemenkeu.go.id/ejournal>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055>
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006>
<https://doi.org/10.1>
- Hou, J., Liang, Q., Simons, F., & Hinkelmann, R. (2013). A 2D well-balanced shallow flow model for unstructured grids with novel slope source term treatment. *Advances in Water Resources*, 52, 107–131. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2012.08.003>
- Hunt, W. F., & Doll, B. a. (2000). Urban Waterways Designing Stormwater Wetlands for Small Watersheds. In *North Carolina Cooperative Extension Service* (Issue AG-588-2). North carolina cooperative extension service. <https://pdhacademy.com/wp-content/uploads/2023/08/172-Design-of-Constructed-Stormwater-Wetlands.pdf>
- Idda, S., Bonté, B., Kuper, M., & Mansour, H. (2021). Revealing the Foggara as a Living Irrigation System through an Institutional Analysis: Evidence from Oases in the Algerian Sahara. *International Journal of the Commons*, 15(1), 431–448. <https://doi.org/10.5334/IJC.1128>
- Idda, S., Bonté, B., Mansour, H., Bellal, S. A., & Kuper, M. (2017). Monument historique ou système bien vivant ? Les foggaras des oasis du Touat (Algérie) et leur réalimentation en eau par pompage. *Cahiers Agricultures*, 26(5), 55007. <https://doi.org/10.1051/CAGRI/2017049>
- Idder, T., Idder, A., Cheloufi, H., Benzida, A., Khemis, R., & Moguedet, G. (2013). Overuse of water resources in the Algerian Sahara and its consequences on the environment. A typical case: The oasis of Ouargla (northern Sahara). *Techniques - Sciences - Methodes*, 5, 31–39. <https://doi.org/10.1051/TSM/201305031>
- Idder, T., Idder, A., Tankari, D.-B.-A., Benzida, A., Merabet, S., Negais, H., & Serraye, A. (2014). The oases of the Algerian Sahara, between hydric excess and salinity: Example of the oasis of Ouargla. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 27(2), 155–164. <https://doi.org/10.7202/1025565AR>
- Janty, G. (2013). Capacité d'adaptation des pratiques traditionnelles de gestion et de partage de l'eau dans l'oasis de Figuig (Maroc). *Autrepart*, N° 65(2), 129–150. <https://doi.org/10.3917/AUTR.065.0129>
- Kamal El-Din, A. (1990). Water management in oases ? *Les Systèmes Agricoles Oasiens*, 221–228. <https://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=CI901497>
- Keyvanfar, A., Shafaghat, A., Ismail, N., Mohamad, S., & Ahmad, H. (2021). Multifunctional retention pond for stormwater management: A decision-support model using Analytical

- Network Process (ANP) and Global Sensitivity Analysis (GSA). *Ecological Indicators*, 124(February), 107317. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107317>
- Khadraoui, A. (2007). La Foggara dans les oasis du Touat, Gourrara et Tidikelt (Sahara algérien). *Publication Du Réseau Associatif de Développement Durable Des Oasis*, 5(1), 1689–1699. <https://revistas.ufrj.br/index.php/rce/article/download/1659/1508%0Ahttp://hipatiapress.com/hpjournals/index.php/qre/article/view/1348%5Cnhttp://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09500799708666915%5Cnhttps://mckinseyonsociety.com/downloads/reports/Educa>
- Khan, J. Z., & Zaheer, M. (2022). Hydrological response to changing climate: a case study of large watershed, Xianning, Hubei, China. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 6(2), 141–147. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1775167>
- Khatri, K., Vairavamorthy, K., & Porto, M. (2008). Challenges for urban water supply and sanitation in developing countries. In *Water for a Changing World - Developing Local Knowledge and Capacity* (pp. 93–112). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203878057-12>
- Khodadad, M., Aguilar-Barajas, I., & Khan, A. Z. (2023). Green Infrastructure for Urban Flood Resilience: A Review of Recent Literature on Bibliometrics, Methodologies, and Typologies. *Water* 2023, Vol. 15, Page 523, 15(3), 523. <https://doi.org/10.3390/W15030523>
- Korkmaz, M. (2022). the Use of HEC-RAS Modeling in Flood Risk Analysis. *NWSA Academic Journals*, 17(4), 54–66. <https://doi.org/10.12739/nwsa.2022.17.4.1a0482>
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 575–590. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.4.575.54430>
- Kouzmin, Y. (2008). L'action publique et les réseaux de transport au Sahara algérien, étapes d'une intégration territoriale pour un développement régional. *Colloque International de l'ASRDLF*, 14. <https://shs.hal.science/halshs-00389861>
- Kouzmine, Y. (2012). *Le Sahara algérien : Intégration nationale et développement régional*. L'Harmattan. <http://journals.openedition.org/lectures/9601>
- Labtar, Q., & Belguernin, A. (2021). Traditional house elements in the Sahara “Ksour” Northern Algeria. *Humanization Journal for Researches and Studies*, 12(01), 339–360. <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticlepdf/320/12/1/154183>
- Lea, D., Yeonsu, K., & Hyunuk, A. (2019). Case Study of HEC-RAS 1D–2D Coupling Simulation:

