

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie de l'eau et l'environnement



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Hydraulique urbaine
Domaine : Science et technologie
Filière : Hydraulique
Spécialité : Hydraulique urbaine
Thème

**Etude préparatoire pour la modélisation des nappes
aquifère d'Ain Témouchent**

Présenté Par :

- 1) Melle. BENYOUCEF Hadjer
- 2) Melle. BENDJEBBAR Farah

Devant le jury composé de :

Dr. Guemou. B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr. Nehari. A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. Baghli. N	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دعاء

" قل اعملوا فسيري الله عملكم ورسوله والمؤمنون وستردون

الى عالم الغيب والشهادة فينبئكم بما كنتم تعملون "

سورة التوبة (الآية 105)

الشكر و التقدير

نحمد الله تعالى حمدا طيبا مباركا لقوله تعالى "لئن شكرتم لأزيدنكم" الذي مدنا بالقوة والعزم وأثار لنا الدرب ووفقنا في مهمتنا العلمية.

نتقدم بخالص الشكر، التقدير والاحترام الى الأستاذة "باغلي نوال" جامعة عين تموشنت التي لم تخل علينا بكل ما لديها من معلومات، وعلى كل ما قدمته الينا من نصائح وتوجيهات طيلة إنجاز هذه المذكرة.

بالإضافة الى ذلك نود ان نشكر الدكتور قمو بوعبد الله على قبوله لرئاسة لجنة التحكيم والسيد نحاري عبد الرحمان على قبوله فحص عملنا وعلى كل ما قدموه لنا طيلة مرحلتنا الجامعية.

شكر خاص الى اساتذة قسم هندسة الماء والمحيط على اشرافهم على تعليمنا طيلة المرحلة الجامعية من بينهم الاستاذ محمد بن عيشة، الاستاذة بن شكور حسيبة، الاستاذة برقان الشيخ والاستاذة قويدر بن مية والذي كان المشرف على ترخيصنا.

شكر خاص للاستاذ الفاضل قدور حكيم على نصائحه ومبادرته الطيبة معنا.

الى كل الاساتذة الذين اشرافوا على تعليمنا من بداية مشوارنا الدراسي الى غاية هذه المرحلة.

الى كل من ساهموا في هذا البحث من بعيد أو قريب ولو بتقليد.

جزاكم الله خيرا.

اهداء

لى رمز لقلب ومنبعه وروحه ومعناه اليك يا ابي يا من علمتني العطاء دون انتظار المقابل

يا من زرعني في قلبي اسمى معاني الافاضل

لى الذي اهديته الدنيا بأسرها مكافأة على عطاياها لي الاب العزيز

-اطال الله في عمره-

لى اخي واخواني سندي في الحياة، ولى جميع الإخوة الذي أثنوا ان الاخوة ليست فقط في الرحم

لى كل اساتذة وطلاب محمد العلوم و التكنولوجيا

و خاصة تخصص الري و دفعة الماستر 2023/2022

لى كل من في ذاكرتنا ولم تسعه ورفقتنا، لى كل من تمنى لي النجاح

شكرا لكل من مد لي يد العون في انجاز هذه المذكرة

فراج



اهداء

أشكر الله عز وجل الذي وفقني لهذا ومنحي الصحة والقوة وبخاصة الشجاعة لإتمام هذه الأطلوحة .

أهدي هذا العمل إلى:

- والدي وأمي كل كلمات العالم لا تستطيع أن تعبر عن الحب العميق الذي أكنه لكما، ولا عن الامتنان العميق الذي أؤديه لكما على كل الجهود والتضحيات التي لم نتوقفا عن بذلها من أجل تعليمي ونجاحي ورفاهيتي. من خلال تشجيعكما، وجدت الشجاعة، ومن خلال نقدكما، استطعت تحقيق ذاتي. أأمل أن أكون قد تجاوزت مع الآمال التي وضعتها في أقدام هذا العمل المتواضع لكما كتعبير عن شكري الأبدي ومحبتتي اللائحة التي أتمنى أن يحفظكم الله تعالى ويمنحكما الصحة والسعادة والعمر الطويل حتى تظلان شعلة تنير طريق أبنائكما.
- لأخي وأخواتي على دعمهم المستمر. ليكون هذا العمل مصدر إلهام لكم. تذكروا أن النجاح يكمن دائماً في حماية الجهود وفتحكم الله وإنار دوزكم.
- لحبيبي الصغير ابن اختي محمد نسر حفظه الله ورعاه وإنار دبه .
- لجميع صديقاتي على دعمهن وحننهن وفقهن الله .
- للأساتذة اللطيفين علمنني، أعز شئ في الحياة، على رأسهن الأستاذة جميلة شقاف رشيدية هواري بارك الله فيكن .
- زميلاتي وأخواتي في الله شكراً على دعمكن وصلواتكن الدائمة! الله قد استجاب حبسباني.

هاجر



"La vie trouve son chemin à travers l'eau."

Rachel Carson

Résumé

Les réserves d'eau de la région de la wilaya d'Ain Témouchent se trouvent menacées face à la diminution sensible du niveau des eaux souterraines ces dernières années. Cette diminution est due à la rareté des eaux de pluie, à l'impact de la sécheresse et à l'augmentation des besoins en eau en raison de l'augmentation rapide de la population. Dans ce contexte, cette étude vise à mettre en évidence l'existence d'un changement du niveau piézométrique de la nappe en fonction de la quantité de pluie et son irrégularité dans zone d'étude. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé logiciel QGIS et plusieurs données (quantité des précipitations, niveau de la nappe phréatique, les coordonnées des stations et forages), et méthodes (l'indice de précipitation standardisé SPI, la méthode double cumule, test de Wilcoxon, la loi normale, cumul écart à la moyenne). Les résultats de cette étude ont montré l'existence d'interruptions ces dernières années, se manifestant par une modification des précipitations et l'apparition d'alternances de périodes de sécheresse. Ils sont également montrés l'effet de ce changement sur le niveau des eaux souterraines, qui a été considérablement réduit.

Mots clés : Nappe d'eau souterraine, Précipitation, Les forages, QGIS, Niveau piézométrique

ملخص

تتعرض احتياطات المياه في منطقة ولاية عين تموشنت للتهديد نتيجة لانخفاض ملحوظ في مستوى المياه الجوفية خلال السنوات الأخيرة. يُرجع هذا الانخفاض إلى ندرة هطول الأمطار وتأثير الجفاف وزيادة الاحتياجات المائية بسبب النمو السكاني السريع. في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى إبراز وجود تغير في مستوى الضغط المائي للحوض المائي بناءً على كمية الأمطار وعدم انتظامها في منطقة الدراسة. لتحقيق هذا الهدف، استخدمنا برنامج QGIS ومجموعة متنوعة من البيانات، بما في ذلك كمية الهطول، ومستوى المياه الجوفية، وإحداثيات المحطات والآبار، بالإضافة إلى الأساليب المتبعة مثل مؤشر الهطول المقيس الموحد (SPI)، وطريقة التراكم المزدوج، واختبار ويلكوكسون، وتوزيع الاحتمال الطبيعي، وتراكم الانحراف عن المتوسط. أظهرت نتائج هذه الدراسة وجود انقطاعات خلال السنوات الأخيرة، تتمثل في تغيرات في نمط الهطول وظهور فترات جفاف متبادلة. كما أظهرت تأثير هذا التغير على مستوى المياه الجوفية، الذي تم تقليله بشكل كبير.

الكلمات المفتاحية : الجدول المائي الجوفي، والهطول، والآبار، و QGIS، ومستوى الضغط المائي.

Abstract

The water reserves in the Ain Témouchent region of the province are being threatened by a significant decrease in groundwater levels in recent years. This decrease is attributed to the scarcity of rainfall, the impact of drought, and the increasing water demand due to rapid population growth. In this context, this study aims to highlight the changes in the piezometric level of the aquifer in relation to the quantity and irregularity of rainfall in the study area. To achieve this objective, we used the QGIS software along with various data sets (precipitation quantity, groundwater level, station and well coordinates) and methods (Standardized Precipitation Index, double cumulative method, Wilcoxon test, normal distribution, and cumulative deviation from the mean). The results of this study have revealed interruptions in recent years, characterized by alterations in precipitation patterns and the occurrence of alternating dry periods. They have also demonstrated the significant impact of these changes on groundwater levels, which have been considerably reduced.

The keywords: Groundwater table, Precipitation, Wells, QGIS, Piezometric level.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Synthèse Bibliographie	
I.1. Introduction	3
I.2. L'aquifère et la nappe:	3
I.2.1. Les grands types d'aquifères	5
I.2.1.1. Les aquifères de roches sédimentaires	5
I.2.1.2. Les aquifères alluviaux	5
I.2.1.3. Les aquifères de roches cristallines.....	5
I.2.2. Propriété physique de milieu aquifère.....	6
I.2.3. Les types des nappes	6
I.2.3.1. Les nappes libres	6
I.2.3.2. Les nappes captives.....	6
I.2.3.3. Les nappes semi-captives.....	7
I.3. La nappe et le forage	7
I.3.1. Le forage d'eau	7
I.3.2. Type de forage.....	8
I.3.2.1. Forage artésien	8
I.3.2.2. Forage de puits profonds.....	9
I.3.2.3. Forage de puits à puisard	10
I.3.2.4. Forage de puits d'irrigation	10
I.3.2.5. Forage de puits municipaux	11
I.4. La géologie des nappes souterraines	11
I.4.1. La composition	11
I.4.2. La structure.....	12
I.4.3. L'écoulement	12

I.4.4.	L'interaction avec leur environnement.....	12
I.5.	Qualité des eaux souterraines	12
I.5.1.	Des processus géologique du terrain	13
I.5.2.	Des processus physiques:	13
I.5.3.	Des processus chimiques.....	13
I.5.4.	Des paramètres physico-chimiques.....	13
I.5.5.	Des processus biologiques	13
I.5.6.	Des facteurs naturels	13
I.5.7.	Les activités humaines	13
I.6.	Les impacts des eaux souterraines.....	14
I.6.1.	L'impact sur l'environnement.....	14
I.6.2.	L'impact sur les paramètres hydrodynamiques de la nappe souterraine sous-jacente – aspects quantitatifs	14
I.6.3.	Impact sur la qualité des eaux souterraines	14
I.7.	Les eaux souterraines en Algérie.....	14
I.7.1.	Elément de géographie et d'hydrographie de l'Algérie	15
I.7.2.	La gestion des eaux souterraines en Algérie	16
I.7.2.1.	Le niveau national:.....	16
I.7.2.2.	Le niveau régional.....	17
I.7.2.3.	Le niveau local.....	18
I.7.3.	Législation sur les eaux souterraines en Algérie	19
I.8.	Ressources souterraines en Algérie	20
I.8.1.	Les nappes en Algérie	20
I.9.	Conclusion.....	21
Chapitre II : Les eaux souterrains d'Ain Témouchent		
II.1.	Introduction	22
II.2.	Localisation et géographie de la wilaya d'Ain Témouchent.....	22

II.3.	Le relief de la wilaya Ain Témouchent	23
II.4.	Cadre géologique.....	24
II.5.	Aperçu hydrogéologique-Description sommaire des aquifères	25
II.5.1.	Aquifère des calcaires du miocène supérieur	25
II.5.2.	Aquifère de l'oligo-miocène	25
II.5.3.	Aquifère des grés et sables du pliocène.....	25
II.5.4.	Aquifère des alluvions du pléistocène	25
II.5.5.	Aquifère des sables	26
II.5.6.	Aquifère des roches volcaniques	26
II.6.	Utilisations des eaux souterraines	26
II.7.	Les ressources souterraines d'Ain Témouchent.....	26
II.7.1.	La Basse vallée de la Tafna	26
II.7.2.	Le Plateau d'Ain Temouchent.....	27
II.7.3.	Le Système aquifère de l'Oued Djelloul	27
II.7.4.	La nappe de Bou Zedjar.....	27
II.7.5.	L'aquifère située entre la Plaine d'Ain Témouchent et la Tafna.....	27
II.7.6.	La nappe de la Plaine de la M'Léta	28
II.7.7.	Le système aquifère des Monts du Tessala	28
II.8.	Les sources d'eau souterraine à Ain Témouchent	28
II.8.1.	Des puits, des forages et leur équipement	28
II.9.	Les principaux défis liés à l'utilisation des eaux souterraines	29
II.9.1.	La pollution des eaux souterraines	30
II.9.1.1.	Les types des pollutions	30
II.9.1.2.	Les conséquences de la pollution des eaux souterraines.....	30
II.9.2.	La surexploitation des eaux souterraines.....	31
II.9.2.1.	L'impact de la surexploitation des eaux souterraines.....	31
II.9.3.	La sécheresse	32

II.9.3.1.	Les types de sécheresse.....	32
II.9.3.2.	L'effet de sécheresse sur le niveau de la nappe.....	33
II.9.4.	La variabilité des précipitations.....	33
II.9.4.1.	Les facteurs qui influence La variabilité des précipitations.....	34
II.9.4.2.	L'impact de la variabilité des précipitations.....	35
II.10.	Conclusion.....	36
Chapitre III : Système information géographique(QGIS)		
III.1.	Introduction aux SIG	37
III.2.	L'histoire des SIG	37
III.3.	Concepts fondamentaux des SIG	38
III.3.1.	Définition des SIG	38
III.3.2.	Les différents types de SIG	39
III.3.2.1.	SIG vectoriels.....	39
III.3.2.2.	SIG raster	40
III.3.2.3.	SIG Web.....	41
III.3.3.	Les différents composants d'un SIG	41
III.3.3.1.	Bases de données	42
III.3.3.2.	Logiciels.....	42
III.3.3.3.	Outils de visualisation de données	42
III.3.3.4.	Matériel.....	42
III.3.4.	Les applications courantes des SIG dans divers domaines.....	42
III.3.4.1.	Urbanisme	43
III.3.4.2.	Environnement.....	43
III.3.4.3.	Planification des ressources	43
III.3.4.4.	Géo-marketing	43
III.3.4.5.	Gestion des catastrophes	44
III.3.5.	Fonctionnalités des SIG	44

III.3.5.1.	Acquisition de données géographiques.....	45
III.3.5.2.	Gestion et stockage de données géographiques :.....	45
III.3.5.3.	Analyse de données géographiques	45
III.3.5.4.	Restitution de données géographiques.....	45
III.3.6.	La tendance d'un SIG	45
III.3.6.1.	Des analyses géospatiales avancées.....	45
III.3.6.2.	Une analyse rapide et efficace des données massives	46
III.3.6.3.	Le SIG en temps réel.....	46
III.3.6.4.	S'adapter à la mobilité.....	46
III.3.6.5.	Un SIG plus convivial.....	46
III.3.7.	Les logiciels SIG les plus populaires.....	46
III.4.	Présentation de QGIS	48
III.4.1.	Définition.....	48
III.4.2.	Historique	49
III.4.3.	Objectifs généraux de QGIS.....	49
III.4.3.1.	Saisie et stockage numérique des données spatiales.....	50
III.4.3.2.	Structuration de l'information.....	50
III.4.3.3.	Calculs spatiaux et géométriques.....	50
III.4.3.4.	Gestion et traitement des collections d'objets	50
III.4.3.5.	Gestion administrative et partage de données entre utilisateurs	50
III.4.3.6.	Analyse spatiale	51
III.4.3.7.	Traitement d'images	51
III.4.3.8.	Simulation et modélisation	51
III.4.3.9.	Intégration de données externes.....	51
III.4.3.10.	Gestion des couches de données	51
III.4.4.	Les avantages de QGIS.....	51
III.4.4.1.	Coût.....	52

III.4.4.2.	Flexibilité	52
III.4.4.3.	Compatibilité.....	52
III.4.4.4.	Puissance d'analyse	52
III.4.4.5.	Facilité d'utilisation.....	53
III.4.5.	Les fonctionnalités de QGIS.....	53
III.4.5.1.	Visualiser des données	53
III.4.5.2.	Parcourir les données et créer des cartes.....	53
III.4.5.3.	Créer, éditer, gérer et exporter des données.....	53
III.4.5.4.	Analyser des données.....	53
III.4.5.5.	Publier des cartes sur Internet	54
III.4.5.6.	Étendre les fonctionnalités de QGIS à l'aide d'extensions.....	54
III.5.	Interface de QGIS.....	54
III.6.	Conclusion.....	58

Chapitre IV : Modélisation de la nappe d'Ain Témouchent par le logiciel QGIS

IV.1.	Introduction	59
IV.2.	Outils et méthodologie	59
IV.2.1.	Les outils de travail.....	59
IV.2.2.	Disponibilité et traitement des données.....	61
IV.2.2.1.	Choix des forages	61
IV.2.2.2.	Choix des stations	62
IV.3.	Organigramme Méthodologie de travail	63
IV.3.1.	Description de l'Organigramme	64
IV.3.1.1.	Collecte de données	64
IV.3.1.2.	La détermination du système de coordonnées	64
IV.3.1.3.	Conversion des coordonnées en UTM WGS84.....	64
IV.3.1.4.	Découpage Wilaya et communes.....	65
IV.3.1.5.	Création des couches	66

IV.3.1.6.	Contrôle de qualité des positions de forages et stations :	69
IV.3.1.7.	Carte d'analyse	69
IV.3.2.	Les stations de choix :	70
IV.4.	Conclusion.....	70
Chapitre V : Etude de la nappe d'Ain Témouchent		
V.1.	Vérification de l'homogénéité des stations pluviométrique.....	71
V.1.1.	La méthode des doubles cumuls	71
V.1.2.	La loi normale.....	71
V.1.3.	Test WILCOXON.....	72
V.1.4.	Les indices climatiques.....	73
V.1.5.	L'indice de précipitations standardisé (SPI).....	73
V.2.	Application, Résultats et discussion.....	74
V.2.1.	Vérification visuelle des données	74
V.2.2.	Etude de l'homogénéité	75
V.2.2.1.	Test de WILCOXON	75
V.2.2.2.	Test d'homogénéité de station de Hammam Bouhdjar, Tamazoura et Aoubellil par apport à la station d'Ain Témouchent.....	75
V.2.3.	Evolution pluviométrique	77
V.2.4.	Evolution des indices climatique	79
V.2.4.1.	Méthode cumuls des écarts à la moyenne.....	79
V.2.4.2.	Variation de l'indice de précipitations standardisé (SPI).....	83
V.2.5.	Evolution du niveau piézométrique de la nappe d'Ain Témouchent	86
	Conclusion générale.....	88

Liste des figures :

Figure 1:Zone saturée et non saturée de l'aquifère	3
Figure 2:la nappe d'eau souterraine	4
Figure 3:Différent types d'aquifères	5
Figure 4:La nappe libre et captive	7
Figure 5:Le forage d'eau	8
Figure 6:Forage de puits artésien.....	9
Figure 7:Forage de puits profonds.....	9
Figure 8:Le forage de puits à puisard	10
Figure 9:Le forage de puits d'irrigation	10
Figure 10:Schéma de forage de puits municipaux.....	11
Figure 11:Situation générale de la wilaya Ain Témouchent	23
Figure 12:Les différents types de SIG	39
Figure 13:les données vectorielles	40
Figure 14:les données raster	40
Figure 15: Les composants d'un SIG	41
Figure 16:Les domaines d'application de SIG	43
Figure 17: Les fonctionnalités d'un SIG	44
Figure 18:Les logiciels SIG payants.....	47
Figure 19:Les logiciels SIG gratuits	47
Figure 20:Interface de QGIS avec Google road et Google traffic.....	49
Figure 21:Les avantages de QGIS	52
Figure 22:interface de QGIS.....	55
Figure 23: Spécifications de l'appareil acer	59
Figure 24: Spécifications de Windows	59
Figure 25: Propriétés de logiciel QGIS	60
Figure 26:Propriétés de l'Excel.....	60
Figure 27:Fichiers d'Excel de travail	61
Figure 28:Organigramme de la méthodologie de travail.....	63

Figure 29: Conversion des coordonnées lambert en UTM WGS84 par QGIS	65
Figure 30:Découpage de la wilaya d'Ain Témouchent et ces communes	66
Figure 31:La couche de base de la Wilaya d'Ain Témouchent	67
Figure 32:La couche de stations pluviométrie dans la Wilaya d'Ain Témouchent	67
Figure 33:La couche de forages dans la wilaya d'Ain Témouchent	68
Figure 34:La couche de base avec les forages et les stations	68
Figure 35 : la carte d'Ain Témouchent avec les stations pluviométrie de notre choix	70
Figure 36 : Courbe de la méthode de double cumule de la station de Hamam bouhdjar en fonction de la station d'Ain Témouchent	76
Figure 37 : Courbe de la méthode de double cumule de la station de Tamazoura en fonction de la station d'Ain Témouchent.	76
Figure 38 : Courbe de la méthode de double cumule de la station d'Aoubellil en fonction de la station d'Ain Témouchent	77
Figure 39 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles des quatre stations retenues (1981-2021).....	78
Figure 40:Evolution des précipitations moyennes annuelles des quatre stations retenues (1981-2021).....	79
Figure 41:Cumuls écart à la moyenne de la série pluviométrique de la station d'Ain Témouchen	80
Figure 42:Cumuls écart à la moyenne de la série pluviométrique de la station Hammam Bouhdjar	81
Figure 43:Cumuls écart à la moyenne de la série pluviométrique de la station Tamazoura	82
Figure 44:Cumuls écart à la moyenne de la série pluviométrique de la station Aoubellil ..	83
Figure 45:Valeurs des SPI (Station Hammam Bouhdjar, Tamazoura)	84
Figure 46:Valeurs des SPI (Station Aoubelil, Ain Témouchent)	85

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Les ressources globales en eaux souterraines du pays.	20
Tableau 2 : caractéristiques de quelques forages	62
Tableau 3 caractéristiques des stations	62
Tableau 4:Classement de la sévérité des sécheresses suivant l'indice de précipitation standardisé	74
Tableau 5: Résultat de test de WILCOXON pour la station d'Ain Témouchent.....	75
Tableau 6:Répartition des valeurs du SPI pour les quatre stations.....	83

Liste des équations

Équation 1	71
Équation 2	72
Équation 3	72
Équation 4	72
Équation 5	73
Équation 6	73
Équation 7	73
Équation 8	74

Liste des acronymes

PVC: polychlorure de vinyle

PH: potentiel hydrogène

ONRE: Office National des Ressources en Eau

MRE: Ministère des Ressources en Eau

ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

AGIRE: Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau

ABH: Agence de Bassins Hydrographique

ADE: Algérie des Eaux

ONID: Office National de l'Irrigation et du Drainage

ABH: Agence de Bassin Hydrographique

DRE: Direction des Ressources en Eau

AEP :Alimentation en eau potable

R.S: Résidus Solubles

PMH: Pompage Manuel d'Eau en Milieu Rural

SIG : Système d'information géographique

3D: Troisième dimension

GPS: Global Positioning System

IoT: Internet of Things

QGIS: Quantum Geographic Information System

GNU: GNU's Not Unix

GPL: General Public License

ArcGIS : Environmental Systems Research Institute

ESRI: Environmental Systems Research Institute

OSGeo: Open Source Geospatial FoundationOrfeo

GRASS: Geographic Resources Analysis Support System

GDAL: Geospatial Data Abstraction Library

LIDAR: Light Detection and Ranging

SAGA: System for Automated Geoscientific Analyses

TauDEM : Terrain Analysis Using Digital Elevation Models

GéoJSON: (JavaScript Object Notation

CSV: Comma-Separated Values

WFS: Web Feature Service

WMS: Web Map Service

HTML: HyperText Markup Language

PC: Personal Computer

RAM: Random Access Memory

UTM: Universal Transverse Mercator

WGS84: World Geodetic System 1984

Ip: L'indice de pluviosité

Ipm : Ecart proportionnel à la moyenne

SPI : Indice de précipitations standardisé

IMP : Ecarts proportionnels à la moyenne des précipitations

IMPC : Cumuls des écarts proportionnels à la moyenne des précipitations

GR: Geographical Resources

SWAT: Soil and Water Assessment Tool

Introduction Générale

Introduction générale

A l'échelle du globe, les ressources en eau potable sont principalement composées de 70% d'eaux de surface (glaciers, lacs et rivières) et de 30% d'eaux souterraines (Gleick, 1996). Comparées aux eaux de surface, les eaux souterraines sont moins exposées aux pollutions d'origine humaine et bénéficient généralement d'une meilleure qualité. Cependant, les périodes de sécheresse qui ont sévèrement touché de nombreuses régions du monde au cours de la seconde moitié du XXe siècle ont souligné la vulnérabilité des réserves d'eau souterraine et de surface dans les zones semi-arides et arides.

L'Algérie est une région particulièrement vulnérable aux impacts et aux changements climatiques au cours du XXIe siècle. Au cours du XXe siècle, le nord de l'Algérie a connu une diminution de la pluviométrie annuelle, ce qui a entraîné une variabilité à la baisse. Cette tendance s'est accentuée à partir des années 1980 et a eu des conséquences significatives sur les ressources en eau, à la fois superficielles et souterraines.[1]

En Algérie, la rareté et l'imprévisibilité croissante des précipitations suscitent une préoccupation grandissante. Cette situation résulte de la dégradation des ressources naturelles due à l'action humaine et aux conditions climatiques rigoureuses. Ces facteurs menacent non seulement les agglomérations, mais aussi les terres agricoles et les infrastructures d'irrigation, en particulier dans la région d'Ain Témouchent. La diminution des précipitations compromet l'approvisionnement en eau nécessaire à ces secteurs vitaux, mettant ainsi en péril la sécurité alimentaire et le développement économique de la région.[2]

La région d'Ain Témouchent est confrontée à d'énormes difficultés alliant une faible pluviosité et une répartition inégale des précipitations.

La nappe d'Ain Témouchent, située dans la région d'Ain Témouchent en Algérie, revêt une importance cruciale en tant que source d'eau pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation agricole et les activités industrielles de la région. Cependant, cette nappe est soumise à des variations saisonnières et interannuelles des précipitations, ce qui entraîne des fluctuations directes de son niveau d'eau et de sa capacité de recharge. Au fil des dernières décennies, la nappe a été gravement impactée par de longues périodes de

sécheresse sévère, conduisant par conséquent à un assèchement partiel ou total de certaines parties de la nappe.

La surexploitation des eaux souterraines dans la région d'Ain Témouchent, résultant de la pression démographique croissante et des activités agropastorales, a aggravé la diminution des niveaux de la nappe. Dans la région d'Ain Témouchent, une gestion efficace, à la fois qualitative et quantitative, des ressources en eaux souterraines est indispensable pour assurer leur durabilité

Dans ce contexte, ce travail se concentre spécifiquement sur l'analyse de l'influence des précipitations sur l'évolution du niveau piézométrique de la nappe d'Ain Témouchent

La méthodologie adoptée dans cette étude se penche principalement sur la détection des moments de rupture au sein des séries annuelles de précipitations sélectionnées. Une fois ces ruptures identifiées, nous procédons à l'analyse du changement climatique et de l'évolution du climat en utilisant des calculs et en suivant divers indices climatiques. Enfin, nous comparons les résultats obtenus avec les variations observées dans la nappe

Ce travail, divisé en cinq parties :

✚ La première partie où s'agit d'une synthèse bibliographique concernant les notions de la nappe, l'aquifère, le forage, la géologie des nappes, la qualité des eaux souterraines, les impacts des eaux souterraines, enfin les eaux souterraines en Algérie.

✚ Dans la deuxième partie, la région d'Ain Témouchent sera présentée dans le cadre des eaux souterraines, le cadre géologique tout en relevant les principaux défis liés à l'utilisation des eaux souterraines et ses impacts.

✚ La troisième partie consiste à définir le Système d'information géographique(QGIS).

✚ Dans la quatrième partie sont définis les outils et la méthodologie de travail pour la modélisation de la nappe d'Ain Témouchent par le logiciel QGIS.

✚ La dernière partie, nous définissons les méthodes statistiques utilisées pour la détection des ruptures des séries pluviométriques agrémentées d'interprétation des résultats obtenus.

Chapitre I: Synthèse Bibliographique



I.1. Introduction

Les eaux souterraines proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol à travers les pores et les fissures de la roche du sous-sol sous la force de la gravité. Ainsi, l'eau percole de plus en plus profondément jusqu'à ce qu'elle rencontre une couche imperméable, L'eau est stockée dans des zones appelées aquifères, composées de roches poreuses et/ou fracturées. Elles s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant un aquifère, occupant tout ou partie de l'aquifère et forment une nappe.[3]

La circulation de l'eau dans les interstices du sous-sol est en général très lente. Ces faibles vitesses d'écoulement engendrent une forte inertie des eaux souterraines qui se traduit aussi bien sur la quantité que sur la qualité des eaux contenues dans les nappes.[3]

I.2. L'aquifère et la nappe

Un aquifère est une formation géologique poreuse ou fracturée, un réservoir, susceptible de contenir ou contenant une nappe d'eau souterraine.[4]

Dans la zone non saturée de l'aquifère, dans la partie supérieure du terrain, où les interstices contiennent également de l'air, l'eau n'existe que sous forme d'humidité. Dans la zone saturée d'un aquifère, tous les vides disponibles (fissures, sédiments ou pores de roches) sont occupés par de l'eau[4] (*Figure1*).

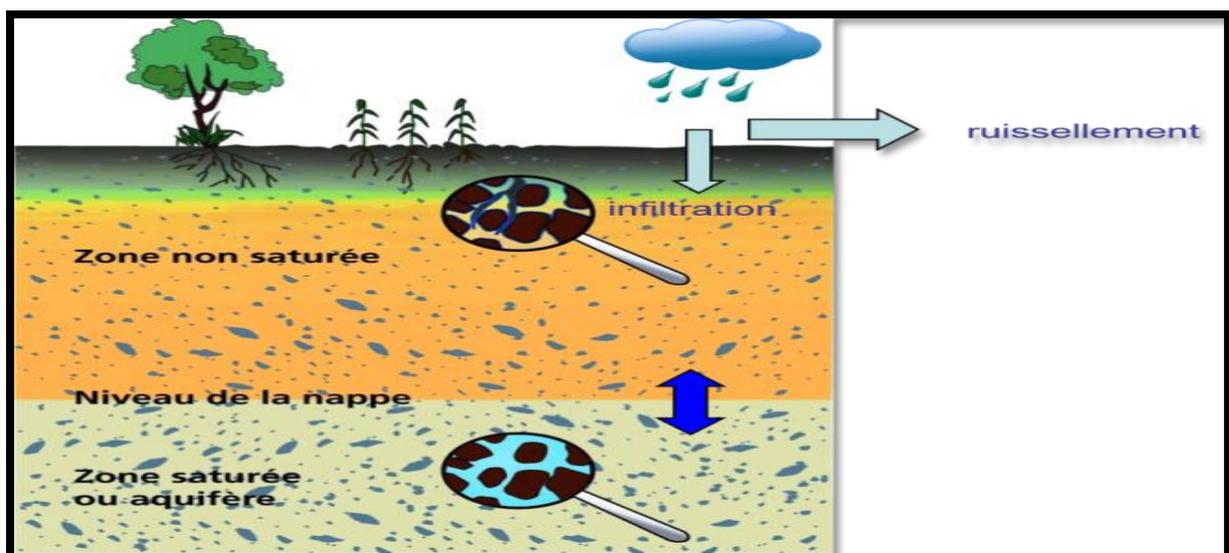


Figure 1: Zone saturée et non saturée de l'aquifère[5]

La profondeur de l'aquifère est variable : le plus profond se trouve à plusieurs centaines de mètres sous la surface.[4]

Donc la nappe est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, elle est limitée en bas par une couche imperméable appelée substratum, la surface entre la zone non saturée et la zone saturée caractérise la surface de la nappe, aussi appelée le toit de la nappe.[4]

Le niveau de la nappe (niveau piézométrique) correspond à l'altitude de la surface de la nappe. Ce niveau piézométrique varie naturellement tout au long de l'année au fur et à mesure que la pluie recharge la nappe phréatique (c'est ce qu'on appelle le battement de la nappe phréatique). Il atteint généralement son niveau le plus élevé (niveau des hautes eaux) au printemps et son niveau le plus bas en fin d'été [4] (*Figure2*).

