

Département des sciences de la terre

**Licence sciences et techniques**

Eau et environnement

Projet de fin d'études

**Élaboration de la carte des isohyètes dans le  
bassin versant du Tensift et Indice de  
Sécheresse**

**Réalisé par :**

SRHIR HIND

MAYOU ZOUHAIR

EL OUIDAD YASSMINE

**Soutenu le :10/06/2024**

**Devant la commission d'examen composée de :**

**Encadrant interne : MOUSTADRAF JALAL (FSTG)**

**Encadrant externe : ABOUNKI INTISSAR (ABHT)**

**Examineur : MOUHAMMED EL MEHDI SAIDI (FSTG)**

**Année universitaire :2023/2024**

## Remerciement

Nous remercions *Allah*, le tout puissant, d'avoir nous donner, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire pour surmonter toutes les difficultés et les obstacles que nous avons rencontrés tout au long de notre parcours académique. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce rapport de projet de fin d'étude. Tout d'abord, nous voudrions remercier notre encadrant académique **Dr. Jalal Moustadraf** pour sa disponibilité, ses conseils et sa confiance tout au long de ce projet. Vos précieux retours nous ont aidé à améliorer nos recherches et à avancer dans la bonne direction. Nous exprimons nos profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à notre encadrante professionnelle **Mme. Abounki Intissar** pour son soutien sans faille tout au long de la réalisation de notre projet. Sa disponibilité et sa générosité en termes de conseils et d'informations ont été inestimables pour nous. **Mr Saidi Mouhammed El Mehdi**, votre assistance vos conseils avisés ont été d'une aide précieuse pour la réussite de ce projet. Merci infiniment pour votre dévouement et votre inspiration.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements aux professeurs du département de la géologie qui nous ont fourni un environnement propice à l'apprentissage et ont été une source d'encadrement et de ressources précieuses, leur soutien et leur contribution ont été essentiels tout au long de notre formation. Ainsi qu'aux différents départements de la FSTG qui ont joué un rôle clé dans notre parcours académique, en nous fournissant des cours de qualité et en nous offrant un accompagnement pédagogique. Nous sommes reconnaissants envers tous ceux qui ont contribué à notre développement et à notre réussite.

On tient également à souligner que cette réalisation n'aurait pas été possible sans notre propre détermination et nos efforts personnels. Nous nous remercions nous-même pour avoir fait preuve de force et de courage malgré les difficultés rencontrées et pour avoir réussi à concilier travail et études. Cela nous a permis de prouver notre détermination, notre force et notre capacité à surmonter les obstacles, ce qui est une réalisation personnelle importante pour nous. Enfin, on souhaite exprimer notre gratitude envers nos familles et nos ami(e)s pour leur soutien, leur patience et leur encouragement tout au long de nos études universitaires. Vos encouragements ont été une grande source de motivation pour nous.

Merci encore à tous ceux qui ont contribué à ce projet et qui nous ont aidé à réaliser nos objectifs. Vos efforts et votre soutien ont été grandement appréciés.

## Résumé

L'étude présentée dans le rapport de PFE représente une avancée significative dans la compréhension et la cartographie des précipitations dans la région étudiée. À travers une méthodologie rigoureuse et exhaustive, le rapport offre une perspective approfondie des processus climatiques locaux.

La première étape consiste à collecter des données météorologiques provenant d'une source fiable. Cependant, ces données peuvent souvent présenter des lacunes ou des incohérences. Pour pallier cela, le rapport utilise des techniques de corrélation pour combler les lacunes et garantir la fiabilité des données. Cette démarche assure une base solide pour les analyses ultérieures.

Une fois les données consolidées, l'homogénéité spatiale est assurée en utilisant des vecteurs régionaux. Cette approche garantit que les variations spatiales des précipitations sont correctement représentées, tenant compte des caractéristiques géographiques spécifiques de la région.

L'intégration du Modèle Numérique de Terrain (MNT) ajoute une dimension cruciale à l'analyse en permettant de comprendre l'impact du relief sur la distribution des précipitations. En tenant compte des variations altitudinales, le rapport offre une représentation plus précise des isohyètes, aidant ainsi à identifier les zones à forte pluviométrie et celles plus arides.

Parallèlement, le calcul de l'indice de sécheresse SPI offre une évaluation quantitative de l'état climatique sur la période d'étude. Cette mesure permet de caractériser les périodes de sécheresse, fournissant ainsi des informations cruciales pour la gestion des ressources en eau et l'adaptation aux changements climatiques.

En somme, le rapport démontre une approche holistique et multidisciplinaire, combinant des outils géospatiaux avancés, des méthodes statistiques sophistiquées et une compréhension approfondie des processus climatiques. Cette étude offre ainsi une base solide pour la prise de décision en matière de gestion des ressources naturelles et de planification du développement régional.

## **Abstract**

The study presented in the final internship report represents a significant advancement in understanding and mapping precipitation in the studied region. Through rigorous and comprehensive methodology, the report provides an in-depth perspective of local climatic processes.

The first step involves collecting meteorological data from a reliable source. However, these data can often have gaps or inconsistencies. To address this, the report uses correlation techniques to fill in the gaps and ensure data reliability. This approach provides a solid foundation for subsequent analyses.

Once the data is consolidated, spatial homogeneity is ensured using regional vectors. This approach ensures that spatial variations in precipitation are properly represented, taking into account the specific geographical characteristics of the region.

The integration of the Digital Terrain Model (DTM) adds a crucial dimension to the analysis by allowing for an understanding of the impact of terrain on precipitation distribution. By accounting for altitudinal variations, the report offers a more precise representation of isohyets, thus helping to identify areas with high rainfall and those that are more arid.

Simultaneously, the calculation of the Standardized Precipitation Index (SPI) provides a quantitative assessment of the climatic state over the study period. This measure characterizes periods of drought, providing crucial information for water resource management and adaptation to climate change.

In summary, the report demonstrates a holistic and multidisciplinary approach, combining advanced geospatial tools, sophisticated statistical methods, and a deep understanding of climatic processes. This study thus provides a solid basis for decision-making in natural resource management and regional development planning.

# SOMMAIRE

Résumé .....	3
Abstract .....	4
SOMMAIRE .....	5
Liste des figures : .....	7
Liste des abréviations : .....	9
Chapitre 1 : Présentation d'organisme d'accueil.....	11
I    Présentation d'organisme d'accueil : .....	12
II   . Organisation d'ABHT : .....	13
Chapitre 2 : Présentation de zone d'étude .....	14
I    Situation géographique : .....	15
II   Situation administrative : .....	15
III  . Situation économique : .....	16
1.  Agriculture : .....	16
2.  Tourisme : .....	16
3.  Industrie : .....	16
4.  Artisanat : .....	17
IV  Caractéristiques de zone d'étude : .....	17
1.  Topographie : .....	17
2.  Réseau hydrographique : .....	18
3.  Climatologie : .....	20
4.  Eaux souterraines : .....	20
Chapitre 3 : Méthodologie.....	22
I    Introduction : .....	23
II   Collecte et critique des données : .....	23
III  . Présentation des données pluviométriques : .....	24

IV . Traitement des données collectées : .....	24
1. Détection et correction des données : .....	25
2. Comblement Par la régression linéaire : .....	27
3. Homogénéisation des données : .....	28
4. . Indice standardisé de précipitation SPI : .....	29
V Elaboration de la carte des isohyètes : .....	29
Chapitre 4 : Résultats et discussions .....	31
I Comblement des lacunes : .....	32
II Indice de sécheresse : .....	40
1. Les principaux avantages du SPI sont les suivants : .....	40
2. Classification de SPI : .....	41
3. Application du SPI sur la zone de l'étude .....	41
4. Résultats du calcul du SPI pour la période de référence : .....	43
III . Données récapitulatives : .....	49
IV . Élaboration de la carte des isohyètes : .....	53
Conclusion : .....	53

## Liste des figures :

Figure 1 :Zone d'action de l'agence du bassin hydraulique du Tensift (Youssef, Hajhouji, 2018).....	12
Figure 2:Organigramme d'organisation de l'ABHT .....	13
Figure 3:Géographie du bassin de Haouz Mejjate (Lendsat, TM 2007) .....	15
Figure 4:La topographie du bassin du Haouz Mejjate .....	18
Figure 5:Répartition de réseau hydrographique du bassin Haouz Mejjate .....	19
Figure 6:Carte de la nappe du Haouz-Mejjate.....	21
Figure 7:Les lacunes des stations pluviométriques. ....	27
Figure 8:Méthode de la régression linéaire entre les stations de Marrakech et Chichaoua .....	36
Figure 9: Méthode de double cumul de la station de Marrakech .....	39
Figure 10: Méthode de double cumul de la station de Sidi Rahal.....	39
Figure 11:Méthode de double cumul de la station de Chichaoua .....	40
Figure 12: Représentation de l'indice de sécheresse de la station de Marrakech en 1970-2021 .....	44
Figure 13:Représentation de l'indice de sécheresse de la station de Chichaoua en 1970-2021 .....	44
Figure 14:Représentation de l'indice de sécheresse de la station de Sidi Rahal en 1970-2021 .....	45
Figure 15:Tableau récapitulatif des indices de sécheresse SPI dans la zone d'étude .....	45
Figure 16:Graphe représentatif de la précipitation annuelle moyenne en (mm) en 1970-2021	50
Figure 17::Présentation des stations météorologiques de Haouz Mejjat.....	51
Figure 18:Carte des isohyètes de Haouz Mejjat en 1970-2021 .....	52

## Listes des tableaux :

Tableau 1:Représentation des données pluviométriques .....	24
Tableau 2:Les données brutes fournies par l'ABHT .....	26
Tableau 3:Les précipitations des stations en 1970-2021.....	33
Tableau 4:Précipitations observées et cumulées des stations de Marrakech et Chichaoua en période commune .....	34
Tableau 5:Tableau d'homogénéisation par Vecteur régional de Chichaoua Marrakech et Sidi Rahal.....	37
Tableau 6:Classification de SPI (Mckee et al, 1993).....	41
Tableau 7: Calcul de SPI des stations de Chichaoua Marrakech et Sidi Rahal .....	42
Tableau 8:Tableau récapitulatif des données pluviométriques .....	49

## **Liste des abréviations :**

MNT: Modèle numérique du terrain

SPI: Standardized Precipitation Index ou Indice Normalisé de Précipitation

ABHT: Agence du bassin hydraulique du Tensift

VR: Vecteur régional

P: Précipitation

PDAIRE : Les Plans Directeurs d'Aménagement Intégrée des Ressources en Eau

PME : Petite et moyenne entreprise

PIB : Produit intérieur brut

## Introduction Générale

Les précipitations représentent l'un des phénomènes météorologiques les plus essentiels et influents de notre planète, jouant un rôle important dans le cycle de l'eau, la formation des écosystèmes, et l'activité humaine. Leur distribution, leur intensité et leur régularité façonnent directement notre environnement et nos sociétés. En effet, ces manifestations atmosphériques, qu'elles se présentent sous forme de pluie, de neige, de grêle ou de grésil, ont des impacts significatifs sur l'agriculture, la gestion des ressources en eau, la sécurité alimentaire, et la prévention des risques naturels.

Le Maroc, situé à la croisée des influences méditerranéennes et atlantiques, est un exemple éloquent de la diversité climatique et géographique qui caractérise notre planète. Cette diversité se reflète dans les précipitations, avec des régions allant du désert aride aux montagnes enneigées en passant par les plaines fertiles. Comprendre et cartographier la répartition des précipitations au Maroc revêt donc une importance capitale pour une gestion efficace des ressources naturelles, l'agriculture durable, et la résilience aux changements climatiques.

L'élaboration des cartes des isohyètes, délimitant les zones d'égales quantités de précipitations, est une méthode fondamentale pour représenter la variabilité spatiale des précipitations au Maroc. Ces cartes permettent de visualiser les variations régionales et saisonnières des précipitations, fournissant ainsi des informations cruciales pour la planification des ressources en eau, la gestion des risques naturels et d'autres secteurs socio-économiques.

En outre, le calcul de l'Indice Standardisé de Précipitations (SPI) constitue une autre approche importante pour évaluer les anomalies pluviométriques et détecter les périodes de sécheresse ou d'excès de précipitations. Le SPI offre une mesure quantifiée des conditions pluviométriques, permettant ainsi une meilleure gestion des risques liés aux variations climatiques.

Cette étude se propose donc d'explorer en profondeur la distribution des précipitations au Maroc, en mettant l'accent sur l'importance de l'élaboration des cartes des isohyètes et du calcul du SPI. À travers une analyse approfondie des données disponibles et des méthodes utilisées, nous chercherons à améliorer notre compréhension des variations climatiques au Maroc et à fournir des outils utiles pour la gestion durable des ressources en eau et l'adaptation aux changements climatiques.

## **Chapitre 1 : Présentation d'organisme d'accueil**

## I Présentation d'organisme d'accueil :

L'Agence de Bassin Hydraulique Tensift (ABHT) est un établissement public doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière, responsable de l'évaluation, de la planification, de la gestion et de la préservation des ressources en eau du bassin hydraulique, en impliquant tous les acteurs concernés au sein de sa zone d'action. Elle s'étend sur le territoire de la Wilaya de Marrakech préfecture de Marrakech, provinces d'Al Haouz, Chichaoua, Essaouira, El Kélâa des Sraghna, et Safi, et couvrant une superficie de 24.800 Km<sup>2</sup> avec une population d'environ 2.632.000 habitants dont 42% en milieu urbain et 58% en milieu rural.

L'Agence assure la protection du domaine public hydraulique et mobilise les partenaires et acteurs (collectivités locales, industriels, agriculteurs...) dans des projets visant à maîtriser la quantité et la qualité des ressources en eau, ainsi qu'à promouvoir et développer les compétences techniques dans l'utilisation de l'eau. Elle prend également en compte les situations exceptionnelles telles que la sécheresse, la pénurie, les inondations et les dégradations soudaines de la qualité de l'eau.