- 2002 Baeksan Flood Event in Korea. *Water* 2019, Vol. 11, Page 2048, 11(10), 2048. <https://doi.org/10.3390/W11102048>
- Leopold, L. (1968). Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use. In *Geological Survey Circular* (Environmen, Vol. 554). United States Department of the Interior. <https://pubs.usgs.gov/circ/1968/0554/report.pdf>
- Lewicki, T. (1988). The Role of the Sahara and Saharians in relationships between north and south. In *General history of Africa, III: Africa from the seventh to the eleventh century* (pp. 276-313,). UNESCO Bibliothèque Numérique. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000077974>
- Ling, H., Xu, H., Fu, J., Fan, Z., & Xu, X. (2013). Suitable oasis scale in a typical continental river basin in an arid region of China: A case study of the Manas River Basin. *Quaternary International*, 286, 116–125. <https://doi.org/10.1016/J.QUAINT.2012.07.027>
- Mabrouk, M., Han, H., Fan, C., Abdrabo, K. I., Shen, G., Saber, M., Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2023). Assessing the effectiveness of nature-based solutions-strengthened urban planning mechanisms in forming flood-resilient cities. *Journal of Environmental Management*, 344, 118260. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118260>
- Madani, S. (2022). An Ingenious Heritage System for Collecting and Distributing Flood Water in the M'zab Valley of Algeria. *Blue Papers*, 1(2), 100–110. <https://doi.org/10.58981/BLUEPAPERS.2022.2.10>
- Madani, T. (2006). Le partage de l'eau dans l'oasis de Figuig (Maroc oriental). *Mélanges de La Casa de Velázquez*, 36–2, 61–81. <https://doi.org/10.4000/MCV.2016>
- Mahrou, I. (2011). Contribution à l'élaboration d'une typologie “umranique” des ksour dans le Gourara. *Insaniyat*, 51–52, 197–219. <https://doi.org/10.4000/INSANIYAT.12766>
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill. <https://www.mhprofessional.com/handbook-of-hydrology-9780070397323-usa>
- Médail, F., & Quézel, P. (2018). Biogéographie de la flore du Sahara. In C. Biotopé (Ed.), *IRD Editions* (IRD). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/BOOKS.IRDEDITIONS.43271>
- Merwade, V., Cook, A., & Coonrod, J. (2008). GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling & Software*, 23(10–11), 1300–1311. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2008.03.005>
- Merzougui, T., Mekkaoui, K. A., & Chebbah, A. L. (2008). Un modèle de gestion intégrée des