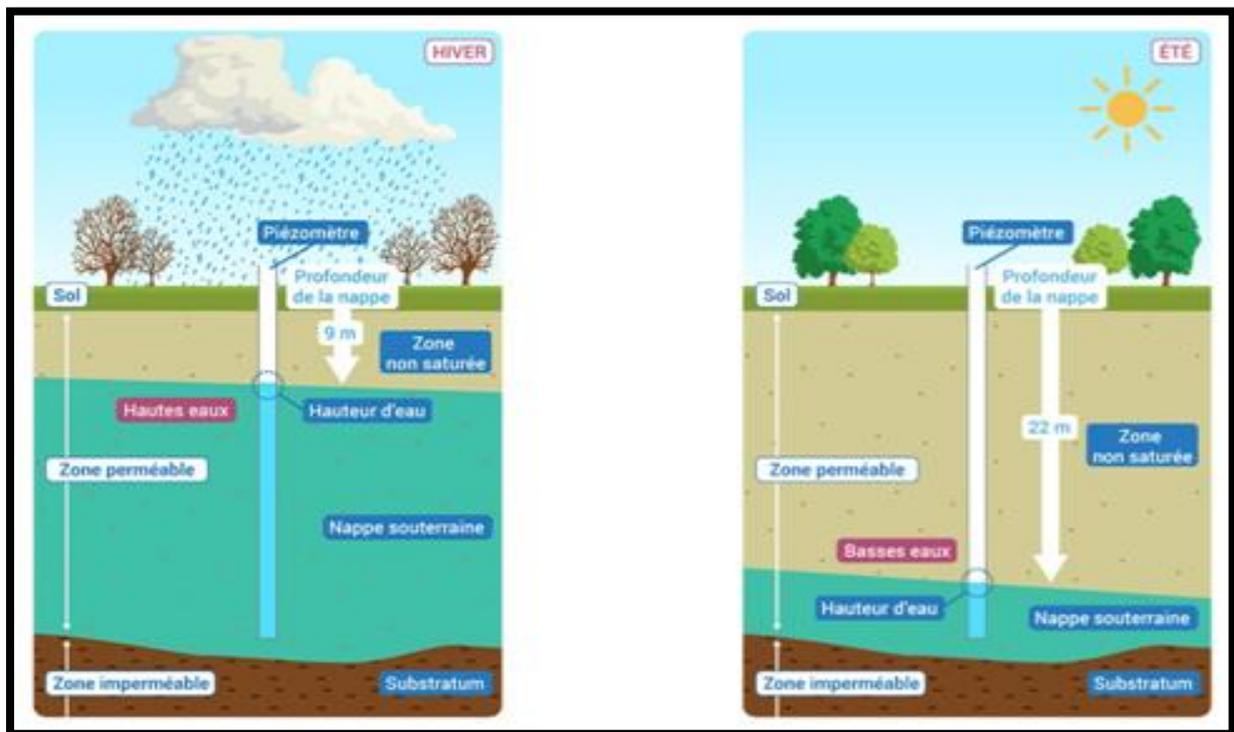


Figure 2: la nappe d'eau souterraine[6]

La nappe phréatique est le niveau d'eau qui se trouve près de la surface. Leur faible profondeur facilite les activités humaines.[4]

I.2.1. Les grands types d'aquifères

Il existe trois grandes familles d'aquifères:

I.2.1.1. Les aquifères de roches sédimentaires

Les aquifères de roches sédimentaires sont composés de calcaires, sables, grès, craie. Ils caractérisent les dépôts en couches dans les grands bassins actuels.[7]

I.2.1.2. Les aquifères alluviaux

Les aquifères alluviaux sont constitués de matériaux déposés dans les vallées par les cours d'eau. Sable et gravier pris en sandwich entre du limon fin. Ces aquifères sont vulnérables aux eaux de surface et servent souvent de relais pour de grands nappes libres qui s'écoulent naturellement dans les points bas, qui sont les vallées.[7]

I.2.1.3. Les aquifères de roches cristallines

Les aquifères de roches cristallines (granite, gneiss,...) et volcaniques (laves, cendres) stockent l'eau dans les fissures et les zones altérées, Ils protègent de petits nappes.

Cependant, il n'existe pas de classification unique et précise des différents types d'aquifères, et l'illustration suivante présente des contextes aquifères variés [7] (*Figure3*).

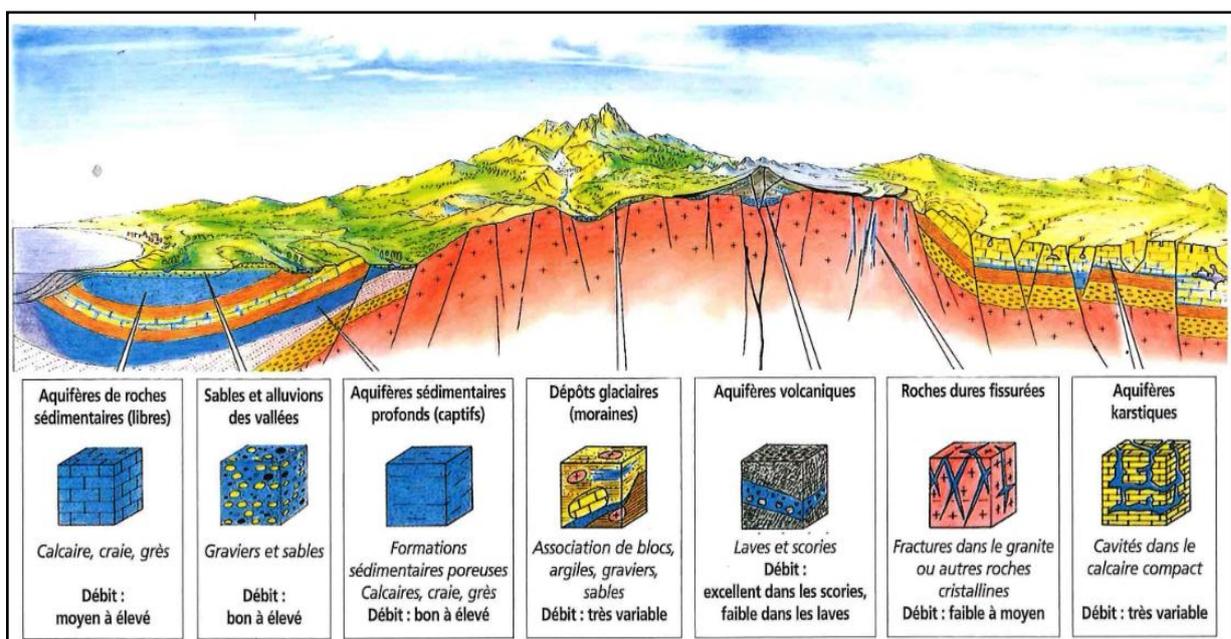


Figure 3: Différent types d'aquifères[8]

I.2.2. Propriété physique de milieu aquifère

Les propriétés physiques de milieu aquifère dépendent [9]:

- La masse volumique
- Le poids volumique
- La porosité
- L'indice des vides
- Le teneur d'eau
- Le degré de saturation
- La granulométrie
- La perméabilité

I.2.3. Les types des nappes

Les types de nappes peuvent également être classés selon les roches-magasins et selon la nature du réservoir.

I.2.3.1. Les nappes libres

Les nappes libres sont constituées de roches poreuses telles que le sable, la craie et le calcaire qui se sont déposées en couches épaisses dans le sous-sol perméable. Elles sont appelées nappes "libres" car elles sont les premières à être rencontrées dans ce type de sous-sol. La nappe phréatique peu profonde en est atteignable par les puits et les forages privés. La hauteur de la surface piézométrique de cette nappe peut être affectée par les conditions climatiques et la recharge de la nappe par les précipitations (*Figure 4*).[10]

I.2.3.2. Les nappes captives

La formation aquifère est surmontée d'une couche imperméable. Son niveau piézométrique se stabilise régulièrement au-dessus de la couche imperméable qui la recouvre. Dans certaines situations, ces nappes captives peuvent être soumises à des phénomènes d'artésianisme, qui provoquent un jaillissement naturel de l'eau à la surface ou lors d'un forage en raison de la pression. Dans ce cas, elles sont appelées des nappes artésiennes (*Figure 4*).[10]

I.2.3.3. Les nappes semi-captives

La nappe semi-captive est utilisée lorsque l'aquifère est surmonté d'une couche de plus faible perméabilité ou semi-perméable.[10]

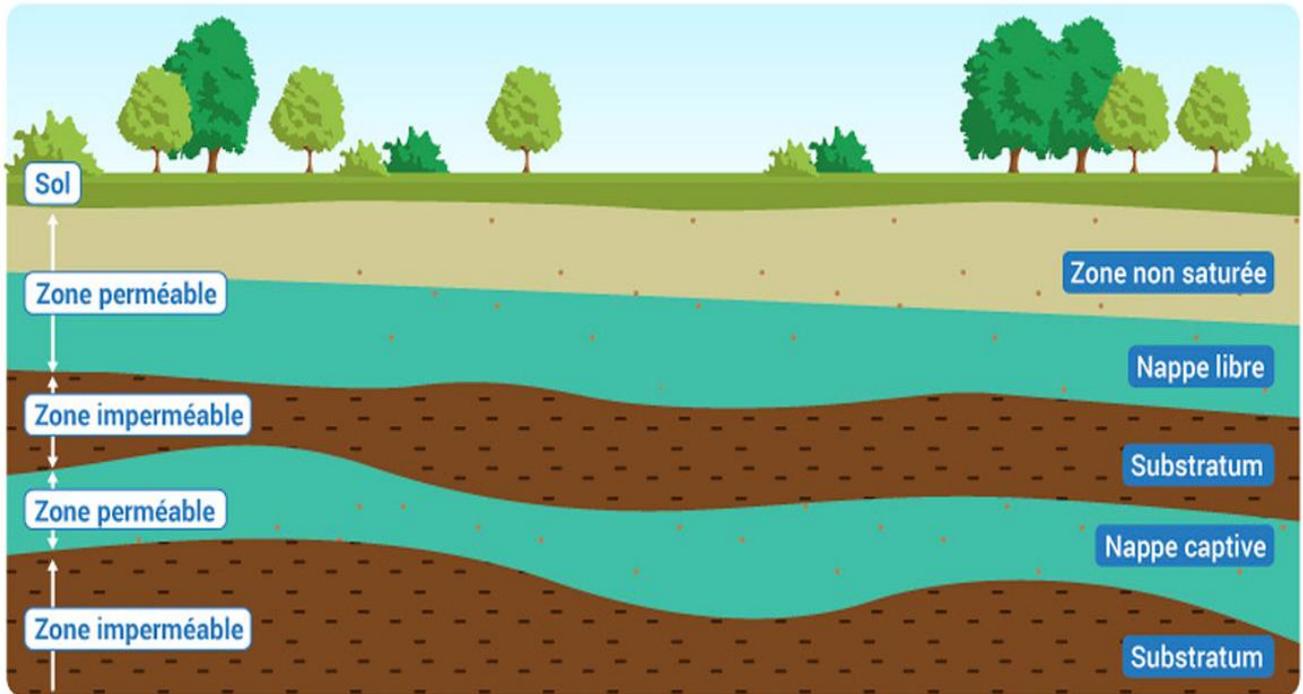


Figure 4: La nappe libre et captive [11]

I.3. La nappe et le forage

Le forage est généralement situé à une profondeur suffisante pour atteindre la nappe et capter l'eau.

I.3.1. Le forage d'eau

Le forage est une technique qui consiste à creuser des trous dans le sol pour atteindre des couches profondes de roche ou de sédiments. Il est principalement utilisé pour [12]:

- L'exploration et l'exploitation des ressources naturelles telles que l'eau et les minéraux.
- La production d'eau pour la consommation humaine et animale
- L'irrigation des cultures
- La surveillance des nappes (piézomètres).

Le forage est une opération réalisée à l'aide de machines semi-automatiques ou de foreuses pour atteindre les nappes d'eau profondes. Pour stabiliser les parois du forage, un tube en PVC est inséré et une crépine est positionnée en face des venues d'eau pour permettre le captage de l'aquifère. Toutefois, cette opération peut être coûteuse et complexe, nécessitant des compétences techniques spécialisées. Il est crucial de prendre en compte les impacts environnementaux et sociaux potentiels du forage, ainsi que de suivre les réglementations en vigueur pour assurer la sécurité et la durabilité de l'opération (*Figure 5*). [13]

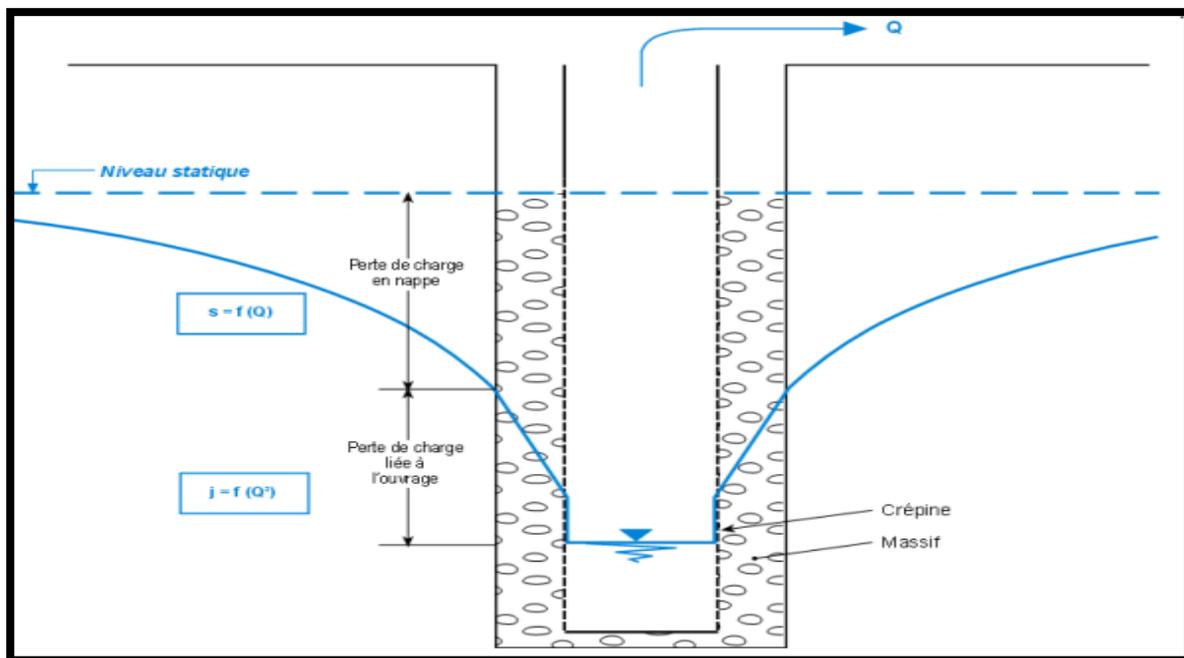


Figure 5: Le forage d'eau [13]

I.3.2. Type de forage

Il existe plusieurs types de forage:

I.3.2.1. Forage artésien

Ce type de forage consiste à perforer un aquifère profond jusqu'à une couche d'eau souterraine qui est sous pression. L'eau jaillit alors naturellement à la surface sans avoir besoin d'une pompe. Ce type de forage est souvent utilisé pour trouver de l'eau potable dans les régions arides ou pour alimenter des piscicultures (*Figure 6*). [14]

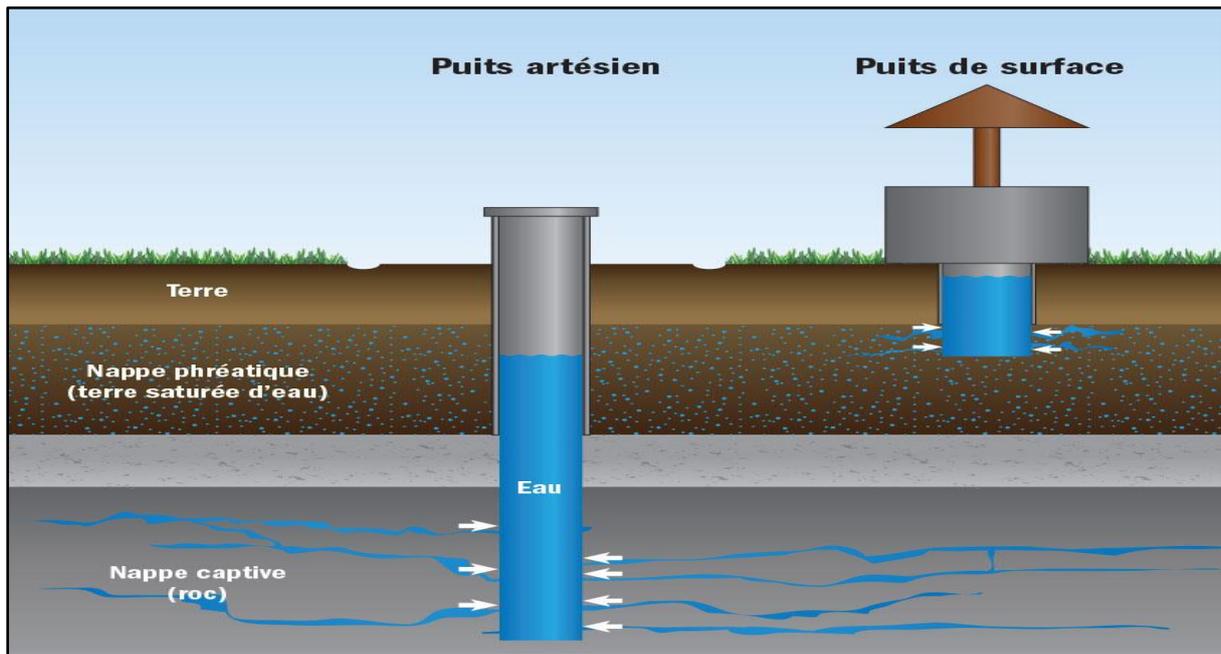


Figure 6: Forage de puits artésien[15]

I.3.2.2. Forage de puits profonds

Ce type de forage implique la perforation de formations souterraines profondes pour trouver une source d'eau potable. Ce type de forage est souvent utilisé dans les régions où les nappes phréatiques superficielles sont insuffisantes ou contaminées (*Figure7*).[14]

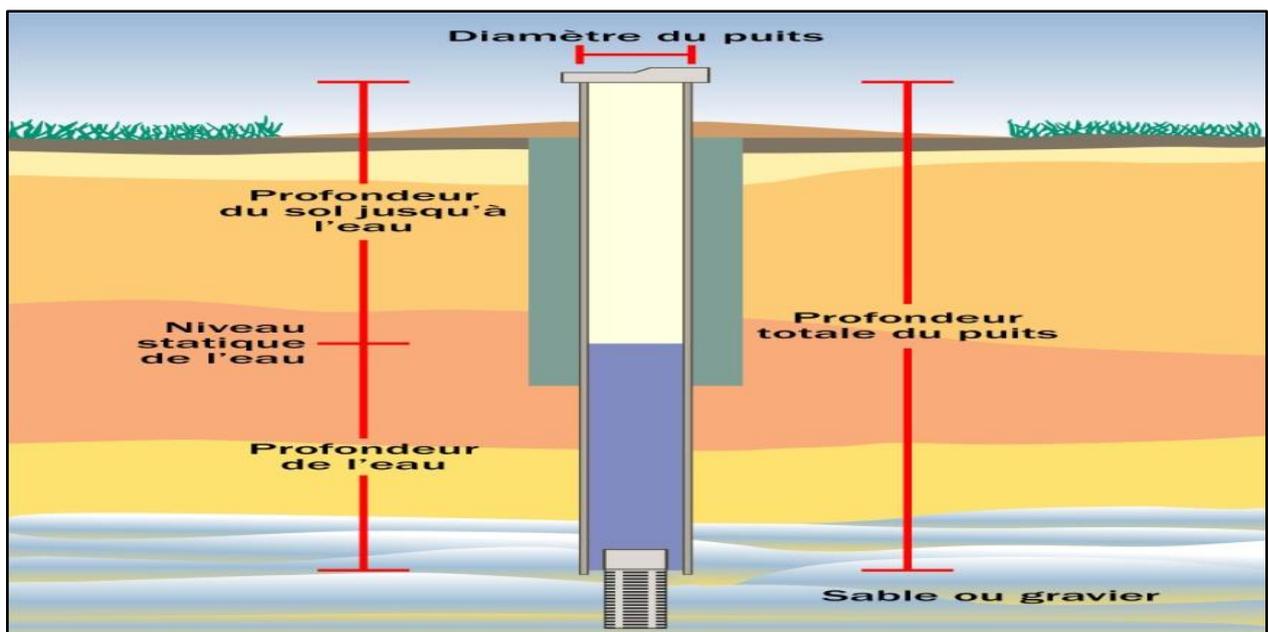


Figure 7: Forage de puits profonds[16]

I.3.2.3. Forage de puits à puisard

Ce type de forage consiste à perforer un aquifère jusqu'à une couche d'eau souterraine. L'eau s'écoule ensuite à la surface par gravité, sans avoir besoin d'une pompe. Ce type de forage est souvent utilisé pour trouver de l'eau pour l'irrigation des cultures ou pour les besoins en eau des animaux (*Figure 8*).[14]

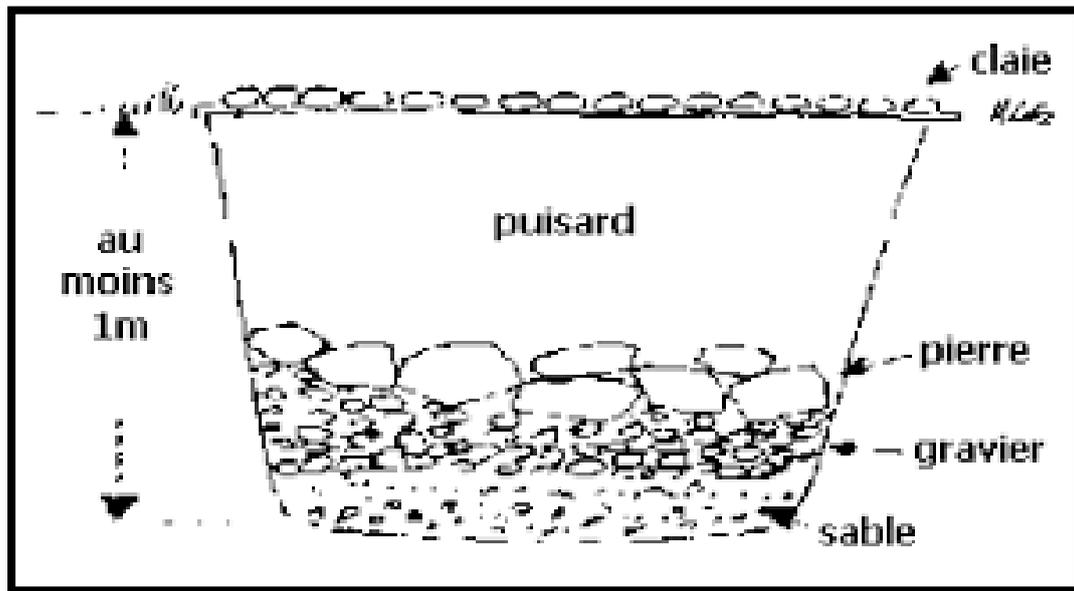


Figure 8:Le forage de puits à puisard[17]

I.3.2.4. Forage de puits d'irrigation

Ce type de forage est utilisé pour trouver de l'eau pour l'irrigation des cultures dans les régions où les sources d'eau superficielles sont insuffisantes (*Figure 9*). [14]

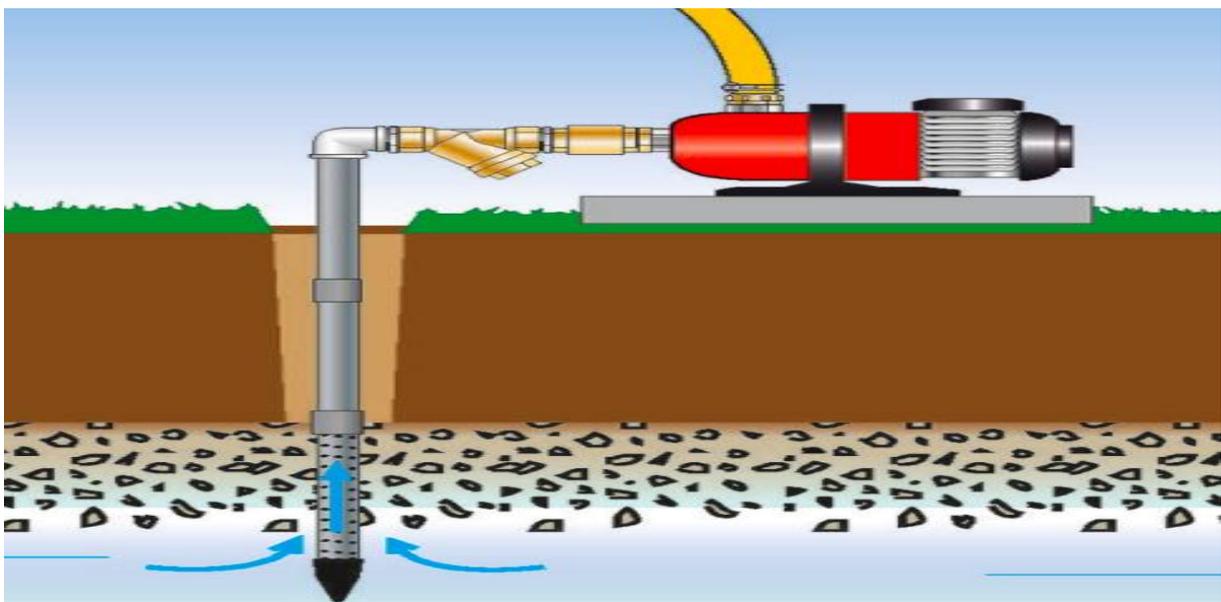


Figure 9:Le forage de puits d'irrigation[18]

I.3.2.5. Forage de puits municipaux

Ce type de forage est effectué pour trouver de l'eau pour les besoins en eau potable d'une ville ou d'une région. Cela peut inclure la fourniture d'eau pour la consommation domestique, les usines, les parcs et d'autres installations publiques. [14]

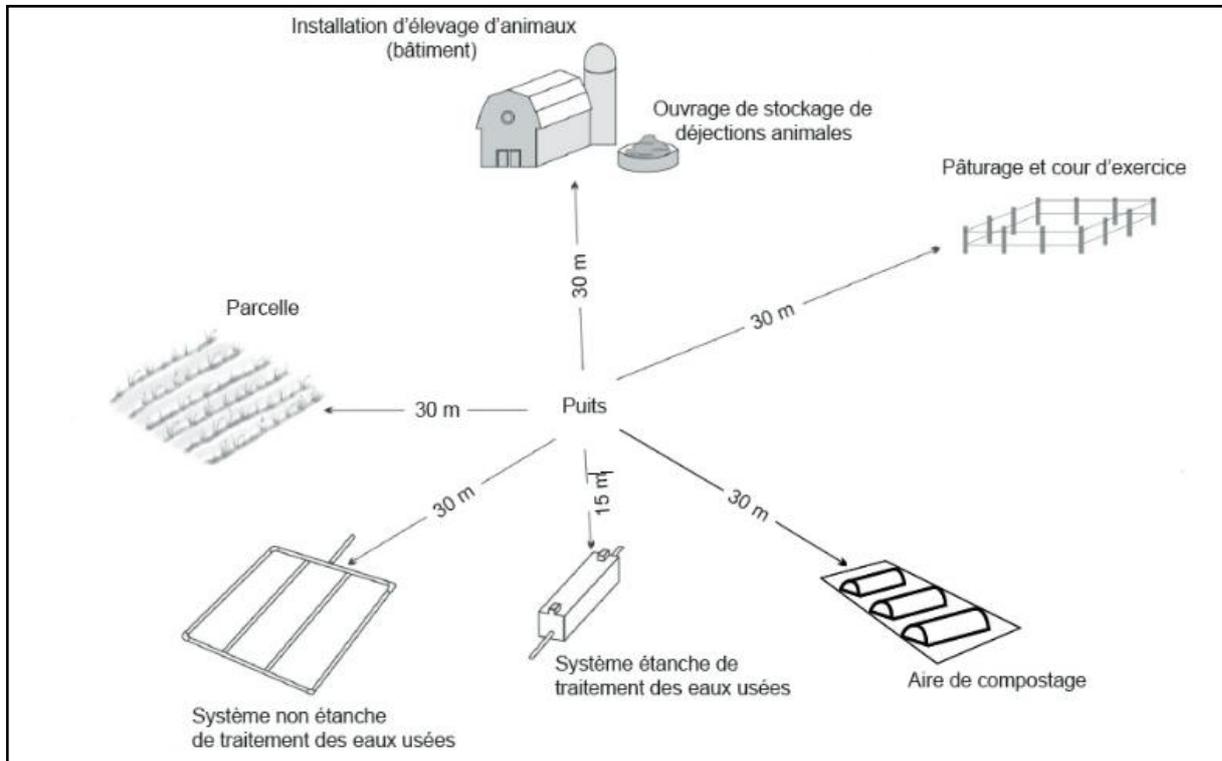


Figure 10:Schéma de forage de puits municipaux[19]

En gros, les différents types de forage d'eau sont conçus pour répondre à différents besoins en eau, en fonction des conditions géologiques et hydrologiques du site. Chacun de ces types de forage peut être utilisé pour fournir de l'eau pour différentes applications.

I.4. La géologie des nappes souterraines

La géologie des nappes souterraines est une science qui étudie les caractéristiques géologiques des nappes souterraines, ces derniers compris :

I.4.1. La composition

La composition des nappes souterraines varie selon leur origine et leur emplacement. Les nappes souterraines peuvent être composées d'eau douce, d'eau salée, de sédiments, de roches et de minéraux. Les nappes souterraines peuvent également contenir des produits chimiques.[20]

I.4.2. La structure

La structure des nappes souterraines est déterminée par la composition et la structure des roches sous-jacentes, ainsi que par la présence de fractures et de failles.

Les nappes souterraines peuvent être constituées de couches de roches sédimentaires, de roches magmatiques ou métamorphiques.[20]

I.4.3. L'écoulement

L'écoulement des nappes souterraines est le mouvement de l'eau à travers les couches géologiques sous la surface de la terre.[21]

L'écoulement des nappes souterraines est influencé par :

La gravité, la pression, les propriétés physiques des couches géologiques (la porosité, la perméabilité et la perméabilité relative...), les conditions climatiques et hydrologiques.[21]

I.4.4. L'interaction avec leur environnement

La géologie des nappes souterraines étudie la façon dont les nappes souterraines interagissent avec leur environnement compris[22]:

- ✓ Leurs effets sur les sols, les eaux de surface et les eaux souterraines.
- ✓ Leurs effets sur la qualité de l'air, le climat et la biodiversité.

I.5. Qualité des eaux souterraines

La vitesse de la circulation de l'eau dans les espaces vides du sous-sol est généralement lente. Ces faibles débits créent une forte inertie des eaux souterraines, Cette inertie a un impact sur la quantité et la qualité de l'eau présente dans l'aquifère.[23]

Les eaux souterraines se trouvent presque partout et leur qualité est généralement très bonne. Le fait que les eaux souterraines soient stockées dans des couches situées sous la surface, et parfois à des profondeurs très élevées ce qui permet de les protéger contre toute contamination et de préserver sa qualité.[23]

La qualité des eaux souterraines sont à l'origine liées à:

I.5.1. Des processus géologique du terrain

La présence de roches et de sols poreux qui peuvent retenir et libérer des contaminants, la quantité et de la qualité des eaux de surface qui s'infiltrent dans le sous-sol.[23]

I.5.2. Des processus physiques:

L'érosion et la dissolution des minéraux...[23]

I.5.3. Des processus chimiques

La présence de produits chimiques dans l'environnement et la présence de produits chimiques dans les eaux souterraines.[23]

I.5.4. Des paramètres physico-chimiques

La température, le pH, la conductivité, La dureté...[23]

I.5.5. Des processus biologiques

La décomposition des matières organiques et la présence de bactéries et d'autres organismes aquatiques...[23]

La qualité des eaux souterraines peut également être affectée par:

I.5.6. Des facteurs naturels

Les changements climatiques, les mouvements des nappes phréatiques, les éruptions volcaniques et les séismes...[23]

I.5.7. Les activités humaines

L'utilisation d'engrais et de pesticides, l'utilisation de produits chimiques industriels, l'utilisation de l'eau pour l'irrigation et l'utilisation de l'eau pour le refroidissement des centrales électriques.[23]

I.6. Les impacts des eaux souterraines

Les eaux souterraines peuvent avoir des impacts positifs et négatifs.

I.6.1. L'impact sur l'environnement

L'eau souterraine est essentielle à la survie des écosystèmes et à la santé humaine. Elle peut fournir une source d'eau potable, de nutriments pour les plantes et les animaux ainsi que d'irrigation pour les cultures, ce qui peut contribuer à la sécurité alimentaire et à la croissance économique.[24]

I.6.2. L'impact sur les paramètres hydrodynamiques de la nappe souterraine sous-jacente – aspects quantitatifs

Les impacts quantitatifs sur les paramètres hydrodynamiques de la nappe souterraine peuvent inclure[24]:

- ✓ Une baisse du niveau de la nappe
- ✓ Une diminution de la vitesse de l'eau
- ✓ Une augmentation de la pression hydrostatique et une modification des flux d'eau.

I.6.3. Impact sur la qualité des eaux souterraines

Les nappes phréatiques peuvent avoir un impact significatif sur la qualité des eaux souterraines. Les nappes peuvent être affectées par[24]:

- ✓ Des polluants provenant des activités humaines (décharges municipales...).
- ✓ Les rejets industriels (puits d'injection souterrains).
- ✓ Les déchets agricoles (engrais et les pesticides sur des terres agricoles).
- ✓ Les produits chimiques utilisés dans les maisons.