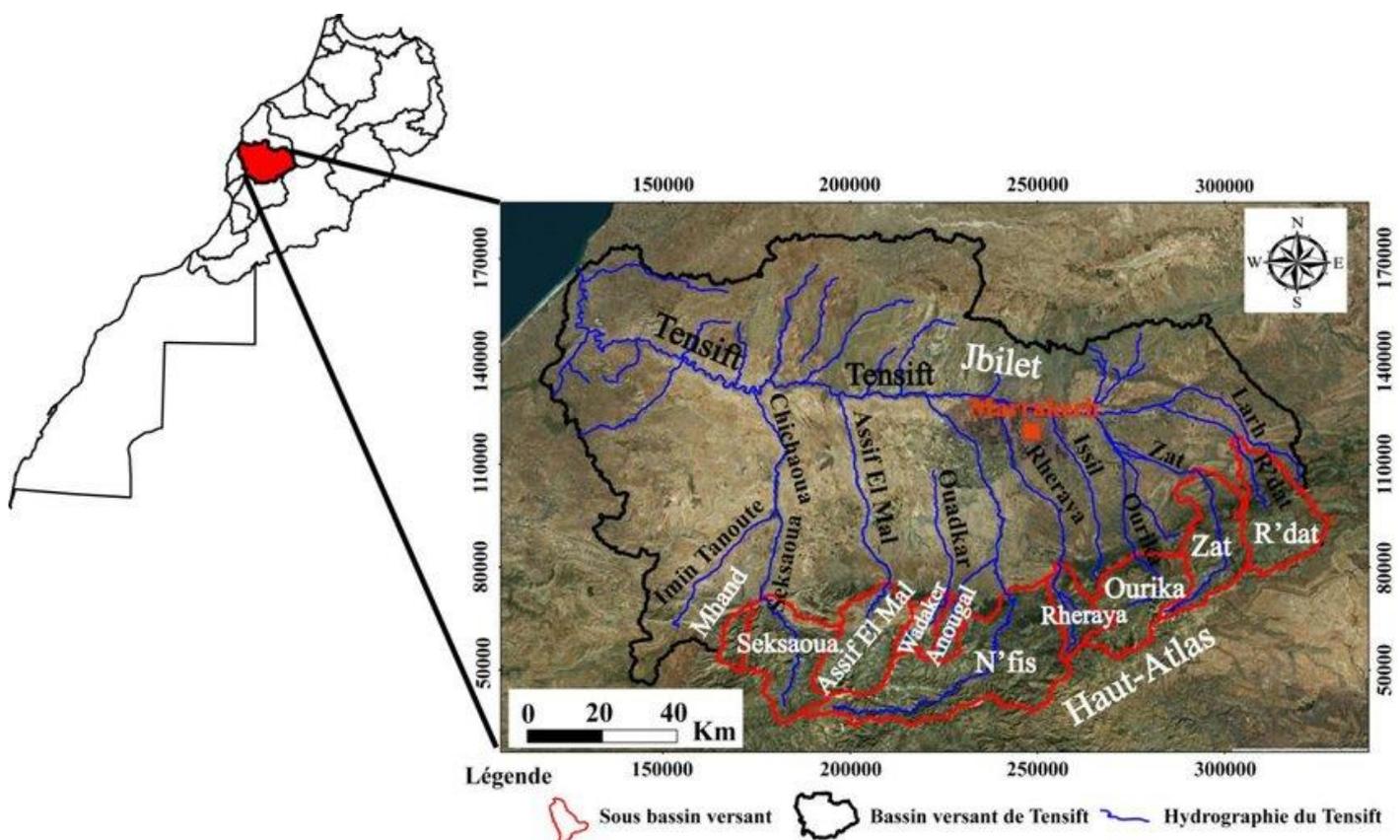


Figure 1 : Zone d'action de l'agence du bassin hydraulique du Tensift (Youssef, Hajhouji, 2018)<sup>i</sup>

## II . Organisation d'ABHT :

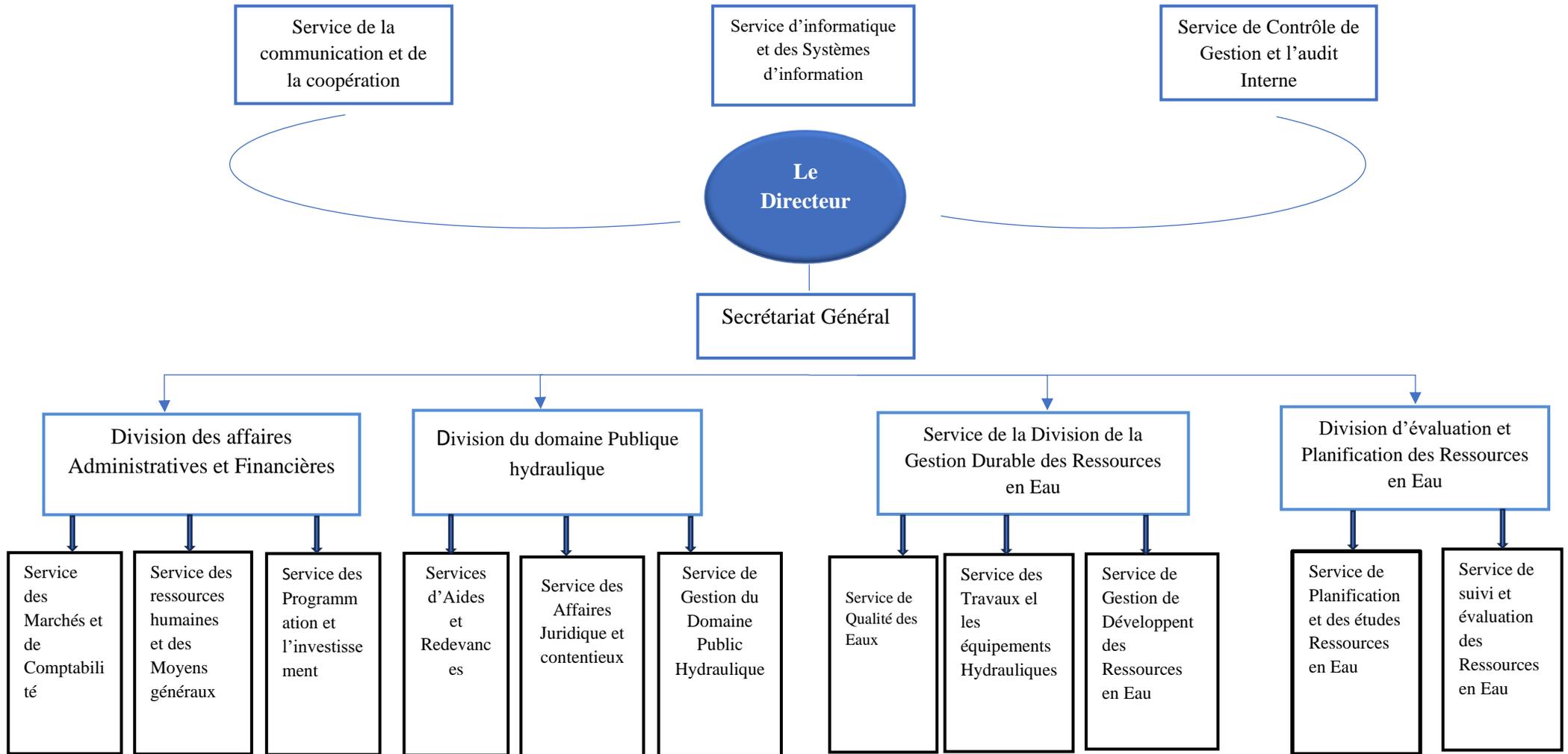


Figure 2: Organigramme d'organisation de l'ABHT<sup>ii</sup>

## **Chapitre 2 : Présentation de zone d'étude**

## I Situation géographique :

La province d'Al Haouz-Mejjate fait partie de la région de Marrakech-Safi, située dans le centre du Maroc. La plaine de Mejjate est la partie occidentale du bassin, présente des étendues de terres plates qui s'étendent à perte de vue, offrant un paysage ouvert et dégagé. Au centre d'Al Haouz, la topographie peut être plus variée, avec des reliefs légèrement plus accidentés et des vallées parsemées entre les collines. À l'est d'Al Haouz, les contreforts du Haut Atlas offrent des panoramas spectaculaires, avec des montagnes escarpées et des vallées profondes.

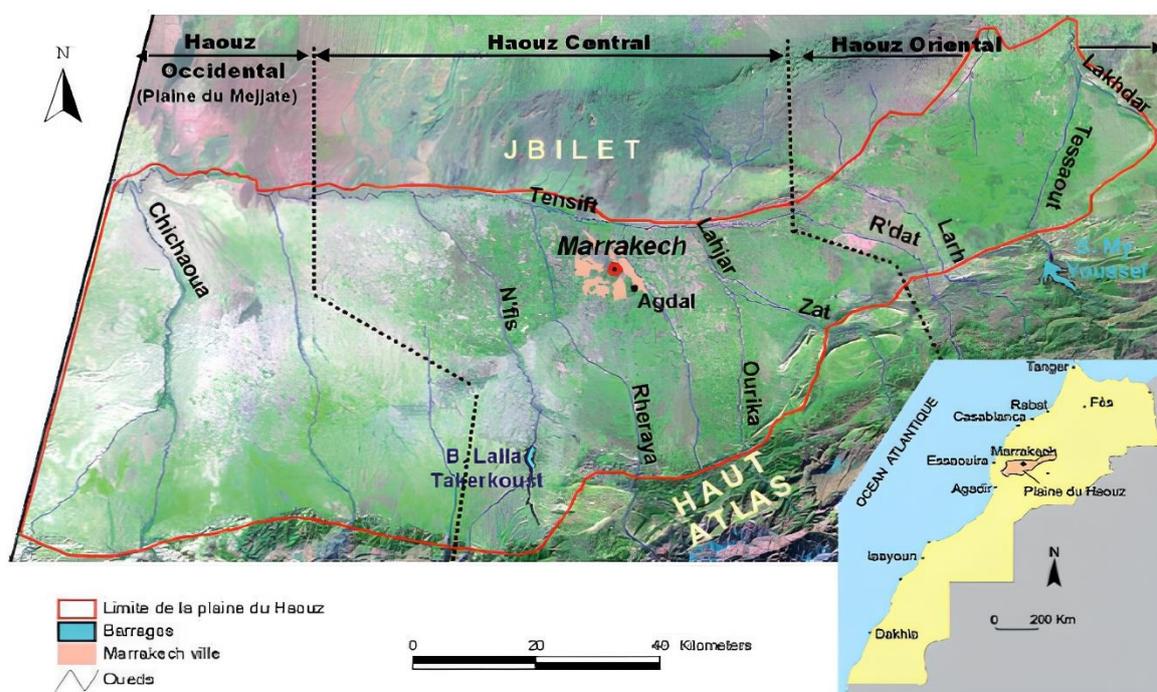


Figure 3: Géographie du bassin de Haouz Mejjate (Landsat, TM 2007)<sup>iii</sup>

## II Situation administrative :

Le bassin d'Al Haouz-Mejjate, avec une population d'environ 2,8 millions d'habitants, est un domaine d'étude comprenant 125 communes, dont 110 sont rurales et 15 sont urbaines. La population de cette région a connu une croissance régulière au fil des années, avec des taux

d'accroissement variant entre 1,56% et 1,65% lors des périodes entre les recensements de 1994, 2004 et 2014. Ces données soulignent l'importance démographique de la région, avec des implications significatives pour la planification et la gestion des ressources.

### **III. Situation économique :**

#### **1. Agriculture :**

Le Bassin Haouz-Mejjate joue un rôle crucial dans l'économie agricole du Maroc, contribuant à 12,6% du PIB agricole national. Avec des infrastructures d'irrigation importantes, l'agriculture dépend fortement de l'irrigation en raison du climat aride. La diversité des cultures comprend principalement l'arboriculture, en particulier l'olivier (olivier, abricotier), qui représente 80% des plantations 20% de la production nationale d'huile d'olive, ainsi que les céréales, les agrumes, le maraichage et l'élevage (bovin, ovin, caprin). La région se distingue par une production agricole diversifiée, avec l'arboriculture.

#### **2. Tourisme :**

La région possède un potentiel touristique important, concentrée à Marrakech, avec plus de 6,7 millions de nuitées enregistrées en 2014 (ABHT, 2016, p. 43)<sup>iv</sup>, notamment grâce à des sites historiques, des paysages naturels attrayants et une culture riche. Les infrastructures d'hébergement, telles que les hôtels 5 étoiles et 4 étoiles, les appartements et les villas, ainsi que les infrastructures d'agrément comme les commerces et les installations sportives, contribuent à l'attrait de la région. Des projets d'aménagement sont prévus pour renforcer l'attractivité touristique comme la création d'un parc d'attractions à thème culturel à Tamansort, un parc acrobatique dans la Vallée du Zat, le Club Biladi Al Haouz offrant des activités d'animation.

#### **3. Industrie :**

Le bassin de Haouz-Mejjate demeure globalement peu industrialisé. La majeure partie de l'activité Industrielle est localisée au niveau de l'agglomération de Marrakech, pôle économique du bassin de Haouz-Mejjate, qui a connu un développement industriel très précoce. Elle abrite aujourd'hui 351 unités industrielles soit près de 80% du parc industriel de la région, Elle s'y est rapidement développée, dans le secteur agroalimentaire, qui représente 38% des

établissements, dans la chimie et la parachimie (30%), le textile (15%), le secteur métallique et mécanique (14%) et l'électrique/électroniques (3%) (ABHT, 2016, p. 46)<sup>v</sup>.

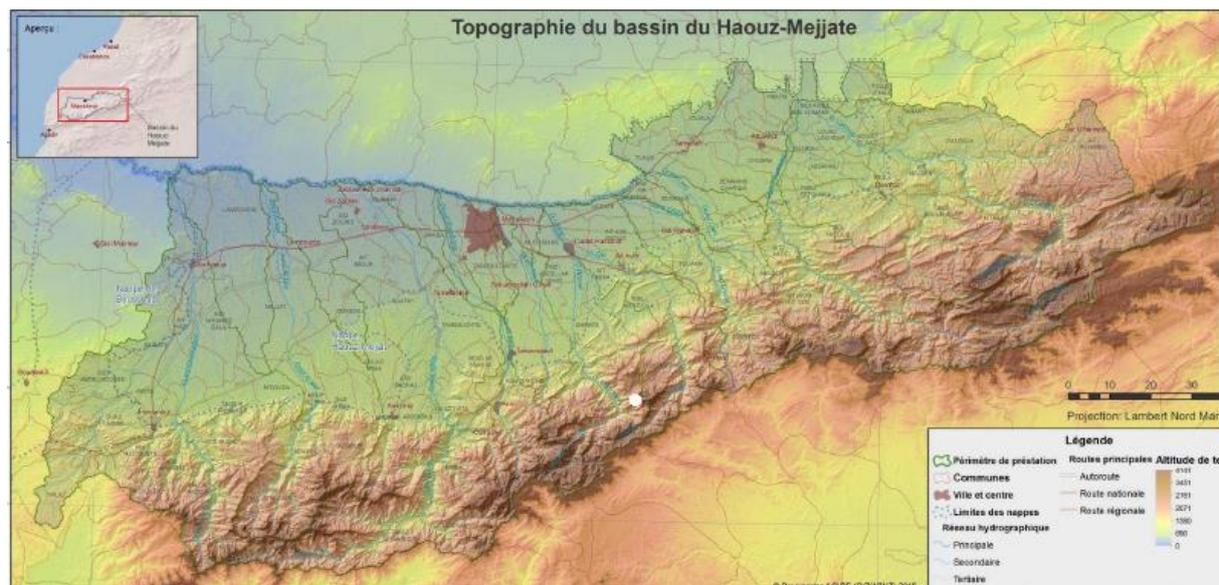
#### **4. Artisanat :**

Dans le bassin de Haouz-Mejjate, l'artisanat est dynamique et crucial pour le développement des petites et moyennes entreprises (PME). À Marrakech, il y a environ 120 PME dans ce secteur. La région compte plus de 120 000 artisans, surtout à Marrakech, dont 56 000 dans des métiers à forte valeur culturelle. En 2014, le chiffre d'affaires de l'artisanat dans la région s'est élevé à 2,9 milliards de dirhams, avec des métiers prédominants tels que le textile, le bâtiment traditionnel et le travail du bois. Les principaux produits artisanaux exportés sont le fer forgé, le bois, le cuir et la poterie, principalement vers la France (33%) et les États-Unis (16%), avec des exportations totalisant 172,5 millions de dirhams en 2014 (ABHT, 2016, p. 49)<sup>vi</sup>.

### **IV Caractéristiques de zone d'étude :**

#### **1. Topographie :**

La morphologie générale du bassin Haouz-Mejjate se divise en trois zones principales : la zone de montagne, la zone de piedmont et la zone de plaine. Cette distinction est cruciale pour comprendre le réseau hydrographique et la production des eaux de surface, telles que le ruissellement. Le Haouz est un bassin de subsidence d'origine tectonique, formé au Néogène et au Quaternaire. Il a accumulé d'importantes formations détritiques résultant du démantèlement de la chaîne atlasique lors de son soulèvement. Comparativement, la plaine de Mejjat, bien que similaire dans sa formation au Haouz, se différencie par la présence de terrains anté-néogènes plissés. Cette particularité géologique la distingue de manière significative et enrichit notre compréhension de la région.