- ressources en eau dans une région hyperaride : cas de l' oasis de Béni Abbès , (vallée de la Saoura , Sud Ouest Algérien) Cadre physique de Béni Abbès : Besoins de l' oasis à l' horizon 2020 et bilan d' eau : Synthèse. *13e Congrès Mondial de l'Eau, 1-4 Septembre, Montpellier, France, September, 13.*
https://www.researchgate.net/publication/303862803_Un_modele_de_gestion_integree_des_ressources_en_eau_dans_une_zone_hyperaride_Cas_de_l'oasis_de_Beni_Abbes_Vallee_de_la_Saoura_sud_ouest_algerien/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLC
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands* (WELEY (ed.); Gosselink,).
<https://www.wiley.com/en-be/Wetlands%2C+5th+Edition-p-9781119019787>
- Montanari, A. (2007). What do we mean by 'uncertainty'? The need for a consistent wording about uncertainty assessment in hydrology. *Hydrological Processes, 21*(6), 841–845.
<https://doi.org/10.1002/HYP.6623>
- Montanari, A., & Koutsoyiannis, D. (2012). A blueprint for process-based modeling of uncertain hydrological systems. *Water Resources Research, 48*(9), 15.
<https://doi.org/10.1029/2011WR011412>
- Moulai, A., & Yahaya, A. (2020). *Appui aux acteurs locaux pour un développement rural durable des oasis du sud algérien. Note d' actualité sur les Oasis d' Algérie.*
https://www.raddo.org/content/download/21921/462316/version/1/file/Note_d%27actualité_Algerie_VFFINALE.pdf
- Mourad, G., & Remini, B. (2018). Irsan : the largest foggara of Tidikelt (Algeria) in decline. *Journal of Water Sciences & Environment Technologies, 03*(01), 279–248. <https://doi.org/ISSN: 2508-9250>
- Mourad, G., Remini, B., & Hamoudi, S. (2021). The foggaras of Ezzaouia oasis (Ageria). The water always flows under the sand. *Technology Reports of Kansai University, 63*(2), 7113–7128.
<https://doi.org/ISSN: 04532198>
- Nguyen, H. D., Nguyen, Q. H., Dang, D. K., Van, C. P., Truong, Q. H., Pham, S. D., Bui, Q. T., & Petrisor, A. I. (2024). A novel flood risk management approach based on future climate and land use change scenarios. *Science of The Total Environment, 921*, 171204.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171204>
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. (2010). Hydraulic Modelling – an Introduction:

- Principles, methods and applications. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering* (Vol. 163, Issue 4). UKSpon Press.
<https://www.routledge.com/Hydraulic-Modelling-An-Introduction-Principles-Methods-and-Applications/Novak-Guinot-Jeffrey-Reeve/p/book/9780419250203>
- ONS : Office National des Statistiques. (2022). *Recensement général de la population et de l'habitat 2022*. ONS : Office National Des Statistiques.
<https://www.ons.dz/spip.php?article2824>
- Otmane, T. (2016). *L'eau dans les oasis du sud-ouest algérien: les systèmes de mobilisation ...* - - Google Livres.
https://books.google.dz/books/about/L_eau_dans_les_oasis_du_sud_ouest_alg.html?id=I_9RuwEACAAJ&redir_esc=y
- Otmane, T., & Bendjelid, A. (2018). Les petites exploitations agricoles familiales dans les oasis occidentales du Sahara algérien : état et devenir. *Les Cahiers Des Etudes Sur Le Monde Arabe et La Méditerranée*, 30. <https://doi.org/10.4000/EMAM.1488>
- Otmani, A., Hazzab, A., Atallah, M., Apollonio, C., & Petroselli, A. (2023). Using volunteered geographic information data for flood mapping – Wadi Deffa El Bayadh Algeria. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 11(4), 464–480.
<https://doi.org/10.1080/23249676.2022.2155716>
- Papy, L. (1959). Le déclin des foggaras au Sahara, d'après des travaux récents. *Cahiers d'outre-Mer*, 12(48), 401–406. <https://doi.org/10.3406/caoum.1959.2138>
- Pramana, Y. H., & Harisuseno, D. (2024). Time of concentration estimated of overland flow. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1311(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1311/1/012004>
- Purdue, L., Charbonnier, J., & Khalidi, L. (2017). Living in arid environments from prehistoric times to the present day: approaches to the study of refugia and oases. In APDCA (Ed.), *XXXVIIIe Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibe* (pp. 13–36).
- Rahal Bouziane, H., Boulahbal, O., Blama, A., Mossab, K., Djidda, A., Allam, A., & Tirichine, A. (2010). Les oasis algériennes: richesse mais diversité menacée. *Revue Des Régions Arides*, 24, 76–79.
https://www.researchgate.net/publication/280011449_Les_oasis_algeriennes_richesse_mais_diversite_menacee