I.7. Les eaux souterraines en Algérie

L'Algérie est un pays semi- aride, voir même aride avec des niveaux des précipitations annuelles variant entre (200 mm à 400 mm). les ressources en eau du pays sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande côtière, l'apport total des précipitations est estimé à environ 100 milliards de mètres cubes d'eau par an mais seulement 12,4 milliards

de mètres cubes sont mobilisables en tenant compte des sites techniquement favorables (hydrologie, topographie, géologie).[25]

I.7.1. Elément de géographie et d'hydrographie de l'Algérie

L'Algérie a une superficie d'environ 2,4 millions de km^2 est le plus grand pays d'Afrique, Le Sahara occupe près de 5/6 de la superficie totale du pays d'environ 200 000 000 hectares.[25]

La majorité de la population habitant le nord sur la côte méditerranéenne tandis que Le désert du Sahara est peu peuplé. On estime que plus de 80% de la population rurale et urbaine a accès à l'eau potable.[25]

L'approvisionnement en eau dépend fortement des eaux souterraines pour la consommation, l'agriculture et l'industrie.[25]

Dans le nord de l'Algérie, l'irrigation des terres agricoles repose sur les eaux souterraines, tandis que dans le sud, les vastes aquifères profonds contiennent des quantités importantes d'eaux souterraines "fossiles" qui ne sont pas régénérées.[25]

La baisse du niveau des eaux souterraines dans certaines zones montre une certaine surexploitation.[25]

En raison d'un grave manque d'eau potable pour alimenter Alger, l'irrigation de la plaine de la Mitidja à partir des barrages Hamiz et Safsaf a été interrompue. Cette pénurie a également contraint la population d'Oran à consommer de l'eau saumâtre pendant plusieurs années.[25]

En 2003, l'Algérie avait une quantité d'eau de seulement $500m^3$ par habitant, ce qui la place parmi les pays les moins bien pourvus en eau de la planète, avec une quantité inférieure au seuil de rareté établi par la Banque Mondiale à $1000m^3$ par habitant et par an.[25]

Depuis l'indépendance, la situation n'a fait que se dégrader. En effet, la disponibilité d'eau par habitant est passée de $1500m^3$ en 1962 à $720m^3$ en 1990, puis à $680m^3$ en 1995 et $630m^3$ en 1998. En 2020 la quantité d'eau était encore plus faible, avec seulement $430m^3$ par an et par habitant. Etant données les observations climatiques, nous supposons qu'en

2023, ces projections ne s'appliquent plus et il serait nécessaire de fournir des données plus récentes pour évaluer la situation actuelle.

Il y a quelques années, l'Algérie est sortie d'un cycle de sécheresse qui a duré près de 25 ans, entraînant une diminution de l'écoulement des eaux et des effets néfastes sur les nappes aquifères. Pendant les trois dernières années de cette période, les précipitations étaient inférieures de moins de 50% à la moyenne des 50 dernières années.[25]

I.7.2. La gestion des eaux souterraines en Algérie

La gestion des eaux souterraines en Algérie est encadrée par la loi sur l'eau de 2005, qui établit un cadre juridique pour la gestion intégrée et durable des ressources en eau. Cette loi préconise la conception de plans de gestion de l'eau pour chaque bassin versant, élaborés en consultation avec les acteurs concernés et mis en œuvre par l'ONRE (l'Office National des Ressources en Eau).[25]

La gestion des eaux souterraines en Algérie est confrontée à des défis majeurs, tels que [25]:

La surexploitation des eaux souterraines, la pollution, le changement climatique.

A fin de faire face à ces défis, l'Algérie met en œuvre des programmes pour moderniser ses infrastructures hydrauliques, encourager l'utilisation de l'eau non conventionnelle telles que les eaux usées traitées et sensibiliser le public à l'importance de préserver les ressources en eau.[26]

- ✚ La gestion des eaux souterraines consiste à surveiller et à gérer les nappes phréatiques souterraines dans le but de préserver leur qualité et leur quantité.
- ✚ La gestion des eaux souterraines peut être divisée en plusieurs niveaux

I.7.2.1. Le niveau national:

L'un des niveaux de gestion des eaux souterraines est la gestion globale des ressources en eau souterraine à l'échelle nationale. Cela implique la définition de politiques et de stratégies visant à promouvoir l'utilisation durable et équitable de ces ressources.[27]

- ***Le Ministère des Ressources en Eau (MRE)***

MRE est responsable du suivi, de la coordination et de la préparation de la législation concernant la gouvernance des eaux souterraines.[27]

- ***L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)***

L'ANRH est responsable de l'exploration, de l'évaluation et de la protection des ressources en eaux souterraines. L'ANRH est également responsable de la surveillance des eaux souterraines.[27]

- ***L'Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIRE) et les Agences des Bassins Hydrographiques (ABH)***

L'AGIRE et L'ABH sont responsables de la gestion globale des ressources en eau.

L'ABH divise le pays en cinq unités hydrographiques naturelles:

Oranie-Chott Chergui, Cheliff-Zahrez, Algérois-Hodna-Soumam, Constantinois-Seybouse-Mellègue, Sahara.[27]

Ces unités sont au centre des consultations et des actions sur la gestion intégrée des ressources en eau.[27]

- ***L'Algérienne des Eaux (ADE)***

L'ADE est responsable de l'exploitation des eaux souterraines pour l'eau potable.[27]

- ***L'Office National de l'Irrigation et du Drainage (ONID)***

L'ONID est responsable de l'exploitation des eaux souterraines pour l'irrigation.[27]

I.7.2.2. Le niveau régional

Un autre niveau de gestion des eaux souterraines est la gestion des bassins hydrographiques et des nappes souterraines à l'échelle régionale. Cette gestion est mise en place pour garantir une utilisation durable des ressources en eau et pour prévenir les conflits entre les différents utilisateurs.[27]

✚ La gestion des eaux souterraines au niveau régional est souvent effectuée par:

- ***Des agences de gestion de l'eau***

Des agences de gestion de l'eau sont responsables de la mise en œuvre des plans de gestion de l'eau pour chaque bassin hydrographique.[27]

- ***L'Agence de Bassin Hydrographique (ABH)***

Ces plans de gestion des eaux sont élaborés en concertation avec les parties prenantes, y compris: Les utilisateurs de l'eau, Les autorités locales, Les organisations non gouvernementales, Les groupes de citoyens.[27]

Au niveau régional, les agences de gestion de l'eau sont responsables de la surveillance des nappes souterraines, de l'évaluation des taux d'utilisation durable, ainsi que de la mise en œuvre de mesures de gestion pour prévenir la surexploitation, la pollution et la dégradation de la qualité de l'eau.[27]

Ces mesures peuvent comprendre des restrictions sur l'utilisation de l'eau, la mise en place de programmes de réutilisation des eaux usées traitées, des campagnes de sensibilisation du public et des initiatives visant à encourager l'utilisation de technologies plus efficaces en termes d'utilisation de l'eau.[27]

Les agences de gestion de l'eau peuvent également collaborer avec d'autres organisations régionales et nationales pour traiter les questions transfrontalières liées à la gestion des eaux souterraines, telles que la gestion de l'eau dans les aquifères transfrontaliers partagés entre deux ou plusieurs pays.[27]

I.7.2.3. Le niveau local

Un autre niveau de gestion des eaux souterraines est la gestion à l'échelle locale des puits, des forages et des nappes souterraines, notamment pour répondre aux besoins d'approvisionnement en eau potable, d'irrigation et d'industrie.[28]

Au niveau local, Les municipalités et les communautés rurales ou les districts de gestion de l'eau sont souvent responsables de la gestion des eaux souterraines. Leur rôle consiste à appliquer les politiques et les plans de gestion de l'eau établis à l'échelle nationale et régionale, tout en surveillant et en contrôlant l'utilisation des eaux souterraines dans leur juridiction. [28]

Au niveau local, la gestion des eaux souterraines peut impliquer la mise en place de mesures réglementaires, telles que l'imposition de quotas d'irrigation pour les agriculteurs ou la limitation de la consommation domestique en cas de sécheresse. Les autorités locales peuvent également encourager l'utilisation de l'eau traitée pour l'irrigation ou la recharge des nappes phréatiques, ainsi que sensibiliser le public pour promouvoir une utilisation rationnelle de l'eau. [28]

Dans les zones rurales où l'agriculture est l'activité économique principale et où les puits privés sont fréquemment utilisés pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation, la gestion des eaux souterraines à l'échelle locale peut revêtir une importance particulière. Au niveau local, la gestion des eaux souterraines peut être assurée par différentes entités en fonction du contexte et de la structure institutionnelle du pays. [28]

Dans certains cas, cela peut être géré par [28]:

➤ *Les autorités locales*, telles que :

- ✓ Les gouvernements municipaux ou régionaux.
- ✓ Dans d'autres cas, des organisations de gestion de l'eau communautaires ou des comités de bassin peuvent être responsables de la gestion des eaux souterraines à l'échelle locale.
- ✓ Les agences de gestion des ressources en eau peuvent également jouer un rôle important dans la gestion des eaux souterraines à l'échelle locale, en fournissant une expertise technique et en travaillant en collaboration avec les autorités locales et les communautés locales.

1.7.3. Législation sur les eaux souterraines en Algérie

En Algérie, la loi n° 05-12 du 4 août 2005 encadre la législation sur les eaux souterraines en établissant un cadre juridique pour la gestion intégrée et durable des ressources en eau, y compris les eaux souterraines. [29]

La loi stipule que des plans de gestion de l'eau doivent être élaborés pour chaque bassin hydrographique, en concertation avec les parties prenantes, et mis en œuvre par l'Office National des Ressources en Eau (ONRE). [29]

La loi prévoit également la réglementation de l'exploitation des eaux souterraines en fixant des limites quantitatives et qualitatives pour leur extraction, ainsi qu'en établissant

des conditions pour l'attribution des permis de recherche et d'exploitation de ces ressources. [29]

La loi inclut des mesures punitives pour les violations de la réglementation des eaux souterraines, telles que des amendes et des peines de prison pour les individus qui sont à l'origine de la surexploitation ou de la contamination des eaux souterraines. [29]

I.8. Ressources souterraines en Algérie

Les ressources souterraines en Algérie compris deux sections :

- **Nord**

Ces ressources sont évaluées à 1.8 milliards de m³ pratiquement mobilisées et certaines nappes sont exploitées à 90% ou en surexploitation critique, 12000 forages, 9000 sources et 100000 puits. [25]

- **Sud**

Exploitation actuelle 1,7 milliards m³/an et qui peut être portée à 5 milliards m³/an avec la possibilité de transfert vers le nord. [25]

I.8.1. Les nappes en Algérie

Les principales nappes en Algérie sont:

La nappe de l'Ouarsenis, la nappe de l'Aurès, la nappe de l'Oranie, la nappe de l'Aïn-Témouchent, la nappe de l'Oued-Righ, la nappe de l'Oued-Soummam, la nappe de l'Oued-Mina, la nappe de l'Oued-Kebir [25] (*Tableau1*).

Tableau 1 : Les ressources globales en eaux souterraines du pays. [25]

	Année moyenne (milliard m ³ /an)	Année sèche (milliard m ³ /an)
Eaux souterraines	8	8

I.9. Conclusion

Les eaux souterraines en Algérie sont une ressource importante pour la population, l'agriculture et l'industrie. Cependant, cette ressource est de plus en plus menacée en raison de la surexploitation, de la pollution et du changement climatique.

La surexploitation des eaux souterraines a entraîné une diminution des niveaux d'eau dans de nombreuses régions du pays, ce qui a des conséquences négatives sur les écosystèmes naturels et les activités humaines. Les sols sont de plus en plus salinisés et les terres agricoles perdent leur fertilité. La pollution des eaux souterraines est un problème croissant en Algérie, en particulier dans les zones industrielles et urbaines. Les rejets de produits chimiques et de déchets contaminent les aquifères, réduisant ainsi la qualité de l'eau et menaçant la santé humaine.

Le changement climatique est également un facteur important dans l'évolution de la disponibilité et de la qualité des eaux souterraines. Les sécheresses plus fréquentes et plus sévères ont pour effet de réduire la recharge des aquifères, ce qui aggrave la surexploitation.

Pour préserver cette ressource vitale, il est donc essentiel de mettre en place des mesures de gestion durable des eaux souterraines en Algérie, en encourageant la recharge artificielle, en réduisant les pertes dans les réseaux de distribution et en contrôlant les pollutions d'origine industrielle et urbaine. Il est également important d'encourager l'utilisation de méthodes d'irrigation plus efficaces et de réduire la dépendance aux eaux souterraines pour l'irrigation.

Chapitre II : Les eaux souterraines d'Ain Témouchent



II.1. Introduction

Ain Témouchent est une wilaya située dans le nord-ouest de l'Algérie, sur la côte méditerranéenne, dispose de ressources en eaux souterraines importantes. Ces eaux sont utilisées pour l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable et l'industrie. [27],[30]

Cependant, la surexploitation des nappes souterraines dans la région a entraîné une réduction du niveau de la nappe phréatique, entraînant des répercussions potentielles sur la disponibilité et la qualité de l'eau. De plus, il est important de souligner que la région d'Ain Témouchent est vulnérable à la pollution des eaux souterraines en raison des activités agricoles et industrielles présentes. Dans ce contexte, la mise en place de mesures de prévention et de traitement de la pollution s'avère cruciale pour préserver les ressources en eau de la région. [27],[31]

Ainsi, des mesures de préservation et de gestion des ressources en eau s'imposent pour assurer une utilisation soutenable des eaux souterraines à Ain Témouchent.[27]

II.2. Localisation et géographie de la wilaya d'Ain Témouchent

La wilaya d'Ain Témouchent est limitée[32] :

- Au Nord Ouest par la mer méditerranée,
- A l'Est et au Nord par la wilaya d'Oran,
- Au Sud et à l'Est par la wilaya de Sidi Bel Abbas,
- A Sud par la wilaya de Tlemcen.

La wilaya d'Ain Témouchent s'étend sur une superficie de 2377 km². Sur le plan administratif, la wilaya compte 28 communes et 8 daïras. Elle fait partie de l'Agence de Bassin de la Région Oranie-Chott Chergui.[33]

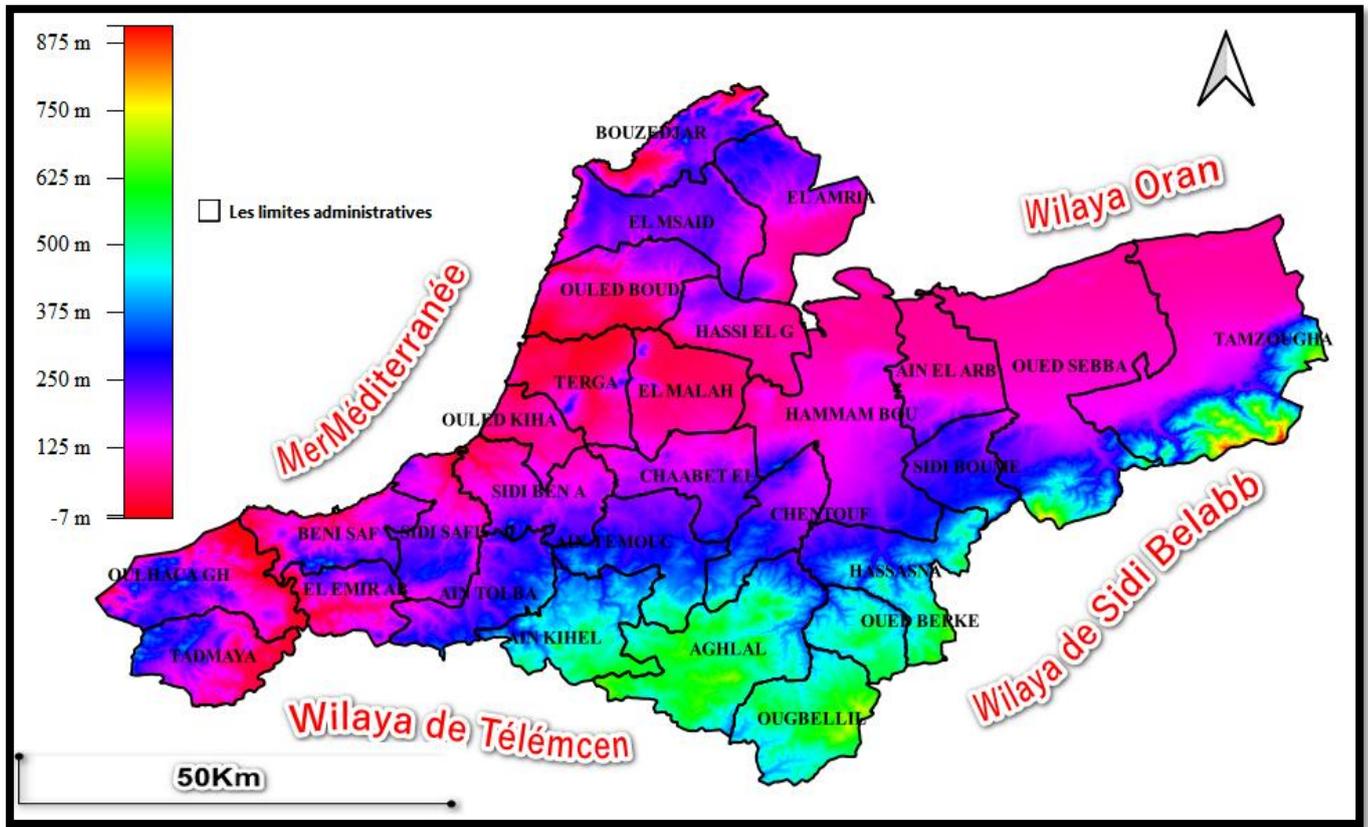


Figure 11: Situation générale de la wilaya Ain Témouchent

II.3. Le relief de la wilaya Ain Témouchent

Le relief de cette wilaya présente trois zones à savoir[32] :

- ✚ La zone des plaines intérieures regroupe 7 communes et abrite 45% de la population totale. Elle occupe 25% de la superficie de la wilaya. Sa densité est de 282 habitants/km². Ces plaines se présentent comme suit :
 - La plaine d'Ain Témouchent – El Amria, constituée de plaines et de coteaux d'une altitude moyenne de 300 m .
 - La plaine de la M'Leta qui se trouve entre la Sebka d'Oran et le versant septentrional du Tessala d'une altitude moyenne variant de 50 à 100 m.
- ✚ La zone de la bande littorale regroupe 8 communes côtières abritant 25% de la population totale et occupe 22% de la superficie totale de la wilaya, avec une densité de 178 habitants/km². Cette bande est composée de :

- Du massif côtier de Béni Saf dont l'altitude moyenne est de 200 m ; le point culminant atteint 409 m à Djebel Skhoua .
 - Du plateau d'Ouled Boudjemaâ d'une altitude moyenne de 350 m légèrement incliné vers la Sebkha.
 - De la baie de Bouzedjar.
- ✚ La zone montagneuse regroupe 13 communes, elle abrite 30% de la population totale de la wilaya et occupe 53% de la superficie totale de la wilaya ; cette zone est la moins peuplée avec 88 habitants/km². Elle est composée de :
- Les hautes plaines des Berkeches qui se prolongent jusqu'aux monts de Sebaa Chioukh, constituant une barrière entre les plaines intérieures et le bassin de Tlemcen.
 - Les monts du Tessala d'une altitude moyenne de 600 m caractérisés par un relief très accentué où le point culminant atteint 923 m à Djebel Bouhaneche.

Sur le plan administratif, la wilaya d'Ain Témouchent compte 28 communes et 8 daïras, Elle fait partie de l'Agence de Bassin de la Région Oranie-Chott Chergui. [32]

II.4. Cadre géologique

L'histoire géologique de la région d'Ain Témouchent se résume de la façon suivante[34]:

- La transgression miocène synchro-nappe qui a affecté la région entre Témouchent et les monts de Tlemcen et qui est en réalité un vaste bassin de sédimentation dont les reliefs sont d'âge primaire et mésozoïque. cette fosse dite "synchro-nappe" a été, au miocène, le siège d'accumulations d'épaisses séries marno-gréseuses, c'est vers elle que se déplaçaient les nappes de charriage, dont les racines se situent à l'emplacement de la Méditerranée actuelle.
- Les apports détritiques proviennent soit des nappes de charriage, soit de l'autochtone représenté par les Monts de Tlemcen. Les massifs de djebel Tounit et Necissa formaient des zones émergées en pleine mer messénienne.
- Les unités charriées se sont mises en place au cours de deux phases tectonique paroxysmales, l'une intralutétienne (éocène moyen), l'autre miocène. Ces

formations constituent un matériel déplacé "allochtone" que l'on oppose au substratum en place "autochtone" de la région d'Ain Témouchent .

II.5. Aperçu hydrogéologique-Description sommaire des aquifères

II.5.1. Aquifère des calcaires du miocène supérieur

La nappe des calcaires à lithothamniés se situe à l'Ouest de Sidi ben Adda et dans le plateau de Sidi Safi. Au sud d'Ain Témouchent et de Sidi Ben Adda des épanchements volcaniques (basaltes) recouvrent ces calcaires et les suralimentent. Cette nappe fournit les plus importants débits de la région d'Ain Témouchent. [34]

II.5.2. Aquifère de l'oligo-miocène

Constitué d'alternance de marnes calcaréo-sableuses et de grés à ciment calcaire. Les niveaux calcaréo-gréseux sont aquifères et séparés par des niveaux marneux, constituant des nappes perchées superposées donnant ainsi naissance à de nombreuses sources de déversement à faibles débits. [34]

II.5.3. Aquifère des grés et sables du pliocène

Ce sont des alternances de sable, grés et marnes renfermant des nappes à perméabilité et qualité chimique variable : ($500\text{mg/l} < R.S < 2500\text{mg/l}$) en plateau de Sidi Bakhti et ($R.S < 3000\text{mg/l}$) en bordure de la sebkha. [34]

II.5.4. Aquifère des alluvions du pléistocène

En bordure du littoral, les alluvions limoneuses des terrasses alluviales ou des fonds d'oued (alluvions de la basse vallée de l'oued sennane), ont des perméabilités faibles. Les alluvions quand elles sont mêlées aux lentilles conglomératiques, deviennent plus perméables comme c'est le cas à l'embouchure de l'oued Sidi Djelloul. [34]

II.5.5. Aquifère des sables

Vers le littoral on rencontre de véritables dunes contenant des réserves d'eau ne pouvant servir qu'à l'irrigation. [34]

II.5.6. Aquifère des roches volcaniques

Les formations meubles (bombes, scories, lapillis) sont de bons aquifères mais de faibles étendue. Les laves basaltique sont tantôt massives et stériles tantôt fissurées et aquifères ces dernières, quand elles surmontent les calcaires, constituant l'un des plus important aquifère de la région d'Ain Témouchent. [34]

II.6. Utilisations des eaux souterraines

Les eaux souterraines jouent un rôle important dans le système hydrologique algérien. En Algérie sont principalement utilisées pour [32]:

- ✓ L'irrigation.
- ✓ La production d'énergie hydroélectrique.
- ✓ L'approvisionnement en eau potable (le stockage et la fourniture d'eau potable).
- ✓ La régulation des crues.

À Ain Témouchent, l'irrigation est la plus grande utilisatrice d'eau souterraine. En 2009, la zone était équipée pour l'irrigation avec des eaux souterraines, démontrant ainsi que l'irrigation reposait principalement sur l'exploitation des ressources en eaux souterraines dans cette région

II.7. Les ressources souterraines d'Ain Témouchent

La Wilaya d'Ain-Temouchent comprend plusieurs aquifères exploités pour l'irrigation, les plus importants sont :

II.7.1. La Basse vallée de la Tafna

La Basse vallée de la Tafna regroupe deux petites unités hydrogéologiques ayant les mêmes caractéristiques : elles sont constituées d'aquifères alluviales monocouche avec nappe libre dépendant de l'oued (Code 41_1a_1 et 46_1a_2) ; ceci permet la recharge de

l'aquifère par l'oued. Cette vallée possède des réserves et puissances moyennes et son exploitation est facilitée par sa situation en plaine. A noter des formations volcaniques (basalte et cendres) au niveau de l'Ouest de l'embouchure de l'Oued Tafna.[32]

II.7.2. Le Plateau d'Ain Temouchent

Le Plateau d'Ain Temouchent est un système d'aquifères monocouche étendus avec nappe libre, non karstique (Code 46_2_1) ; ses réserves et ses capacités de régulation sont de moyennes à fortes. [32]

II.7.3. Le Système aquifère de l'Oued Djelloul

Le Système aquifère de l'Oued Djelloul regroupe les unités hydrogéologiques situées sur la rive gauche de la Tafna, c'est l'extrémité orientale de l'ensemble Nemours-Monts des Traras qui s'étend dans la Wilaya de Tlemcen. Il s'agit d'un système d'aquifères non karstiques, complexes, avec des monocouches étendues avec nappe libre (Code 46_2_3) et des multicouches sans nappe libre (Code 46_5_1), une portion est sans aquifère (Code 46_6_3). Ce système ne comporte aucun problème de salinité, ses réserves sont moyennes avec une bonne productivité. [32]

II.7.4. La nappe de Bou Zedjar

La nappe de Bou Zedjar (Code 46_3_1) est la partie occidentale du système d'aquifères nommé Djebel Murdjadjo, situé dans la Wilaya d'Oran. Ce système détient une eau riche en sel, c'est un système karstique à surface libre, ce qui lui confère une capacité de régulation variable. [32]

II.7.5. L'aquifère située entre la Plaine d'Ain Témouchent et la Tafna

L'aquifère située entre la Plaine d'Ain Témouchent et la Tafna (Code 46_3_2) est un système karstique à surface libre, ce qui lui confère de même une capacité de régulation variable. [32]

II.7.6. La nappe de la Plaine de la M'Léta

La nappe de la Plaine de la M'Léta (Code 46_4_1) est constituée d'aquifères multicouches à nappe libre, avec un ou plusieurs aquifères profonds, ce qui lui donne de fortes réserves (85 Hm³). Néanmoins, c'est une unité hydrogéologique en liaison avec la Sebkhia d'Oran, à forte salinité, donc difficilement exploitable pour l'irrigation. [32]

II.7.7. Le système aquifère des Monts du Tessala

Le système aquifère des Monts du Tessala (Code 46_5_2) est un aquifère multicouches sans nappe libre, avec un ou plusieurs aquifères profonds, lui conférant une forte capacité et productivité. [32]

II.8. Les sources d'eau souterraine à Ain Témouchent

Le nombre de forages dans la Wilaya est de 132 forages et 753 puits.

Le volume brut infiltré annuel sur l'ensemble de la Wilaya, à partir de la pluviométrie, donne une valeur de 153 Hm³. Seule une partie de ce volume, dite mobilisable, est exploitable. Le volume mobilisable des ressources en eaux souterraines est estimé à environ 36 Hm³. [33] Les sources d'eau souterraine à Ain Témouchent peuvent inclure [33]:

II.8.1. Des puits, des forages et leur équipement

Les puits et les forages sont des méthodes courantes pour extraire de l'eau souterraine à Ain Témouchent.

Une concentration des prélèvements sur aquifères dans la région Plaine et Côteaux d'Ain Témouchent–M'léta, avec : 50% des forages et 77% des puits.

Un certain développement des prélèvements sur aquifères dans la région des Côtes Littorales du Tlemcenais-Oranais, avec : 25% des forages et 17% des puits.

Une exploitation plus faible des aquifères dans la région des Monts du Tessala-Béni Chougrane : 25% des forages et 6% des puits nécessitant des forages plus profonds.

Une analyse au niveau communal permet de noter que:

- ✓ Dans la région de la Plaine et Coteaux d'Ain Témouchent –M'léta, près de 50% des forages sont localisés dans la commune de Sidi Ben Adda où les ZGI sont réparties sur tout le territoire sans relation spécifique avec l'Oued Sidi Aneur (O. El Hallouf), suivie d'Ain Témouchent, Ouled Boudjemaâ, Oued Sabah et Hammam Bouhadjar, qui ne comptent chacune que 6% des forages. Un croisement du nombre de puits avec la carte (W46- C9) révèle que la plupart des communes de l'Ouest exploitent les nappes fluviales des principaux oueds, alors que celles de l'Est exploitent les nappes de l'unité hydrogéologique correspondant à la 'Plaine multicouches et fossés de subsidence alluviale épais.
- ✓ Dans la région des Côtes littorales du Tlemcenais-Oranais, la commune d'Oulhaca El Gheraba concentre 70% des forages, celle de Sidi Ouerieche (Tadmaya) 18% localisés principalement dans les zones de piémonts et de relief. La majorité des puits se retrouvent dans ces 2 communes (44 et 31%) et sont localisés en grande partie dans les ZGI situées le long de l'Oued Tafna, exploitant la nappe alluviale de cet oued.
- ✓ Dans la région des Monts du Tessala-Béni Chougrane, les communes d'Ain Kihal et d'Aghlal comptent, respectivement, 64% et 31% des forages, ainsi que 33% et 47% des puits, les autres communes ne présentant qu'un faible développement de la PMH.

Les fiches communales soulignent la faiblesse du débit des forages et des puits (en moyenne 1l/s) sur au moins 18 des 28 communes de la Wilaya. [33]

II.9. Les principaux défis liés à l'utilisation des eaux souterraines

Les principaux défis liés à l'utilisation des eaux souterraines comprennent[35]:

- ✓ La pollution des eaux souterraines.
- ✓ la surexploitation des nappes.
- ✓ La sécheresse.
- ✓ La variabilité de la précipitation.

II.9.1. La pollution des eaux souterraines

La pollution des eaux souterraines est un problème environnemental important, qui peut avoir des conséquences négatives sur la santé humaine et l'environnement. [35]

II.9.1.1. Les types des pollutions

Les ressources souterraines sont soumises à de nombreuses pollutions[35]:

II.9.1.1.1. La pollution chimique

La pollution chimique des eaux souterraines est causée par des produits chimiques industriels, des produits agricoles, des produits chimiques de jardinage, des déchets ménagers.

II.9.1.1.2. La pollution organique

La pollution organique des eaux souterraines est causée par des matières organiques telles que les matières fécales, les produits alimentaires.

II.9.1.1.3. La pollution microbiologique

La pollution microbiologique des eaux souterraines est causée par des bactéries, des virus et des parasites qui peuvent être transmis par l'eau.

Les principales sources de pollution microbiologique sont les eaux usées non traitées, les eaux usées agricoles et les eaux usées industrielles.

II.9.1.1.4. La pollution radioactive

La pollution radioactive des eaux souterraines est causée par des substances radioactives telles que le radon, le tritium et le césium. Ces substances sont généralement libérées dans l'environnement par des centrales nucléaires, des usines de traitement des déchets radioactifs et des sites d'enfouissement.

II.9.1.2. Les conséquences de la pollution des eaux souterraines

La pollution des eaux souterraines peut avoir de graves conséquences sur l'environnement et la santé humaine. Voici quelques-unes des conséquences possibles[36]:

- ✓ La contamination de l'eau potable.
- ✓ Réduction des ressources en eau.
- ✓ Perte de biodiversité (la destruction des écosystèmes aquatiques).
- ✓ La contamination des sols (dommages à la qualité des sols et des cultures).
- ✓ Des effets négatifs sur la santé humaine.

Il est nécessaire de prendre certaines mesures pour réduire la contamination des eaux souterraines, parmi ces mesures[36]:

- ✓ L'utilisation de technologies de traitement des eaux usées.
- ✓ La réduction des rejets industriels et agricoles.
- ✓ L'amélioration des pratiques agricoles.
- ✓ La protection des zones humides.
- ✓ La réduction des déchets ménagers.

II.9.2. La surexploitation des eaux souterraines

La surexploitation des eaux souterraines est un problème environnemental grave qui se produit lorsque les eaux souterraines sont extraites à un rythme plus rapide que leur taux de remplacement naturel. Cela peut entraîner une baisse des niveaux d'eau souterraine, une contamination des eaux souterraines par des produits.[37]

La croissance démographique exponentielle augmentera la demande pour cette ressource. Cela contribue à sa rareté en termes de disponibilité, car l'eau est piégée dans un cycle fermé sans pertes ni gains. Il est simplement stocké dans un état physique dans un format plus ou moins accessible. Au cours des dernières décennies, des sonnettes d'alarme ont été tirées non seulement par la réduction de nos ressources en eau disponibles en raison de la consommation d'eau, mais aussi par les processus de pollution qu'elle subit. Les activités agricoles, urbaines et industrielles sont les principaux contributeurs à la dégradation de cette ressource. [37]

II.9.2.1. L'impact de la surexploitation des eaux souterraines

Parmi les impacts de la surexploitation des eaux souterraines sont[36]:

- ✓ Épuisement des nappes phréatiques.
 - ✓ La détérioration de la qualité des eaux souterraines.
-

- ✓ Réduction des ressources en eau pour l'irrigation.
- ✓ L'affaissement de la surface terrestre.
- ✓ Augmentation des coûts de production.

II.9.3. La sécheresse

La sécheresse est un phénomène météorologique caractérisé par une période prolongée de faibles précipitations. Elles peuvent inclure des pénuries d'eau et peut entraîner des conséquences négatives sur l'environnement, l'agriculture et la santé humaine.[38]

II.9.3.1. Les types de sécheresse

Il existe plusieurs types de sécheresse[38],

II.9.3.1.1. La sécheresse atmosphérique

La sécheresse atmosphérique est la sécheresse causée par un manque de précipitations ou une évaporation excessive due à des températures élevées.

II.9.3.1.2. La sécheresse agricole

La sécheresse agricole est la sécheresse qui affecte les cultures et les sols. Elle est causée par une diminution des précipitations ou une irrigation insuffisante.

II.9.3.1.3. La sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique est la sécheresse qui affecte les cours d'eau, les lacs et les réservoirs. Elle est causée par une diminution des précipitations ou une utilisation excessive de l'eau.

II.9.3.1.4. La sécheresse écologique

La sécheresse écologique est la sécheresse qui affecte les écosystèmes terrestres et aquatiques. Elle est causée par une diminution des précipitations ou une utilisation excessive de l'eau, ce qui peut entraîner une perte de biodiversité.

II.9.3.1.5. La sécheresse socio-économique

La sécheresse socio-économique est la sécheresse qui affecte les populations en termes de sécurité alimentaire, de santé, d'économie et de bien-être social. Elle est causée par une diminution des précipitations ou une utilisation excessive de l'eau, qui peut entraîner une pénurie de ressources et une détérioration des conditions de vie.