0Figure 4:La topographie du bassin du Haouz Mejjate

Source : carte générée par AHT-RESING à partir du MNT du bassin de Haouz-Mejjate, 2014<sup>vii</sup>

## 2. Réseau hydrographique :

Le bassin de Haouz-Mejjate est traversé par un réseau hydrographique organisé comme suit :

- **Au niveau de la zone d'action de l'ABHT** : nombreux oueds atlasiques, d'orientation Nord-Sud, ce sont tous des affluents rive gauche de l'oued Tensift, et qui s'organisent de l'Ouest

Vers l'Est de la façon suivante : Chichaoua, Assif Almal, N'Fis, Rherhaya-Issyl, Ourika-Ghmat, Zat, Ghdat et Larh.

**-Oued Chichaoua** : Principal cours d'eau drainant la plaine de Mejjate, avec une superficie de 2 696 km<sup>2</sup>. Collecte les eaux des oueds Ameznes, Imintanout et Seksaoua, prenant naissance dans le Haut Atlas. Longueur du cours d'eau principal : 130 km.

**-Oued Assif El Mal** : Draine une superficie de 1 418 km<sup>2</sup>. Prend également sa source dans le Haut Atlas occidental et reçoit les eaux de trois affluents : Oued Zemmit, Assif Oued Tabgoaw et Assif Lounsektene. Longueur du cours d'eau principal : 115 km.

**-Oued N'Fis** : Draine une superficie de 2 726 km<sup>2</sup> et mesure 183 km jusqu'à la confluence avec l'oued Tensift. Reçoit de nombreux affluents dont les principaux sont Oued Amezmiz, Assif Ougdemot, Oued Ouirgane, Assif Imigdal et Assif N'Augrandis.

**-Oued Rherhaya :** Draine un bassin versant de 421 km<sup>2</sup> à la confluence d'Oued Tensift. Constitué par la confluence d'Assif Iminene et Assif N'Aït Mizaine, avec une longueur du cours d'eau principal de 94 km.

**-Oued Issyl :** Draine un bassin versant d'environ 423 km<sup>2</sup>, prenant naissance sur le Haut Atlas occidental. Longueur du cours principal : 60 km.

**-Oued Ourika-Ghmat :** Superficie de 1 071 km<sup>2</sup>, drainé par l'oued Ourika mesurant 101 km. Partie amont active et menaçante du bassin du Tensift, avec une pente longitudinale moyenne de 3,2 %.

**-Oued Zat :** Superficie de 921 km<sup>2</sup>, drainé par Oued Zat mesurant 89 km. Partie amont active et menaçante du bassin du Tensift, avec une pente longitudinale moyenne de 3,8 %.

**-Oued Ghdat :** Draine une superficie de 790 km<sup>2</sup>, avec une longueur du cours d'eau principal de 83 km. Reçoit les affluents Oued Ighi, Oued Iswal, Oued Imarirhene et Oued Ammasine.

**-Oued Larh :** Draine une superficie de 331 km<sup>2</sup>, avec une longueur du cours d'eau principal de 58 km. Principaux affluents : Oued Timert et Oued Tigroui.

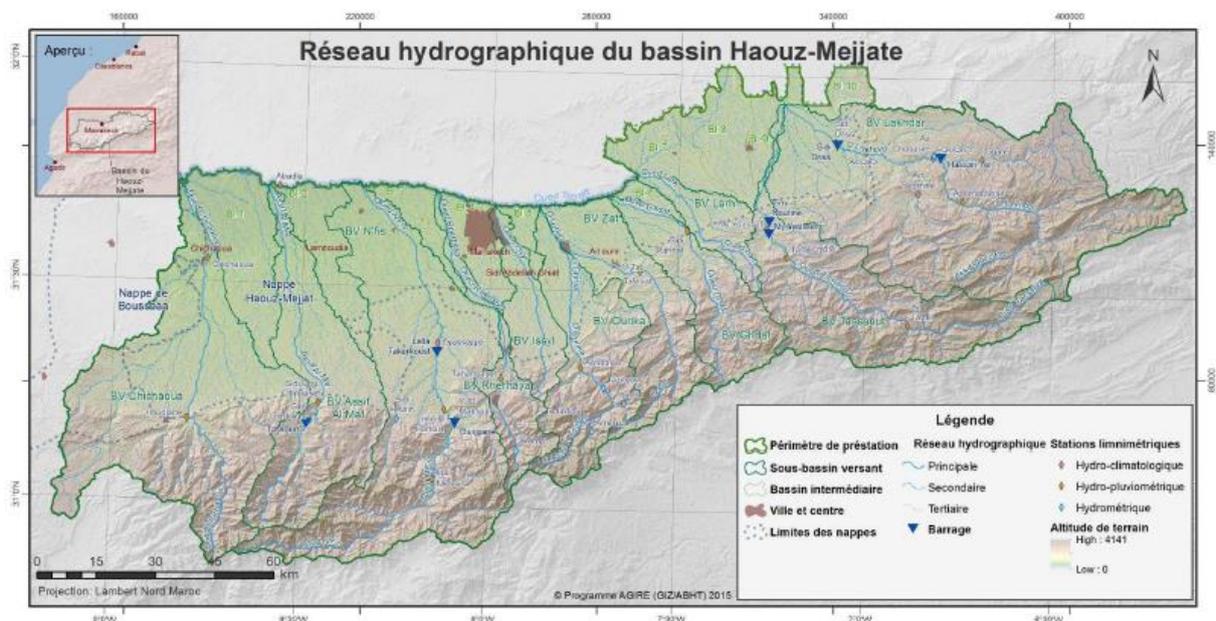


Figure 5: Répartition de réseau hydrographique du bassin Haouz Mejjate  
Source : établie et modifiée d'après les données de l'ABHT-ABHOER, 2014<sup>viii</sup>

### **3. Climatologie :**

La région de Marrakech-Tensift-Al Haouz, caractérisée par des températures élevées tout au long de l'année, présente un climat semi-aride à aride. Les températures maximales moyennes atteignent 28 degrés Celsius par jour, avec des pics de chaleur pouvant atteindre 38 degrés. La période idéale pour voyager est de novembre à mars, lorsque les températures sont plus fraîches, évitant ainsi la saison des pluies de novembre à avril. Cependant, la région connaît des précipitations limitées et irrégulières, concentrées principalement pendant la saison des pluies en hiver et au printemps. Les températures estivales dépassent souvent les 30°C, et le relief varié de la région crée des conditions locales différentes, avec des zones montagneuses plus fraîches et humides que les plaines environnantes.

### **4. Eaux souterraines :**

Le système aquifère du Haouz-Mejjate se compose de deux principales nappes :

- À l'est de la flexure d'Assoufid, il y a la nappe phréatique du Haouz-Mejjate, dont le réservoir est formé par les formations du mioplioquaternaire. Ces formations reposent sur le substratum imperméable des marnes du Miocène ou des schistes du Viséen.
- À l'ouest de la flexure d'Assoufid, on trouve à la fois la nappe phréatique du Haouz-Mejjate et la nappe profonde du Cénomano-Turonien.

La nappe du Haouz-Mejjate s'étend sur une superficie de 6 859 km<sup>2</sup> et est délimitée par l'oued Chichaoua à l'ouest, l'oued Tessaout à l'est, l'oued Tensift au nord et la chaîne du Haut-Atlas au sud. Les eaux souterraines circulent à travers les formations du plioquaternaire, comprenant des sables argileux, des calcaires lacustres, des galets et des graviers avec une matrice sablo-argileuse. Ces formations sont plus épaisses à l'est de la flexure d'Assoufid mais s'amincissent à l'ouest de cette flexure, dans la plaine de Mejjat. Elles reposent sur le substratum des marnes du Miocène ou des schistes du Viséen.

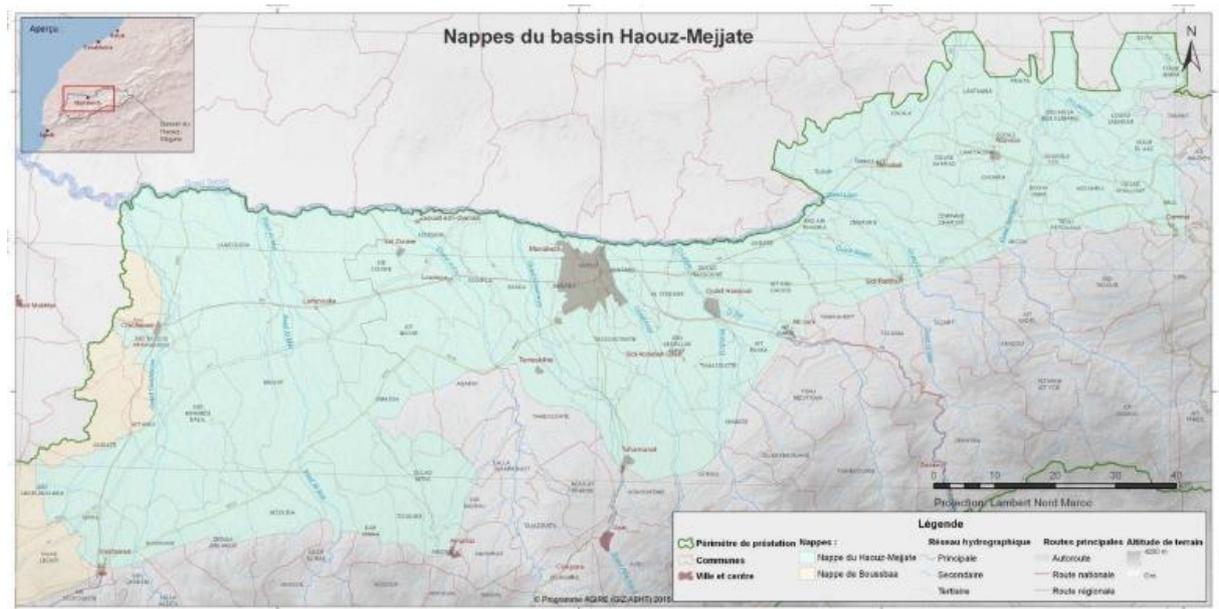


Figure 6: Carte de la nappe du Haouz-Mejjate  
 Source : imagerie satellitaire, Arc Gis, Cadastre des points d'eau, ABHT

## **Chapitre 3 : Méthodologie**

## **I Introduction :**

Avant de plonger dans les détails du projet, il est primordial de définir les étapes essentielles pour réaliser une carte des isohyètes. Tout d'abord, la collecte de données fiables est importante. Cela implique de rassembler des données de précipitation provenant de sources dignes de confiance, et de s'assurer de leur précision en vérifiant leur qualité et en éliminant les anomalies. Ensuite, le traitement et la correction des données sont nécessaires pour garantir leur homogénéité, en comblant les lacunes éventuelles et en corrigeant les erreurs.

Une fois les données préparées, la création de la carte des isohyètes peut commencer en utilisant un logiciel de cartographie approprié, en choisissant un intervalle de valeurs de précipitation et en traçant les isohyètes en reliant les points de même valeur. Ensuite, une analyse approfondie des isohyètes est effectuée pour identifier les zones de précipitation homogènes et hétérogènes, en tenant compte des facteurs géographiques et climatiques. Enfin, la présentation et la communication des résultats sont importantes, avec un format de carte adapté et une légende claire pour faciliter la compréhension des informations contenues dans la carte des isohyètes par le public ciblé. En suivant ces étapes avec précision, une carte des isohyètes précise et significative peut être créée, offrant ainsi des perspectives précieuses sur les variations spatiales des précipitations dans la région d'étude.

Avant d'entamer tout projet de cartographie, il est impératif de se référer à l'archive des cartes précédentes. Ces archives fournissent une base essentielle pour comprendre les tendances historiques des précipitations et établir des comparaisons avec les données actuelles.

## **II Collecte et critique des données :**

La collecte de données pluviométriques **précises** et **fiables** revêt une importance capitale pour la gestion optimale des ressources en eau, surtout dans des pays comme le Maroc, où les activités agricoles et divers secteurs économiques reposent largement sur les conditions météorologiques, en particulier les précipitations. Dans cette optique, plusieurs sources de données sont disponibles pour répondre à ce besoin :

- **Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT)** : Organisme de gestion des bassins versants chargé de la collecte de données hydrologiques, y compris les données pluviométriques, dans la région du Tensift.

Dans cette étude, l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT) se positionne comme la source la plus proche et fiable pour les données pluviométriques.

### III. Présentation des données pluviométriques :

Dans le cadre de cette étude, 12 stations pluviométriques ont été utilisées. Le tableau ci-après donne la liste de ces stations, accompagnées de leurs coordonnées, ainsi que quelques autres stations externes qui permettront l'élaboration de la carte des isohyètes.

Tableau 1:Représentation des données pluviométriques

N°	Station	COORDONNEES (m)			N°	Station	COORDONNEES (m)		
		X	Y	Z			X	Y	Z
1	IMI EL KHENG	260509	429719	1209	13	DKHILA BARRAGE	-	-	-
2	ABADLA	199866	129770	246	14	IGROUNZAR	103500	91300	205
3	ABDELMOUMEN	139965	421845	711	15	ILOUDJANE	176245	70525	757
4	ADAMNA	92865	104209	77	16	IMIN LHAMMAM	241500	72120	744
5	AGAOUIRA	269500	79000	1700	17	MARRAKECH	252139	117908	460
6	AGHBALOU	276459	82616	1005	18	SIDI HSAIN	229230	70390	1021
7	AIT OUAZIZ	311920	115054	869	19	SIDI RAHAL	303143	117733	687
8	AMSOUL	136	414	650	20	Sidi BOATHMAN	209460	74345	816
9	ARMED	259505	61984	1910	21	Sidi BOUZGUIA	264660	100540	630
10	TAKERKOUST	148909	432582	849	22	TAFERIAT	291080	107860	761
11	CHICHAOUA	181501	111206	337	23	TAHANAOUT	255785	80650	1043
12	CHOUITER	271685	113061	513	24	TIJDANTE	310699	98114	1122

Source : ABHT

### IV. Traitement des données collectées :

Les données pluviométriques proviennent d'une mesure qui a été recueillie soit par :

- Une lecture directe des paramètres (à partir d'un pluviomètre)
- Un dépouillement d'enregistrement c'est-à-dire d'un pluviographe.

Deux types d'erreurs peuvent être commises au cours de cette mesure :

- **Des erreurs systématiques :**

Elles affectent la fiabilité des données et sont totalement corrélées, elles peuvent être dû à :

- La mauvaise utilisation ou calibration de l'appareillage de mesure
- Un mauvais réglage, par procédure incorrecte de mesure
- Une installation inadéquate de cet appareil

- **Des erreurs accidentelles ou aléatoires:**

Elles affectent la précision des données et elles sont non corrélées. Ce type d'erreurs est dû à des raisons nombreuses et variées, généralement inconnues, différemment chaque mesure individuellement. Survenant inopinément et ne peuvent être ni prévues ni évitées.

Pour que les données soient fiables on doit suivre les démarches suivantes :

- Détecter et corriger les erreurs ;
- Comblent les données manquantes des séries d'observations
- Vérifier l'homogénéité et l'indépendance des données recueillies

### **1. Détection et correction des données :**

Dans le cadre de cette étude sur les précipitations dans la région de Haouz Mejjat, des données pluviométriques fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) ont été collectées et analysées. Pour faciliter l'analyse, ces données ont été classées selon des groupes en fonction de l'altitude  $z$  des stations de mesure, voilà un exemple de cette classification :

- **Le premier groupe** : comprend les stations situées à des altitudes plus basses, notamment *Chichaoua, Marrakech et Sidi Rahal*.
- **Le deuxième groupe** : comprend les stations à des altitudes moyennes telles que *Taferiat, Imin Hmame, Tahnaout et Sidi Bouathmane*.
- **Le troisième groupe** : est composé de stations situées à des altitudes plus élevées, telles que *Aghbalo, Sidi Hssain et Armed*.

Les stations de mesure *Ait Ouaziz, Sidi Bouzguia, Chouitter et Tijdine*, ont été éliminées en raison de leur courte série de mesure qui ne dépasse pas six ans. Ce qui garantira des résultats fiables.