- Reed, D. (1999). *Flood Estimation Handbook. Volume 1 Overview*. Centre for Ecology & Hydrology Maclean Building, Benson Lane, Crowmarsh Gifford Wallingford, Oxfordshire OX1 0 8BB UK. https://www.ceh.ac.uk/sites/default/files/2021-11/Flood-Estimation-Handbook-1-Overview-Duncan_Reed.pdf
- Remini, B. (2011). *Les foggaras de la ceinture oasienne du Sahara : passé , présent et futur* [Université Mohamed Khider – Biskra]. http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/24364/1/Boualem_REMINI.pdf
- Remini, B. (2017). La Foggara de Tadmait : sans énergie de l'eau du sous-sol a la surface du sol. *Larhyss Journal*, 32, 301–325. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/viewFile/563/575>
- Remini, B. (2018). The foggaras of the oasis of Ghardaia (Algeria): the sharing of flood waters. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 36, 157–178. <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/125/15/2/76017>
- Remini, B. (2019). The foggaras of Sahara: the sharing of water the work of Osian genius. *Larhyss Journal*, 39(September 2019), 25–57. <https://doi.org/ISSN 1112-3680>,
- Remini, B. (2022). In the Footsteps of the Apostles. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2602-7828*, 52(December 2022), 117–162. <https://doi.org/10.2307/j.ctt9qdsx9.9>
- Remini, B. (2023). When the Foggara Ensures the Water Security of the Oases. *Larhyss Journal*, 2023(53), 219–257. <https://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/4570/881>
- Remini, B., & Achour, B. (2013). Les Foggaras de L ' Ahaggar : disparition d ' un patrimoine hydraulique. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782*, 14(July 2020), 149–159. https://www.researchgate.net/profile/Boualem-Remini/publication/256543975_LES_FOGGARAS_DE_L'AHAGGAR_DISPARIATION_D'UN_PATRIMOINE_HYDRAULIQUE/links/65d4760783fbd35a98050054/LES-FOGGARAS-DE-LAHAGGAR-DISPARIATION-DUN-PATRIMOINE-HYDRAULIQUE.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0
- Remini, B., & Achour, B. (2017). The Foggara of Moghrar (Algeria): An irrigation system millennium. *Journal of Water Sciences & Environment Technologies Cit*, 01(02), 2017–2111. <https://doi.org/ISSN: 2508-9250>
- Remini, B., Achour, B., & Kechad, R. (2010). The foggara in Algeria: A hydraulic world heritage. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 23(2), 105–117. <https://doi.org/10.7202/039903AR>
- Remini, B., Achour, B., Ouled Belkhir, C., & Baba Amar, D. (2012). The Mزاب foggara: an original

- technique for collecting the water rising. *Journal of Water and Land Development*, 16(1), 49–53. <https://doi.org/10.2478/v10025-012-0024-x>
- Remini, B., Achour, B., & Rabah, K. (2015). The Foggara: A Traditional System Of Irrigation In Arid Regions. *GeoScience Engineering*, 60(2), 30–37. <https://doi.org/10.2478/gse-2014-0011>
- Remini, B., Albergel, J., & Achour, B. (2015). The garden foggara of timimoun (Algeria): The decline of hydraulic heritage. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 12(3), 51–57. <https://doi.org/10.3233/AJW-150006>
- Remini, B., & Hareche, M. M. (2021). The water sharing system in the zibans. Part 1: Case of chetma oasis. *Larhyss Journal*, 2021(45), 223–237.
- Remini, B., & Ouled belkhir, C. (2019). Le Systeme ancestral de partage des eaux de crues de L'Oasisde Metlili (Algerie): Un Patrimoine Hydraulique Oublie! *Larhyss Journal*, 40(January), 81–115. <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/125/16/4/109660>
- Remini, B., Rezoug, C., & Achour, B. (2014). The foggara of Kenadsa (Algeria). *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782*, 18, 93–105. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/207>
- Rezzoug, C. (2014). Les techniques traditionnelles de captage et de partage des eaux d'irrigation dans l'Oasis de Béni Ounif (Région de Béchar, Sud-Ouest, Algérie). *Cinq Continents*, 8(9), 16–25. https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/40900/ssoar-cinqcon-2014-9-cherif-Les_techniques_traditionnelles_de_captage.pdf?sequence=1&isAllowed=y&lnkname=ssoar-cinqcon-2014-9-cherif-Les_techniques_traditionnelles_de_captage.pdf
- Rezzoug, C., & Remini, B. (2019). The originality of oasis of Saoura in south-west of Algeria. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 11(1), 92–100. <https://doi.org/10.4314/jfas.v11i1.7>
- Roushangar, K., Moghaddas, M., Ghasempour, R., & Alizadeh, F. (2021). Evaluation of spatial–temporal characteristics of precipitation using discrete maximal overlap wavelet transform and spatial clustering tools. *Hydrology Research*, 52(2), 414–430. <https://doi.org/10.2166/NH.2021.141>
- Saadi, M. H. A., Remini, B., & Farhi, A. (2017). Le Ksar De Boussemghoun: Identification de son patrimoine et perspectives de promotion du tourisme saharien. *Courrier Du Savoir*, 23(October 2022), 55–74. www.boussemghoun.e-monsite.com