II.9.3.2. L'effet de sécheresse sur le niveau de la nappe

La sécheresse peut avoir un effet négatif sur le niveau de la nappe phréatique car[39]:

- ✓ Réduction des ressources en eau.
- ✓ Elle réduit la quantité d'eau disponible dans le sol, ce qui entraîne une diminution du niveau de la nappe phréatique.
- ✓ Avoir une baisse de la qualité de l'eau.
- ✓ Elle est également entraînée une évaporation.
- ✓ Elle est entraînée une augmentation des risques d'incendie.
- ✓ Elle est entraînée une augmentation des coûts d'irrigation et une baisse de production et de rendement agricole.
- ✓ Avoir un impact négatif sur la faune et la flore, car elle peut entraîner une baisse des niveaux d'oxygène.

II.9.4. La variabilité des précipitations

Les précipitations sont élément le plus important parce qu'elles reflètent la circulation des eaux souterraines, elles sont variables et irrégulières d'une année à une autre et d'une saison à une autre.[23]

La variabilité des précipitations est un indicateur important de la santé des écosystèmes et des communautés. Elle peut avoir des effets directs sur la disponibilité de l'eau et des ressources agricoles, ainsi que sur la santé et le bien-être des populations. [23]

La variabilité des précipitations est la mesure de la variabilité des quantités de précipitations dans un certain espace et à un certain moment. Elle est généralement mesurée en termes de moyenne, de variance et d'écart-type. [23]

Les données historiques sur la variabilité des précipitations peuvent aider à comprendre comment les précipitations ont varié dans le passé et à mieux prédire comment elles pourraient varier à l'avenir. [23]

II.9.4.1. Les facteurs qui influence La variabilité des précipitations

Les facteurs qui influencent la variabilité des précipitations sont[40]:

II.9.4.1.1. Le climat

Le climat est le facteur le plus important, car il détermine la quantité et la distribution des précipitations.

II.9.4.1.2. La topographie

La topographie influence également la variabilité des précipitations, car elle peut modifier la direction et la vitesse des vents et des systèmes météorologiques.

II.9.4.1.3. La saison

La saison est également un facteur important, les précipitations peuvent varier considérablement d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre en raison de la variabilité naturelle du système climatique.

II.9.4.1.4. Les systèmes météorologiques

Les systèmes météorologiques, tels que les fronts froids et les dépressions, peuvent également influencer la variabilité des précipitations.

II.9.4.1.5. Les changements climatiques

Les changements climatiques peuvent également avoir un impact sur la variabilité des précipitations, car ils peuvent modifier les conditions météorologiques et la distribution des précipitations.

II.9.4.1.6. Les activités humaines

Les activités humaines telles que l'agriculture, la déforestation et les émissions de gaz à effet de serre peuvent affecter le climat et la quantité de précipitations.

II.9.4.2. L'impact de la variabilité des précipitations

La variabilité des précipitations peut avoir des impacts significatifs sur les écosystèmes naturels et les activités humaines. Voici quelques exemples[41] :

II.9.4.2.1. Sécheresses et pénuries d'eau

Une diminution de la quantité de précipitations peut entraîner une sécheresse et une pénurie d'eau, ce qui peut avoir des conséquences graves pour l'agriculture, l'élevage, la production d'énergie et la vie quotidienne des populations.

II.9.4.2.2. Inondations et glissements de terrain

D'autre part, des précipitations excessives peuvent entraîner des inondations et des glissements de terrain, qui peuvent endommager les infrastructures, détruire les cultures et les habitations, et causer des pertes humaines.

II.9.4.2.3. Changements dans les écosystèmes

La variabilité des précipitations peut également affecter les écosystèmes naturels, tels que les forêts, les prairies et les zones humides. Des précipitations irrégulières peuvent perturber les cycles de vie des plantes et des animaux, affectant ainsi la biodiversité et les services écosystémiques.

II.9.4.2.4. Impacts sur l'économie

Les impacts économiques de la variabilité des précipitations peuvent être importants, en particulier dans les pays en développement qui dépendent fortement de l'agriculture. Des précipitations insuffisantes ou excessives peuvent réduire la production agricole, entraîner des pertes de revenus pour les agriculteurs et des hausses de prix pour les consommateurs.

La variabilité des précipitations peut avoir des effets considérables sur les sociétés et les écosystèmes, et doit être prise en compte dans les politiques de gestion des ressources en eau, de l'agriculture, de la gestion des risques de catastrophes et de la protection de l'environnement.

II.10. Conclusion

La wilaya d'Ain Témouchent en Algérie est une région qui dépend largement des eaux souterraines pour l'irrigation de ses terres agricoles et pour la fourniture d'eau potable à sa population. Cependant, cette ressource est menacée en raison de la surexploitation, de la pollution, de la sécheresse et de la variabilité de la précipitation.

La surexploitation des eaux souterraines dans la région d'Ain Témouchent a conduit à une baisse importante du niveau des nappes phréatiques, ce qui affecte la capacité de la région à répondre aux besoins en eau. En outre, la qualité de l'eau est également affectée par la pollution industrielle et agricole, notamment dans les zones proches des centres urbains et industriels.

Le changement climatique a également un impact sur la disponibilité des eaux souterraines, en raison de l'augmentation de la fréquence et de la gravité des sécheresses dans la région.

Pour faire face à ces défis, il est essentiel de mettre en place des mesures de gestion durable des eaux souterraines dans la région d'Ain Témouchent. Cela peut inclure la promotion de l'utilisation de techniques d'irrigation plus efficaces, la réglementation de l'exploitation des eaux souterraines, la mise en place de systèmes de surveillance de la qualité de l'eau, et l'encouragement des pratiques agricoles durables.

La gestion durable des eaux souterraines est un enjeu crucial pour la province d'Ain Témouchent en Algérie, et nécessite une action urgente pour garantir la sécurité et la durabilité de cette ressource vitale pour les générations futures.

Chapitre III : Système information géographique(QGIS)



III.1. Introduction aux SIG

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont des outils informatiques permettant de capturer, stocker, analyser et afficher des données géographiques. Ils permettent de visualiser des données spatiales sous forme de cartes, de réaliser des analyses spatiales complexes, de modéliser des phénomènes géographiques et de prendre des décisions éclairées en matière de planification, de gestion de ressources naturelles, de surveillance environnementale et de gestion des catastrophes, entre autres.

L'importance des SIG réside dans leur capacité à intégrer des données provenant de différentes sources et à les présenter de manière compréhensible pour les utilisateurs. Les SIG permettent également de partager des informations géographiques avec des personnes travaillant dans différents secteurs d'activité et dans différents endroits du monde.

Les SIG jouent un rôle important dans la prise de décision éclairée en matière de gestion territoriale et environnementale. Ils sont devenus des outils essentiels pour les gouvernements, les entreprises et les organisations travaillant dans différents domaines, en leur fournissant des données spatiales précises et des analyses pour soutenir leur travail. [42], [43]

III.2. L'histoire des SIG

L'histoire des systèmes d'information géographique (SIG) remonte au milieu du 19^e siècle, lorsque le Dr John Snow a mené une étude géolocalisée de l'épidémie de choléra dans le quartier Soho de Londres en Angleterre. Cette étude a révélé que l'épidémie avait commencé à partir d'un puits contaminé, marquant ainsi la première application de l'analyse spatiale des phénomènes [44].

Dans les années 1960, lorsqu'il fallait créer de nouvelles plantations forestières en Afrique de l'Est, il est devenu évident que les cartes existantes ne permettaient pas de gérer géographiquement la situation. C'est alors que l'idée d'utiliser l'outil informatique pour traiter les données cartographiques a émergé [44].

Depuis les années 1970, les progrès des technologies informatiques ont permis aux SIG de se développer et d'être utilisés dans plusieurs domaines scientifiques, notamment dans les domaines liés à l'aménagement et à l'observation du territoire [44].

Selon les études menées par Maguire et al. en 1991, on peut distinguer quatre périodes principales dans l'évolution des SIG :

De 1950 à 1970, les premières applications de l'informatique à la cartographie ont été développées [44].

De 1970 à 1980, les outils SIG ont commencé à être utilisés par les organismes étatiques tels que l'armée, le cadastre et les services topographiques [44].

De 1980 aux années 1990, plusieurs applications informatiques dédiées aux SIG ont été développées et les outils SIG ont été mis en réseau [44].

Depuis la fin des années 1990, le webmapping a connu un développement important avec l'apparition de plusieurs services cartographiques offerts sur internet. Les outils SIG libres ont également été développés et les technologies GPS ont été largement utilisées [44].

Aujourd'hui, les SIG sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la planification urbaine, la gestion des ressources naturelles, la surveillance environnementale et la gestion des catastrophes, entre autres.

III.3. Concepts fondamentaux des SIG

III.3.1. Définition des SIG

Un SIG (système d'information géographique) est un système permettant de collecter, manipuler, gérer, visualiser, analyser et publier des données spatiales.

Bien que ces fonctionnalités puissent être regroupées dans un logiciel, un SIG est plutôt un ensemble de fonctionnalités. Il permet de prendre de meilleures décisions et d'obtenir des résultats plus approfondis à partir des données en fonction de leurs relations spatiales.

Les données spatiales sont la partie la plus importante de la définition.

Le SIG gère les données en fonction de leur emplacement dans un système de référence de coordonnées. Cela signifie que bien que le SIG soit principalement utilisé pour le traitement de données géographiques (pouvant être cartographiées sur la surface de la Terre), il peut être utilisé pour tout objet avec des dimensions. Les capacités d'un SIG

indiquent les compétences requises d'un expert SIG, notamment la collecte, la gestion, la visualisation, la manipulation et l'analyse de données spatiales, ainsi que la publication de résultats [45].

III.3.2. Les différents types de SIG

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) peuvent prendre différentes formes en fonction des données géographiques qu'ils manipulent et des outils utilisés pour les représenter. On distingue ainsi trois types de SIG : les SIG vectoriels, les SIG raster et les SIG Web. La (*Figure 12*) représente un schéma des différents types de SIG.

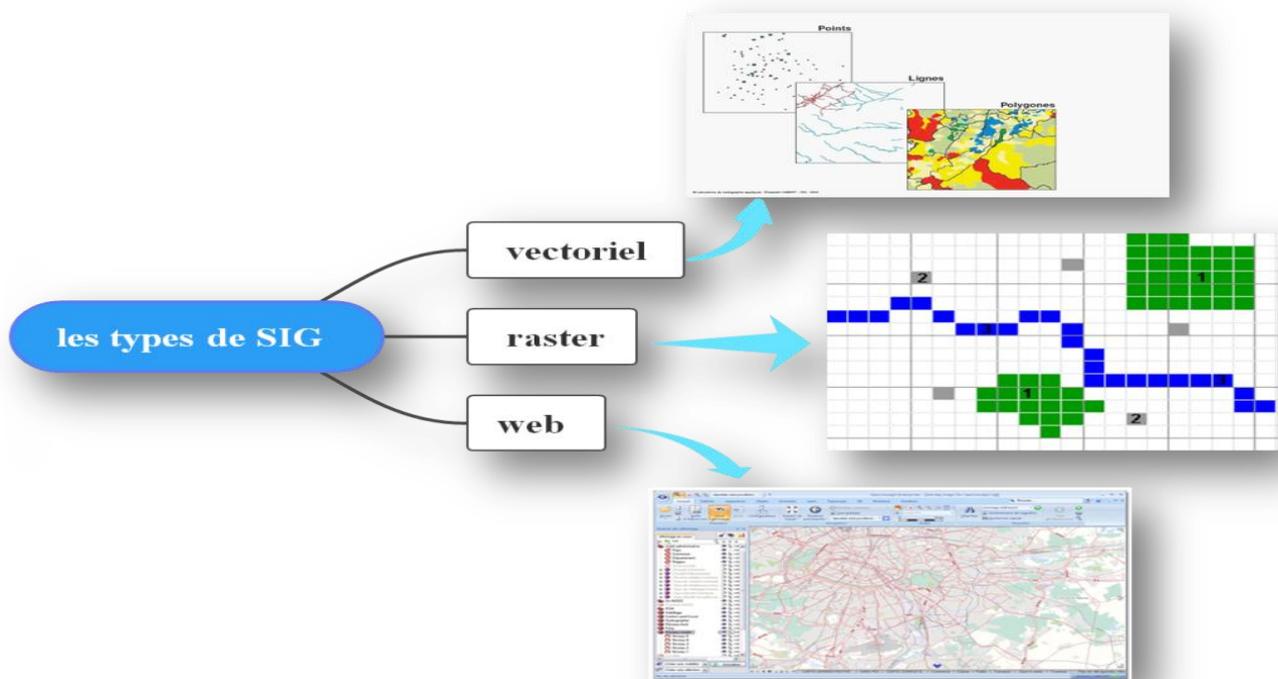


Figure 12: Les différents types de SIG

III.3.2.1. SIG vectoriels

Ce type de SIG utilise des formes géométriques telles que des points, des lignes et des polygones pour représenter des caractéristiques géographiques [46]. La (*Figure 13*) illustre des données vectorielles dans un SIG ou différentes entités géographiques sont représentées sous forme de points, de lignes et de polygones.

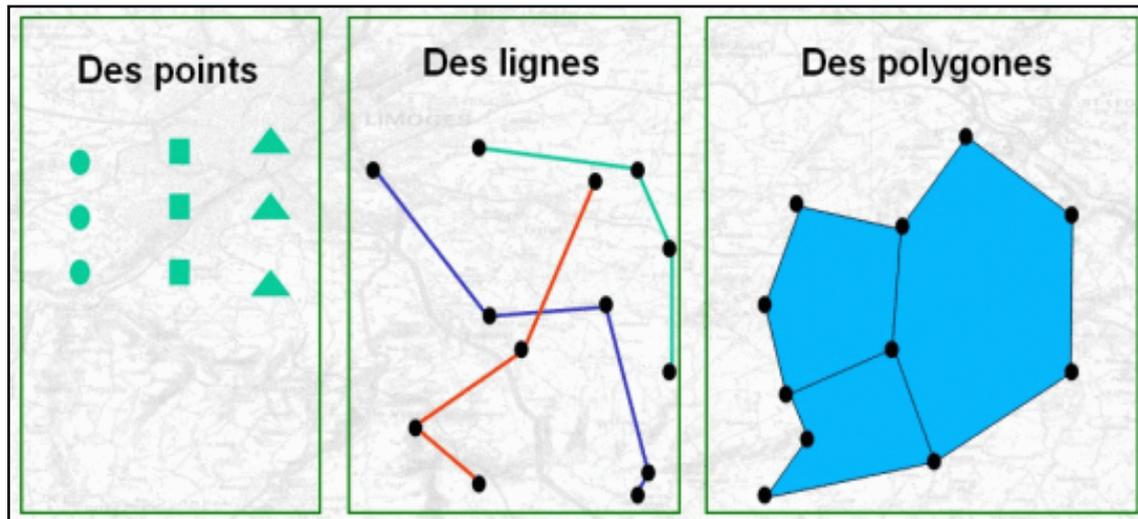


Figure 13: les données vectorielles [47]

III.3.2.2. SIG raster

Ce type de SIG utilise des matrices de pixels pour représenter des informations géographiques telles que des images aériennes ou des modèles de relief [48]. La (Figure 14) illustre l'utilisation des données raster dans un SIG, où les informations géographiques sont représentées sous forme de grille de pixels.

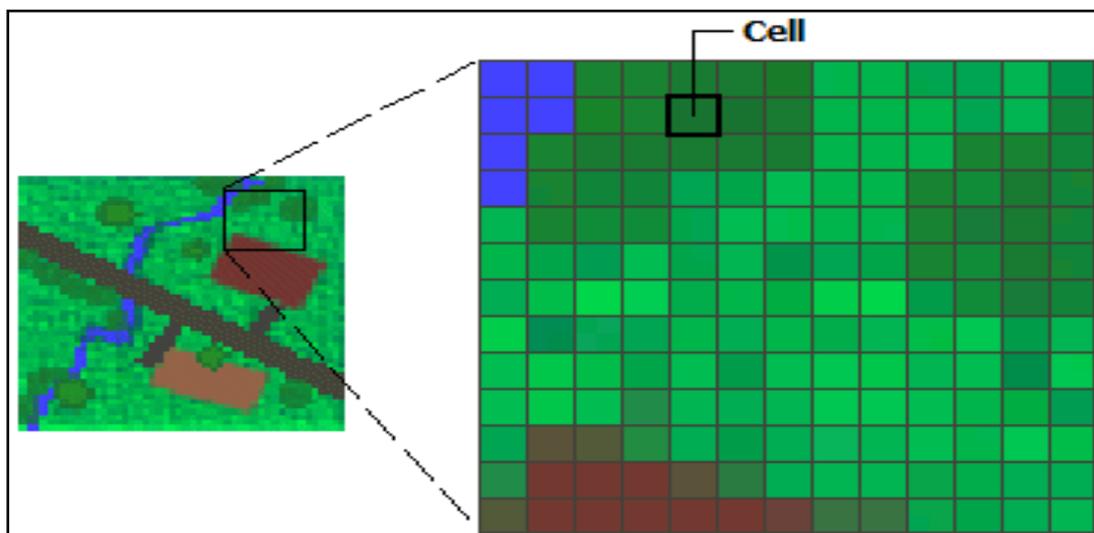


Figure 14: les données raster [47]

III.3.2.3. SIG Web

Ce type de SIG utilise des technologies Web pour fournir des données géographiques en temps réel via des applications et des services en ligne. Les SIG Web incluent souvent des cartes interactives et des visualisations en temps réel [49].

Les SIG vectoriels sont souvent utilisés pour représenter des données structurées, telles que les limites administratives ou les réseaux de routes, tandis que les SIG raster sont utilisés pour représenter des données continues, telles que les modèles de relief ou les images satellite. Les SIG Web sont souvent utilisés pour fournir des données géographiques accessibles et interactives à un large public.

III.3.3. Les différents composants d'un SIG

Les SIG sont composés de plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour collecter, stocker, analyser et visualiser les données géographiques (*Figure 15*). Voici les composants principaux d'un SIG:

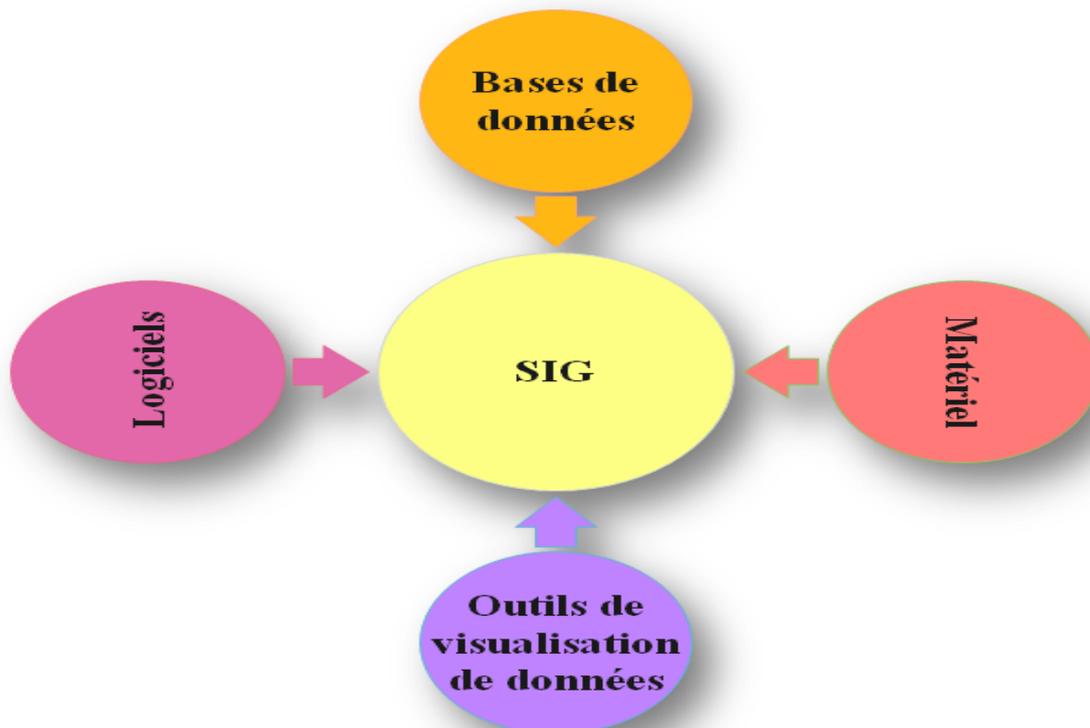


Figure 15: Les composants d'un SIG

III.3.3.1. Bases de données

Les bases de données sont au cœur de tout SIG. Elles sont utilisées pour stocker les données géographiques, telles que les positions géographiques, les informations sur les bâtiments et les routes, ainsi que les données sur l'environnement et les ressources naturelles[50].

III.3.3.2. Logiciels

Les logiciels de SIG sont utilisés pour collecter, analyser et visualiser les données géographiques. Ils peuvent inclure des logiciels de cartographie, des logiciels d'analyse géospatiale et des logiciels de visualisation de données[50].

III.3.3.3. Outils de visualisation de données

Les outils de visualisation de données sont utilisés pour représenter graphiquement les données géographiques. Ils peuvent inclure des cartes, des graphiques et des images en 3D[51].

III.3.3.4. Matériel

Les SIG nécessitent également du matériel pour collecter et stocker les données géographiques. Cela peut inclure des dispositifs de collecte de données tels que des GPS, des caméras et des drones, ainsi que des ordinateurs pour stocker les données et exécuter les logiciels de SIG[50].

III.3.4. Les applications courantes des SIG dans divers domaines

Les SIG sont utilisés dans une variété de domaines pour planifier, gérer et évaluer des projets en utilisant des données géographiques. Les applications courantes comprennent l'urbanisme, l'environnement, la planification des ressources, le géo-marketing et la gestion des catastrophes. (*Figure 16*) illustre les domaines d'application de SIG dans ces différents secteurs.

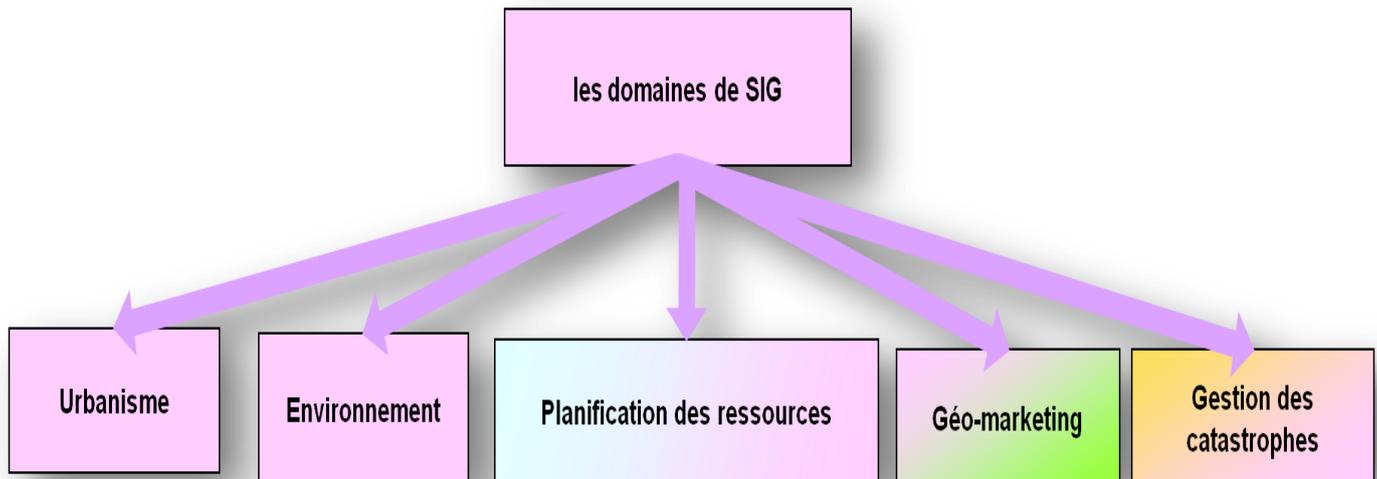


Figure 16: Les domaines d'application de SIG

III.3.4.1. Urbanisme

Les SIG sont utilisés pour planifier la croissance urbaine en utilisant des données géographiques pour évaluer les impacts sur l'environnement, les ressources naturelles et la qualité de vie des habitants[52].

III.3.4.2. Environnement

Les SIG sont utilisés pour étudier les écosystèmes, les changements climatiques et la gestion des ressources naturelles telles que les forêts, les terres agricoles et les ressources en eau[53].

III.3.4.3. Planification des ressources

Les SIG sont utilisés pour planifier les ressources telles que les ressources en eau, les terres agricoles et les zones industrielles en utilisant des données géographiques pour évaluer les impacts sur l'environnement et les communautés locales[54].

III.3.4.4. Géo-marketing

Les SIG sont utilisés pour collecter et analyser les données géographiques sur les consommateurs et les marchés pour aider les entreprises à déterminer les meilleurs emplacements pour leurs magasins, leurs centres de distribution et leurs centres de service.

III.3.4.5. Gestion des catastrophes

Les SIG sont utilisés pour planifier et coordonner les réponses aux catastrophes telles que les inondations, les feux de forêt et les tempêtes en utilisant des données géographiques pour évaluer les impacts sur les communautés et les infrastructures[55].

III.3.5. Fonctionnalités des SIG

Les SIG offrent plusieurs fonctionnalités qui permettent d'acquérir, de gérer, de stocker, d'analyser et de restituer les données géographiques. Ces fonctionnalités incluent l'acquisition de données géographiques à partir de différentes sources, la gestion et le stockage des données dans une base de données géographique, l'analyse spatiale des données pour examiner les relations spatiales entre différentes couches de données et la présentation des données sous forme de cartes, de graphiques, de tableaux, etc. (*Figure 17*) illustre ces fonctionnalités et montre comment les SIG peuvent aider à mieux comprendre les données géographiques pour prendre des décisions éclairées.[56], [57]

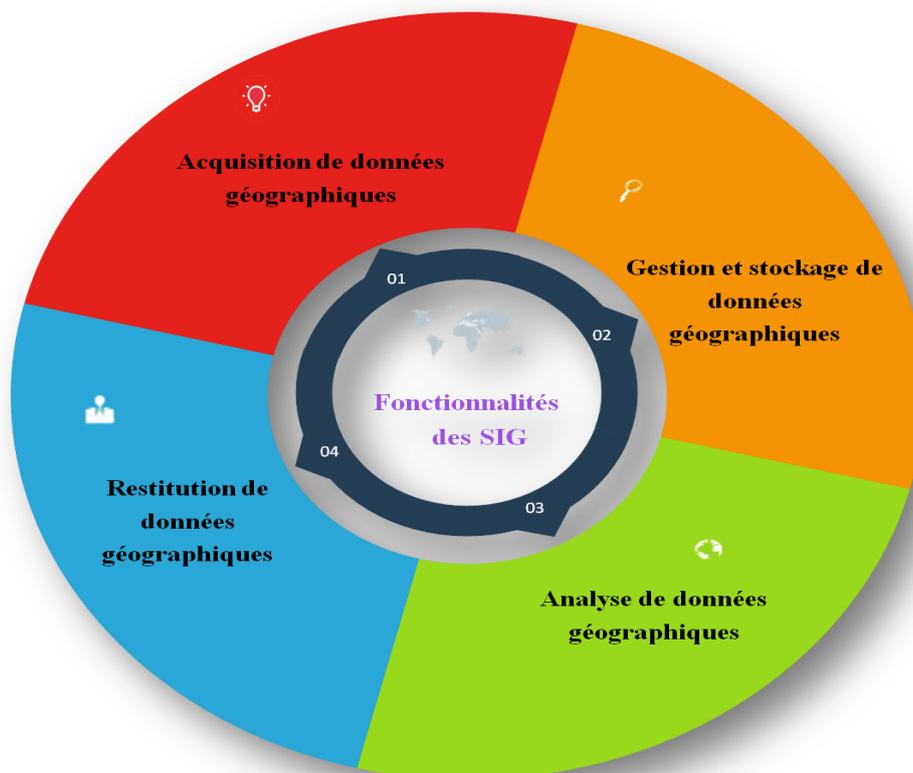


Figure 17: Les fonctionnalités d'un SIG

III.3.5.1. Acquisition de données géographiques

Les SIG permettent de collecter des données géographiques à partir de différentes sources, telles que des images satellites, des relevés topographiques, des enquêtes sur le terrain, etc. Ces données peuvent être intégrées dans un système d'information géographique pour une utilisation ultérieure.

III.3.5.2. Gestion et stockage de données géographiques :

Les données géographiques collectées peuvent être stockées et gérées dans une base de données géographique, ce qui permet une organisation efficace des données et une gestion optimisée des informations.

III.3.5.3. Analyse de données géographiques

Les SIG permettent d'analyser les données géographiques en utilisant des outils d'analyse spatiale pour examiner les relations spatiales entre les différentes couches de données. Cela peut inclure la superposition de couches de données, le calcul de distances et d'itinéraires, la création de zones tampons, la modélisation de flux, etc.[48].

III.3.5.4. Restitution de données géographiques

Les SIG permettent de présenter les données géographiques sous forme de cartes, de graphiques, de tableaux, etc. pour aider les utilisateurs à comprendre et à interpréter les données. Ces données peuvent être exportées dans différents formats pour une utilisation ultérieure ou pour la présentation à d'autres personnes.

III.3.6. La tendance d'un SIG

Dans un monde de plus en plus numérique et connecté, il est crucial d'étendre les collaborations, de favoriser les échanges et de réfléchir collectivement pour trouver les meilleures solutions aux enjeux actuels. Les SIG connaissent cinq tendances majeures :

III.3.6.1. Des analyses géospatiales avancées

La connaissance et la maîtrise de l'environnement sont essentielles au développement de toute entreprise. Le SIG facilite l'analyse et la visualisation des données de manière visuelle, simple et accessible sur tous les supports et en tout temps[58].

III.3.6.2. Une analyse rapide et efficace des données massives

Comment utiliser les innombrables données disponibles qui intègrent une dimension spatiale ? Les organisations et les utilisateurs peuvent désormais facilement s'approprier ces données pour les comprendre et créer leurs propres flux d'analyses[58].

III.3.6.3. Le SIG en temps réel

Grâce aux plateformes participatives et aux consultations sur tous les périphériques, l'utilisation "en temps réel" du SIG doit pouvoir s'intégrer directement de l'Internet des Objets (IoT) vers le SIG. L'information est analysée, visualisée et partagée au sein d'applications en ligne auxquelles se connectent les organisations et les consommateurs [58].

III.3.6.4. S'adapter à la mobilité

Le SIG procure une expérience utilisateur plus fluide grâce à son intégration directe dans les générateurs d'applications et les applications mobiles. Les smartphones sous iOS ou Android peuvent ainsi contribuer à la collecte des données géospatiales et à leur exploitation, n'importe où pour ensuite les partager dans le Cloud de l'organisation[58].

III.3.6.5. Un SIG plus convivial

Le SIG est désormais directement connecté au public, permettant aux professionnels de partager facilement auprès du plus grand nombre certaines parties de leurs travaux et de leurs analyses. L'outil SIG, qui réunit puissance de traitement, capacité à fédérer les données et ergonomie d'utilisation, se situe ainsi au carrefour de deux mondes, celui des géomaticiens (professionnels du SIG) et du grand public[58].

III.3.7. Les logiciels SIG les plus populaires

Dans le domaine des Systèmes d'Information Géographique (SIG), il existe une multitude de logiciels qui offrent des fonctionnalités variées pour la gestion, l'analyse et la visualisation des données spatiales. Parmi ces logiciels, certains sont payants (*Figure 18*) nécessitant un investissement financier pour leur utilisation, tandis que d'autres sont gratuits (*Figure 19*), offrant des solutions accessibles à tous.