Ces étapes préliminaires sont essentielles pour poser les bases d'une analyse approfondie des tendances et des variations des précipitations dans la région de Haouz Mejjat.

Tableau 2:Les données brutes fournies par l'ABHT

Nom de station	Période	Nombre d'année	X (m)	Y (m)	Z (m)
Admna	1977-2016	39	92865	104209	77
Igrounzar	1978-2016	38	103500	91300	205
Abadla	1970-2021	51	199866	129770	246
Chichaoua	1965-2021	55	181525	111200	340
Marrakech	1970-2020	50	250000	110000	460
Sidi Rahal	1967-2021	55	303100	117800	690
Ioudjane	1989-2017	29	176245	70525	757
Tafriat	1982-2021	39	291250	107500	760
Imin El Hammame	1968-2021	54	241400	72400	770
Sidi Bouathmane	1989-2021	33	209400	74300	820
Tahnaout	1968-2021	54	255900	80400	925
Sidi Hsain	1997-2021	25	229100	70170	1030
Aghbalou	1968-2021	54	276150	83050	1070
Agaouira	1925-1994	70	269500	79000	1700
Aremd Imlil	1998-2021	24	259300	62100	1950
Takerkourst	1970-2020	51			
Chouiter	2017-2021	5	271685	113061	513
Sidi Bouzguia	2021	1	264660	100540	630
Ait Ouaziz	2021	1	311920	115054	869
Tijdante	2017-2021	5	310699	98114	1122

Source : ABHT



puis on prend les meilleurs coefficients de corrélation et on réalise une régression linéaire entre les stations correspondantes.

$$r^2 = \frac{a(k\sum xy - \sum x\sum y)}{a\sum y^2 - (\sum y)^2}$$

$k$  : Nombre d'observations communes.

$x$  : Précipitation annuelle dans la station  $x$ .

$y$  : Précipitation annuelle dans la station  $y$ .

$r$  : Coefficient de corrélation  $-1 < r < 1$

### 3. Homogénéisation des données :

Pour homogénéiser les données pluviométriques dans l'ensemble du bassin, la méthode du double cumul (Azzedine Garah, 2016)<sup>ix</sup>, est utilisée pour détecter toute hétérogénéité dans les séries de données. Cette méthode nécessite l'existence d'une station de référence, également appelée station témoin, qui fournit des données annuelles homogènes et observées. Cependant, dans ce cas, il n'existe pas de telle station.

Pour contourner cette limitation, l'utilisation de la méthode du "**vecteur régional**" qui consiste à constituer un vecteur formé par des indices calculés sur les données de pluies annuelles des stations d'une zone homogène régionale en termes de pluviométrie et de climatologie.

Chaque groupe de stations ayant des altitudes relativement égales, consiste la constitution d'un vecteur régional. *Par exemple*, la formation d'un groupe de stations comprenant Chichaoua, Marrakech et Sidi Rahal, et des autres groupes comprenant d'autres stations similaires en altitude.

L'indice régional pour une année donnée se calcule sur la période commune d'observation disponible (1970-2021) entre l'ensemble des stations concernées, selon la formule :

$$V_j = \frac{1}{n} \sum \frac{p_{i,j}}{P_i}$$

$P_{i,j}$  : Pluie annuelle de l'année  $j$  à la station  $i$  .

$P_i$  : Module interannuel de la station  $i$ .

$N$  : Nombre de poste (SERHIR, 2023, p. 7)<sup>x</sup>.

#### 4. . **Indice standardisé de précipitation SPI :**

Le **SPI**, ou **Indice Normalisé de Précipitation**, est un outil largement reconnu pour évaluer les sécheresses météorologiques. Il est privilégié pour sa simplicité de calcul et son adaptabilité, en se basant uniquement sur les données de précipitations. L'OMM l'a adopté comme norme mondiale en 2009.

Pour calculer le SPI, des données annuelles sur les précipitations sur une période idéalement longue sont nécessaires, de préférence 50 à 60 ans ou plus. Cet indice permet de mesurer l'écart entre les précipitations d'une période donnée et les moyennes historiques. Il est avantageux car il peut représenter de manière équitable les climats humides et arides grâce à sa normalisation.

La méthode de calcul du SPI repose sur l'ajustement d'une distribution de probabilité aux données historiques de précipitations, transformée ensuite en distribution normale pour que la moyenne soit zéro. Les valeurs positives indiquent un excès de précipitations par rapport à la médiane, tandis que les valeurs négatives signalent un déficit.

$$SPI = \frac{(P_i - P_m)}{\sigma}$$

$P_i$  : précipitation totale d'une période  $i$  en (mm) ;

$P_m$  : Précipitation moyenne historique de la période en (mm) ;

$\sigma$  : Ecart type historique des précipitations de la période en (mm).

#### **V Elaboration de la carte des isohyètes :**

L'élaboration de la carte des isohyètes a été un processus méthodique qui a impliqué plusieurs étapes. Tout d'abord, l'utilisation du **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** de la zone d'étude du site de [www.saidi.ma](http://www.saidi.ma) (Saidi El Mehdi, n.d.-b) <sup>xi</sup> pour obtenir des informations précises sur l'élévation du terrain. Ensuite, ces données ont été importées dans le logiciel **Global Mapper** afin de les préparer pour une analyse plus poussée.

Dans Global Mapper, l'effectuation des opérations de prétraitement telles que la correction des erreurs topographiques et la gestion des données manquantes. Une fois ces étapes

préliminaires terminées, les données ont été transférées dans **ArcGIS** pour une analyse plus approfondie.

À l'aide des outils *Arc Toolbox*, d'abord la délimitation du bassin versant de la zone d'étude en utilisant la fonction d'*Hydrology*, disponible dans *les outils d'analyse spatiale*. Cette étape permet de créer le réseau de drainage en définissant les flux et les directions d'écoulement des eaux de surface, ainsi que l'accumulation des débits dans chaque cellule du raster.

Ensuite, l'identification des points de décharge principaux en utilisant la fonction de *détection de l'exutoire*, ce qui a permis de délimiter précisément le bassin versant. Une fois cette étape achevée, la projection des stations météorologiques sur le bassin versant, en les nommant pour une meilleure identification.

Pour créer la carte des isohyètes, il nécessite l'utilisation de *3D Analyst* de ArcGIS, l'emploi de la technique du *spline* pour interpoler les valeurs de précipitations entre les stations météorologiques, permettant ainsi de générer des lignes isohyètes représentant des niveaux équivalents de précipitations dans la région, puis la fonction *clip* pour découper ces courbes en fonction des limites de la zone d'étude. Cela garantit que seules les lignes isohyètes pertinentes pour l'analyse sont incluses dans la carte finale.

Enfin, l'ajout des éléments cartographiques nécessaires tels que la légende, le titre et l'échelle pour compléter la carte des isohyètes. Ce processus rigoureux a permis de produire une représentation précise et informative de la répartition des précipitations dans la zone d'étude.

## **Chapitre 4 : Résultats et discussions**

## **I Comblement des lacunes :**

Il est essentiel de prendre en compte le fait que les séries de données pluviométriques annuelles peuvent souvent être incomplètes en raison de divers facteurs tels que des pannes d'appareils, l'absence d'observateurs ou des arrêts temporaires des stations de mesure. Avant de procéder à tout traitement des données, il est crucial de combler ces lacunes pour assurer l'intégrité et la cohérence des analyses ultérieures.

À cet effet, un complément des lacunes dans les séries de données pluviométriques collectées a été effectué. Les tableaux ci-dessous présentent les données recueillies pour les stations de Marrakech et Chichaoua, avec les lacunes comblées indiquées en jaune. Pour combler les lacunes dans les données de la station de Marrakech, une approche basée sur la régression linéaire a été adoptée en utilisant les données de la station de Chichaoua comme station de référence. Étant donné que Chichaoua présente une altitude proche de celle de Marrakech, elle est considérée comme une référence appropriée pour estimer les valeurs manquantes de précipitations. La période commune entre les deux stations, où aucune lacune n'était présente dans les données, a été sélectionnée pour effectuer cette analyse. Pour chaque année de cette période commune, les données de précipitations disponibles pour les stations de Marrakech et de Chichaoua ont été utilisées. En utilisant une analyse de régression linéaire, une relation mathématique entre les deux ensembles de données a été établie, permettant ainsi d'estimer les valeurs manquantes de Marrakech en fonction des données observées à Chichaoua. Il est important de noter que lors du remplacement de la variable indépendante ( $x$ ) par les valeurs observées à Chichaoua, il a été veillé à ce que les valeurs utilisées correspondent à la même année que celles des données de Marrakech.

Dans le cas où la valeur comblée est inférieure à la lacune, la valeur la plus élevée entre la valeur comblée et la valeur initiale avant la lacune a été conservée. Cette approche garantit l'intégrité et la cohérence et assure que l'estimation des précipitations est au moins élevée que la valeur initialement manquante.

Tableau 3:Les précipitations des stations en 1970-2021

Années	Chichaoua			Marrakech			Sidi Rahal		
	P observée (mm)	P corrigée (mm)	P adoptée (mm)	P observée (mm)	P corrigée (mm)	P adoptée (mm)	P observée (mm)	P corrigée (mm)	P adoptée (mm)
1970/71	300,6	398,9319	398,9319	460,5	345,7498	460,5	577,6	582,5	577,6
1971/72	204,9	188,5122	204,9	212,1	232,8525	232,8525	466,2	471,2	466,2
1972/73	143,9	133,8743	143,9	147,6	160,8908	147,6	322,3	327,4	322,3
1973/74	273,7	301,0918	273,7	345,0	314,0159	345	565,4	570,3	565,4
1974/75	112,7	135,9073	112,7	150,0	124,0842	150,0	252,9	258,1	252,9
1975/76	199,0	209,5203	199,0	236,9	225,8923	236,9	382,3	387,4	382,3
1976/77	114,5	113,2897	114,5	123,3	126,2076	123,3	270,4	275,5	270,4
1977/78	292,6	240,27	292,6	273,2	336,3122	273,2	412,1	417,1	412,1
1978/79	223,8	177,4999	223,8	199,1	255,1489	199,1	277,7	282,8	277,7
1979/80	201,0	185,0391	201,0	208,0	228,2517	228,2517	449,9	454,9	449,9
1980/81	91,4	101,8539	91,4	109,8	98,95657	109,8	328,4	333,5	328,4
1981/82	298,7	216,4665	298,7	245,1	343,5084	343,5084	394,4	399,5	394,4
1982/83	78,3	75,50907	78,3	78,7	83,50251	78,7	176,4	209,7	176,4
1983/84	131,4	141,6676	131,4	156,8	146,1446	156,8	241,4	277,8	241,4
1984/85	199,3	214,6029	199,3	242,9	226,2462	242,9	319,9	375,7	319,9
1985/86	164,9	210,8757	164,9	238,5	185,6645	238,5	349,2	367,3	349,2
1986/87	112,1	139,804	112,1	154,6	123,3764	154,6	220,6	225,8	220,6
1987/88	260,7	239,4229	260,7	272,2	298,6798	272,2	351,4	363,4	351,4
1988/89	249,7	240,27	249,7	273,2	285,7031	273,2	437,6	469,4	437,6
1989/90	210,3	130,5706	210,3	143,7	239,2229	143,7	319,6	363,4	319,6
1990/91	207,2	230,2742	207,2	261,4	235,5658	261,4	467,5	449,9	467,5
1991/92	105,6	128,5375	105,6	141,3	115,7083	141,3	247,9	292,6	247,9
1992/93	56,8	128,1987	56,8	140,9	58,13896	140,9	167,7	246,3	167,7
1993/94	228,9	190,7994	228,9	214,8	261,1653	214,8	359,9	444,4	359,9
1994/95	213,8	252,0447	213,8	287,1	243,3519	287,1	346,3	382,8	346,3
1995/96	295,1	305,5814	295,1	350,3	339,2615	350,3	648,2	827,3	648,2
1996/97	294,5	294,7386	294,5	337,5	338,5537	337,5	429,6	403,9	429,6
1997/98	217,1	237,5593	217,1	270,0	247,2449	270,0	388,5	399,6	388,5
1998/99	136,0	171,062	136,0	191,5	151,5712	191,5	349,0	381,6	349,0
1999/00	159,2	143,2771	159,2	158,7	178,9403	158,7	268,1	307,1	268,1
2000/01	89,8	95,92418	89,8	102,8	97,06905	102,8	195,8	243,7	195,8
2001/02	139,4	162,8451	139,4	181,8	155,5822	181,8	241,3	299,1	241,3
2002/03	182,2	184,5308	182,2	207,4	206,0733	207,4	347,3	277,9	347,3
2003/04	196,1	201,4728	196,1	227,4	222,4712	227,4	389,7	332,8	389,7
2004/05	94,4	99,39729	99,39729	106,9	102,4957	106,9	261,0	227,0	261
2005/06	293,7	251,5364	293,7	286,5	337,6098	337,6098	383,5	320,6	383,5
2006/07	99,4	130,4859	99,4	143,6	108,3909	143,6	204,8	235,3	204,8
2007/08	117,1	125,3186	117,1	137,5	129,2749	137,5	212,0	217,2	212,0
2008/09	270,0	306,9368	270,0	351,9	309,651	351,9	416,7	413,8	416,7

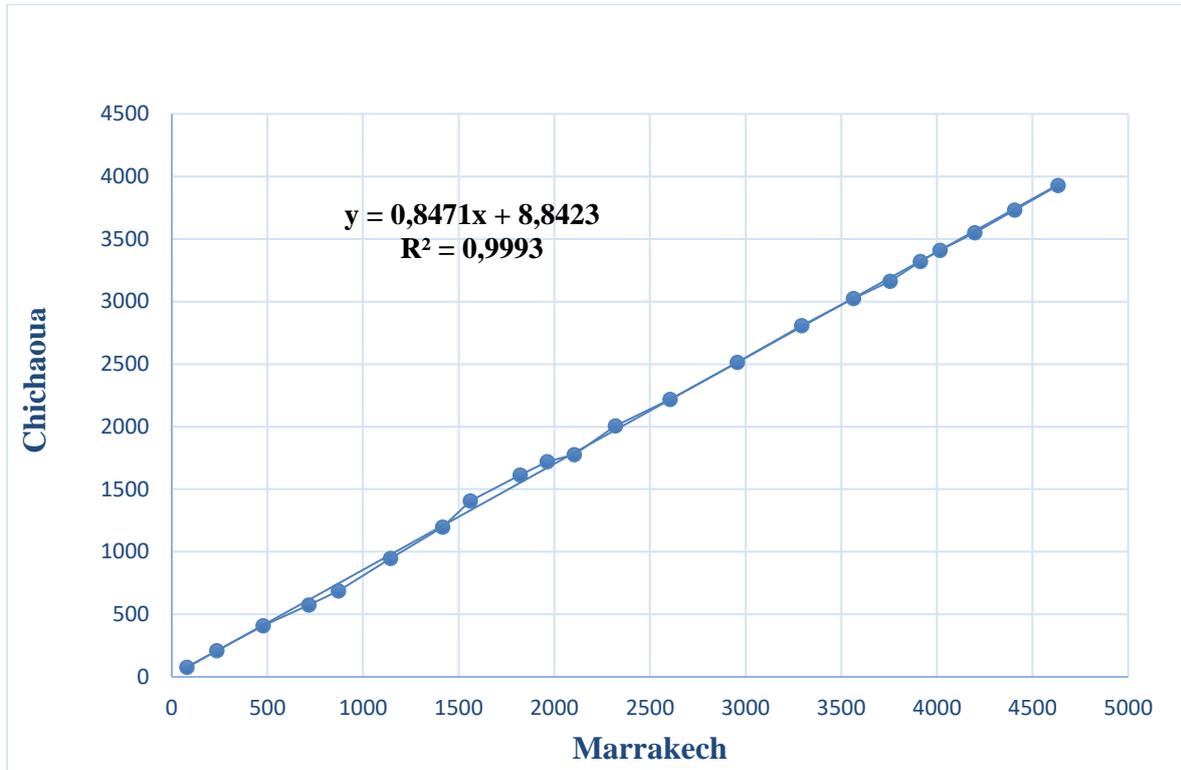
2009/10	167,2	279,9143	167,2	320,0	188,3778	320,0	451,7	376,1	451,7
2010/11	245,3	194,9502	245,3	219,7	280,5124	280,5124	336,2	384,3	336,2
2011/12	95,2	130,4012	95,2	143,5	103,4394	143,5	294,1	299,2	294,1
2012/13	144,0	176,2293	144,0	197,6	161,0088	197,6	360,1	317,0	360,1
2013/14	193,7	188,1734	193,7	211,7	219,6399	211,7	300,0	305,1	300,0
2014/15	237,0	279,0672	237,0	319,0	270,7209	319,0	485,1	490,1	485,1
2015/16	106,0	228,2412	106,0	259,0	116,1802	259	215,5	205,3	215,5
2016/17	197,7	84,91188	197,7	89,8	224,3587	89,8	272,8	271,5	272,8
2017/18	174,1	286,0134	174,1	327,2	196,5178	327,2	436,1	399,4	436,1
2018/19	173,2	163,9463	173,2	183,1	195,456	183,1	307,7	371,1	307,7
2019/20	57,9	111,0873	57,9	120,7	59,43663	120,7	352,9	264,7	352,9
2020/21	109,8	94,56882	109,8	101,2	120,6631	101,2	252,7	315,0	252,7
2021/22	115,9	70,59589	115,9	72,9	127,8592	127,8592	158,0	172,1	158,0

Après avoir sélectionné la période commune (1982-2003) entre les stations de Marrakech et Chichaoua, nous avons calculé les précipitations cumulées pour chaque année (voir le tableau).