- Salhi, A. (2020). Transformations spatiales et dynamiques socio-environnementales de l'oasis de Ouargla. Une analyse des perspectives de développement – Le carnet de l'IRMC. In B. [Italie] : CIHEAM-IAMB (Ed.), *Research and innovation as tools for sustainable agriculture, food and nutrition security* . (pp. 144–156). Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens, ISSN 0253-1542, num. 124. <https://om.ciheam.org/om/pdf/a124/00007814.pdf>
- Santoro, A. (2023). Traditional oases in Northern Africa as multifunctional agroforestry systems: a systematic literature review of the provided Ecosystem Services and of the main vulnerabilities. *Agroforestry Systems*, 97(1), 81–96. <https://doi.org/10.1007/S10457-022-00789-W>
- Scholz, M. (2019). Classifying Adaptive Sustainable Flood Retention Basins. In *Sustainable Water Treatment* (pp. 279–299). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816246-0.00011-2>
- Senoussi, A., Bensania, M., Moulaye, S., & Tell, i N. (2011). La foggara : un système hydraulique multiséculaire en déclin. *Revue Des BioRessources*, 1, 47–54. <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/6754/1/B010107.pdf>
- ShahiriParsa, A., Noori, M., Heydari, M., & Rashidi, M. (2016). Floodplain zoning simulation by using HEC-RAS and CCHE2D models in the Sungai Maka river. *Air, Soil and Water Research*, 9(May), 55–62. <https://doi.org/10.4137/ASWR.S36089>
- Shrestha, A. B. (2012). Structural Measures for Flood Management in the Context of Integrated Water Resources Management. In *Resource Manual on Flash Flood Risk Management* (pp. 78–82).
- Smith, K. (2013). *Environmental hazards : assessing risk and reducing disaster* (Taylors &). Routledge.
- Smith, K., & Ward, R. (1998). Floods: Physical Processes and Human Impacts. In *Book*. WILEY. <https://www.wiley.com/en-us/Floods%3A+Physical+Processes+and+Human+Impacts-p-9780471952480>
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2017.01.006>
- Tomer, M. D. (2014). Watershed Management. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (pp. 306–315). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548->

9.09117-X

- Trousset, P. (1986). Les oasis présahariennes dans l'Antiquité : partage de l'eau et division du temps. *Antiquités Africaines*, 22(1), 163–193. <https://doi.org/10.3406/antaf.1986.1130>
- U.S. Army Corps of Engineers, 2010. (2010). *US Army Corps of Engineers (Corps or USACE) Civil Works SUMMARY Agency Recovery Act Plan. March.*
- Vernet, R., Boulay, S., & Gélard, M.-L. (2013). Sable et préhistoire saharienne. *Curiosa*, 61, 286–303. <https://doi.org/10.4000/TC.7336>
- Viglione, A., Chirico, G. B., Komma, J., Woods, R., Borga, M., & Blöschl, G. (2010). Quantifying space-time dynamics of flood event types. *Journal of Hydrology*, 394(1–2), 213–229. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.05.041>
- World Meteorological Organization (WMO). (2009). *Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*. <https://doi.org/978-926-3101045-9>
- Yahiaoui, A., Touaïbia, B., Bouvier, C., & Dechemi, N. (2011). Watershed flood regime modelling with the Flow-duration-Frequency approach as applied to the oued Mekerra catchment in western Algeria. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 24(2), 103–115. <https://doi.org/10.7202/1006105AR>
- Youcef, A., & Rachedine, I. (2017). *Le tourisme entre le matériel et l'immatériel. Cas de Boussemghoun* [Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem]. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/8175>
- Yuan, D., Wang, H., Wang, C., Yan, C., Xu, L., Zhang, C., Wang, J., & Kou, Y. (2024). Characteristics of Urban Flood Resilience Evolution and Analysis of Influencing Factors: A Case Study of Yingtan City, China. *Water (Switzerland)*, 16(6), 834. <https://doi.org/10.3390/W16060834/S1>
- Zella, L., & Smadhi, D. (2006). Gestion de l'eau dans les oasis algériennes. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782*, 4(2), 149–156. <https://doi.org/P-ISSN 1112-3680>
- Zhou, W., Matsumoto, K., & Sawaki, M. (2024). Potential of traditional domestic rainwater harvesting systems: current trends and future directions. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 23(1), 344–354. <https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2214193>