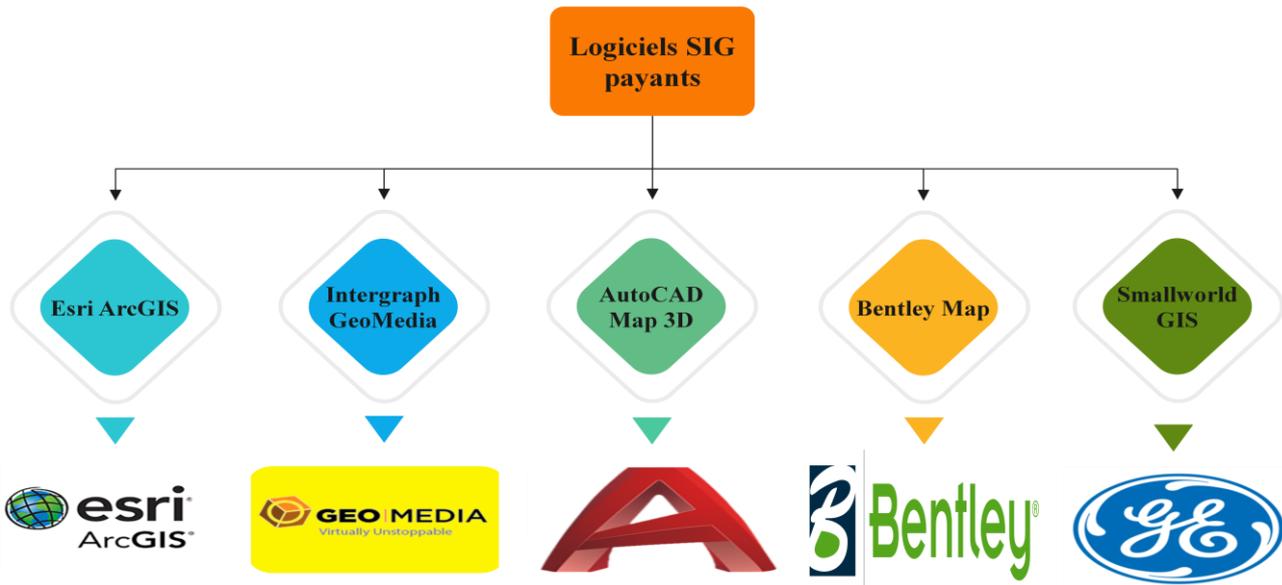


Figure 18: Les logiciels SIG payants

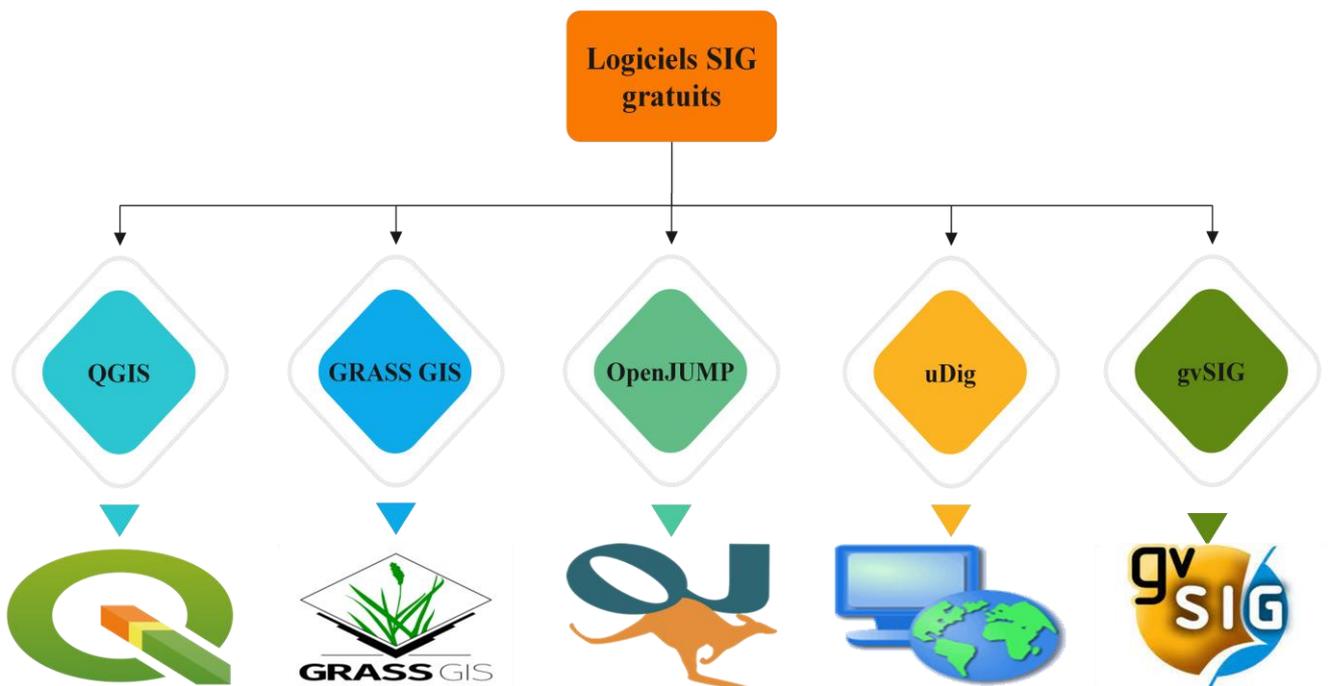


Figure 19: Les logiciels SIG gratuits

Les logiciels SIG sont des outils informatiques essentiels pour collecter, stocker, analyser et visualiser des données géographiques. Il existe de nombreux logiciels SIG disponibles sur le marché, allant des solutions gratuites et open source aux solutions professionnelles coûteuses.

Parmi ces logiciels SIG, QGIS est un logiciel open source populaire qui offre des fonctionnalités puissantes d'analyse et de visualisation de données géographiques. QGIS est une option rentable pour les professionnels et les organisations qui cherchent à effectuer des analyses géographiques sans dépenser beaucoup d'argent. En outre, QGIS peut être utilisé pour visualiser des données géographiques provenant de sources diverses, telles que les bases de données vectorielles et raster, les images satellites et les fichiers de formes. En fin de compte, QGIS est un choix solide pour les utilisateurs qui cherchent un logiciel SIG gratuit et fiable.

III.4. Présentation de QGIS

III.4.1. Définition

Le Quantum Geographic Information System (QGIS) est un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) open source distribué sous la licence GNU GPL. Il permet la gestion, l'analyse, la visualisation et la publication de données spatiales, en intégrant des fonctionnalités de géotraitement, d'analyse spatiale et de cartographie[59].

Grâce à sa communauté active de développeurs et d'utilisateurs, QGIS propose une alternative gratuite et efficace aux logiciels SIG propriétaires, tels qu'ArcGIS de la firme ESRI[59].

Il est compatible avec différents systèmes d'exploitation, tels que Linux, Mac OS X, Android et Windows. [59]

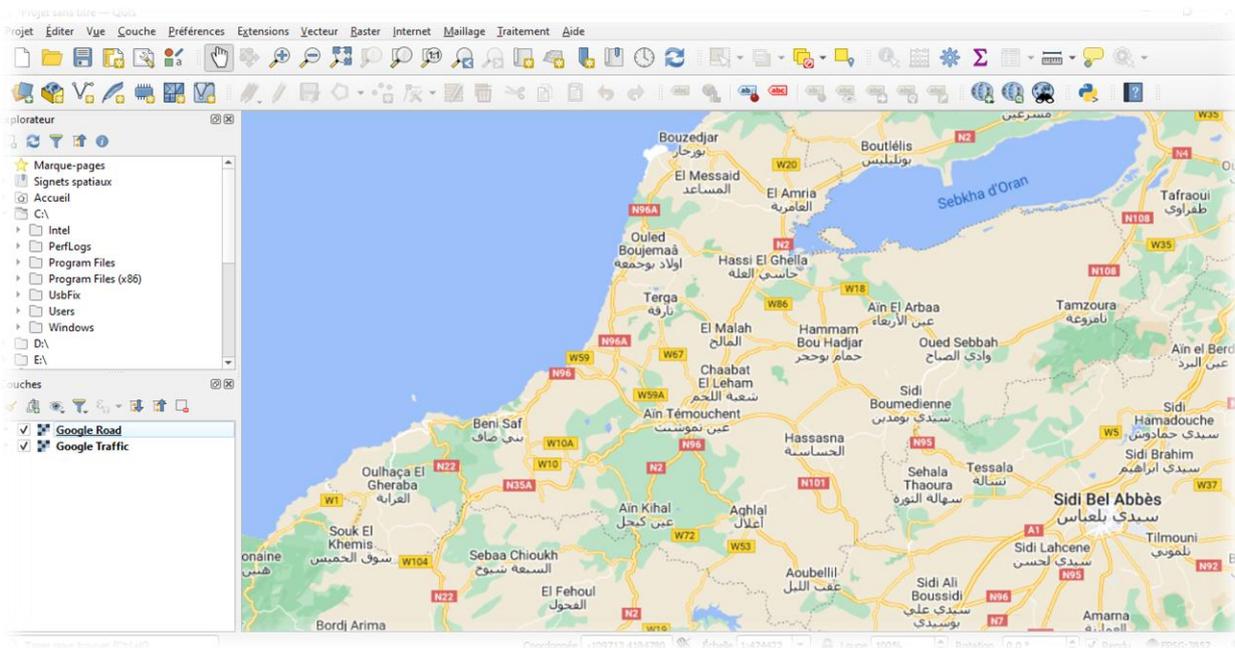


Figure 20: Interface de QGIS avec Google road et Google traffic

III.4.2. Historique

QGIS a été créé en 2002 par Gary Sherman, dans le but de proposer une alternative open source à ArcGIS. Depuis lors, QGIS a connu un développement rapide et constant, avec la participation d'une communauté internationale d'utilisateurs et de développeurs enthousiastes. En 2007, QGIS a été adopté comme l'un des projets officiels de la Fondation Open Source Geospatial (OSGeo), une association à but non lucratif créée en 2006 pour promouvoir les logiciels SIG open source. Depuis lors, QGIS a intégré de nombreuses fonctionnalités et applications tierces, telles que Orfeo ToolBox, GRASS, GDAL OGR, LIDAR, R scripts, SAGA, Scripts Python et TauDEM[59].

QGIS a intégré des technologies de pointe, telles que le traitement quantique avec le module Qiskit Earth, pour une analyse avancée des données géospatiales.

III.4.3. Objectifs généraux de QGIS

QGIS est un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) open source, qui permet de visualiser, de traiter et d'analyser des données spatiales. [60]

III.4.3.1. Saisie et stockage numérique des données spatiales

Le premier objectif de QGIS est de stocker des données spatiales numériques telles que des cartes, des images aériennes, des modèles numériques de terrain, des couches vecteur ou encore des tables attributaires associées à ces couches. Le logiciel permet de gérer les différentes projections géographiques et de stocker les données en différents formats (par exemple, Shapefile, GeoJSON, PostGIS, SpatiaLite, etc.).

III.4.3.2. Structuration de l'information

Comme tout SIG, QGIS exige une structuration de l'information et une modélisation du monde réel. Pour cela, le logiciel permet de créer des couches spatiales, de définir les systèmes de coordonnées, de définir les types de données et d'attributs, ainsi que de gérer les relations spatiales entre les différentes couches.

III.4.3.3. Calculs spatiaux et géométriques

QGIS offre une large gamme d'outils pour effectuer des calculs métriques, techniques, de positionnement et des projections géographiques. Il est possible de calculer des distances, des aires, des volumes, des directions, des angles, des intersections, des différences, des buffers, des zones tampons, des ombres, etc. Le logiciel permet également de manipuler et de transformer des données géométriques, comme les déplacer, les pivoter, les étirer, les modifier, etc.

III.4.3.4. Gestion et traitement des collections d'objets

QGIS permet de gérer et de traiter des collections d'objets spatiaux, y compris des couches raster et vecteur. Il offre des fonctionnalités pour créer, éditer, supprimer, fusionner, diviser, découper, joindre, filtrer et trier des couches. Le logiciel permet également de travailler avec des données externes, telles que des tables attributaires, des images, des diagrammes, des graphiques, etc.

III.4.3.5. Gestion administrative et partage de données entre utilisateurs

QGIS permet de gérer le partage et l'accès aux données entre utilisateurs en permettant de publier des cartes en ligne, de gérer des projets collaboratifs, d'accéder à des données en temps réel via des services web, etc. Le logiciel offre également des fonctionnalités pour la sauvegarde, la récupération et la synchronisation des données entre différents utilisateurs.

III.4.3.6. Analyse spatiale

QGIS est un outil puissant pour l'analyse spatiale, avec des fonctionnalités pour effectuer des requêtes spatiales, des analyses de proximité, des intersections spatiales, des agrégations spatiales, des interpolations, des classifications, des modélisations, etc. Le logiciel permet également d'utiliser des outils avancés d'analyse tels que la géostatistique, les réseaux, l'analyse multicritère, la simulation, etc.

III.4.3.7. Traitement d'images

QGIS permet le traitement d'images géographiques. Les utilisateurs peuvent effectuer des opérations de classification, de mosaïque, de fusion, de rehaussement, etc.

III.4.3.8. Simulation et modélisation

QGIS peut être utilisé pour la simulation et la modélisation des données géographiques. Les utilisateurs peuvent créer des modèles de processus spatiaux, des modèles de simulation d'événements, etc.

III.4.3.9. Intégration de données externes

QGIS permet d'intégrer des données externes à partir de sources telles que des services de cartographie en ligne, des données météorologiques, des données démographiques, etc.

III.4.3.10. Gestion des couches de données

QGIS permet la gestion des couches de données géographiques, notamment leur ajout, leur suppression, leur modification, leur fusion, leur jointure, etc.

III.4.4. Les avantages de QGIS

QGIS offre un rapport qualité-prix imbattable par rapport aux logiciels SIG payants. Il est gratuit, flexible, compatible, puissant et facile à utiliser (*Figure 21*), ce qui en fait un excellent choix pour les utilisateurs de SIG. [61], [62]

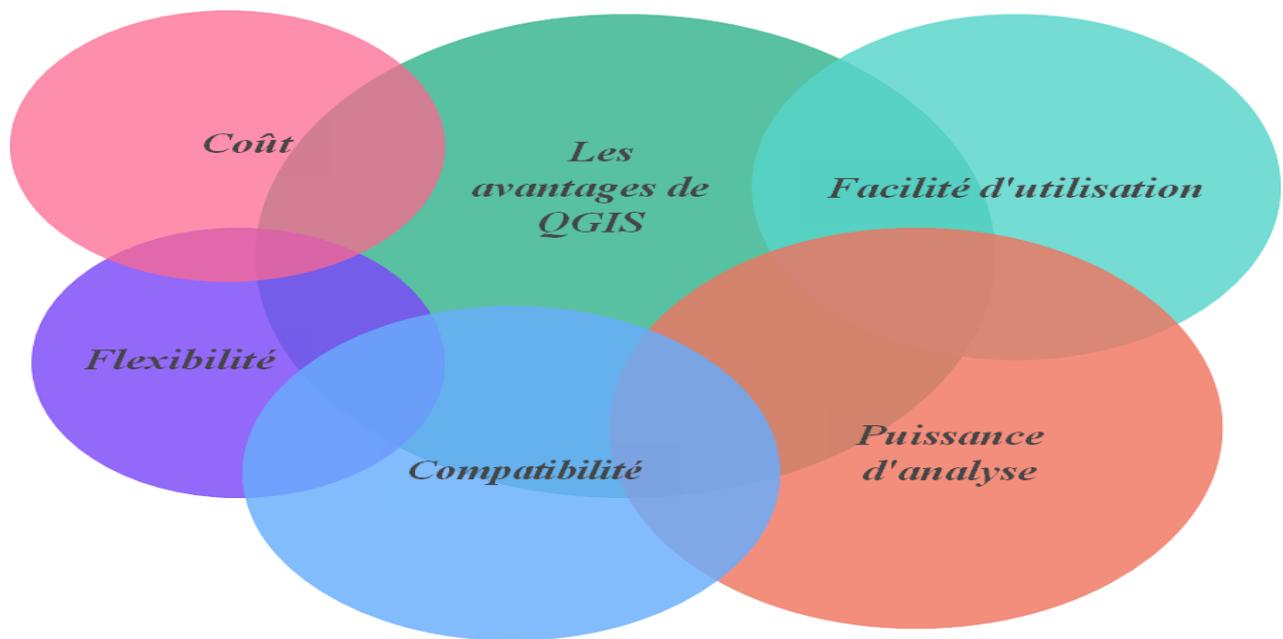


Figure 21: Les avantages de QGIS

III.4.4.1. Coût

QGIS est un logiciel gratuit, ce qui en fait un choix économique pour les utilisateurs qui ne peuvent pas se permettre de payer pour un logiciel SIG coûteux.

III.4.4.2. Flexibilité

QGIS est un logiciel open source, ce qui signifie que les utilisateurs peuvent personnaliser et adapter le logiciel à leurs besoins spécifiques. Les utilisateurs peuvent également ajouter des fonctionnalités supplémentaires en utilisant des plugins.

III.4.4.3. Compatibilité

QGIS est compatible avec de nombreux formats de données géographiques différents, ce qui facilite le travail avec des données provenant de sources diverses.

III.4.4.4. Puissance d'analyse

QGIS offre de nombreuses fonctionnalités pour effectuer des analyses spatiales avancées, telles que la génération de cartes thématiques, la classification et la sélection de données.

III.4.4.5. Facilité d'utilisation

QGIS a une interface utilisateur intuitive et facile à naviguer, ce qui la rend idéale pour les utilisateurs débutants.

III.4.5. Les fonctionnalités de QGIS

QGIS offre de nombreuses fonctionnalités les utilisateurs de SIG. Les utilisateurs peuvent importer des données géospatiales, personnaliser l'apparence des cartes, effectuer des analyses de données, visualiser des données géospatiales et créer des tableaux de bord pour présenter des données.[63]

III.4.5.1. Visualiser des données

QGIS permet de visualiser des données géographiques en les superposant sur une carte. Les utilisateurs peuvent ajouter des couches de données, modifier leur style et leur symbologie pour afficher les informations de manière claire et précise.

III.4.5.2. Parcourir les données et créer des cartes

Vous pouvez explorer les données spatiales stockées sur votre ordinateur ou sur un serveur distant en utilisant l'interface utilisateur conviviale de QGIS. Vous pouvez également créer des cartes en personnalisant la mise en page et en ajoutant des éléments tels que des légendes, des titres et des échelles.

III.4.5.3. Créer, éditer, gérer et exporter des données

QGIS est capable de créer, d'éditer et de gérer des données géographiques. Vous pouvez créer de nouvelles couches de données à partir de zéro, importer des fichiers existants et modifier les attributs de la couche. Enfin, vous pouvez exporter les données sous différents formats tels que Shapefile, GéoJSON, CSV et plus encore.

III.4.5.4. Analyser des données

QGIS offre une variété d'outils d'analyse pour extraire des informations à partir de données géographiques. Vous pouvez effectuer des analyses spatiales telles que des intersections, des tampons, des unions, des agrégations spatiales et plus encore. Vous

pouvez également effectuer des analyses de données telles que des statistiques de données et des analyses de tendances.

III.4.5.5. Publier des cartes sur Internet

QGIS vous permet de publier vos cartes et données sur Internet en utilisant différentes méthodes telles que le serveur WMS, le serveur WFS et plus encore. Vous pouvez également exporter des cartes en HTML interactif pour les publier sur votre site Web.

III.4.5.6. Étendre les fonctionnalités de QGIS à l'aide d'extensions

QGIS dispose d'un écosystème d'extensions pour ajouter de nouvelles fonctionnalités à l'application. Ces extensions peuvent être installées via le gestionnaire d'extensions de QGIS.

Extensions principales : Les extensions principales sont des fonctionnalités intégrées à QGIS qui sont activées par défaut. Ils comprennent des outils de numérisation avancés, des outils de traitement d'images, des outils d'analyse de terrain et plus encore.

Extensions Python externes: Les extensions Python externes sont des extensions tierces développées par des développeurs externes. Ces extensions peuvent être installées manuellement en utilisant le gestionnaire d'extensions de QGIS et offrent des fonctionnalités supplémentaires telles que des outils de géocodage, des outils de visualisation de données, des outils de traitement d'images et plus encore.

III.5. Interface de QGIS

L'interface du logiciel QGIS (*Figure22*) ressemble de façon générale aux interfaces de la majorité des logiciels fonctionnant sous Windows. Elle est constituée par une barre des titres située en haut, au dessous de laquelle se trouve un ensemble de barres d'outils installées par défaut. A gauche sont situés 2 panneaux par défaut le panneau explorateur et le panneau couches. En bas de l'interface est affichée la barre d'état qui permet entre autres d'afficher les coordonnées et le système de coordonnées de votre projet.[64]

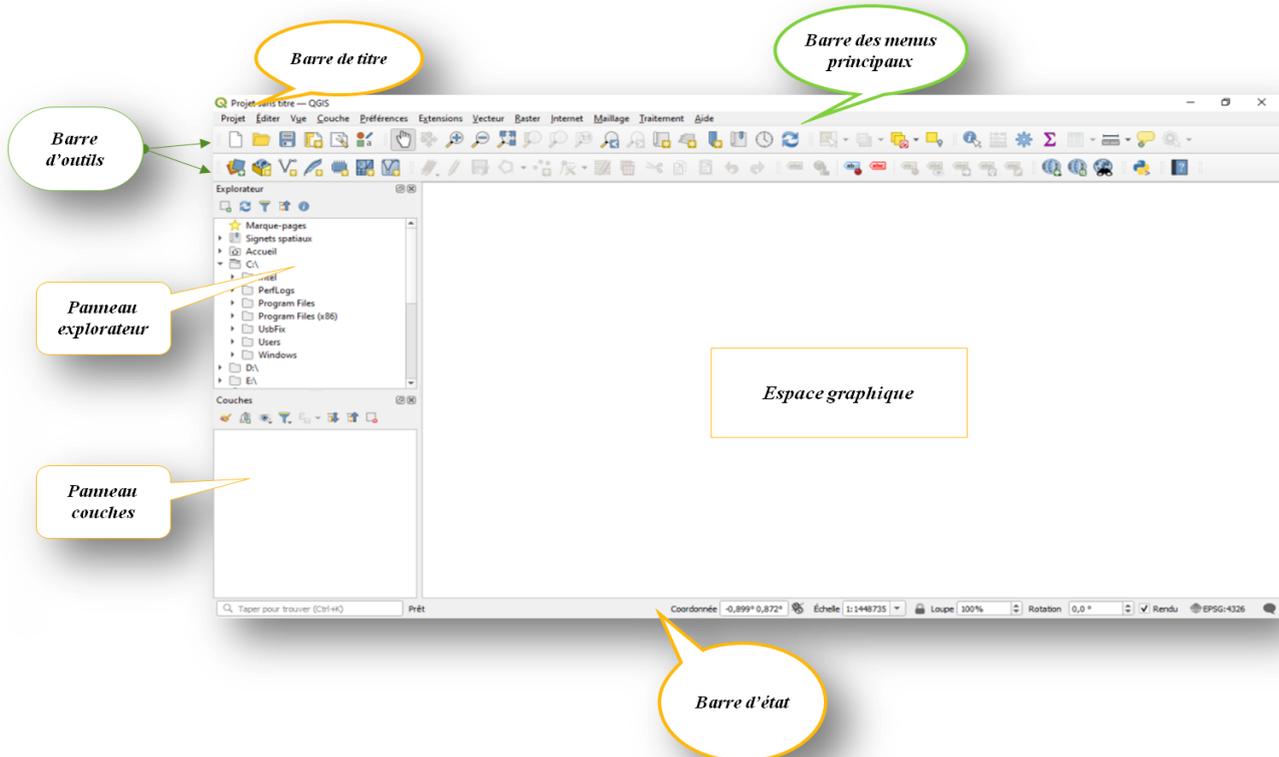
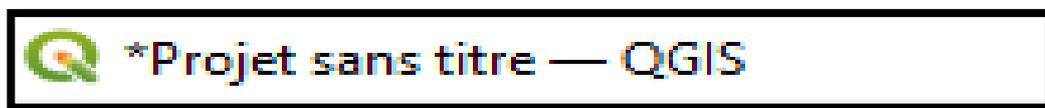


Figure 22:interface de QGIS

✚ La barre de titre

La barre de titre Est la partie supérieure de l'interface de QGIS et affiche le nom du projet en cours et le nom de l'application. Elle peut également fournir des informations sur la version de QGIS en cours d'utilisation et afficher des messages d'erreur. C'est une partie importante de l'interface car elle fournit des informations sur l'état du projet et de l'application.[64], [65]



✚ La barre des menus principaux

La barre des menus principaux de QGIS contient des menus déroulants qui permettent d'accéder à toutes les fonctionnalités de QGIS. Les menus principaux incluent des options pour la gestion de projets, des couches de données, la création et la gestion de cartes,

L'analyse spatiale, les plugins, les préférences et les options de QGIS. La barre de menu principale est importante car elle permet aux utilisateurs d'accéder rapidement à toutes les fonctionnalités de QGIS. [64], [65]



La barre d'outils

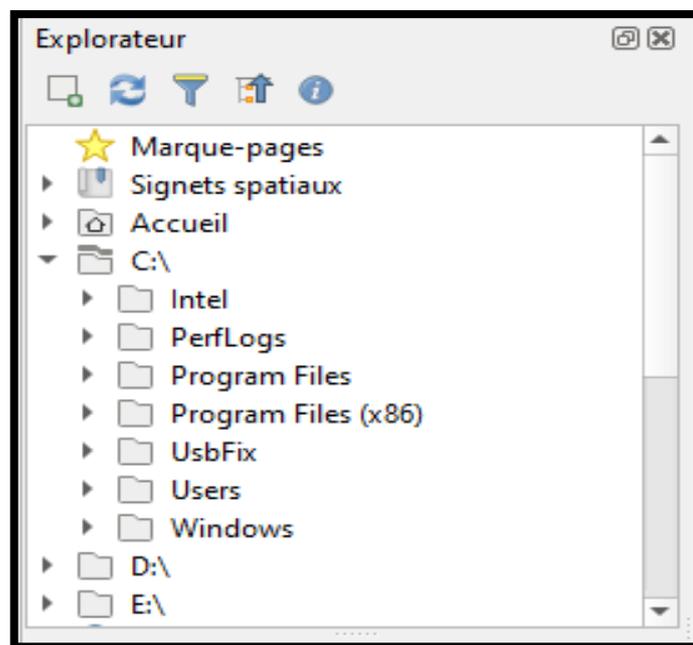


La barre d'outils de QGIS contient des icônes pour les outils fréquemment utilisés, tels que l'outil de sélection, l'outil de zoom, l'outil de mesure, l'outil de numérisation, etc. Les icônes de la barre d'outils peuvent varier en fonction des modules installés dans QGIS et des actions récemment utilisées. Les utilisateurs peuvent personnaliser la barre d'outils en ajoutant ou en supprimant des icônes pour les outils qu'ils utilisent le plus souvent. La barre d'outils est un élément important de l'interface de QGIS car elle permet aux utilisateurs d'accéder rapidement aux outils dont ils ont besoin pour leur travail. [64], [65]



Le panneau Explorateur

Le panneau Explorateur de QGIS fournit un accès facile aux sources de données, aux projets, aux styles, aux favoris, aux outils de traitement, etc. Les utilisateurs peuvent naviguer dans leurs fichiers locaux, leurs services en ligne, leurs bases de données et leurs projets QGIS à partir du panneau Explorateur. En outre, les utilisateurs peuvent ajouter des couches de données à leurs projets à partir du panneau Explorateur en les faisant glisser et en les déposant sur la carte. Le panneau Explorateur est un élément essentiel de l'interface de QGIS car il fournit une manière facile et pratique pour les utilisateurs d'explorer, d'ajouter et de gérer leurs données géospatiales. [64], [65]



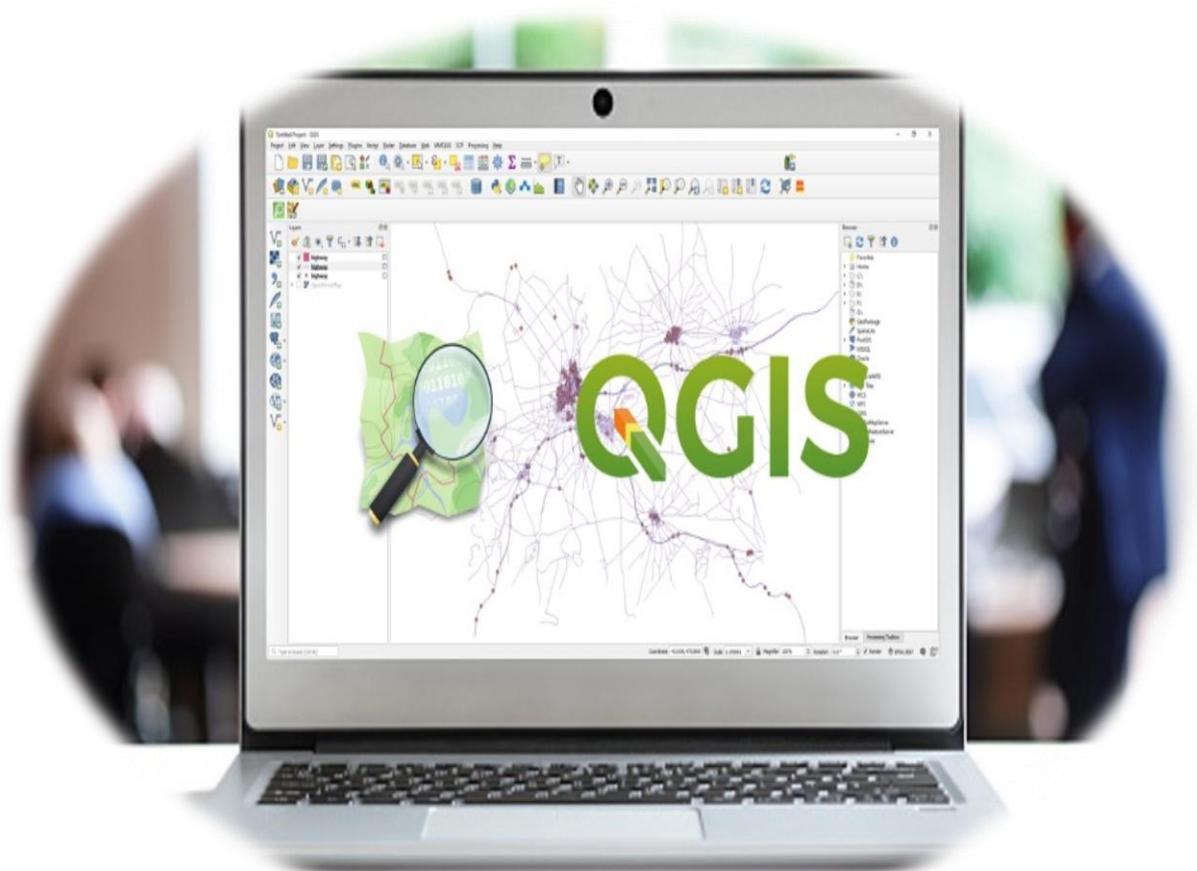
Le panneau de Couches

Le panneau de Couches de QGIS affiche toutes les couches de données ajoutées au projet actif, telles que les fichiers shapefile, les fichiers raster, les bases de données spatiales, etc. Les utilisateurs peuvent utiliser le panneau de Couches pour gérer les couches de données, pour modifier les propriétés de la couche, pour définir les styles, pour gérer les étiquettes, pour ajouter des symboles et pour effectuer d'autres opérations sur les données cartographiques. Les utilisateurs peuvent également organiser les couches en groupes et définir les propriétés de chaque groupe. Le panneau de Couches est un élément essentiel de l'interface de QGIS car il fournit un accès facile à toutes les couches de données ajoutées au projet et permet aux utilisateurs de les gérer efficacement. [64], [65]

III.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté le logiciel QGIS comme un outil précieux pour l'analyse et la visualisation des données spatiales. Nous avons constaté que QGIS est un logiciel open-source, gratuit et facile à utiliser, qui permet de manipuler et d'analyser des données géographiques de manière efficace et précise. Il offre une variété d'outils d'analyse spatiale tels que l'interpolation, la création de couches, la vectorisation et la création de cartes.

Chapitre IV : Modélisation de la nappe d'Ain Témouchent par le logiciel QGIS



IV.1. Introduction

Dans le cadre de notre mémoire, on est entrepris la modélisation de la nappe d'Ain Témouchent en utilisant le logiciel QGIS. L'objectif principal de cette application était de cartographier et d'analyser la position des stations et des forages présents dans la région afin de mieux comprendre la dynamique de cette nappe.

IV.2. Outils et méthodologie

IV.2.1. Les outils de travail

Pour la réalisation de notre étude, nous avons utilisé divers outils et matériels :

- Un PC Acer mémoire RAM installée de 2,00 Go avec un Système d'exploitation 64 bits (**Figure 23**), équipé du système d'exploitation Windows 10 Pro (**Figure 24**), qui nous ont permis de collecter, analyser et visualiser efficacement les données.

Spécifications de l'appareil	
Nom de l'appareil	DESKTOP-FNJ0HUT
Processeur	Intel(R) Celeron(R) CPU N2840 @ 2.16GHz 2.16 GHz
Mémoire RAM installée	2,00 Go (1,89 Go utilisable)
ID de périphérique	4646DDAD-25CB-4ECF-837D-7A7CF8261ADF
ID de produit	00330-80000-00000-AA006
Type du système	Système d'exploitation 64 bits, processeur x64
Stylect et fonction tactile	La fonctionnalité d'entrée tactile ou avec un stylect n'est pas disponible sur cet écran

Figure 23: Spécifications de l'appareil acer

Spécifications de Windows	
Édition	Windows 10 Professionnel
Version	21H2
Installé le	25/12/2022
Build du système d'exploitation	19044.2965
Expérience	Windows Feature Experience Pack 1000.19041.1000.0

Figure 24: Spécifications de Windows

- Le logiciel QGIS version 3.28.3 pour l'analyse spatiale des données dans notre étude. Le logiciel est une application SIG open source disponible en 46bits (*Figure 25*).