Tableau 4: Précipitations observées et cumulées des stations de Marrakech et Chichaoua en période commune

Années	MARRAKECH P observée (mm)	CHICHAOUA P observée (mm)	MARRAKECH P cumulée (mm)	CHICHAOUA P cumulée (mm)
1982	78,7	78,3	78,7	78,3
1983	156,8	131,4	235,5	209,7
1984	242,9	199,3	478,4	409,0
1985	238,5	164,9	716,9	573,9
1986	154,6	112,1	871,5	686,0
1987	272,2	260,7	1143,7	946,7
1988	273,2	249,7	1416,9	1196,4
1989	143,7	210,3	1560,6	1406,7
1990	261,4	207,2	1822,0	1613,9
1991	141,3	105,6	1963,3	1719,5
1992	140,9	56,8	2104,2	1776,3
1993	214,8	228,9	2319,0	2005,2
1994	287,1	213,8	2606,1	2219,0
1995	350,3	295,1	2956,4	2514,1
1996	337,5	294,5	3293,9	2808,6
1997	270,0	217,1	3563,9	3025,7
1998	191,5	136,0	3755,4	3161,7
1999	158,7	159,2	3914,1	3320,9
2000	102,8	89,8	4016,9	3410,7
2001	181,8	139,4	4198,7	3550,1
2002	207,4	182,2	4406,1	3732,3
2003	227,4	196,1	4633,5	3928,4

Le graphe ci-dessous présente les précipitations cumulées annuelles pour les deux stations sur la période sélectionnée.



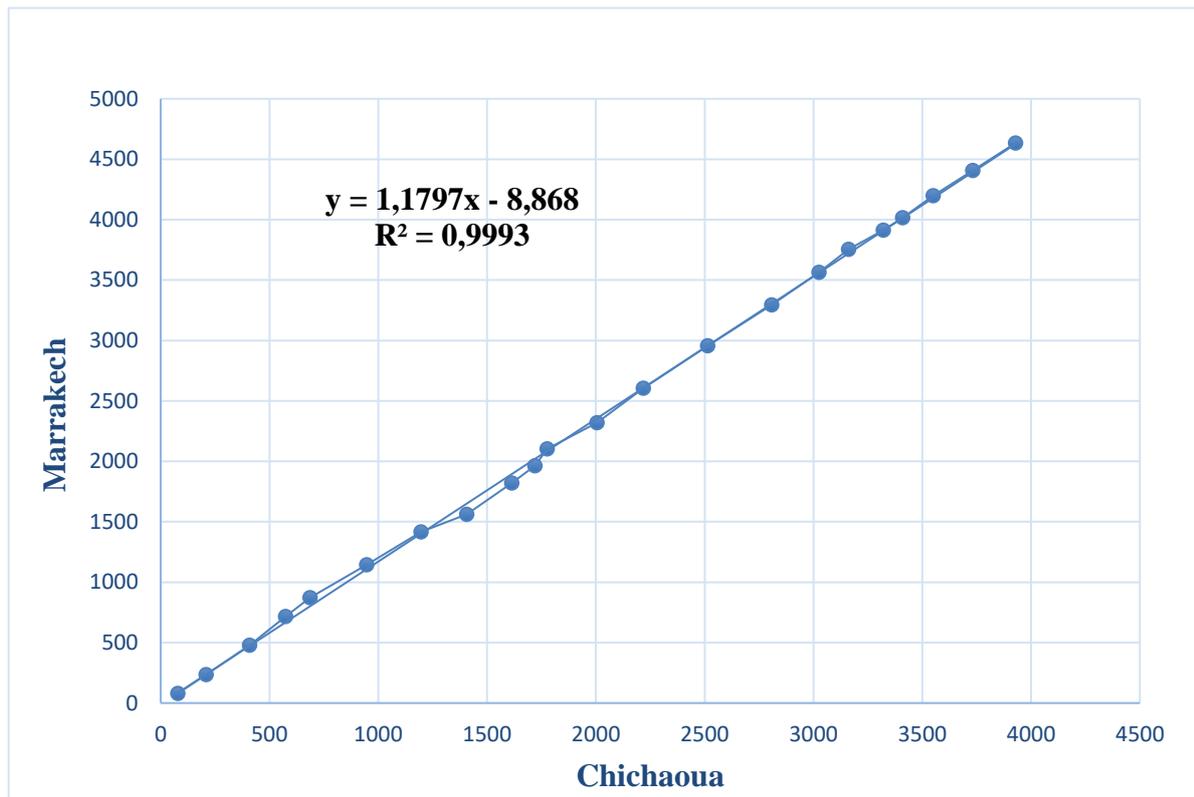


Figure 8: Méthode de la régression linéaire entre les stations de Marrakech et Chichaoua

En observant ces graphiques, les variations annuelles des précipitations cumulées pour Marrakech et Chichaoua au cours de la période étudiée sont mises en évidence. Cette analyse nous permet de mieux appréhender les tendances générales en matière de précipitations dans la région de Haouz et de repérer d'éventuelles anomalies ou variations significatives d'une année à l'autre.

Un coefficient de corrélation de  $R=0.9993$  indique une corrélation extrêmement forte, ce qui signifie que les précipitations mesurées dans les deux stations sont très étroitement liées. Par conséquent, les variations dans les précipitations à Marrakech sont généralement fortement prédictives des variations correspondantes à Chichaoua, et vice versa.

Cette corrélation élevée suggère que l'utilisation de la régression linéaire pour estimer les précipitations manquantes à Marrakech à partir des données observées à Chichaoua est justifiée, étant donné que les deux stations météorologiques présentent des tendances similaires dans leurs données pluviométriques.

Tableau 5: Tableau d'homogénéisation par Vecteur régional de Chichaoua Marrakech et Sidi Rahal

Années	Chichaoua		Sidi Rahal		Marrakech		VR	VR cumulé
	P adoptée (mm)	P cumulée (mm)	P adoptée (mm)	P cumulée (mm)	P adoptée (mm)	P cumulée (mm)		
1970/71	398,93	398,93	460,50	460,50	577,60	577,60	2,01	2,01
1971/72	204,90	603,83	232,85	693,35	466,20	1043,80	1,20	3,21
1972/73	143,90	747,73	147,60	840,95	322,30	1366,10	0,81	4,02
1973/74	273,70	1021,43	345,00	1185,95	565,40	1931,50	1,59	5,61
1974/75	112,70	1134,13	150,00	1335,95	252,90	2184,40	0,69	6,30
1975/76	199,00	1333,13	236,90	1572,85	382,30	2566,70	1,11	7,41
1976/77	114,50	1447,63	123,30	1696,15	270,40	2837,10	0,67	8,07
1977/78	292,60	1740,23	273,20	1969,35	412,10	3249,20	1,37	9,44
1978/79	223,80	1964,03	199,10	2168,45	277,70	3526,90	0,99	10,43
1979/80	201,00	2165,03	228,00	2396,45	449,90	3976,80	1,16	11,60
1980/81	91,40	2256,43	109,80	2506,25	328,40	4305,20	0,66	12,26
1981/82	298,70	2555,13	343,51	2849,76	394,40	4699,60	1,47	13,73
1982/83	78,30	2633,43	78,70	2928,46	176,40	4876,00	0,44	14,17
1983/84	131,40	2764,83	156,80	3085,26	241,40	5117,40	0,72	14,89
1984/85	199,30	2964,13	242,90	3328,16	319,90	5437,30	1,06	15,94
1985/86	164,90	3129,03	238,50	3566,66	349,20	5786,50	1,02	16,96
1986/87	112,10	3241,13	154,60	3721,26	220,60	6007,10	0,66	17,62
1987/88	260,70	3501,83	272,20	3993,46	351,40	6358,50	1,25	18,87
1988/89	249,70	3751,53	273,20	4266,66	437,60	6796,10	1,31	20,18
1989/90	210,30	3961,83	143,70	4410,36	319,60	7115,70	0,92	21,10
1990/91	207,20	4169,03	261,40	4671,76	467,50	7583,20	1,24	22,35
1991/92	105,60	4274,63	141,30	4813,06	247,90	7831,10	0,66	23,00
1992/93	56,80	4331,43	140,90	4953,96	167,70	7998,80	0,49	23,49
1993/94	228,90	4560,33	214,80	5168,76	359,90	8358,70	1,11	24,60
1994/95	213,80	4774,13	287,10	5455,86	346,30	8705,00	1,18	25,78
1995/96	295,10	5069,23	350,30	5806,16	648,20	9353,20	1,72	27,50
1996/97	294,50	5363,73	337,50	6143,66	429,60	9782,80	1,49	28,98
1997/98	217,10	5580,83	270,00	6413,66	388,50	10171,30	1,20	30,18
1998/99	136,00	5716,83	191,50	6605,16	349,00	10520,30	0,89	31,07
1999/00	159,20	5876,03	158,70	6763,86	268,10	10788,40	0,80	31,87
2000/01	89,80	5965,83	102,80	6866,66	195,80	10984,20	0,52	32,39
2001/02	139,40	6105,23	181,80	7048,46	241,30	11225,50	0,77	33,17
2002/03	182,20	6287,43	207,40	7255,86	347,30	11572,80	1,00	34,16
2003/04	196,10	6483,53	227,40	7483,26	389,70	11962,50	1,10	35,26
2004/05	99,40	6582,93	106,90	7590,16	261,00	12223,50	0,60	35,86
2005/06	293,70	6876,63	337,61	7927,77	383,50	12607,00	1,44	37,30
2006/07	99,40	6976,03	143,60	8071,37	204,80	12811,80	0,61	37,91

2007/08	117,10	7093,13	137,50	8208,87	212,00	13023,80	0,64	38,54
2008/09	270,00	7363,13	351,90	8560,77	416,70	13440,50	1,45	39,99
2009/10	167,20	7530,33	320,00	8880,77	451,70	13892,20	1,25	41,24
2010/11	245,30	7775,63	280,51	9161,28	336,20	14228,40	1,22	42,46
2011/12	95,20	7870,83	143,50	9304,78	294,10	14522,50	0,69	43,14
2012/13	144,00	8014,83	197,60	9502,38	360,10	14882,60	0,92	44,07
2013/14	193,70	8208,53	211,70	9714,08	300,00	15182,60	0,98	45,04
2014/15	237,00	8445,53	319,00	10033,08	485,10	15667,70	1,41	46,45
2015/16	106,00	8551,53	259,00	10292,08	215,50	15883,20	0,81	47,26
2016/17	197,70	8749,23	89,80	10381,88	272,80	16156,00	0,77	48,03
2017/18	174,10	8923,33	327,20	10709,08	436,10	16592,10	1,25	49,28
2018/19	173,20	9096,53	183,10	10892,18	307,70	16899,80	0,90	50,19
2019/20	57,90	9154,43	120,70	11012,88	352,90	17252,70	0,64	50,83
2020/21	109,80	9264,23	101,20	11114,08	252,70	17505,40	0,61	51,43
2021/22	115,90	9380,13	127,86	11241,94	158,00	17663,40	0,57	52,00
<b>Total</b>	<b>9380,13</b>		<b>11241,94</b>		<b>17663,40</b>			