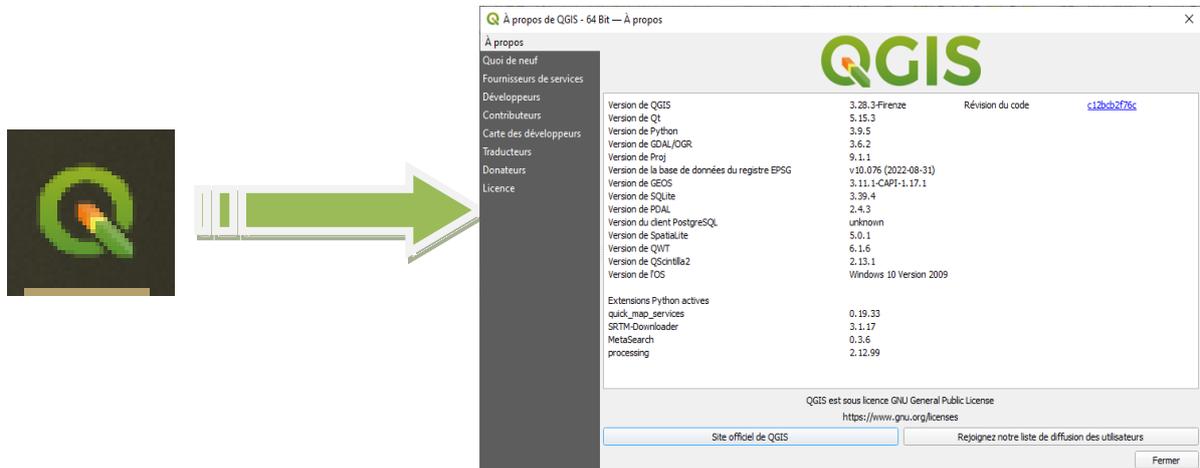


Figure 25: Propriétés de logiciel QGIS

- Excel 2007 (*Figure 26*) pour l'analyse statistique et la gestion des données dans notre étude.

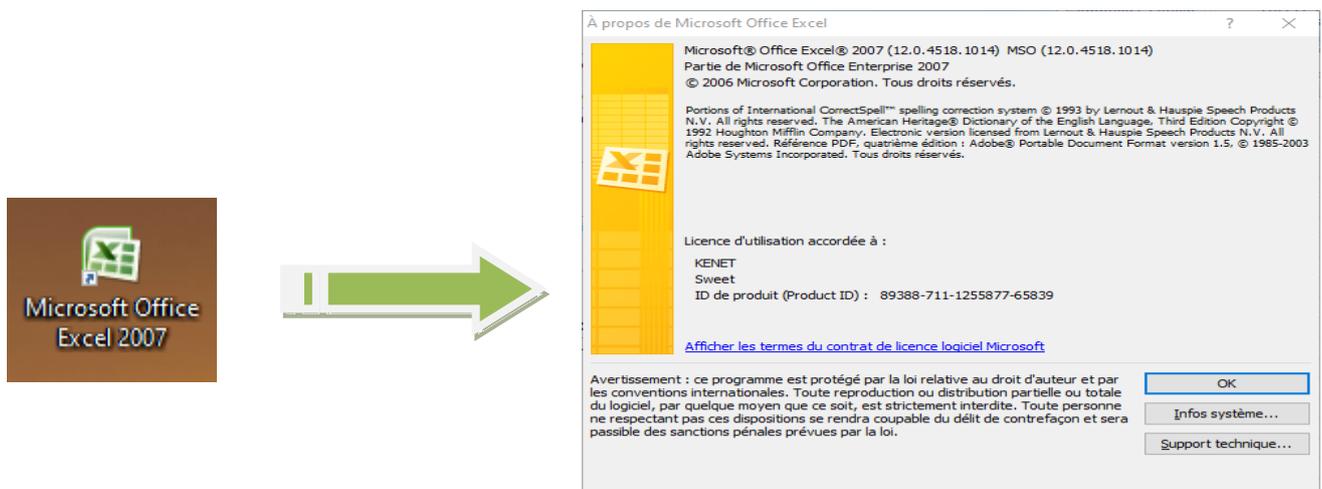


Figure 26: Propriétés de l'Excel

- Des fichiers Excel (**Figure 27**) contenant les coordonnées (x,y,z) en Lambert de 132 forages et 11 stations pluviométriques. Les données pluviométriques ont été enregistrées sur une période de 40 ans, et incluent des séries chronologiques pour chaque station. Nous avons utilisé ces fichiers pour réaliser des analyses spatiales et temporelles des données, ainsi que pour effectuer des calculs statistiques et des visualisations graphiques.

Nom	Modifié le ^	Type	Taille
 Forage étatique à travers la wilaya de Témouchent	09/03/2023 10:45	Feuille Microsoft ...	50 Ko
 STATIONS PLUVIOMETRIE EN LAAMBERT	15/03/2023 10:03	Feuille Microsoft ...	17 Ko
 el amria	15/03/2023 11:29	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 Aoubellil	15/03/2023 11:31	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 Aghlal	15/03/2023 11:33	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 Oued Berkeche	15/03/2023 11:33	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 Ain Témouchent	15/03/2023 11:33	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 Chabet Leham	15/03/2023 11:35	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 Ain El Arba	15/03/2023 11:39	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 Hassi El Ghella	15/03/2023 11:40	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 hamam bouhdjar	21/03/2023 09:46	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 tamazugha	21/03/2023 09:44	Fichier CSV Micro...	4 Ko
 el maleh (2)	21/03/2023 09:41	Fichier CSV Micro...	4 Ko

Figure 27: Fichiers d'Excel de travail

IV.2.2. Disponibilité et traitement des données

IV.2.2.1. Choix des forages

Pour la sélection des forages représentatifs de la région d'Ain Témouchent, nous avons tenu compte de plusieurs critères : la position géographique, la profondeur des forages, la qualité des données disponibles et la représentativité des débits et des niveaux statiques et dynamiques. Le **tableau 2** présente les caractéristiques de quelques forages sélectionnés

Tableau 2 : caractéristiques de quelques forages[66]

Nom de forage	Localité de forage	Xl(m)	YL (m)	Profondeur(m)	Niveau Statique (m)	Niveau Dynamique (m)	années	Débit (l/s)	Débit moyenne (m)	Etat	Gestionnaire
Sidi Mohamed	Ain Témouchent	150250	221250	134	15,5	38,70	1999	5	4	Bon	ADE
Sidi Boudia	Ain Témouchent	105600	223850	145	56,1	55,94	1999	5	4	Bon	ADE
Itaf Bis	Chabâat	151200	233050	120	5,48	16,92	2000	45	4	Bon	ADE
O/EI Kihal III	Oued Kihal	146200	234500	118	41,4	51,30	1992	8	4	Bon	ADE

IV.2.2.2. Choix des stations

Dans ces séries pluviométriques, il été tenté d'identifier le maximum de postes de mesures répondant aux conditions suivantes : la repartions, la densité et la durée. Autrement dit :

La taille de l'échantillon, la position géographique, la qualité des données.

Parmi les stations situées dans la zone d'étude, quatre stations **Tableau 3** dont les longueurs pluviométriques, des enregistrements de 40ans ont été retenus. Les cordonnées et les caractéristiques de ces stations sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau 3 caractéristiques des stations[67]

Stations	code	Cordonnées			Durée des observations
		X(Km)	Y(Km)	Z(m)	
Ain Témouchent	040205	153,5	227	350	1982-2021
Hamam Bouhdjar	040415	167.2	237.45	153	1982-2021
Aoubellil	040201	163.95	210.55	610	1982-2021
Tamazoura	040405	195.45	239.9	189	1982-2021

IV.3. Organigramme Méthodologie de travail

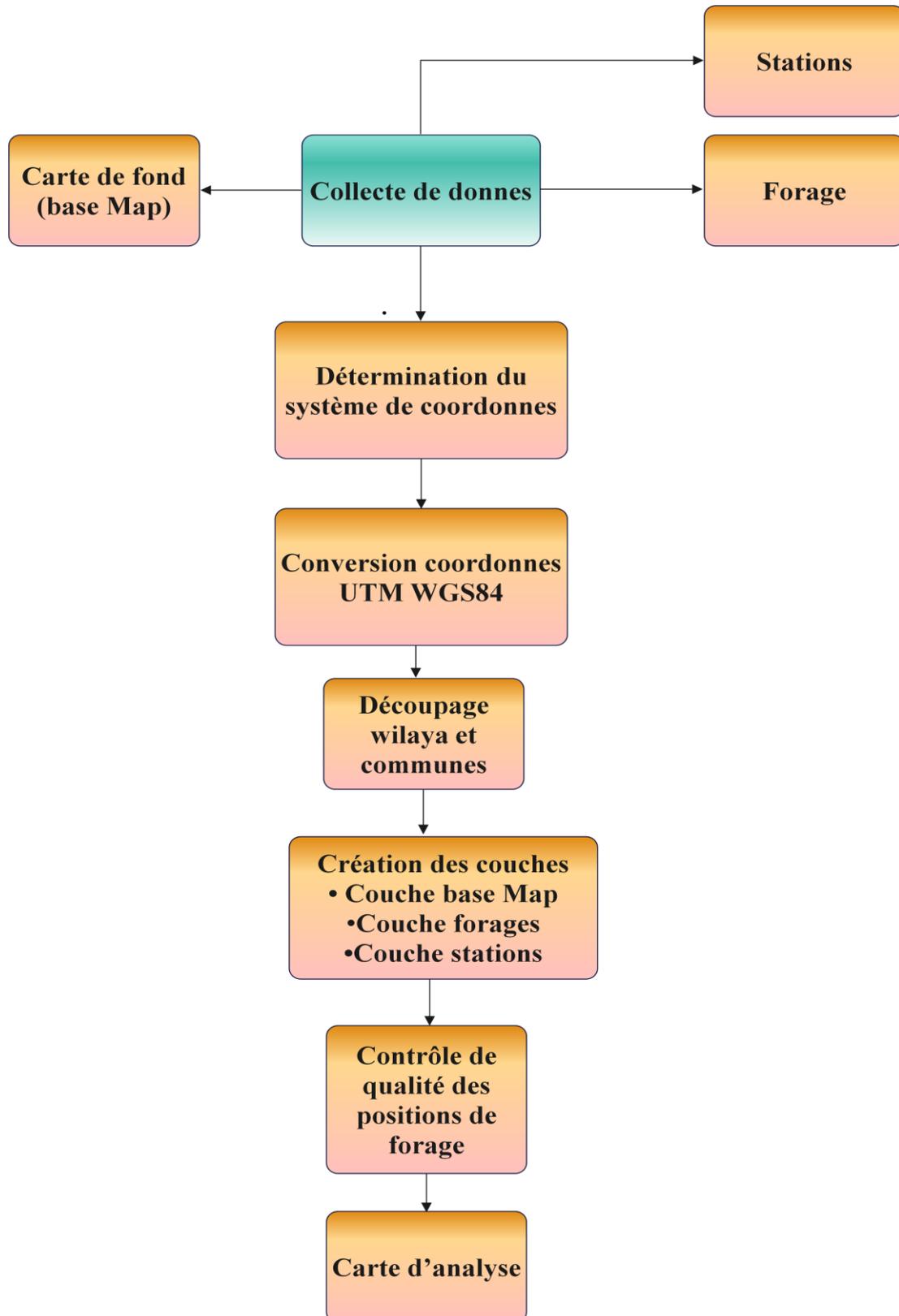


Figure 28: Organigramme de la méthodologie de travail

IV.3.1. Description de l'Organigramme

IV.3.1.1. Collecte de données

Nous avons utilisé des données provenant de la Direction des Ressources en Eau (DRE) pour collecter les informations sur :

- ✓ Les positions des forages et des stations pluviométrie en lambert dans la région d'Ain Témouchent.
- ✓ Les données sur la profondeur, le débit et le niveau statique de chaque forage.
- ✓ Les séries pluviométriques de chaque station dans une période de temps de 40ans.

Une carte de fond de la région d'Ain Témouchent pour utiliser comme base de notre carte de forage.

Toutes les données collectées ont été stockées dans des fichiers de données compatibles avec QGIS, le logiciel que nous avons utilisé pour créer notre projet.

IV.3.1.2. La détermination du système de coordonnées

Dans notre projet, nous avons utilisé le système de coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator) basé sur le système de référence géodésique WGS84 (World Geodetic System 1984) pour la projection de nos données.

IV.3.1.3. Conversion des coordonnées en UTM WGS84

Conversion des coordonnées Lambert des forages et stations en coordonnées UTM WGS84 a été réalisée en utilisant le logiciel QGIS.

La première étape a été de charger les données des forages ou les stations avec leurs coordonnées Lambert dans QGIS. Ensuite, nous avons utilisé l'outil de conversion de coordonnées.

Après avoir effectué la conversion, nous avons créé une nouvelle couche de forages ou de stations avec les coordonnées UTM WGS84. Ces couches ont ensuite été utilisées pour créer la carte d'Ain Témouchent.

La conversion des coordonnées en UTM WGS84 (*Figure29*) est important car ce système de coordonnées est largement utilisé à l'échelle internationale et permet d'assurer une meilleure précision des données géographiques

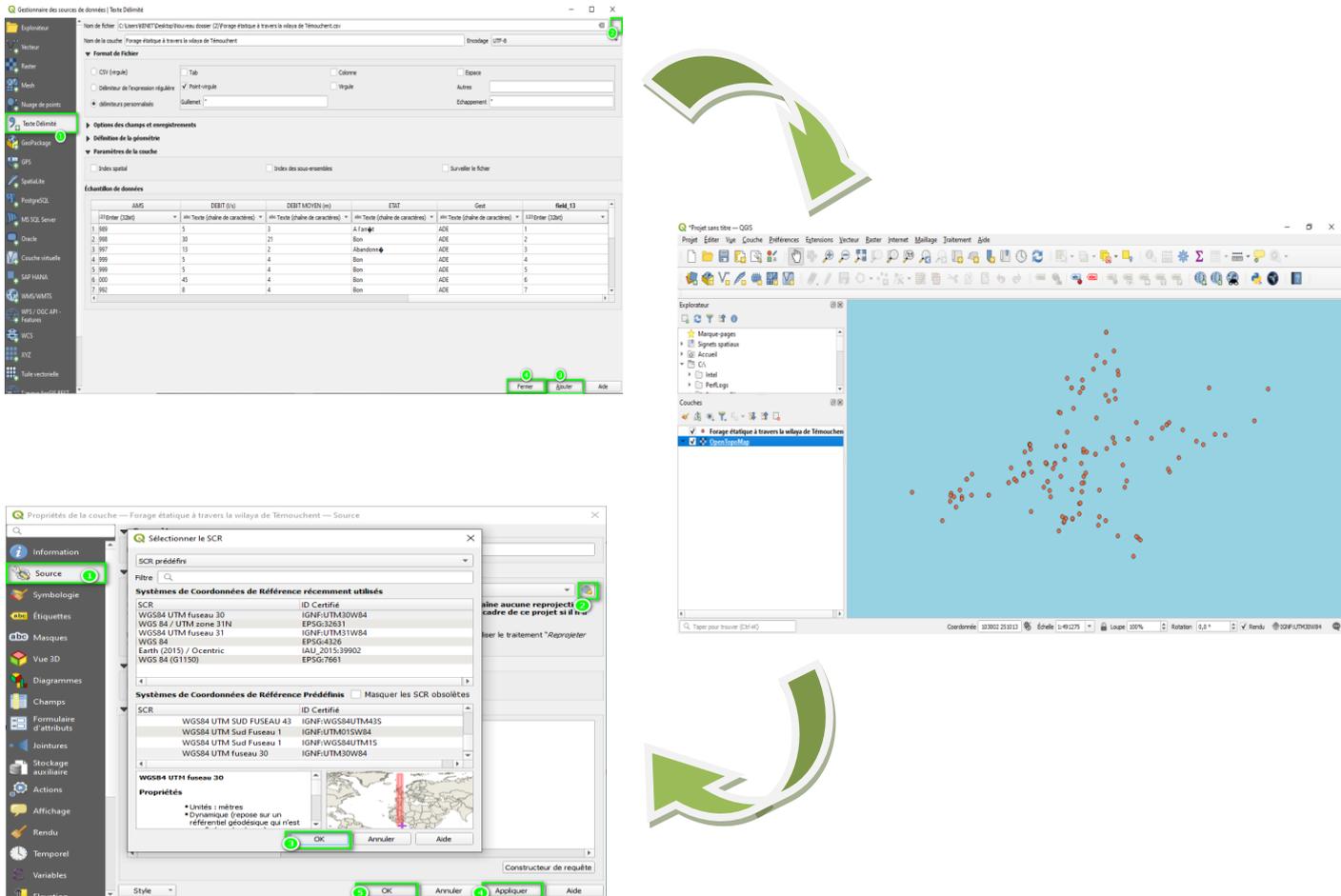


Figure 29: Conversion des coordonnées lambert en UTM WGS84 par QGIS

IV.3.1.4. Découpage Wilaya et communes

Après, nous avons procédé au découpage de la wilaya d'Ain Temouchent et de ses communes pour faciliter l'analyse des données (*Figure30*).

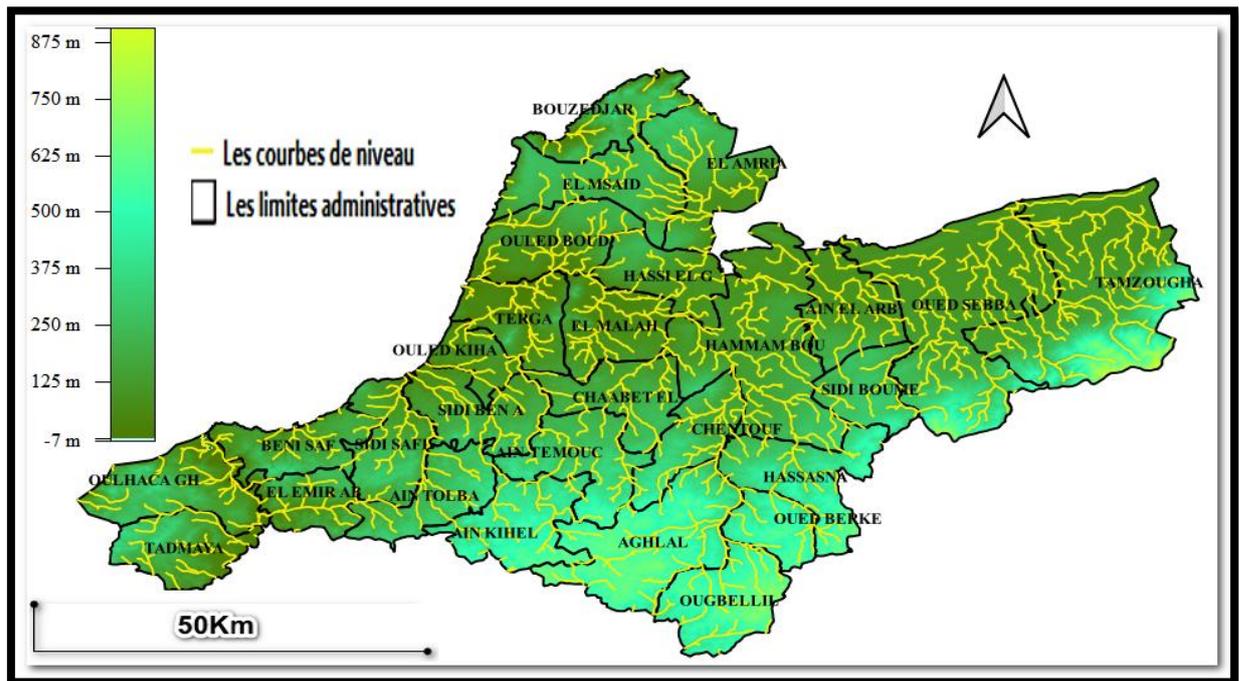


Figure 31: La couche de base de la Wilaya d'Ain Témouchent

Après la conversion des données nous avons importé ces données dans QGIS et créé la couche de base Map on utilisant l'outil "Créer une couche à partir d'un fichier CSV". Nous avons défini les champs appropriés pour chaque attribut et vérifié la projection des données (Figure32),(Figure33).

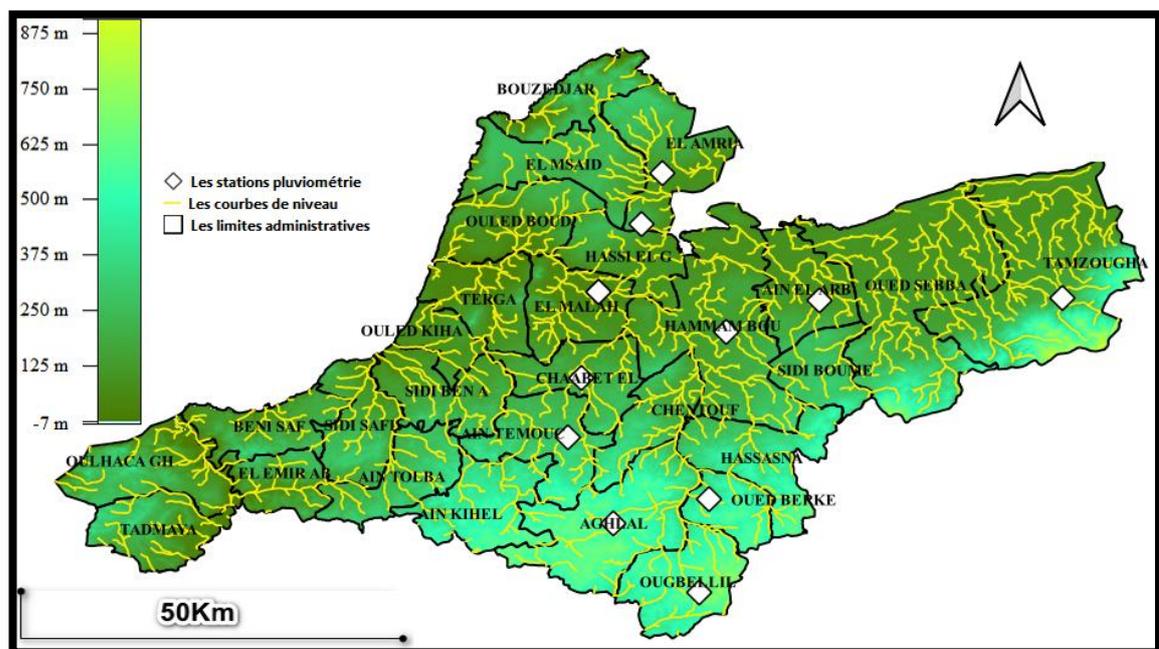


Figure 32: La couche de stations pluviométrique dans la Wilaya d'Ain Témouchent

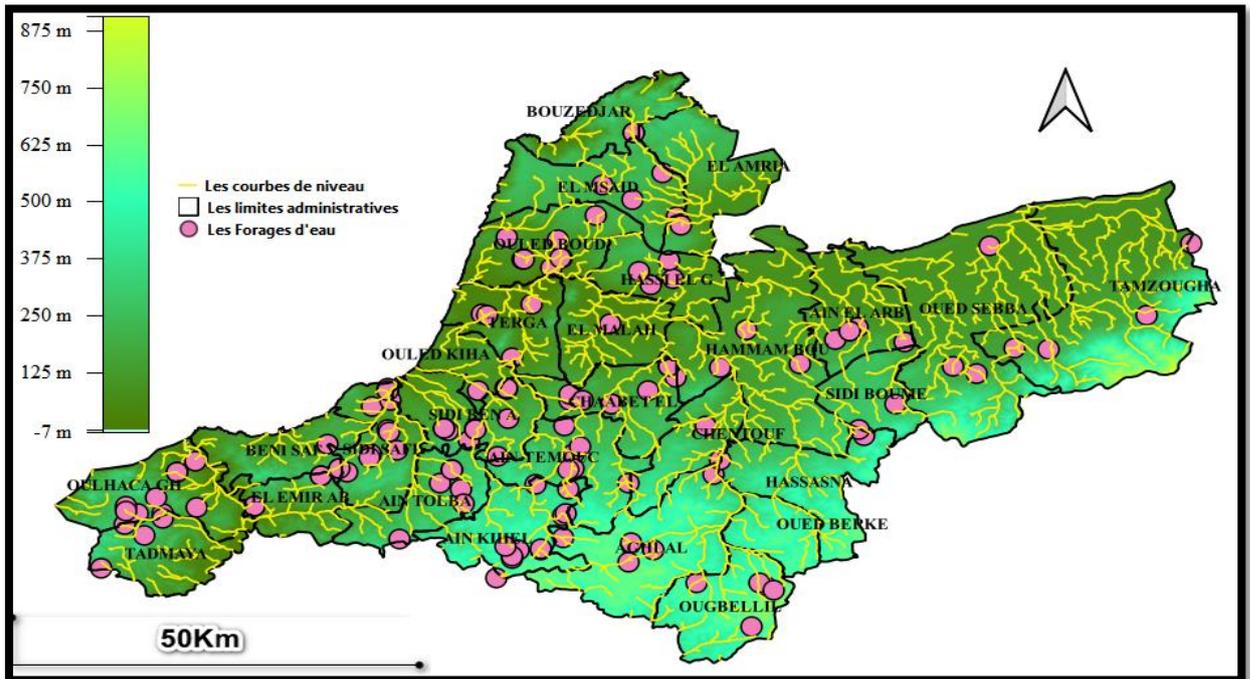


Figure 33: La couche de forages dans la wilaya d'Ain Témouchent

En fin de compte, nous avons superposé la couche de forages et de stations sur la couche base Map pour créer une carte qui montrait les emplacements des 132 forages et des 11 stations pluviométrique dans la région d'Ain Témouchent (Figure 34).

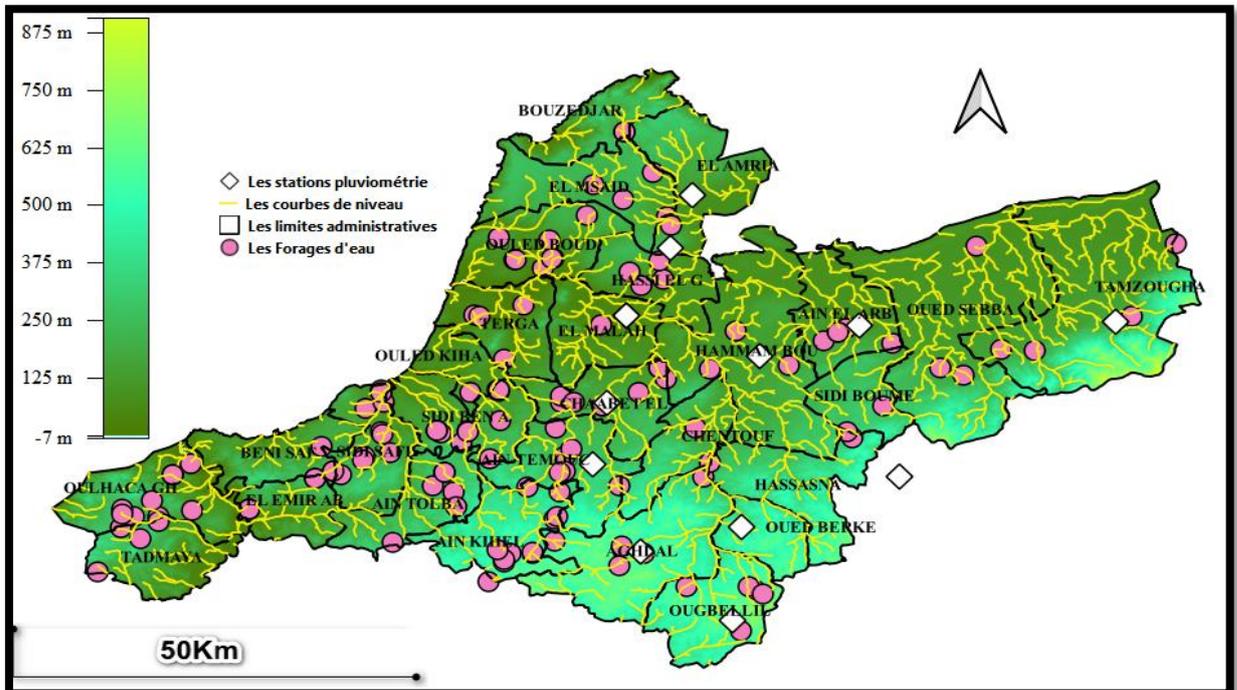


Figure 34: La couche de base avec les forages et les stations

IV.3.1.6. Contrôle de qualité des positions de forages et stations :

Nous avons utilisé différents outils de QGIS pour :

- ❖ La comparaison des positions de forages et de stations à la carte de base et aux données géographiques disponibles pour la région.
- ❖ La vérification des coordonnées enregistrées pour chaque forage et chaque station, les avons comparées à celles disponibles dans d'autres sources pour confirmer leur exactitude.

Dans notre étude nous avons trouvé que :

- ❖ 85 forages abandonnés et à l'arrêt.
- ❖ 47 forages en service.

IV.3.1.7. Carte d'analyse

La carte d'analyse nous permet de voir :

- ❖ Les positions des stations pluviométriques.
- ❖ Les positions des forages en fonction de leur profondeur, de leur débit et de leur niveau statique.
- ❖ Des informations sur les communes et la wilaya pour fournir un contexte géographique plus large.

Nous avons utilisé des outils de QGIS pour ajouter :

- ❖ Des symboles et des étiquettes à la carte.
- ❖ Des légendes pour aider à identifier les différentes variables représentées.
- ❖ Des couleurs pour représenter les différentes gammes de données (forages et stations pluviométriques).

La carte d'analyse est un outil important pour :

- ❖ La visualisation des données de forages.
- ❖ L'identification des tendances géographiques et les corrélations entre les différentes variables mesurées.
- ❖ L'utilisation pour la planification future de la région.
- ❖ Prendre des décisions éclairées sur l'utilisation des ressources en eau.

IV.3.2. Les stations de choix :

Dans notre étude on choisie 4 stations pluviométrie (*Figure35*)

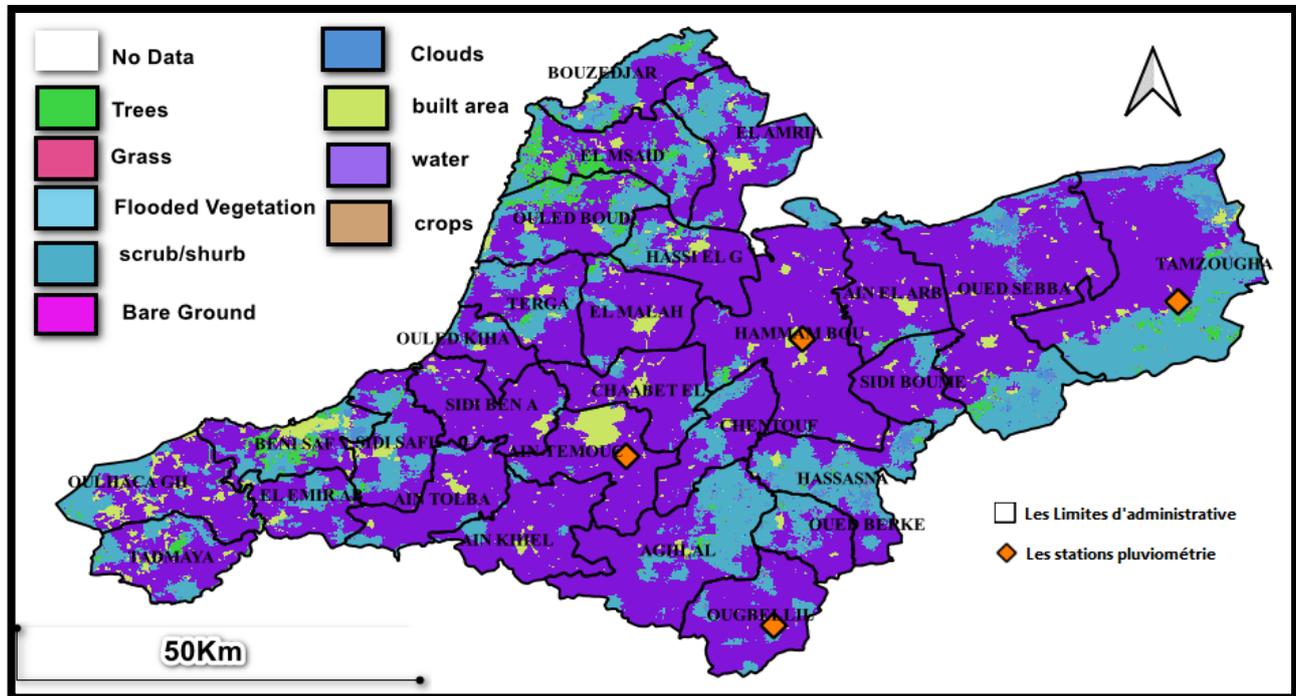
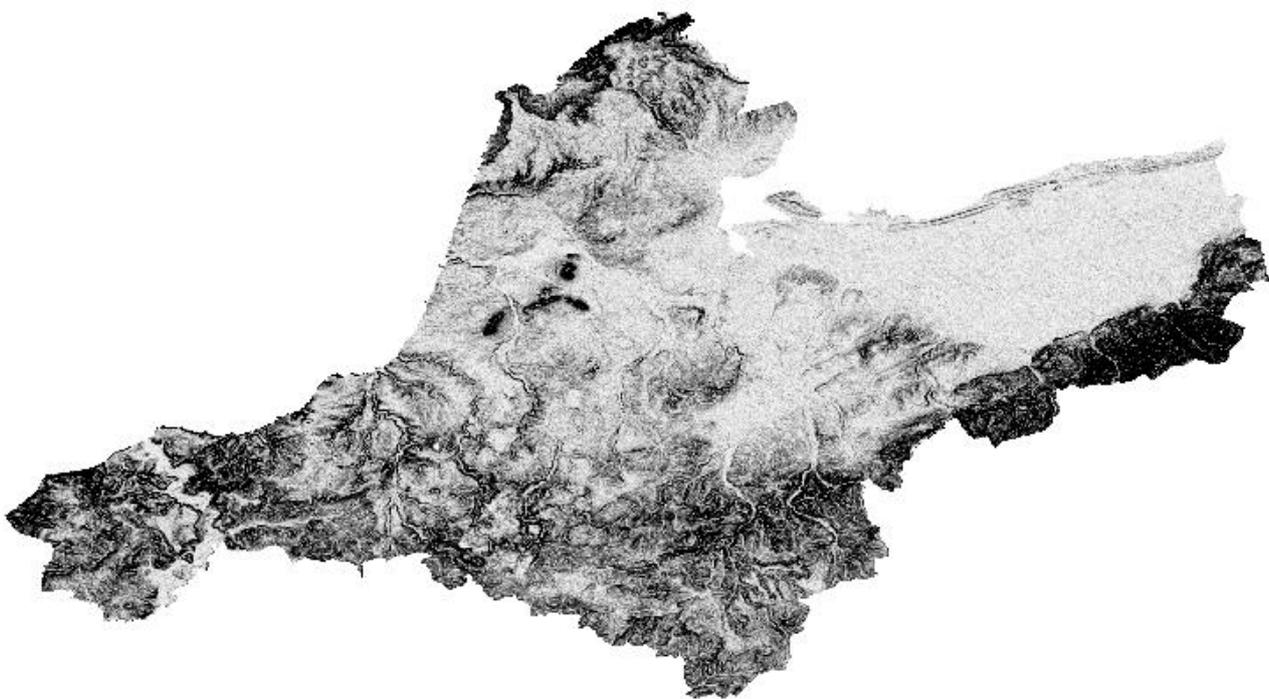


Figure 35 : la carte d'Ain Témouchent avec les stations pluviométrie de notre choix

IV.4. Conclusion

Grâce à l'utilisation de QGIS, nous avons réussi à importer avec précision les emplacements des forages et des stations dans une carte de base de la nappe d'Ain Témouchent. Cette cartographie détaillée constitue une ressource précieuse pour mieux comprendre la répartition spatiale de ces points d'intérêt. En identifiant les emplacements stratégiques des forages et des stations, nous avons établi une base solide pour une gestion plus efficace de cette ressource hydrique. Ces informations cartographiques seront utiles aux décideurs et aux gestionnaires des ressources en eau pour prendre des décisions éclairées concernant la gestion et la préservation de la nappe d'Ain Témouchent.

Chapitre V : Etude de la nappe d'Ain Témouchent



V.1. Vérification de l'homogénéité des stations pluviométrique

V.1.1. La méthode des doubles cumuls

La méthode des doubles cumuls est utilisée dans les analyses statistiques pour exploiter des données recueillies sur des périodes longues, qu'elles soient continues ou discontinues. Cependant, ces données sont souvent incomplètes en raison de l'hétérogénéité des moyennes pluviométriques dans un même bassin versant, provenant soit d'une seule station, soit de différentes stations.

Dans le but de réduire les erreurs, la méthode des doubles cumuls consiste à corriger une série de données hétérogènes provenant de la station A en les comparant à une série de référence jugée homogène provenant de la série B. Les valeurs cumulées annuelles de A sont représentées sur l'axe des ordonnées (y), tandis que celles de B sont représentées sur l'axe des abscisses (x), formant ainsi une droite.

Si une incohérence est présente, on observe une rupture dans la droite, indiquée par un changement de pente. À partir de la valeur correspondant à ce point de rupture, les valeurs de A sont corrigées en ajustant la pente de la droite.[68]

V.1.2. La loi normale

Cette loi s'applique toutefois généralement bien à l'étude des modules annuels des variables hydro-météorologiques. La fonction de densité de probabilité est définie par[69] :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$\text{avec: } \begin{cases} x: \\ m: \text{La moyenne} \\ \sigma: \text{L'écart type} \end{cases}$$

Les deux paramètres de cette distribution sont la moyenne m et l'écart type σ .

Si on opère le changement de variable suivant :

$$z = \frac{x-m}{\sigma} \quad (2)$$

avec: $\{z\}$: La probabilité

La distribution devient :

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (3)$$

L'expression $z = \frac{x-m}{\sigma}$ peut s'écrire $z\sigma + m = x$, cette équation désigne l'expression de la droite d'Henry, représentée sur échelle logarithmique ou Gauss

V.1.3. Test WILCOXON

Le test de Wilcoxon est un test statistique non paramétrique utilisé pour comparer les différences entre deux échantillons appariés ou pour tester si la médiane d'un échantillon diffère significativement d'une valeur de référence. Ce test est utilisé lorsque les données ne suivent pas une distribution normale ou lorsque l'on ne peut pas supposer l'égalité des variances entre les échantillons.[68]

- Le test de Wilcoxon repose sur le principe selon lequel si l'échantillon X est un sous-ensemble de l'échantillon Y, alors l'union de X et Y est également un sous-ensemble valide.
- L'échantillon total de taille N est divisé en deux échantillons, X et Y, de tailles respectives N1 et N2, avec $N1 \leq N2$ et $N1 + N2 = N$.
- Les valeurs des échantillons sont triées par ordre croissant et se voient attribuer des rangs correspondants.
- Si X et Y proviennent d'une série homogène, on peut établir que :
 $W_{\min} < W_x < W_{\max}$.
- W_{\min} est calculé à l'aide de la formule

$$W_{\min} = \frac{(N1 + N2 + 1)N1}{2} - z_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)} \sqrt{\frac{N1N2(N1 + N2 + 1)}{12}} \quad (4)$$

où $z(1-\alpha/2)$ est la valeur de la variable centrée réduite de la loi normal correspondant au seuil $1-\alpha/2$ (pour un seuil de 95%, $z(1-\alpha/2) = 1,96$).

- W_{\max} est calculé à l'aide de la formule

$$W_{\max} = \frac{(N1 + N2 + 1)N1}{2} - W_{\min} \quad (5)$$

V.1.4. Les indices climatiques

L'indice de pluviosité (I_p) et la méthode du cumul de l'écart proportionnel à la moyenne c'est le rapport de la hauteur de précipitation annuelle à la hauteur moyenne annuelle de précipitation.[1]

$$I_p = P_i / P_m \quad (6)$$

P_i : la pluie annuelle de l'année i

P_m : la pluie moyenne annuelle

L'intérêt de cette méthode est d'identifier les séquences sèches et leurs caractérisations. Une année est qualifiée d'humide si ce rapport est supérieur à 1 et de sèche s'il est inférieur à 1. Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne (I_{pm}) qui diffère de l'indice de pluviosité en soustrayant 1 de cet indice. [1]

$$I_{pm} = I_p - 1 \quad (7)$$

V.1.5. L'indice de précipitations standardisé (SPI)

Qui utilise des modèles statistiques pour estimer la probabilité de différentes quantités de précipitations sur une période de 41ans. Cette méthode est souvent utilisée pour évaluer les risques de sécheresse, il permet aussi de vérifier bien els période/cycles humides que la période/cycles sec. [1]

Le SPI est un indice simple et robuste à la fois basé sur les données pluviométrique. Hayes et ses collaborateurs 1999 ont répertorié un certain nombre d'avantage en faveur de l'utilisation spi, qui sont[1]:

$$SPI = \frac{Pi - Pm}{\sigma} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Pi: \text{Précipitation de l'année } i. \\ Pm: \text{Précipitation moyenne .} \\ \sigma: \text{l'écart type.} \end{cases}$$

En plus d'être un indice de sécheresse, ce dernier peut également nous renseigner sur la sévérité de celle-ci. Une échelle de sévérité a été donnée par Mackee et A I (1993). Elle est présentée par le (**Tableau 4**).

Tableau 4: Classement de la sévérité des sécheresses suivant l'indice de précipitation standardisé[1]

Valeurs du SPI	Classes
Plus de 2.0	Extrêmement humide
1.5 à 1.99	Sévèrement humide
1.0 à 1.49	Modérément humide
-0.99 à 0.99	Proche de la normal
-1.0 à -1.49	Modérément sèche
-1.5 à -1.99	Sévèrement sèche
Moins de -2.0	Extrêmement sèche

V.2. Application, Résultats et discussion

V.2.1. Vérification visuelle des données

Tout d'abord et avant de commencer la procédure théorique, une vérification visuelle dans un aperçu sur l'homogénéité des données :

- *Les stations (Ain Témouchent, Hamam bouhdjar, Aoubellil, Tamazoura)*

Elles possèdent des données de 41 ans, allant de 1981 jusqu'à 2021, sans lacunes.

V.2.2. Etude de l'homogénéité

V.2.2.1. Test de WILCOXON

Le test de Wilcoxon appliqué à la série de stations de référence d'Ain Témouchent a donné des résultats cohérents et fiables. Les valeurs calculées de W_{min} , W_x et W_{max} confirment statistiquement l'existence de différences significatives entre les échantillons appariés. Ces résultats robustes (*Tableau 5*) renforcent la confiance dans les conclusions de notre étude et soutiennent l'idée que les variables mesurées présentent des variations significatives.

Tableau 5: Résultat de test de WILCOXON pour la station d'Ain Témouchent

N1	N2	W_x	W_{min}	W_{max}
[328,5 ; 337,6]	[428,9 ; 255,5]	391,83	221,59	629

On trouve que $W_{min} < W_x < W_{max}$ alors, on considère la station de Ain Témouchent comme une station de référence.

V.2.2.2. Test d'homogénéité de station de Hammam Bouhdjar, Tamazoura et Aoubellil par apport à la station d'Ain Témouchent

Nous avons procédé un test d'homogénéité par la méthode de double cumul, pour confirmer la fiabilité des données, on prend la station de Ain Témouchent comme une station de référence.

La méthode de double cumul a donné l'examen des graphiques de double cumul des stations :

- Ain Témouchent avec Hammam bouhdjar (*Figure36*)
- Ain Témouchent avec Tamazoura (*Figure37*)
- Ain Témouchent avec Aoubellil (*Figure38*)

Les résultats (*Figure 36, Figure37, Figure38*) ont montré l'absence des cassures qui signifié que les données de ces derniers sont fiable.

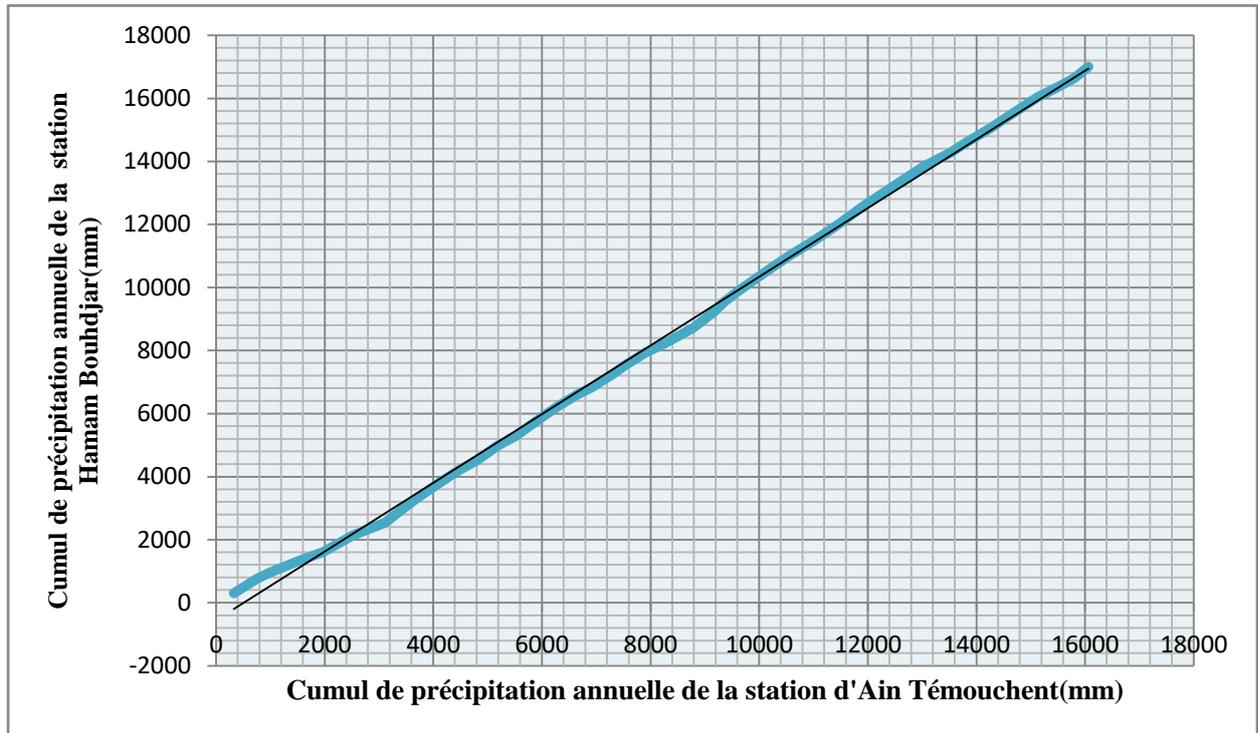


Figure 36 : Courbe de la méthode de double cumule de la station de Hamam bouhdjar en fonction de la station d'Ain Témouchent

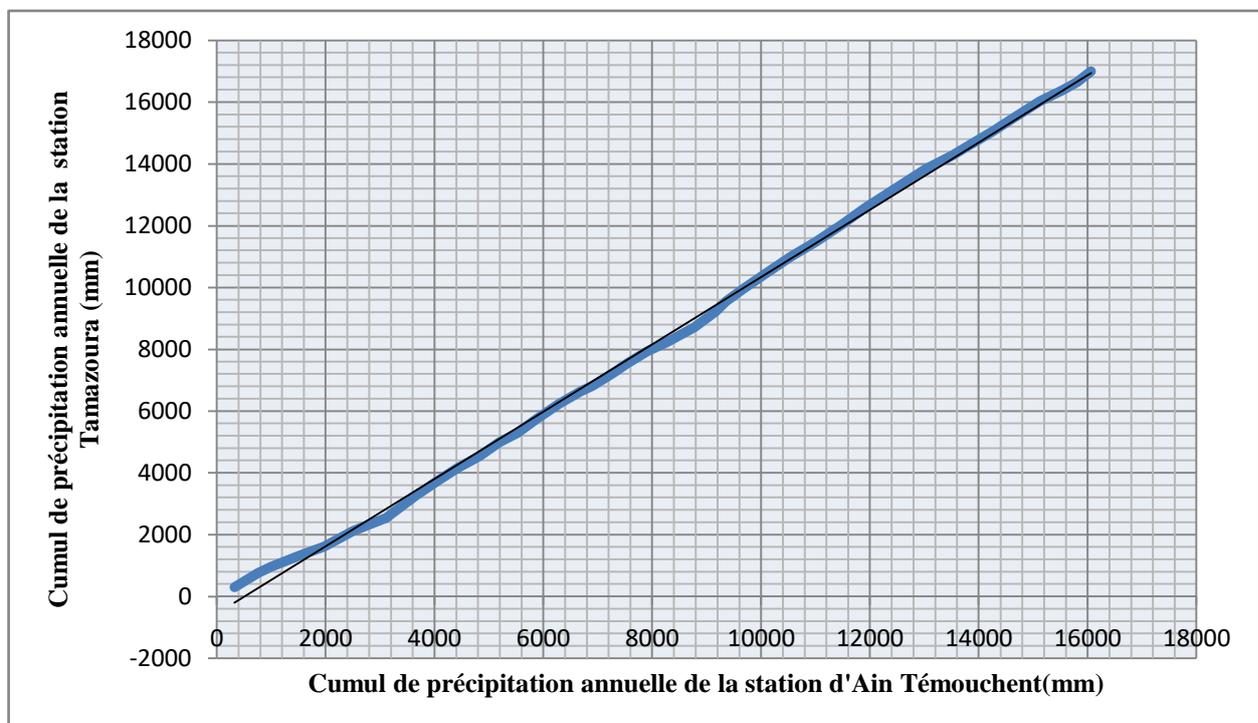


Figure 37 : Courbe de la méthode de double cumule de la station de Tamazoura en fonction de la station d'Ain Témouchent.

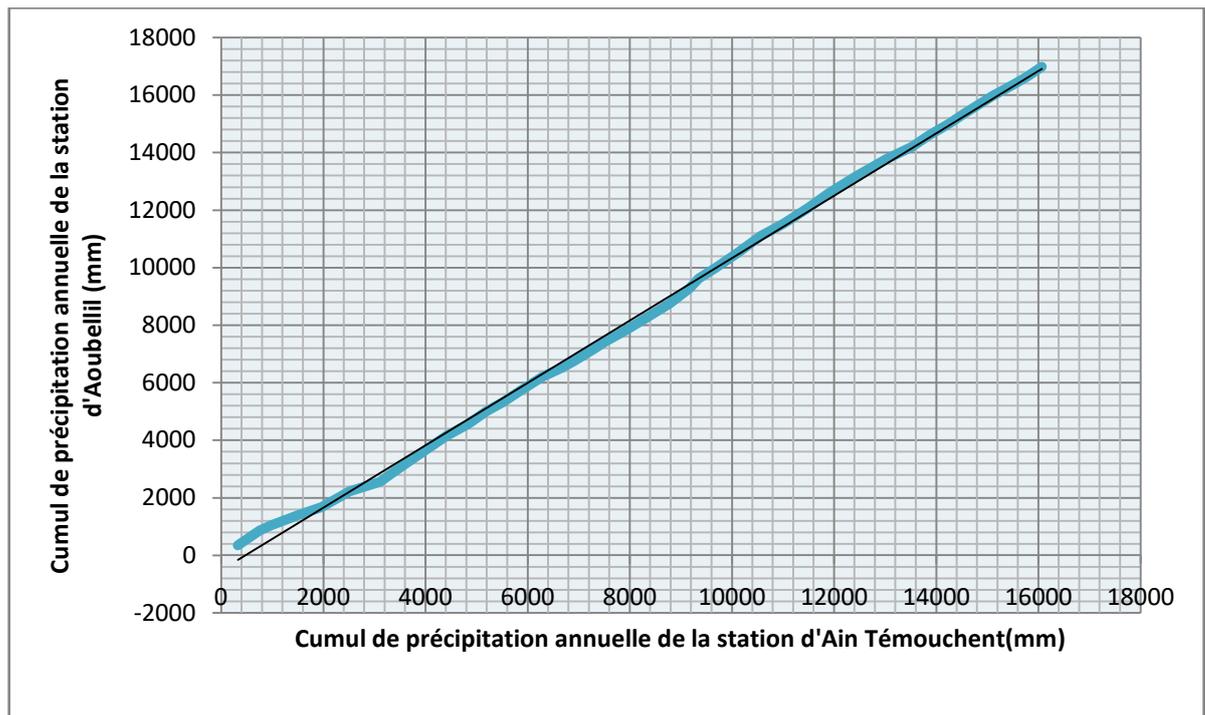


Figure 38 : Courbe de la méthode de double cumule de la station d'Aoubellil en fonction de la station d'Ain Témouchent

Une corrélation linéaire a été observée entre les mesures des stations d'Ain Témouchent et (Hammam Bouhadjar, Aoubellil, Tamazoura). Cette relation linéaire renforce la fiabilité des données et suggère une cohérence entre les variations mesurées dans les deux stations au fil du temps.

V.2.3. Evolution pluviométrique

V.2.3.1.1. À l'échelle mensuelle

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles pour la période d'étude, montre que dans toutes les stations pluviométriques existe une saison pluvieuse qui se situe entre Octobre et Avril avec un maximum en Novembre, où les précipitations atteignent 64.86mm, et des faibles précipitations au mois de Juillet et Août (*Figure39*).

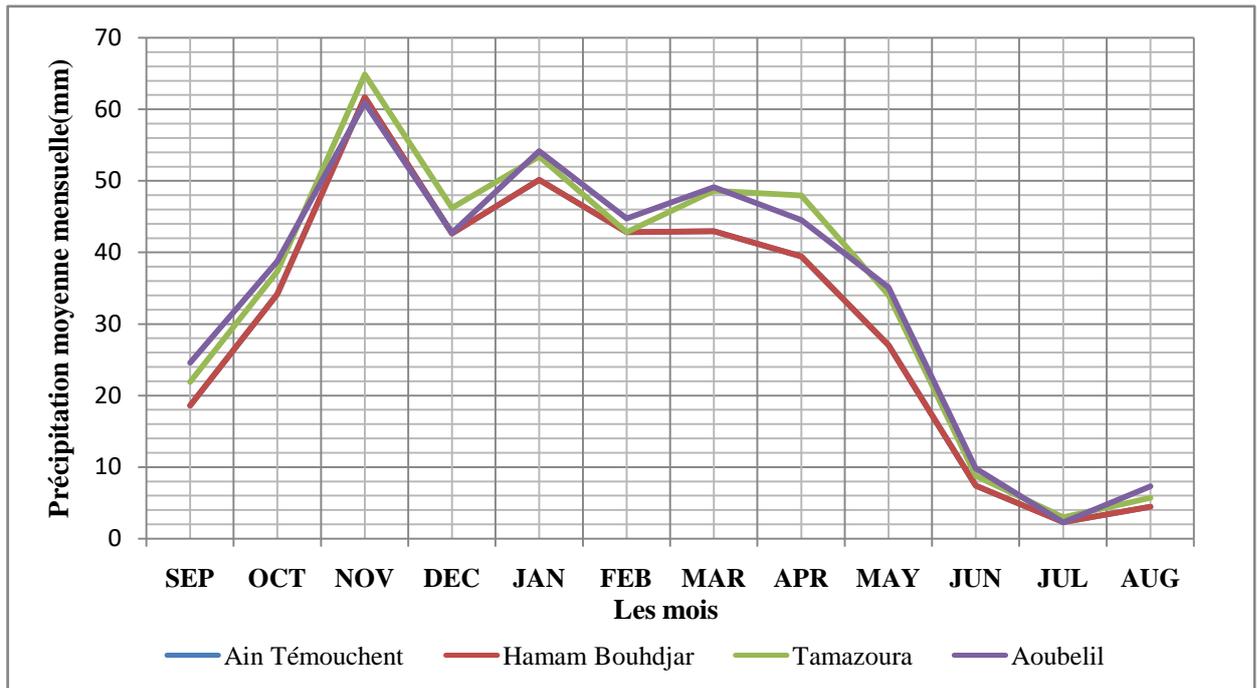


Figure 39 : Evolution des précipitations moyennes mensuelles des quatre stations retenues (1981-2021)

V.2.3.1.2. À l'échelle annuelle

L'analyse pluviométrique annuelle des stations pluviométrique a montré que la pluviométrie annuelle dans la région d'Ain Témouchent est caractérisée par une irrégularité dans le temps et dans l'espace.

La moyenne annuelle pour les quatre stations est de 399mm, avec une valeur maximal de 685,55mm enregistré dans la station de Tamazoura en 2013 Ce qui concerne la variabilité spatiale. (*Figure 40*)

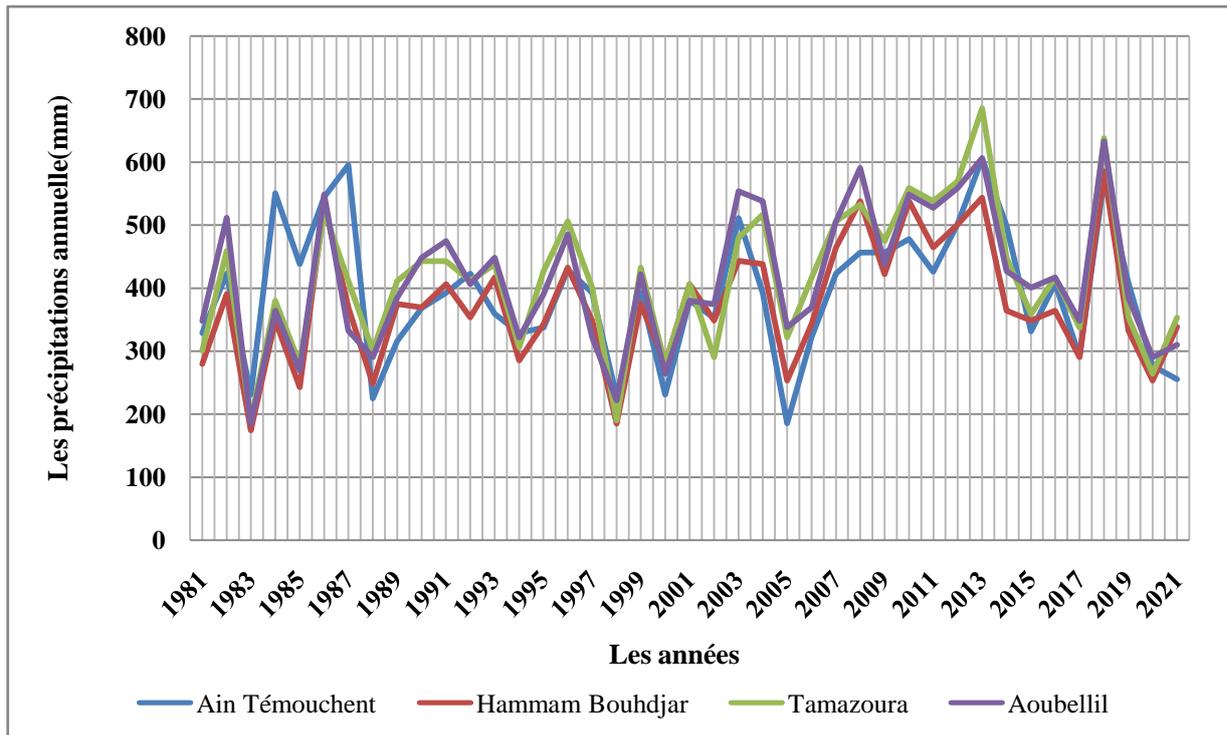


Figure 40: Evolution des précipitations moyennes annuelles des quatre stations retenues (1981-2021)

V.2.4. Evolution des indices climatique

L'analyse de l'évolution des indices climatiques nous a permis de caractériser les périodes de sécheresse et d'humidité, ainsi que de mettre en évidence la variabilité spatiale des précipitations dans la région d'Ain Témouchent.

V.2.4.1. Méthode cumuls des écarts à la moyenne

L'analyse des graphiques représentant les cumuls des écarts proportionnels à la moyenne des précipitations (IMPC) pour les différentes stations sélectionnées dans l'étude a révélé l'existence d'une variabilité climatique marquée par des cycles alternants de phases sèches et humides, de durées variables.

🚩 Station Ain Témouchent

Le graphique IMPC de la station d'Ain Témouchent (*Figure 41*) révèle des variations significatives de l'indice au fil des années.

- Entre 1981 et 1990, une tendance à la hausse est observée, indiquant une possible amélioration des conditions climatiques ou des précipitations dans la région.
- De 1990 au début des années 2000, des fluctuations sont présentes, avec une tendance globalement légèrement à la baisse, suggérant une diminution des précipitations ou des conditions moins favorables.
- La période de 2000 à 2010 est caractérisée par des valeurs négatives, indiquant une période de sécheresse ou de conditions de précipitations défavorables.
- À partir de 2010 jusqu'à l'année la plus récente 2021, une tendance générale à la hausse est observée, suggérant une possible amélioration récente des conditions climatiques ou des précipitations plus abondantes.

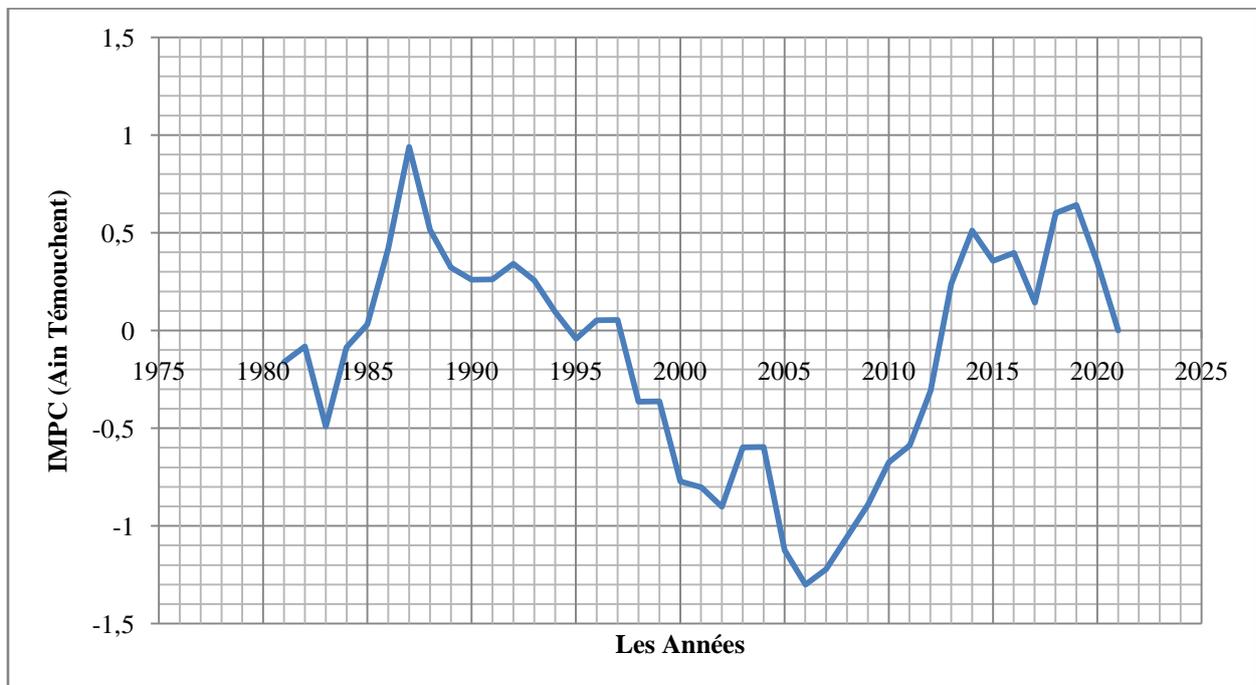


Figure 41: Cumuls écart à la moyenne de la série pluviométrique de la station d'Ain Témouchent

✚ Station Hammam Bouhdjar

Le graphique IMPC de la station de Hammam Bouhdjar (*Figure 42*) présente une tendance générale à la baisse des valeurs au fil des années.

- Entre 1981 et 2005, on observe des valeurs négatives, indiquant des périodes de sécheresse ou de conditions de précipitations défavorables dans la région. Cette

période de baisse atteint son point le plus bas entre 1998 et 2002, suggérant une période de sécheresse prolongée.

- À partir de 2005 jusqu'à l'année la plus récente 2021, les valeurs de l'IMPC se stabilisent autour de zéro, indiquant une légère amélioration des conditions climatiques ou une tendance vers des précipitations plus proches de la moyenne.

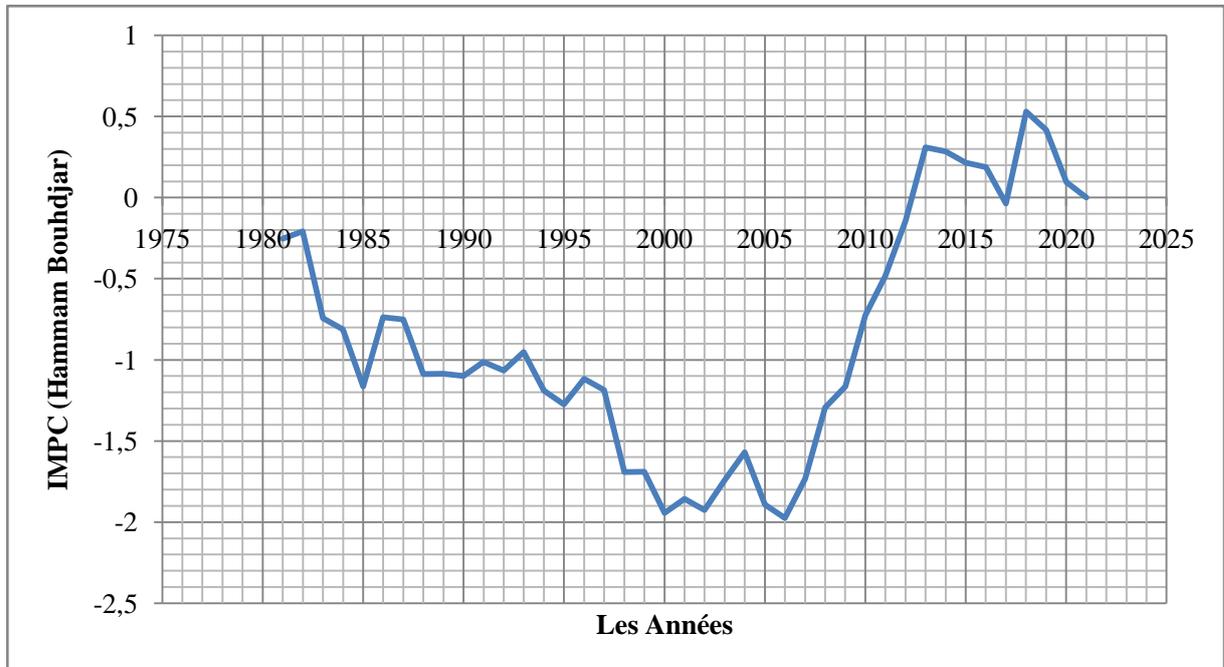


Figure 42: Cumuls écart à la moyenne de la série pluviométrique de la station Hammam Bouhdjar

✚ Station Tamazoura

Le graphique IMPC de la station de Tamazoura (*Figure 43*) montre une tendance marquée à la baisse des valeurs au fil des années.