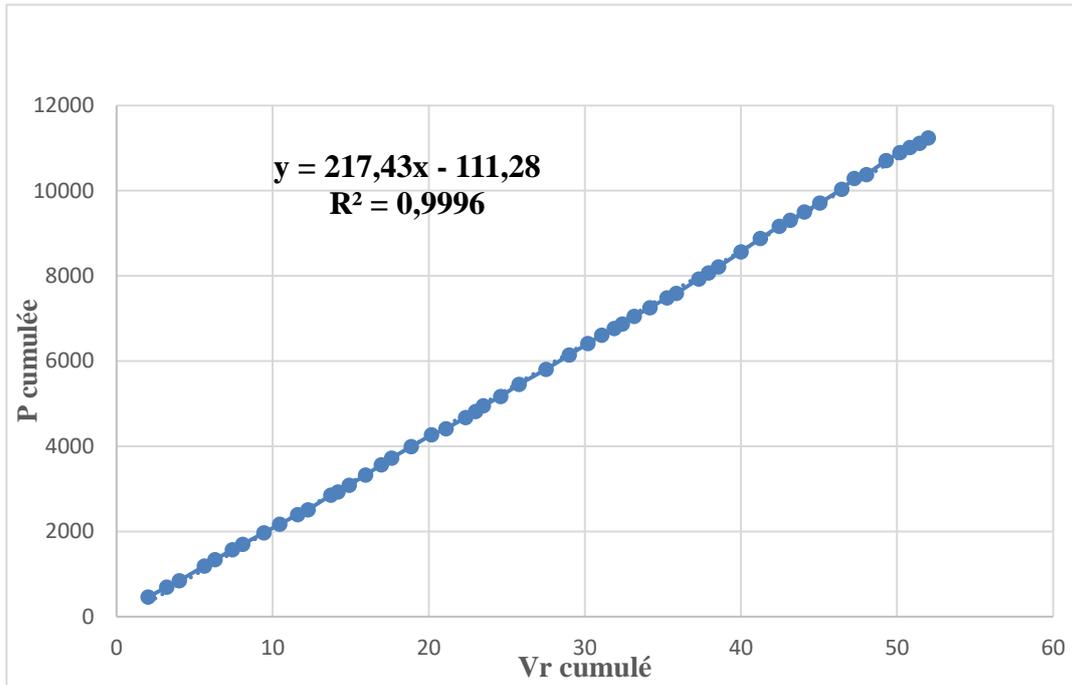


Figure 9: Méthode de double cumul de la station de Marrakech

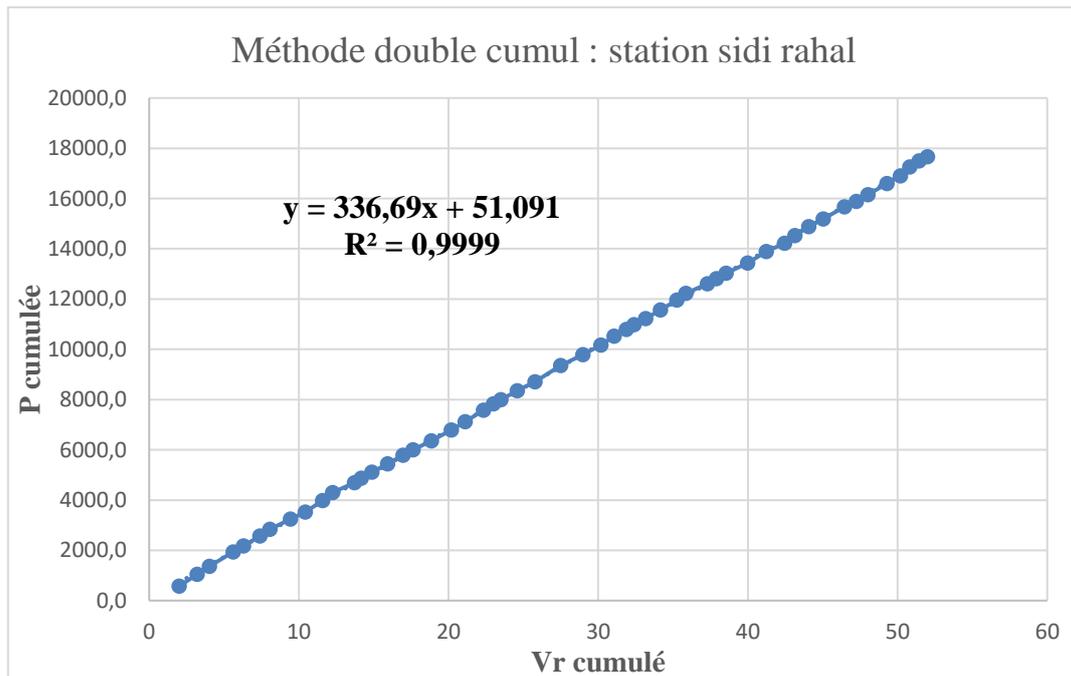


Figure 10: Méthode de double cumul de la station de Sidi Rahal

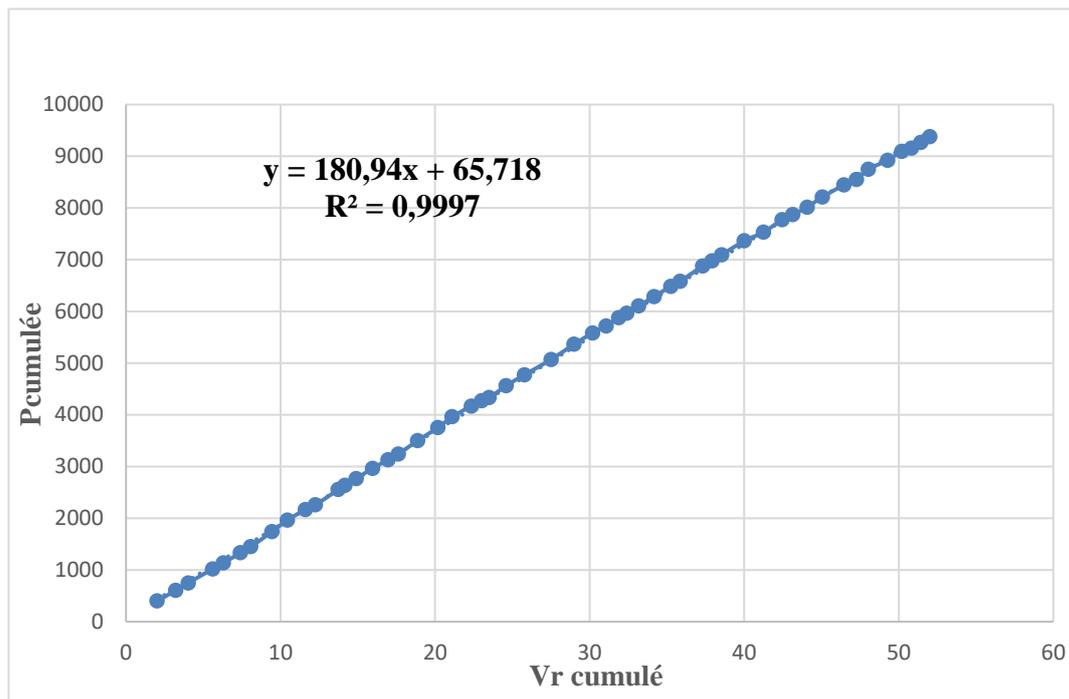


Figure 11: Méthode de double cumul de la station de Chichaoua

Lorsque les données pluviométriques des stations de référence et des autres stations présentent une corrélation forte et cohérente, cela renforce la confiance dans l'homogénéité des données. Cette corrélation efficace indique que les données de précipitations dans la région sont similaires et que les variations observées sont généralement cohérentes entre les différentes stations.

En conséquence, il est possible de conclure que les données pluviométriques sont homogènes, ce qui est essentiel pour garantir la fiabilité des analyses hydrologiques, climatologiques et environnementales qui reposent sur ces données.

## II Indice de sécheresse :

### 1. Les principaux avantages du SPI sont les suivants :

L'indice SPI offre une bonne souplesse d'utilisation : il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps.

Quand il porte sur un laps de temps relativement court, entre 1 et 3 mois par exemple, l'indice SPI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité.

L'indice SPI présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d'établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents.

Sa nature probabiliste le place dans un contexte historique, ce qui convient bien à la prise de décision. *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, 2012*

## 2. Classification de SPI :

Le SPI est classifié selon une échelle établie par MCKEE et al. (1993) pour évaluer l'intensité des sécheresses. Par exemple, une sécheresse est déclarée lorsque l'indice est en dessous de -1 de manière continue et prend fin lorsqu'il devient positif.

Tableau 6:Classification de SPI (Mckee et al, 1993)<sup>xii</sup>

2	Humidité extrême
1,5 à 1,9	Humidité forte
1 à 1,49	Humidité modérée
0 à 0,99	Humidité légère
0 à -0,99	Sécheresse légère
-0,99 à -1,49	Sécheresse modérée
-1,5 à -1,99	Sécheresse forte
-2,00 <	Sécheresse extrême

## 3. Application du SPI sur la zone de l'étude

Dans un contexte de changement climatique la fréquence et la durée des sécheresses des années futures restent incertaines. Dans le but de prédire l'évolution des risques de sécheresse, l'indice de précipitation standardisé (SPI) est employé. Pour illustrer son application, prenons l'exemple des stations météorologiques de Chichaoua, Marrakech et Sidi Rahal.

Tableau 7: Calcul de SPI des stations de Chichaoua Marrakech et Sidi Rahal

Années	Chichaoua		Marrakech		Sidi Rahal	
	P adoptée (mm)	SPI	P adoptée (mm)	SPI	P adoptée (mm)	SPI
1970/71	398,93	2,93	460,50	2,81	577,60	2,23
1971/72	204,90	0,33	232,85	0,19	466,20	1,19
1972/73	143,90	-0,49	147,60	-0,79	322,30	-0,16
1973/74	273,70	1,25	345,00	1,48	565,40	2,12
1974/75	112,70	-0,91	150,00	-0,76	252,90	-0,81
1975/76	199,00	0,25	236,90	0,24	382,30	0,40
1976/77	114,50	-0,88	123,30	-1,07	270,40	-0,65
1977/78	292,60	1,50	273,20	0,66	412,10	0,68
1978/79	223,80	0,58	199,10	-0,20	277,70	-0,58
1979/80	201,00	0,28	228,00	0,14	449,90	1,03
1980/81	91,40	-1,19	109,80	-1,22	328,40	-0,11
1981/82	298,70	1,58	343,51	1,46	394,40	0,51
1982/83	78,30	-1,37	78,70	-1,58	176,40	-1,53
1983/84	131,40	-0,66	156,80	-0,68	241,40	-0,92
1984/85	199,30	0,25	242,90	0,31	319,90	-0,19
1985/86	164,90	-0,21	238,50	0,26	349,20	0,09
1986/87	112,10	-0,91	154,60	-0,71	220,60	-1,12
1987/88	260,70	1,08	272,20	0,64	351,40	0,11
1988/89	249,70	0,93	273,20	0,66	437,60	0,92
1989/90	210,30	0,40	143,70	-0,83	319,60	-0,19
1990/91	207,20	0,36	261,40	0,52	467,50	1,20
1991/92	105,60	-1,00	141,30	-0,86	247,90	-0,86
1992/93	56,80	-1,66	140,90	-0,87	167,70	-1,61
1993/94	228,90	0,65	214,80	-0,02	359,90	0,19
1994/95	213,80	0,45	287,10	0,81	346,30	0,06
1995/96	295,10	1,54	350,30	1,54	648,20	2,89
1996/97	294,50	1,53	337,50	1,39	429,60	0,84
1997/98	217,10	0,49	270,00	0,62	388,50	0,46
1998/99	136,00	-0,59	191,50	-0,28	349,00	0,09
1999/00	159,20	-0,28	158,70	-0,66	268,10	-0,67
2000/01	89,80	-1,21	102,80	-1,30	195,80	-1,35
2001/02	139,40	-0,55	181,80	-0,40	241,30	-0,92
2002/03	182,20	0,02	207,40	-0,10	347,30	0,07
2003/04	196,10	0,21	227,40	0,13	389,70	0,47
2004/05	99,40	-1,08	106,90	-1,26	261,00	-0,74
2005/06	293,70	1,52	337,61	1,40	383,50	0,41

2006/07	99,40	-1,08	143,60	-0,83	204,80	-1,27
2007/08	117,10	-0,85	137,50	-0,90	212,00	-1,20
2008/09	270,00	1,20	351,90	1,56	416,70	0,72
2009/10	167,20	-0,18	320,00	1,19	451,70	1,05
2010/11	245,30	0,87	280,51	0,74	336,20	-0,03
2011/12	95,20	-1,14	143,50	-0,84	294,10	-0,43
2012/13	144,00	-0,49	197,60	-0,21	360,10	0,19
2013/14	193,70	0,18	211,70	-0,05	300,00	-0,37
2014/15	237,00	0,76	319,00	1,18	485,10	1,36
2015/16	106,00	-1,00	259,00	0,49	215,50	-1,17
2016/17	197,70	0,23	89,80	-1,45	272,80	-0,63
2017/18	174,10	-0,08	327,20	1,28	436,10	0,90
2018/19	173,20	-0,10	183,10	-0,38	307,70	-0,30
2019/20	57,90	-1,64	120,70	-1,10	352,90	0,12
2020/21	109,80	-0,95	101,20	-1,32	252,70	-0,82
2021/22	115,90	-0,86	127,86	-1,02	158,00	-1,70
Moyenne	180,39		216,19		339,68	
Ecartype	74,66		87,02		106,58	

#### 4. Résultats du calcul du SPI pour la période de référence :

Les données de précipitation de la période de référence, sont celles observées au niveau des stations de Chichaoua, Marrakech et Sidi Rahal pour la période historique s'étalant sur 52 années (1970-2021). Après avoir appliqué le programme de calcul de l'indice de SPI 12 mois, les résultats suivants se présentent.

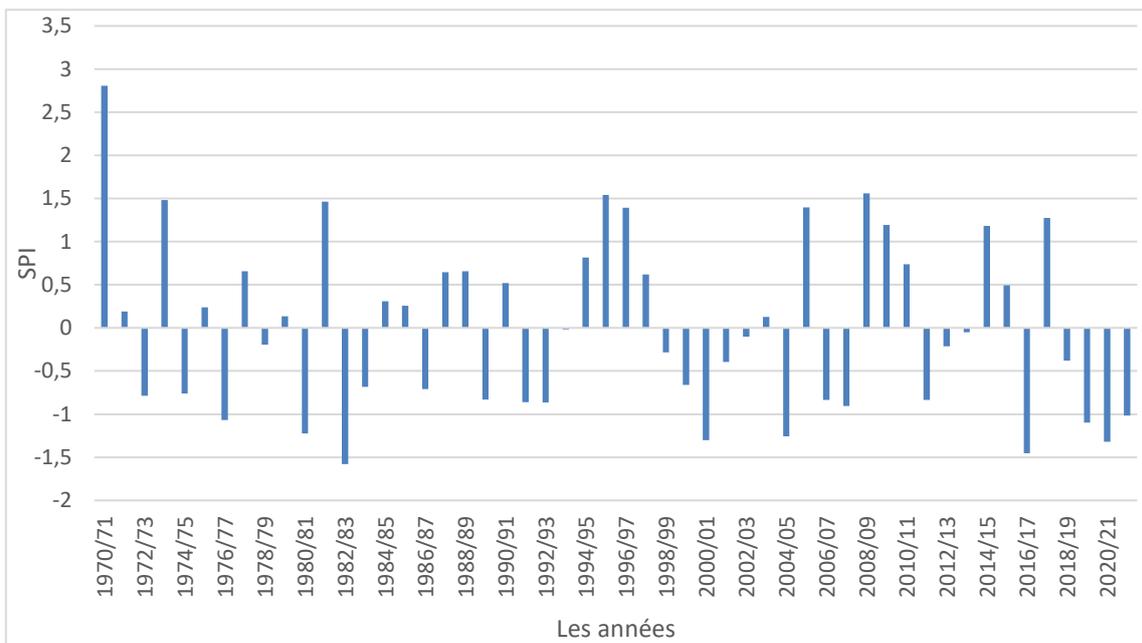


Figure 12: Représentation de l'indice de sécheresse de la station de Marrakech en 1970-2021

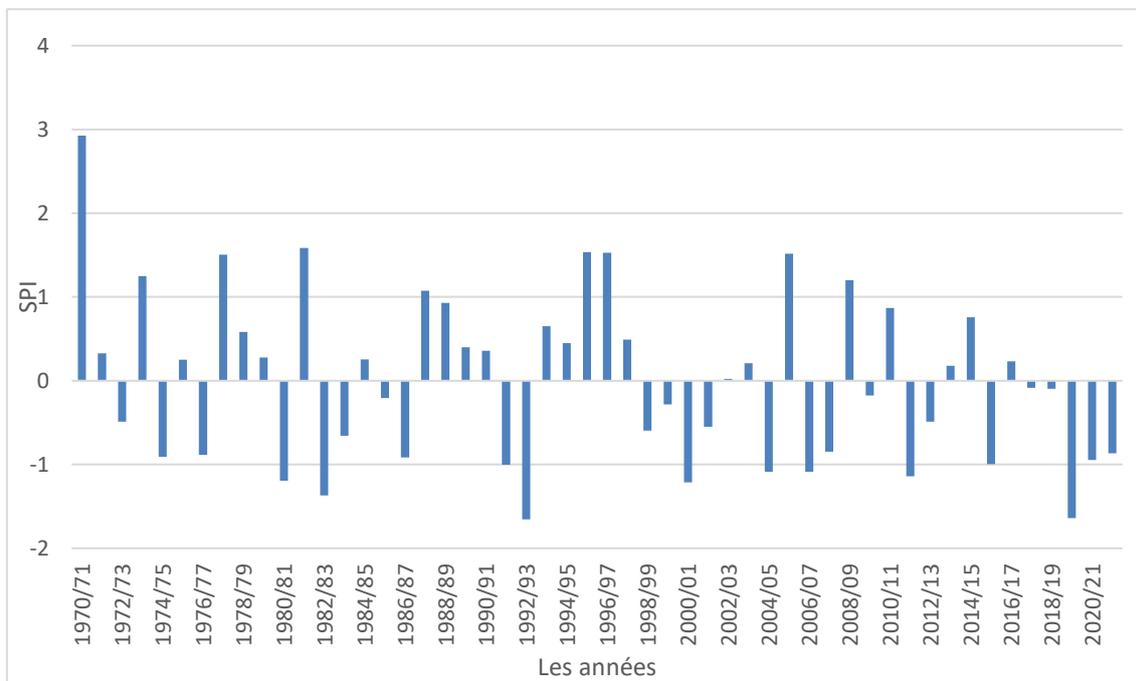


Figure 13: Représentation de l'indice de sécheresse de la station de Chichaoua en 1970-2021