- Entre 1981 et 2007, on observe une diminution régulière des valeurs de l'IMPC, ce qui suggère des périodes prolongées de sécheresse ou de conditions de précipitations défavorables dans la région.
- La période de baisse atteint son point le plus bas entre 2002 et 2004, avec des valeurs particulièrement négatives de l'IMPC, indiquant une sécheresse sévère. Après cette période, on observe une légère augmentation des valeurs, mais elles restent généralement négatives.

- À partir de 2013 jusqu'à l'année la plus récente 2021, les valeurs de l'IMPC se stabilisent autour de zéro ou sont très proches de zéro, suggérant une légère amélioration des conditions climatiques ou des précipitations plus proches de la moyenne.

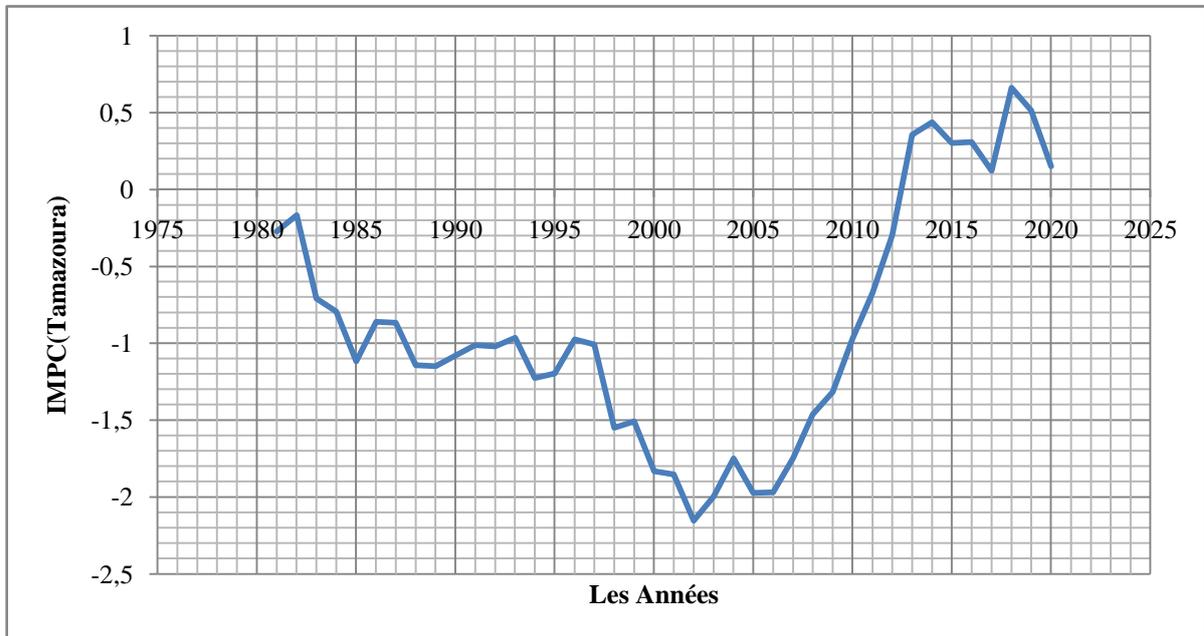


Figure 43: Cumuls écart à la moyenne de la série pluviométrique de la station Tamazoura

✚ Station Aoubellil

Le graphique IMPC de la station d'Aoubellil (*Figure44*) montre une variation significative au fil des années.

- Entre 1981 et 2001, on observe une tendance générale à la baisse des valeurs de l'IMPC, indiquant des périodes de sécheresse ou des conditions de précipitations défavorables dans la région. Les valeurs atteignent leur niveau le plus bas entre 2000 et 2002, suggérant une sécheresse sévère pendant cette période.
- À partir de 2002 jusqu'à la dernière année disponible 2021, les valeurs de l'IMPC connaissent une augmentation progressive. Cependant, elles restent majoritairement négatives, ce qui peut indiquer une persistance de conditions climatiques défavorables ou des fluctuations dans les précipitations.

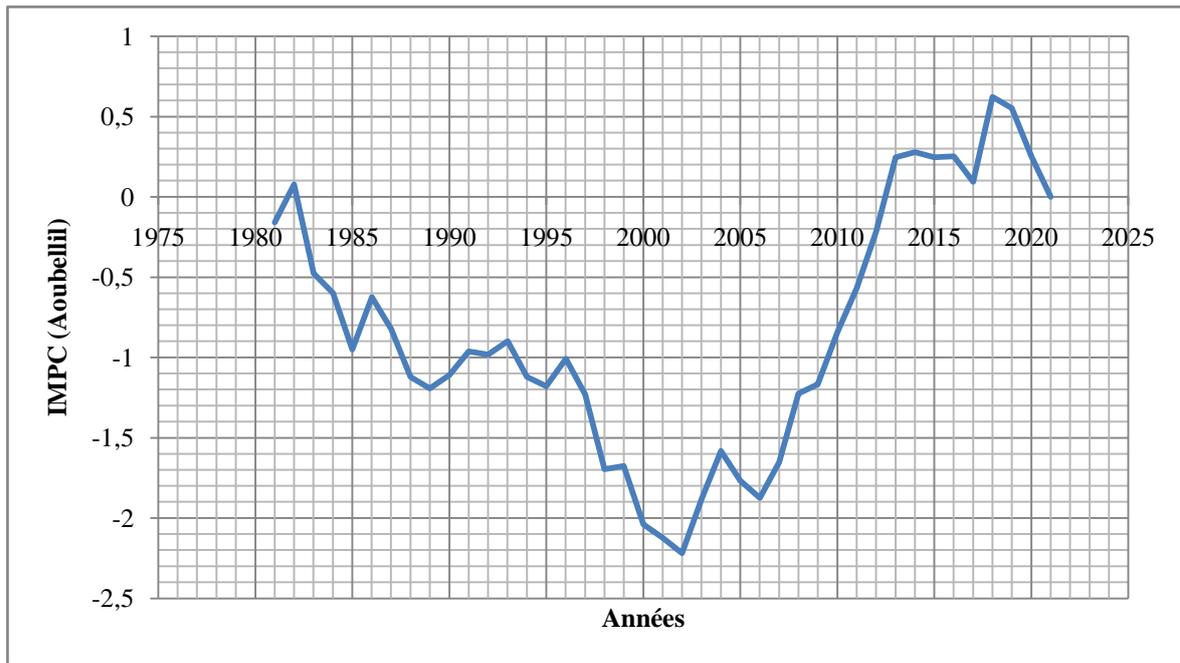


Figure 44: Cumuls écart à la moyenne de la série pluviométrique de la station Aoubellil

V.2.4.2. Variation de l'indice de précipitations standardisé (SPI)

L'évolution de l'indice de précipitation standardisé (SPI), indique une variabilité temporelle de précipitation. Cette variabilité caractérisée par une alternance des phases humides, proche de normal et sèches pour les différentes stations (*Tableau 6*).

Tableau 6: Répartition des valeurs du SPI pour les quatre stations

Station	Intensité de sécheresse						
	Extrêmes humide	Très humide	Sévèrement humide	Proche de normal	Modérément sec	Très sec	Excrément sec
Ain Témouchent	1	3	4	26	2	5	
Aoubellil	1	2	6	26	4	1	1
Hammam Bouhdjar	1	4	1	29	4	1	1
Tamazoura	2		4	27	5		2

Les données révèlent une variation intéressante de l'intensité de sécheresse dans les différentes stations. Ain Témouchent, Aoubellil et Hammam Bouhdjar affichent une intensité de sécheresse majoritairement modérée à proche de la normale, avec des valeurs relativement élevées dans ces catégories. Cependant, il est encourageant de constater qu'elles restent principalement dans la gamme humide, ce qui peut indiquer un environnement favorable à l'agriculture et aux ressources en eau.

Tamazoura, quant à elle, présente une intensité de sécheresse légèrement plus élevée, avec une classification principalement dans la catégorie "proche de la normale" à "modérément sec". Néanmoins, il est intéressant de noter que Tamazoura connaît toujours des périodes de conditions humides, car elle a enregistré des valeurs significatives dans les catégories "extrêmement humide" et "sévèrement humide".

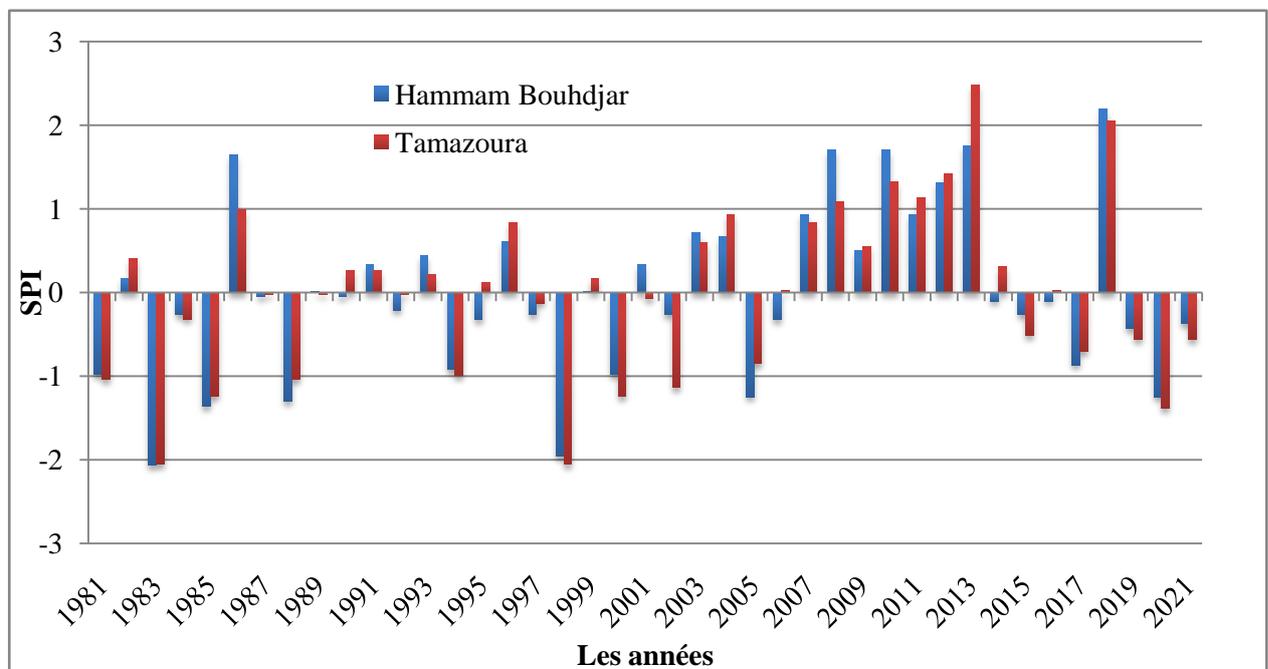


Figure 45: Valeurs des SPI (Station Hammam Bouhdjar, Tamazoura)

En 1981, l'année est considérée comme sèche tant pour Tamazoura (SPI=-1,04) que pour Hammam Bouhdjar (SPI = -0,98).

En 1982, les deux stations ont des valeurs positives de SPI, indiquant une année excédentaire ou plus humide pour Tamazoura (SPI = 0,4) et Hammam Bouhdjar (SPI=0,17).

En 1983, à la fois Tamazoura (SPI = -2,06) et Hammam Bouhdjar (SPI = -2,07) connaissent une année déficitaire ou sèche.

Les années suivantes présentent des variations similaires, avec des valeurs positives et négatives de SPI indiquant des années humides, moyennes ou sèches pour chaque station (*Figure 45*).

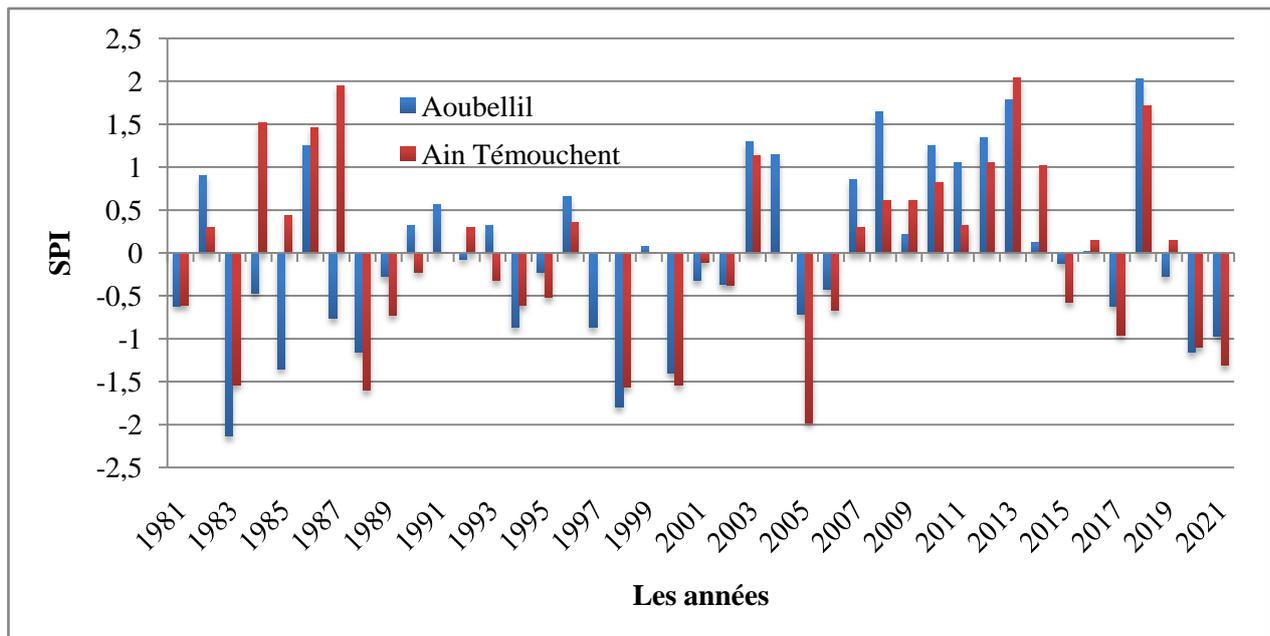


Figure 46: Valeurs des SPI (Station Aoubellil, Ain Témouchent)

En 1981, à la fois Ain Témouchent (SPI = -0,6) et Aoubellil (SPI = -0,61) connaissent une année considérée comme sèche.

En 1982, les deux stations affichent des valeurs positives de SPI, indiquant une année excédentaire ou plus humide pour Ain Témouchent (SPI = 0,3) et Aoubellil (SPI = 0,9).

En 1983, à la fois Ain Témouchent (SPI = -1,54) et Aoubellil (SPI = -2,13) connaissent une année déficitaire ou sèche.

Les années suivantes présentent des variations similaires, avec des valeurs positives et négatives de SPI indiquant des années humides, moyennes ou sèches pour chaque station (*Figure 46*).

V.2.5. Evolution du niveau piézométrique de la nappe d'Ain Témouchent

Dans un environnement semi-aride, où les précipitations sont limitées, chaque événement pluvieux est d'une importance cruciale pour la recharge de la nappe d'aquifère. Lorsqu'il pleut, une partie de l'eau s'infiltré dans le sol, contribuant ainsi à l'augmentation des niveaux piézométriques des forages.[70]

Dans une région de climat semi-aride comme Ain Témouchent, où les précipitations peuvent être limitées, la relation entre la pluviométrie et les niveaux piézométriques peut être d'autant plus critique. Les épisodes de pluies sont souvent rares et sporadiques, ce qui signifie que chaque événement pluvieux peut avoir un impact significatif sur la recharge de la nappe d'aquifère.

La pluviométrie joue un rôle crucial dans la recharge de la nappe d'aquifère. La relation entre la pluviométrie et les niveaux piézométriques est complexe et dépend de nombreux facteurs, tels que la perméabilité du sol, la géologie locale, les caractéristiques hydrologiques spécifiques de la région et des modèles conceptuels. Malheureusement, les données piézométriques spécifiques des forages n'étaient pas disponibles. Cependant, nous nous basons sur l'analyse des données piézométriques et la consultation d'études antérieures pour pouvoir interpréter et fournir des informations sur cette relation.

Une étude précédente, dans le cadre de thèse de doctorat, sur la relation eaux de surface-eaux souterraines dans un contexte de changements climatiques dans la zone Sud du bassin du Saloum (Sénégal) est élaborée par Mme Ndeye Maguette DIENG NDAO. Cette étude faite sur la période allant de 1970 à 2012, montre que cette nappe, assure plus de 95 % des besoins en eau de la population locale à travers les puits villageois et les forages. Les prélèvements des puits villageois sont relativement faibles, tandis que les forages d'exploitation débitent en moyenne environ 7000 m³/j. En conséquence, la surexploitation de ces forages contribue à la baisse du niveau piézométrique de la nappe.

D'un autre côté, une étude faite dans la plaine de Sidi Belabes sur une période de 44 ans de 1971 à 2014, où à travers des précipitations moyennes et des températures importantes, le climat étant considéré semi-aride, a clairement démontré la baisse considérable des réserves de l'aquifère accentué par les Oueds, les prélèvements AEP, agricoles et industriels.

Enfin, Mr Zennaki Ahmed de l'université de Tlemcen ayant fait une étude dans le cadre de doctorat sur la relation pluie-débit du bassin de l'oued Boukiou sur une période de 40 ans de 1974 à 2014, il recommande d'utiliser les modèles Gardénia et GR pour modéliser le comportement de l'aquifère en fonction de la pluviométrie.

Enfin, dans le cadre d'un PFE dont le thème est l'étude de l'impact du changement climatique sur le niveau de la nappe de la Mitidja (Allouche, 2016), l'analyse de la fluctuation du niveau de la nappe a montré que ce dernier a connu un rabattement très significatif pendant les années sèches. Ce rabattement est dû principalement aux déficits pluviométriques et la surexploitation de la nappe.

En général, la Gestion des eaux souterraines au Maghreb rapportée par Mustapha BESBES, hydrogéologue tunisien, révèle que le rapport Prélèvements /Ressources souterraines est de 112% !

Suivant les résultats des études ci-dessus, nous ne pouvons que conclure, dans le cas de la présente étude, que le niveau de la nappe d'Ain Témouchent doit connaître un fort rabattement lié au déficit pluviométrique et aux prélèvements excessifs sans pour autant quantifier le degré de rabattement du niveau piézométrique et ce, faute de données.

V.3. Conclusion

En conclusion, l'étude sur la vérification de l'homogénéité des stations pluviométriques et l'analyse des indices climatiques a fourni des résultats significatifs pour comprendre la variabilité des précipitations dans la région étudiée. Les méthodes utilisées, telles que la méthode des doubles cumuls, la loi normale et le test de Wilcoxon, ont permis d'évaluer l'homogénéité des données pluviométriques, tandis que les indices climatiques tels que l'Ip et la méthode du cumul de l'écart proportionnel à la moyenne ont contribué à l'analyse des variations climatiques et les données de spi fournissent des informations précieuses pour évaluer les conditions climatiques locales et prendre des décisions éclairées en matière de gestion des ressources en eau, de planification agricole et de conservation de l'environnement. Il est essentiel de surveiller de près ces variations pour adapter les pratiques et les politiques en conséquence, afin de garantir une utilisation durable des ressources naturelles et de préserver la résilience des écosystèmes\.

Conclusion générale

Nous concluons dans ce travail que la nappe d'Ain Témouchent subit la pression de la baisse de la pluviométrie accompagnée de la hausse des températures et des prélèvements pour l'AEP quoique le dessalement couvre presque la totalité des besoins domestiques, aussi des prélèvements de l'irrigation.

Tout d'abord dans cette étude nous avons remarqué:

- L'importance des précipitations : Les résultats ont confirmé que les précipitations jouent un rôle crucial dans la dynamique de la nappe souterraine d'Ain Témouchent. Les variations des précipitations, tant sur le plan spatial que temporel, ont un impact significatif sur la recharge de la nappe et le niveau de la nappe.
- La relation entre les précipitations et la nappe : L'analyse des données a permis d'établir une relation entre les variations des précipitations et les fluctuations du niveau de la nappe. Les périodes de précipitations abondantes sont généralement associées à une augmentation de la recharge de la nappe et à une hausse du niveau de la nappe, tandis que les périodes de faibles précipitations peuvent entraîner une diminution de la recharge et une baisse du niveau de la nappe.
- L'utilisation de QGIS pour l'analyse spatiale : L'utilisation de QGIS s'est avérée être une approche efficace pour l'analyse spatiale des données hydrologiques. Les fonctionnalités de modélisation et de cartographie de QGIS ont permis de représenter visuellement les données sur les précipitations, la recharge de la nappe et les variations du niveau de la nappe, facilitant ainsi la compréhension des processus hydrologiques.
- Les limites de l'étude : Il est important de noter que cette étude présente certaines limites. Par exemple, d'autres facteurs tels que l'utilisation des terres et les activités anthropiques peuvent également influencer la nappe d'Ain Témouchent et doivent être pris en compte pour une compréhension plus complète de son fonctionnement.

En suit cette étude nous conduit aux recommandations suivantes :

- La mise en place d'un système de surveillance régulier des précipitations et du niveau de la nappe pour suivre les variations à long terme et identifier les tendances.
- L'élaboration de plans de gestion de l'eau prenant en compte les variations des précipitations et la recharge de la nappe, en mettant l'accent sur la préservation des ressources en eau.
- La promotion de pratiques de gestion des eaux pluviales visant à maximiser l'infiltration des eaux de pluie dans la nappe, notamment par le biais de techniques de rétention et d'infiltration.
- L'éducation et la sensibilisation des utilisateurs de la nappe, tels que les agriculteurs et les industries, sur l'importance des précipitations et de la gestion durable de la nappe.
- La collaboration entre les différentes parties prenantes, y compris les autorités locales, les experts en eau et les communautés locales, pour élaborer et mettre en œuvre des politiques et des mesures de gestion intégrée des ressources en eau.

Ces recommandations visent à garantir une utilisation responsable et durable de la nappe d'Ain Témouchent, en tenant compte de l'influence des précipitations et de la nécessité de préserver cette ressource vitale pour les générations futures.

En fin cette étude aurait été mieux élaborée si les données sur les niveaux piézométriques étaient disponibles et si l'utilisation des modèles tels que gardenia, GR, SWAT était possible. Nous tenons à préciser que ce type de travail relèverait de travaux dans le cadre de doctorat dépassant celui du master.

Bibliographie

- [1] M. D. E. Master, “Impact du changement climatique sur la fluctuation piézométrique de la nappe de la Mitidja,” 2016.
- [2] “Stockage UP edel Nuxeo - Tableau de bord.” http://nuxeo.edel.univ-poitiers.fr/nuxeo/user_dashboard.faces?conversationId=0NXMAIN (accessed Jun. 09, 2023).
- [3] “Définitions sur les eaux souterraines.” <https://www.lenntech.fr/eaux-souterraines/definitions.htm> (accessed May 18, 2023).
- [4] “LES SYSTEMES AQUIFERES.” <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/du-7.htm> (accessed May 18, 2023).
- [5] “Qu’est-ce qu’un aquifère ? - SIGES Bretagne - ©2023.” <https://sigesbre.brgm.fr/Qu-est-ce-qu-un-aquifere.html> (accessed May 18, 2023).
- [6] “Guillaume | Louernos Nature sur Twitter : ‘(28/n) Sur le même site web, un résumé du niveau dynamique des nappes phréatiques : <https://t.co/wn8qCnAqZd> <https://t.co/826bUoJVQm> / <https://twitter.com/CaluGuillaume/status/1508728665449848841> Twitter.” <https://twitter.com/CaluGuillaume/status/1508728665449848841> (accessed May 18, 2023).
- [7] M. Mohammed, “Master : Contribution A L ’ Etude de La Recharge Des Nappes Par Procèdes Artificielles,” 2015.
- [8] “Une grande variété de réservoirs d’eau souterraine - SIGES Seine-Normandie - ©2023.” <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article197#header> (accessed May 18, 2023).
- [9] “Caractéristiques principales des nappes : les paramètres hydrodynamiques (définitions) - SIGES Seine-Normandie - ©2023.” <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article313#1> (accessed May 19, 2023).
- [10] “Nappes libres et captives / Les nappes superficielles et souterraines / Les ressources en eau / Portrait du territoire / Accueil - SAGE Born et Buch.” <https://www.sage-born-et-buch.fr/Portrait-du-territoire/Les-ressources-en-eau/Les-nappes-superficielles-et->

souterraines/Nappes-libres-et-captives (accessed May 19, 2023).

- [11] “Les eaux souterraines, des systèmes dynamiques | Eaufrance.” <https://www.eaufrance.fr/les-eaux-souterraines-des-systemes-dynamiques> (accessed May 19, 2023).
- [12] “Toutes les actualités - SIGES Seine-Normandie - ©2023.” <https://sigesn.brgm.fr/spip.php?page=actualite> (accessed May 19, 2023).
- [13] E. Garroustet and L. Pyot, “réalisation”.
- [14] Jhjk, *In Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. 2007.
- [15] “Forage de puits artésiens laurentides et Lanaudière | Puits Fréchette.” <https://www.puitsfrechette.com/forage-de-puits-artesiens-laurentides/> (accessed May 19, 2023).
- [16] “Désinfection des puits d’eau privés | ontario.ca.” <https://www.ontario.ca/fr/page/desinfection-des-puits-deau-privés> (accessed May 19, 2023).
- [17] “Trou à eaux grasses - installation au camp scout.” http://www.toujourspret.com/techniques/campisme/installations/hygiene/trou_a_eaux_grasses.php (accessed May 19, 2023).
- [18] “Faire un forage soi-même dans son jardin : taper un puits.” https://www.reno-info-maison.com/faire-un-forage-soi-meme-dans-son-jardin-taper-un-puits-_r_4_a_1088.html (accessed May 19, 2023).
- [19] “Eau potable et puits — MRC de Matawinie.” <https://mrcmatawinie.org/eau-potable-et-puits> (accessed May 19, 2023).
- [20] D. . Todd, “Groundwater Hy.” pp. 280–281, 2001. [Online]. Available: http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1186/html/gw_effect.html
- [21] W. M. A. R. W. H. J. W. L. T. E. Reilly, “Flow and StorageFlowAndStorageInGroundwaterSystems in Groundwater Systems,” 2016.
- [22] “Interactions between groundwater and surface water: the state of the science | SpringerLink.” <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-001-0170-8#Abs1>

(accessed May 19, 2023).

- [23] Bouchemal F., “Diagnostic de la qualité des eaux souterraines et superficielles de la région de Biskra,” 2017.
- [24] F. Les, F. Cette, and F. Ainsi, “ATDx ATDx,” no. 34.
- [25] “Thème,” 2019.
- [26] A. Mathematics, “JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 60,” *J. Off. LA Repub. Alger. N° 60*, pp. 1–23.
- [27] M. GUERGUEB and A. FERHAT, “La gestion des eaux en Algérie : Vers un nouveau paradigme,” *J. Adv. Econ. Res. N° 06(ISS 01)/2021*, vol. 06, 2021.
- [28] C.-Y. Ismanane, “Gestion intégrée et économie de l ’ eau Licence : Réseaux hydrauliques,” pp. 1–12.
- [29] “L.n.0.-1.d.4.j.2.r.à.l.g.d.r.e.e.algérie”.
- [30] “Entreprises - Annuaire en ligne - Algérie | Annuaire des entreprises Kompass.” <https://dz.kompass.com/a/annuaire-en-ligne/8061017/> (accessed May 19, 2023).
- [31] “les rapport de l’office nationale de l’eau et de l’assainissement (ONA).”
- [32] E. T. D. Inventaire, E. T. D. E. Developpement, and R. E. C. O. G, “E ’ pmh,” 2009.
- [33] “Schema hydraulique de la wilaya d’ain temouchent,” 2014.
- [34] “SOUTERRAINES DE LA REGION D ’ AIN,” p. 2015, 2015.
- [35] L. Chéry and C. Mouvet, “Principaux processus physico-chimiques et biologiques intervenant dans l’infiltration des produits polluants et leur transfert vers les eaux souterraines,” *La Houille Blanche*, vol. 86, no. 7–8, pp. 82–88, 2000, doi: 10.1051/lhb/2000079.
- [36] V. Vaessen and R. Brentführer, “Module 8: Les Risques liés à la surexploitation des eaux souterraines,” 2015.
- [37] O. Petit, “N atures S ciences S ociétés Article La surexploitation des eaux souterraines : enjeux et gouvernance,” vol. 156, pp. 146–156, 2004.

- [38] “La sécheresse | Eaufrance.” <https://www.eaufrance.fr/la-secheresse> (accessed May 19, 2023).
- [39] “Les impacts de la sécheresse | Eaufrance.” <https://www.eaufrance.fr/les-impacts-de-la-secheresse> (accessed May 19, 2023).
- [40] “Chapitre3 - Les précipitations.” <https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre3/chapitre3.html> (accessed May 19, 2023).
- [41] “Le rapport du GIEC résumé en 5 points : ‘un recueil de la souffrance humaine’ | TV5MONDE - Informations.” <https://information.tv5monde.com/environnement/le-rapport-du-giec-resume-en-5-points-un-recueil-de-la-souffrance-humaine-128938> (accessed May 19, 2023).
- [42] U. Kasdi and M. Ouargla, “Mémoire”.
- [43] S. Bernier, S. Duthoit, S. Ladet, and D. Baudet, “Les concepts de base des systèmes d’information géographique (SIG) : les données et les fonctions générales,” pp. 19–27, 2005.
- [44] “Préparation d’une Géodatabase SIG pour La cartographie et le suivi de l’état de dégradation des chaussées,” ain temouchent, 2018.
- [45] T. F. Uppmt, T. Bt, F. Up, and C. Qpxfsgvm, *No Title*.
- [46] “Memoire Online - Conception et développement d’un outil information pour la gestion de l’aménagement paysager au sein de la communauté urbaine de Yaoundé(C.U.Y) - Jean Simon BAMAL ba LIHEP.” https://www.memoireonline.com/08/11/4788/m_Conception-et-developpement-dun-outil-information-pour-la-gestion-de-lamenagement-paysager-a8.html (accessed Apr. 14, 2023).
- [47] “MapInfo.” <http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2013/MapInfo/sig.html> (accessed Apr. 23, 2023).
- [48] F. A. BOUKLI, HACENE Chérifa RABAH, “REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen-Faculté de technologie Département d’Hydraulique Polycopié intitulé : SYSTEMES D’INFORMATION

- GEOGRAPH,” p. 79, 2013.
- [49] “Application cartographique SIG : fonctionnalités | GEOCONCEPT SA.” <https://en.geoconcept.com/node/3597> (accessed Apr. 14, 2023).
- [50] L. Sig, “Qu’est-ce qu’un SIG ?”.
- [51] “Système d’Information Géographique (SIG).” https://www.emse.fr/tice/uved/SIG/Complexe/co/Systeme_Information_Geog.html (accessed Apr. 14, 2023).
- [52] “L’apport des SIG en Urbanisme! | Veille cartographique 2.0.” <https://veillecarto2-0.fr/2021/11/15/lapport-des-sig-en-urbanisme/> (accessed Apr. 16, 2023).
- [53] “QUELQUES DOMAINES D’APPLICATION DES SIG - AGRO-PASTORALISME.” <https://sites.google.com/site/pastoraldz/cartographie-gps/cours-sig/quelques-domaines-d-application-des-sig> (accessed Apr. 16, 2023).
- [54] “SIG [Définition & Application] Système d’Information Géographique – smappen - smappen.” <https://www.smappen.fr/sig/> (accessed Apr. 16, 2023).
- [55] A. À. L. É. Des *et al.*, “Télétection Et Gestion Des Catastrophes Naturelles : Inondations Urbaines De Saint Louis,” *Revue*, pp. 203–210, 2008.
- [56] “Toutes les fonctions d’un SIG | Esri France - Les grands usages.” <https://www.esrifrance.fr/produits/sig4.aspx> (accessed May 22, 2023).
- [57] “Quelles sont les fonctionnalités principales d’un SIG ? - Dynamic Business,” <https://www.dynamic-business.fr/>, Accessed: May 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.dynamic-business.fr/quelles-sont-les-fonctionnalites-principales-dun-sig/>
- [58] “mémoire corrigé (1).”
- [59] T. Pratiques, “Initiation à QGIS”.
- [60] “memoire assia faiza finale.”
- [61] “Les Avantages à utiliser le SIG QGIS (Quantum GIS) | CartoExpert.” <https://www.cartoexpert.com/avantages-qgis/> (accessed Apr. 16, 2023).
- [62] “QGIS — Wikipédia.” <https://fr.wikipedia.org/wiki/QGIS> (accessed Apr. 16, 2023).

- [63] “4. Fonctionnalités — Documentation QGIS Documentation.”
https://docs.qgis.org/3.28/fr/docs/user_manual/preamble/features.html# (accessed Apr. 16, 2023).
- [64] M. Chergui and B. Soumia, “INITIATION AU LOGICIEL SIG”.
- [65] “Apprendre à utiliser QGIS : premiers pas - NaturaGIS.”
<https://naturagis.fr/qgis/aperçu-de-qgis/> (accessed May 22, 2023).
- [66] “Forage étatique à travers la wilaya de Témouchent direction de ressources en eau.”
- [67] “stations pluviométrie au niveau (ANRH/ONM).”
- [68] I. H. Organisation, “Cours hydrologie,” pp. 35–114.
- [69] “chp2-Hydrologie ..pdf.”
- [70] “Les conséquences du changement climatique sur les régions arides en Inde.”
<http://base.d-p-h.info/fr/fiches/dph/fiche-dph-8610.html> (accessed Jun. 10, 2023).