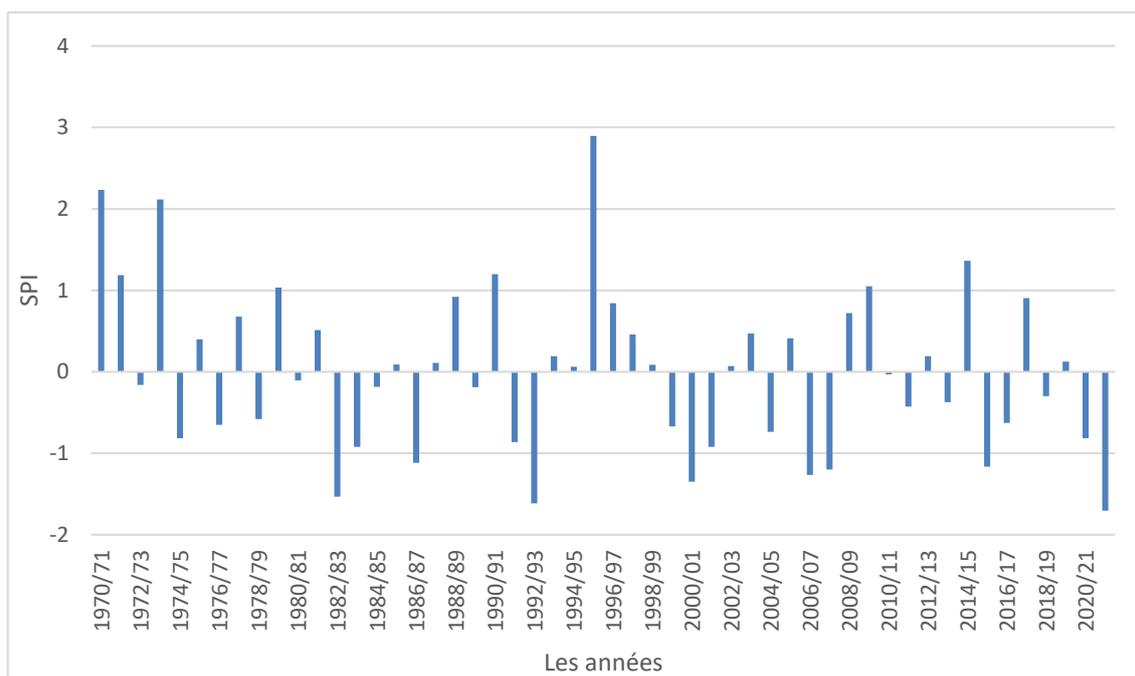


Figure 14: Représentation de l'indice de sécheresse de la station de Sidi Rahal en 1970-2021

Ci-dessous se trouve un récapitulatif des stations météorologiques de la région de Haouz Mejjat. Dans ce tableau, vous trouverez la classification de l'humidité et de la sécheresse selon McKee et ses collègues, où chaque couleur indique une valeur distincte.

Figure 15: Tableau récapitulatif des indices de sécheresse SPI dans la zone d'étude

Années	Chichaoua	Marrakech	Sidi Rahal	Taferiat	Imin El	Sidi Bouothmane	Tahanaout	Aghbalou
1970/71	2,93	2,81	2,23	2,05	2,40	2,65	1,83	3,26
1971/72	0,33	0,19	1,19	1,06	-0,55	0,00	0,69	1,69
1972/73	-0,49	-0,79	-0,16	-0,22	0,19	0,67	0,25	0,20
1973/74	1,25	1,48	2,12	1,94	2,76	2,98	2,13	2,43
1974/75	-0,91	-0,76	-0,81	-0,83	-0,39	0,14	0,02	-0,20
1975/76	0,25	0,24	0,40	0,32	0,73	1,15	0,92	0,33
1976/77	-0,88	-1,07	-0,65	-0,67	-0,12	0,38	-1,06	-0,26
1977/78	1,50	0,66	0,68	0,58	0,20	0,67	0,84	0,73
1978/79	0,58	-0,20	-0,58	-0,61	-1,45	-0,82	-1,39	-1,23
1979/80	0,28	0,14	1,03	0,92	0,84	1,25	0,24	0,72
1980/81	-1,19	-1,22	-0,11	-0,16	-1,03	-0,44	-0,70	-0,77

1981/82	1,58	1,46	0,51	0,42	1,09	1,48	0,44	0,23
1982/83	-1,37	-1,58	-1,53	-1,26	-1,16	-0,56	-1,44	-1,35
1983/84	-0,66	-0,68	-0,92	-0,65	-0,74	-0,18	-0,55	-0,97
1984/85	0,25	0,31	-0,19	0,21	0,28	0,74	0,27	0,13
1985/86	-0,21	0,26	0,09	0,14	-1,48	-0,84	-0,40	-0,40
1986/87	-0,91	-0,71	-1,12	-1,12	-1,24	-0,62	-0,86	-1,36
1987/88	1,08	0,64	0,11	0,10	0,98	1,37	-0,03	0,40
1988/89	0,93	0,66	0,92	1,04	0,96	1,36	1,74	0,93
1989/90	0,40	-0,83	-0,19	0,10	-0,56	-1,28	-0,39	-0,69
1990/91	0,36	0,52	1,20	0,87	0,17	-0,34	0,93	0,54
1991/92	-1,00	-0,86	-0,86	-0,52	0,21	-0,35	-0,07	-0,27
1992/93	-1,66	-0,87	-1,61	-0,93	-1,27	-1,56	-1,73	-1,59
1993/94	0,65	-0,02	0,19	0,82	0,01	-0,14	0,48	0,73
1994/95	0,45	0,81	0,06	0,28	-0,55	0,08	-0,37	-1,07
1995/96	1,54	1,54	2,89	4,22	1,55	1,18	1,69	1,21
1996/97	1,53	1,39	0,84	0,46	1,28	-0,08	1,00	-0,10
1997/98	0,49	0,62	0,46	0,42	0,24	-0,05	-0,13	0,18
1998/99	-0,59	-0,28	0,09	0,27	0,17	-0,09	0,05	0,13
1999/00	-0,28	-0,66	-0,67	-0,40	-0,47	-0,58	-0,86	-0,51
2000/01	-1,21	-1,30	-1,35	-0,96	-1,83	-1,48	-1,53	-0,95
2001/02	-0,55	-0,40	-0,92	-0,47	0,05	-0,86	-0,70	-0,31
2002/03	0,02	-0,10	0,07	-0,65	-1,32	-0,97	-0,77	-0,78
2003/04	0,21	0,13	0,47	-0,17	0,94	0,27	0,98	1,08
2004/05	-1,08	-1,26	-0,74	-1,10	-0,84	-1,24	-1,52	-0,83
2005/06	1,52	1,40	0,41	-0,27	0,14	-0,30	0,37	0,27
2006/07	-1,08	-0,83	-1,27	-1,03	0,00	0,49	-0,26	0,13
2007/08	-0,85	-0,90	-1,20	-1,19	-1,44	-0,81	-0,89	-0,70
2008/09	1,20	1,56	0,72	0,55	1,29	1,15	1,80	0,97
2009/10	-0,18	1,19	1,05	0,22	-0,14	-0,51	0,28	0,37
2010/11	0,87	0,74	-0,03	0,29	1,63	0,83	0,80	0,92
2011/12	-1,14	-0,84	-0,43	-0,46	-0,46	-0,92	-0,68	-0,10
2012/13	-0,49	-0,21	0,19	-0,31	0,26	-0,35	0,32	-0,45
2013/14	0,18	-0,05	-0,37	-0,41	-0,56	0,84	-0,02	-0,47
2014/15	0,76	1,18	1,36	1,23	0,86	0,23	2,76	1,56
2015/16	-1,00	0,49	-1,17	-1,30	0,23	-0,85	-1,18	-0,52
2016/17	0,23	-1,45	-0,63	-0,71	-0,17	-0,84	-0,13	-1,01
2017/18	-0,08	1,28	0,90	0,42	0,26	0,26	0,22	0,25
2018/19	-0,10	-0,38	-0,30	0,17	0,31	0,20	0,55	0,77
2019/20	-1,64	-1,10	0,12	-0,77	-0,92	-1,41	-0,89	-0,56
2020/21	-0,95	-1,32	-0,82	-0,33	-0,02	-0,40	0,65	-0,74
2021/22	-0,86	-1,02	-1,70	-1,59	-1,33	-1,49	-1,60	-1,98

Années	Sidi Hssain	Armrdr	Abadla	Adamna	Agaiouar	Igrounzar	Houdjane	Takerkoust
1970/71	3,18	2,98	2,38	1,20	2,77	-0,36	2,35	2,35
1971/72	1,67	1,56	0,42	-0,35	0,56	-0,86	-0,17	0,71
1972/73	0,24	0,21	-0,56	-1,12	0,21	-1,11	0,46	0,37
1973/74	2,39	2,23	0,98	0,09	1,27	-0,72	2,67	2,04
1974/75	-0,14	-0,15	-1,18	-1,61	0,54	-1,27	-0,04	-0,24
1975/76	0,36	0,32	0,07	-0,63	0,19	-0,95	0,92	-0,06
1976/77	-0,20	-0,21	-0,71	-1,24	-0,58	-1,15	0,19	-0,39
1977/78	0,75	0,69	1,62	1,09	0,75	-0,55	0,46	0,35
1978/79	-1,13	-1,09	-0,34	-0,03	-1,97	0,27	-0,95	-1,30
1979/80	0,74	0,68	0,41	-0,26	1,00	0,53	1,02	0,02
1980/81	-0,69	-0,67	-1,36	-0,65	-1,11	-0,06	-0,59	-0,47
1981/82	0,27	0,23	1,40	0,06	-0,51	0,82	1,23	0,49
1982/83	-1,25	-1,20	-1,18	-0,69	-2,85	-0,51	-0,70	-1,75
1983/84	-0,88	-0,85	-0,65	0,20	-1,02	-0,03	-0,34	-1,26
1984/85	0,17	0,14	0,24	0,44	0,61	0,39	0,53	-0,15
1985/86	-0,33	-0,33	-0,58	0,29	-0,77	0,28	-0,97	-0,73
1986/87	-1,26	-1,20	-0,86	-0,99	-0,90	-0,64	-0,77	-0,40
1987/88	0,44	0,39	0,97	2,17	-0,41	2,05	1,14	0,60
1988/89	0,95	0,87	1,13	0,77	2,29	2,09	1,12	0,92
1989/90	-0,61	-0,60	0,08	0,54	-0,65	0,71	-0,86	-0,85
1990/91	0,56	0,51	0,43	0,28	-0,31	0,73	0,46	0,61
1991/92	-0,22	-0,22	-1,05	-0,81	-0,19	-0,40	-1,05	-0,66
1992/93	-1,48	-1,41	-1,61	-0,44	-1,74	-0,64	-1,68	-1,64
1993/94	0,75	0,69	0,50	-0,20	0,61	-0,08	0,36	-0,24
1994/95	-0,98	-0,95	0,40	-0,72	-0,53	-0,53	0,03	1,15
1995/96	1,21	1,12	2,11	2,83	1,02	2,91	0,37	1,65
1996/97	-0,05	-0,06	1,89	2,35	0,13	1,63	1,44	2,68
1997/98	0,22	0,19	0,25	0,73	0,32	0,95	0,29	0,49
1998/99	-0,22	0,15	-0,59	-0,48	0,28	-0,08	0,08	-0,26
1999/00	-0,50	-0,20	-0,29	-0,33	0,03	-0,22	0,40	-0,73
2000/01	-1,13	-2,19	-1,20	-0,63	-1,47	-0,37	-0,99	-0,95
2001/02	0,03	-1,01	-0,51	0,28	-0,58	0,03	-0,65	-0,48
2002/03	-0,73	-0,37	0,70	-0,12	-0,10	-0,24	-0,14	1,03
2003/04	0,19	-0,22	0,49	0,36	0,01	0,95	1,36	-0,04
2004/05	-0,91	-0,88	-1,05	-0,57	-0,48	-0,31	-0,96	-1,55
2005/06	0,32	-0,12	1,16	-0,09	0,08	1,78	0,50	0,57

2006/07	0,21	0,32	-0,70	-0,83	0,42	-0,60	-0,55	-0,65
2007/08	-0,83	-0,66	-1,23	-1,08	-0,32	-0,60	-1,55	-1,43
2008/09	1,86	0,90	0,89	0,98	0,85	1,35	1,14	1,22
2009/10	0,37	1,06	0,54	1,13	0,97	1,29	-0,37	-0,29
2010/11	1,94	0,43	0,60	2,17	0,50	1,07	-0,27	0,84
2011/12	-0,24	-0,71	-0,63	-0,63	-0,36	-0,37	-1,81	-0,62
2012/13	0,38	-0,04	-0,54	0,32	0,14	0,66	-1,33	0,30
2013/14	-0,26	-0,75	-0,20	-0,51	-0,39	-0,35	-0,70	-0,25
2014/15	-0,16	2,85	1,30	0,75	2,31	-0,64	1,31	0,98
2015/16	-0,63	-0,70	-1,41	0,51	-0,35	-1,33	-0,82	-0,79
2016/17	-1,34	0,17	-0,33	-0,05	0,30	-1,05	-1,60	-0,38
2017/18	0,10	-0,29	0,51	-0,28	-0,04	-0,84	0,52	0,26
2018/19	0,10	0,68	-0,24	-0,87	0,68	-1,03	0,56	0,60
2019/20	-1,38	-0,71	-1,28	-1,69	-0,35	-1,30	-0,49	-1,30
2020/21	-0,29	-0,43	-1,22	-1,64	-0,15	-1,28	0,28	-0,42
2021/22	-1,56	-1,18	-2,50	-1,79	-0,71	-1,43	-0,84	-2,96

En analysant l'indice de sécheresse, plusieurs similitudes entre les différentes stations météorologiques ont été remarquées. Il est fascinant de constater la tendance distincte dans les données observées. Les années 1988, 1995 et 2008 se démarquent comme étant exceptionnelles, avec toutes les stations enregistrant des conditions humides. En revanche, plusieurs années, notamment 1980, 1982, 1986, 1992, 1995, 1999, 2004 et 2011, se caractérisent par des périodes de sécheresse généralisée dans toutes les stations.

Certaines stations ont montré une alternance régulière entre les années humides et sèches, comme Chichaoua, Marrakech, Sidi Rahal et Taferiat, tandis que d'autres ont présenté des cycles de périodes humides plus fréquents que les cycles secs, telles que Sidi Bouathmane, Tahnaout, Aghbalo et Agaiouar. En revanche, des stations comme Adamna et Igrounzar ont affiché une prédominance des cycles secs sur les cycles humides.

Au milieu de la période étudiée, une alternance moins régulière entre les cycles de sécheresse et d'humidité a été constatée dans toutes les stations. Cependant, vers la fin de la période, une dominance des années sèches a été observée dans l'ensemble des stations.

Ces observations soulignent la complexité des variations climatiques dans la région étudiée, avec des fluctuations significatives entre les cycles de sécheresse et d'humidité. La tendance vers une prédominance des années sèches vers la fin de la période pourrait indiquer un changement climatique notable, nécessitant une analyse approfondie pour en comprendre les causes et les conséquences potentielles.

### III. Données récapitulatives :

Après la collecte des données météorologiques, un tableau récapitulatif a été dressé présentant les stations avec leurs coordonnées géographiques respectives ainsi que la moyenne des précipitations sur la période allant de 1970 à 2021. Ensuite, les stations pluviométriques ont été localisées dans le bassin en les projetant géographiquement comme suit :

Tableau 8:Tableau récapitulatif des données pluviométriques

Nom de station	X (m)	Y (m)	Z (m)	P moyenne (mm)
IMI EL KHENG	260509	429719	1209	249,647636
ABADLA	199866	129770	246	167,636346
ABDELMOUMEN	139965	421845	711	330,962745
ADAMNA	92865	104209	77	317,279257
AGAOUIRA	269500	79000	1700	600,318878
AGHBALOU	276459	82616	1005	576,490394
AGUENZA	139965	421845	711	230,949838
AIT OUAZIZ	311920	115054	869	-
AMSOUL	136	414	650	205,766595
ARMED	259505	61984	1910	434,614741
CHICHAOUA	181501	111206	337	180,39
CHOUTER	271685	113061	513	-
DKHILA	-	-	-	302,541846
IGROUNZAR	103500	91300	205	254,333935
IGUIDI	260509	429719	1209	314,477515
ILOUDJANE	176245	70525	757	346,453018
IMIN EL HAMMAME	241500	72120	744	373,706157
LEMDAD	221700	421700	670	213,627218
MARRAKECH	252139	117908	460	213,914109
Sidi BOATHMAN	209460	74345	816	404,483947
SIDI HSAIN	229230	70390	1021	430,438768
SIDI RAHAL	303143	117733	687	339,680771
Sidi BOUZGUIA	264660	100540	630	
TAFERIAT	291080	107860	761	360,18815
TAHANAOUT	255785	80650	1043	367,608159
TAKERKOUST	148909	432582	849	232,511538
TIJDANTE	310699	98114	1122	-

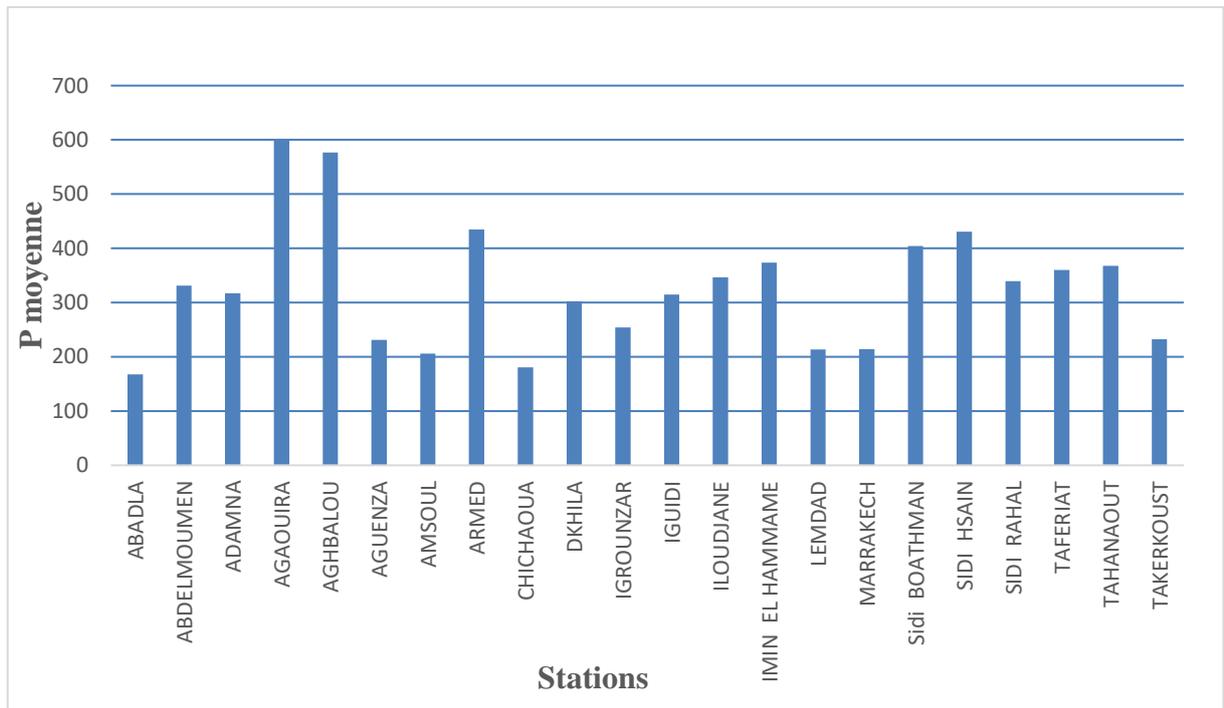


Figure 16: Graphe représentatif de la précipitation annuelle moyenne en (mm) en 1970-2021



Figure 17::Présentation des stations météorologiques de Haouz Mejjat

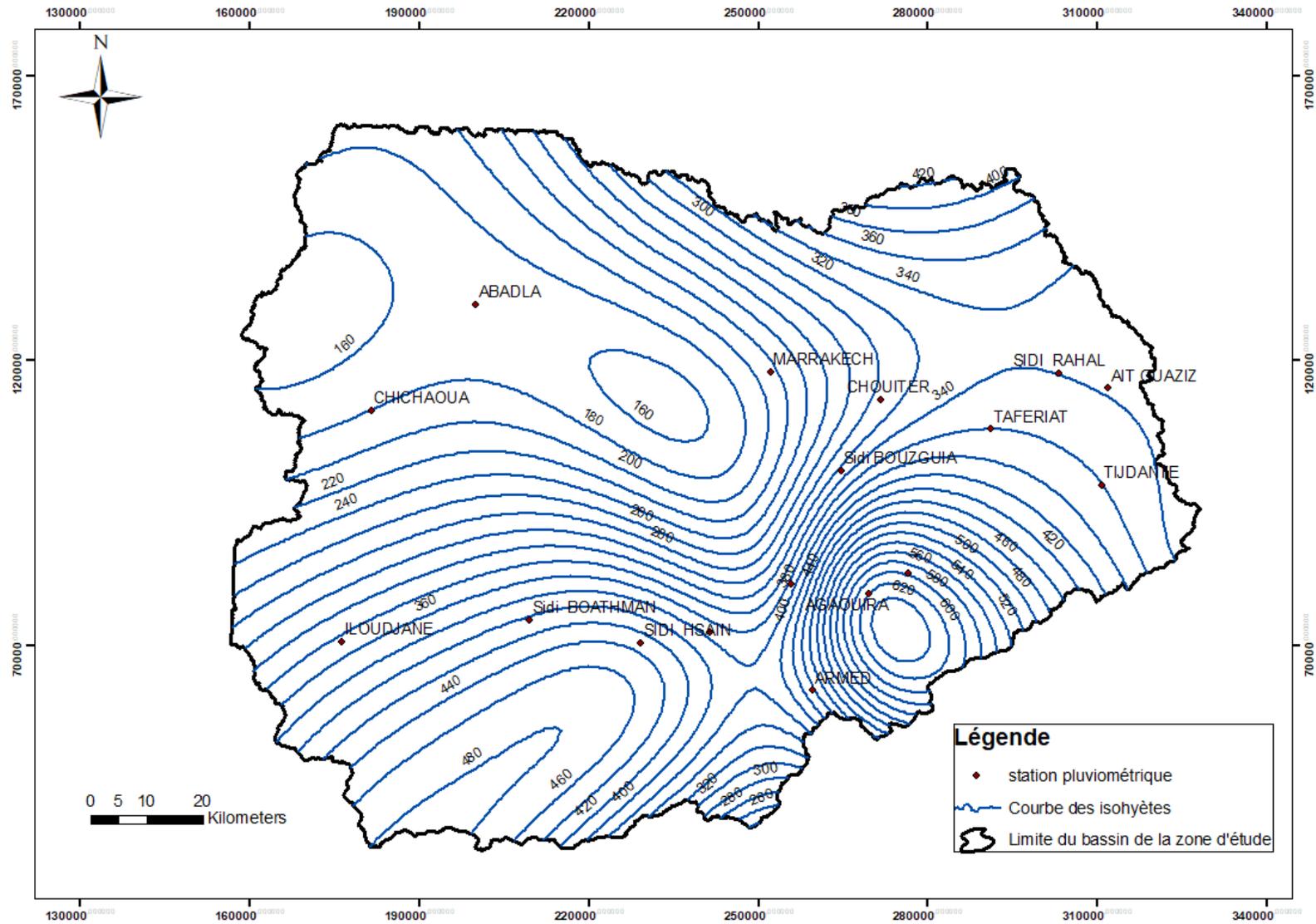


Figure 18: Carte des isohyètes de Haouz Mejjat en 1970-2021

#### **IV . Élaboration de la carte des isohyètes :**

Les cartes des isohyètes de la période 1970-2021 montrent une distribution spatiale des précipitations qui varie considérablement en fonction des reliefs géographiques et des caractéristiques locales des stations. Les stations Armed, Tahanaout, Sidi Bouathmane, Sidi Hssain et Imin el Hamane montrent des courbes isohyètes très rapprochées, indiquant des précipitations relativement élevées et des variations rapides des précipitations sur de courtes distances. Cela suggère que ces zones, situées vers le sud-est de la carte, reçoivent plus de précipitations et sont probablement influencées par des reliefs montagneux. Les montagnes jouent un rôle important en forçant l'air à monter, se refroidir et se condenser, ce qui augmente les précipitations. Aghbalou se distingue avec la précipitation la plus élevée (576 mm), ce qui pourrait indiquer une zone montagneuse ou une localisation particulièrement favorable à une plus grande accumulation de précipitations.

En revanche, les stations Marrakech (214 mm), Chichaoua (180 mm) et Abdla (168 mm), situées vers le nord-ouest de la carte, montrent des courbes isohyètes plus espacées, indiquant des précipitations plus faibles et des variations plus graduelles des précipitations sur de plus grandes distances. Cette région semble donc plus aride, ce qui est typique des plaines et des zones plus éloignées des influences montagnardes ou maritimes.

Enfin, une troisième zone, située entre les deux extrêmes précédemment mentionnés, se caractérise par un rapprochement des isohyètes, bien que moins prononcé que dans la zone sud-est. Cela indique des niveaux de précipitations moyens à cette latitude, créant un environnement climatique plus équilibré et modéré.

#### **Conclusion :**

L'analyse des données de précipitations de 1970 à 2021 dans la région de Tensift révèle une tendance inquiétante à l'augmentation des périodes de sécheresse. L'utilisation de l'indice SPI a permis d'identifier des cycles alternants entre années sèches et humides, avec une prédominance des années sèches ces dernières décennies. Cette tendance pose des défis importants pour l'agriculture et la gestion des ressources en eau dans la région.

D'autre part, le stage au sein de l'Agence Hydraulique du Bassin de Tensift a permis, sur le plan technique, d'enrichir le spectre des compétences et des acquis théoriques tout en apprenant de nouveaux concepts, essentiellement en hydrologie.

En outre, l'occasion d'apprendre à utiliser plusieurs logiciels (Global Mapper, ArcGIS...) a été offerte, ce qui non seulement a aidé à réaliser les objectifs du stage, mais qui sera également utile dans les futurs projets. Sur le plan personnel, mener un tel projet au sein de l'Agence a été une nouvelle expérience professionnelle enrichissante.

En bref, les objectifs fixés au début du stage, à savoir aiguiser le savoir-faire, améliorer la communication et apprendre à être professionnel, ont été atteints.

## Conclusion Général

Cette étude, menée lors d'un stage au sein de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift, a examiné les variations climatiques dans la région de Tensift, en se concentrant sur l'analyse des précipitations et leurs impacts sur l'agriculture et la gestion des ressources en eau. L'objectif principal était de comprendre ces variations en utilisant des outils tels que les cartes des isohyètes et l'indice de sécheresse (SPI).

La carte des isohyètes ont clairement visualisé les zones de précipitations dans la région, mettant en évidence les zones arides et humides. De même, l'indice SPI a révélé une prédominance des périodes de sécheresse au cours des dernières décennies. Ces résultats sont essentiels pour la prise de décisions éclairées en matière de gestion des ressources en eau et de planification agricole.

Ce projet a également permis d'améliorer les compétences techniques, notamment en hydrologie, et de maîtriser l'utilisation de logiciels tels que Global Mapper et ArcGIS. Une évolution des compétences en analyse de données et en communication scientifique a été constatée, ce qui sera précieux pour les projets futurs.

En conclusion, cette étude a fourni des perspectives importantes sur les variations climatiques dans la région de Tensift, soulignant l'importance de la gestion durable des ressources en eau et de l'adaptation aux changements climatiques. Pour progresser, il est crucial de continuer à surveiller les tendances climatiques et à intégrer des approches innovantes, tout en renforçant les capacités des communautés locales à s'adapter aux conditions climatiques changeantes. L'expansion du réseau de stations pluviométriques sur la rive droite du bassin et l'utilisation de satellites pour compléter les données sur le terrain sont recommandées pour améliorer la compréhension de la répartition des précipitations dans la région. Pour aller de l'avant, des questions telles que l'évolution future des tendances climatiques dans la région, les stratégies d'atténuation des effets des sécheresses sur l'agriculture et la gestion des ressources en eau, et les implications socio-économiques des changements climatiques doivent être abordées de manière continue et collaborative.

## Référence

- 
- <sup>i</sup> Youssef, Hajhouji. (2018, Octobre 20). Youssef, Hajhouji. Retrieved May 29, 2024, from [https://www.researchgate.net/publication/336796242\\_Modelisation\\_hydrologique\\_du\\_bassin\\_versant\\_de\\_l'oued\\_Rheraya\\_et\\_sa\\_contribution\\_a\\_la\\_recharge\\_de\\_la\\_nappe\\_du\\_Haouz\\_bassin\\_du\\_Tensift\\_Maroc](https://www.researchgate.net/publication/336796242_Modelisation_hydrologique_du_bassin_versant_de_l'oued_Rheraya_et_sa_contribution_a_la_recharge_de_la_nappe_du_Haouz_bassin_du_Tensift_Maroc)
  - <sup>ii</sup> Mémoire du fin d'étude (2017) actualisation des annuaires hydrologiques du bassin versant du Tensift et contrôle des débits d'oued Zat à la station de Tefriat Maroc (juin 2017), page 9.
  - <sup>iii</sup> Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABH-T). (2016). Diagnostic du bassin Haouz-Mejjate.
  - <sup>iv</sup> Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT). (2016). Diagnostic du bassin du Haouz-Mejjate. Avril 2016, page 43.
  - <sup>v</sup> Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT). (2016). Diagnostic du bassin du Haouz-Mejjate. Avril 2016, page 46.
  - <sup>vi</sup> Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT). (2016). Diagnostic du bassin du Haouz-Mejjate. Avril 2016, page 49.
  - <sup>vii</sup> Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABH-T). (2016). Diagnostic du bassin Haouz-Mejjate (p. 56).
  - <sup>viii</sup> Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT). (2016). Diagnostic du bassin du Haouz-Mejjate. Avril 2016, page 44.
  - <sup>ix</sup> Azzedine Garah. (2016, December 6). Azzedine Garah. Retrieved May 6, 2024, from <https://www.scribd.com/document/438595576/serie>
  - <sup>x</sup> SERHIR, N. (2023). \*Contrôle et régionalisation des données de pluie\* (p. 7). École Hassania des Travaux Publics.
  - <sup>xi</sup> Saidi El Mehdi. (n.d.-b). Saidi El Mehdi. Retrieved May 20, 2024, from <https://www.saidi.ma/mnt/>

- 
- Abounki Intissar. (2019). \*Elaboration de la carte des isohyètes de la région de Marrakech-Tensift-El Haouz et de la carte d'inondation de la commune d'Oued LBOUR\* (p. 11) Ecole Hassania des Travaux Publics.
  - Saidi El Mehdi. (2013). \*Apport des logiciels de SIG dans la morphométrie des bassins versants L'exemple d'ArcGIS\*
  - <sup>xii</sup> ANZAR Conseil/BRGM. (2023). \*Etude de faisabilité de la recharge artificielle de la nappe de Rhis Nekor\* (Mission I: collecte de données, synthèse bibliographique sur la recharge artificielle, diagnostic de l'état des lieux et élaboration d'une synthèse hydrogéologique de la nappe de Rhis Nekor) (p. 52). Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau.