

## Département des Sciences de la Terre

### Licence des Sciences et Techniques

#### Eau&Environnement

#### Mémoire de projet de fin d'étude

COMPARAISON DES DONNÉES DE PRÉCIPITATIONS SATELLITAIRES  
AVEC LES DONNÉES MESURÉES AU SOL DANS LES STATIONS DU  
BASSIN DE TENSIFT, MARRAKECH, MAROC

Réalisé par :

**TIZI Khadija**

**KHNATI Rida**

**IFZI Rida**

Sous la direction de : **Pr A. RHOJJATI** et **Mme F. CHOUKRI**

Soutenu le 19 Juin 2023 devant la commission d'examen composée de :

**Pr A. RHOJJATI** Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

**Pr ME SAIDI** Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

**Mme F. CHOUKRI** Agence du Bassin Hydraulique de Tensift

## **Dédicace**

Nous dédions ce travail :

A nos chers parents, qui sans leur soutien et leur aide on n'aurait pas pu nous présenter aujourd'hui devant vous pour présenter notre projet de fin d'étude. Ils ont mis à notre disposition tous les moyens nécessaires pour que nous réussissions dans nos études.

A nos Frères et Sœurs qui nous ont encouragés durant toute notre vie scolaire.

Nos enseignants et enseignantes pour leurs efforts déployés pour qu'on puisse avoir une bonne formation.

A nos chers amis avec qui nous avons passé des meilleurs moments tout au long de notre cursus universitaire.

## Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu, de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour mener à terme notre formation et pouvoir réaliser ce modeste travail d'initiation à la recherche.

Nous tenons tout spécialement à exprimer notre sincère gratitude et estime envers les représentants de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensiftde Marrakech, de nous avoir accueilli durant cette période, et de nous avoir accordé l'opportunité de vivre une telle expérience enrichissante et valorisante. Ils nous ont transmis leur passion de recherche et j'espère qu'il nous sera possible de travailler ensemble un jour.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadrant Professeur **Ali RHOUJJATI** pour sa disponibilité, ses nombreux conseils et sa participation à la réalisation de ce travail avec toute une particulière sympathie.

Nous adressons aussi nos sincères et chaleureux remerciements également à Mme **Fatiha CHOUKRI** pour avoir eu l'amabilité de partager son savoir-faire, suivre nos états d'avancement, elle nous a accordé sa confiance et attribué des missions intéressantes et valorisantes durant ce stage.

Nous remercions aussi Pr **Mohammed AIT BABRAM** qui a aimablement accepté de nous accorder son temps et nous aider aux analyses statistiques

Nous tenons à remercier infiniment Pr **Mohamed El Mehdi SAIDI** pour ses conseils, d'avoir accepté de jugé ce travail et contribuer à l'améliorer.

Nous profitons de l'occasion pour remercier tous nos enseignants de la Faculté des Sciences et Techniques Marrakech grâce à qui, nous avons acquis une très bonne formation durant notre cursus universitaire. Enfin, que tous ceux et toutes celles qui, de près ou de loin nous ont généreusement offert leur aide à l'élaboration de ce travail, trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

## Résumé

Les estimations des précipitations par satellite jouent un rôle crucial dans l'évaluation des répercussions du changement climatique. Grâce à des produits satellitaires offrant des résolutions spatiales et temporelles élevées, Ces estimations sont particulièrement précieuses dans les régions où les données sur les précipitations sont rares ou difficiles à obtenir, ainsi que dans les pays en développement qui peuvent bénéficier d'une modélisation des ressources en eau plus précise. Les produits de précipitations satellitaires offrent de nouvelles possibilités pour surveiller et analyser les tendances des précipitations, ce qui est essentiel pour la gestion des ressources en eau, l'adaptation au changement climatique et la prévision des événements météorologiques extrêmes. Dans le cadre de cette étude, l'objectif est d'évaluer la précision des estimations des précipitations fournies par le produit PERSIANN-CCS-CDR à l'échelle mensuelle et annuelle dans le bassin versant de Tensift, d'une superficie de 24 000 km<sup>2</sup>. Plusieurs indices statistiques ont été utilisés pour évaluer les performances du produit, tels que le coefficient de corrélation(CC), le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>), le pourcentage de biais (Pbias), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE). La comparaison et l'évaluation préliminaires montrent de bons résultats à l'échelle mensuelle et à l'échelle annuelle, surtout dans la zone des montagnes par rapport à la zone de plaine. Cela souligne l'utilité et la fiabilité de ce produit pour la surveillance des précipitations et la gestion des ressources en eau dans la région du bassin de Tensift.

## **Abstract**

Satellite precipitation estimates play a crucial role in assessing the impacts of climate change. With satellite products offering high spatial and temporal resolutions, these estimates are particularly valuable in regions where precipitation data is scarce or difficult to obtain, as well as in developing countries that can benefit from more accurate water resource modeling. Satellite precipitation products provide new opportunities for monitoring and analyzing precipitation trends, which are essential for water resource management, climate change adaptation, and forecasting extreme weather events. In this study, the objective is to evaluate the accuracy of precipitation estimates provided by the PERSIANN-CCS-CDR product on a monthly and annual scale in the Tensift watershed, covering an area of 24,000 km<sup>2</sup>. Several statistical indices were used to assess the performance of the product, such as the correlation coefficient (CC), the coefficient of determination (R<sup>2</sup>), the percentage bias (PBIAS), the root mean square error (RMSE), and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE). Preliminary comparison and evaluation show good results at both the monthly and annual scales, especially in the mountainous area compared to the plains area. This highlights the utility and reliability of this product for precipitation monitoring and water resource management in the Tensift basin region.

## Liste des figures

Figure 1 : Principaux Oueds du bassin versant du Tensift (Pascon, 1986, modifiée).....	16
Figure 2 : Carte de répartition des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant du Tensift, enregistrées entre 1972 et 2002 (BOUDHAR, 2009, modifiée).....	17
Figure 3: Formations géologiques du bassin versant de Tensift (HAJJOUJI, 2018, modifiée) .....	18
Figure 4 : Coupes géologiques dans la plaine du Haouz (HAJJOUJI, 2018 modifiée) .....	19
Figure 5 : Zone d'action de l'ABHT ( <a href="https://www.eau-tensift.net">https://www.eau-tensift.net</a> ).....	21
Figure 6 : Image de TRMM ( <a href="https://trmm.gsfc.nasa.gov/">https://trmm.gsfc.nasa.gov/</a> ) .....	24
Figure 7: Image de IMERG ( <a href="https://gpm.nasa.gov/missions/two-decades-imerg-resources">https://gpm.nasa.gov/missions/two-decades-imerg-resources</a> ) .	25
Figure 8 : Image de CMORPH ( <a href="https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/precipitationcmorph">https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/precipitationcmorph</a> ) .....	26
Figure 9 : Image de CHIRPS ( <a href="https://www.watres.com/CHIRPS/">https://www.watres.com/CHIRPS/</a> ).....	27
Figure 10 : Image de PERSIANN ( <a href="https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-datarecords/precipitationpersiann">https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-datarecords/precipitationpersiann</a> ) .....	28
Figure 11: Carte des stations pluviométriques .....	31
Figure 12 : Graphe des indices statistiques mensuels pour chaque station à l'échelle mensuelle .....	32
Figure 16 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station de Chichaoua à l'échelle mensuelle.....	35
Figure 15 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Chichaoua à l'échelle mensuelle.....	35
Figure 18 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station de Abadla à l'échelle mensuelle .....	36
Figure 17 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Abadla à l'échelle mensuelle.....	36
Figure 19 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station Amenzel à l'échelle mensuelle .....	36
Figure 20 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Amenzel à l'échelle mensuelle.....	36
Figure 24 : Courbe de confrontation des données observées et les données estimées de la station de Aghbalou à l'échelle mensuelle .....	38
Figure 23 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Aghbalou à l'échelle mensuelle.....	38
Figure 25 : Graphes des indices statistiques annuels pour chaque station à l'échelle annuelle	39
Figure 26 : Courbe de confrontation des données observées et les données estimées de la station de Marrakech à l'échelle annuelle .....	41
Figure 27 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Marrakech à l'échelle annuelle .....	41
Figure 28 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées à la station de Chichaoua à l'échelle annuelle .....	42

Figure 29 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Chichaoua à l'échelle annuelle .....	42
Figure 31 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station d'Abadla à l'échelle annuelle .....	43
Figure 30 : Graphe du coefficient de détermination de la station d'Abadla à l'échelle annuelle .....	43
Figure 32 : Graphe du coefficient de détermination de la station d'Aghbalou à l'échelle annuelle .....	44
Figure 33 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station d'Aghbalou à l'échelle annuelle .....	44
Figure 34 : Graphe du coefficient de détermination de la station d'Amenzel à l'échelle annuelle .....	44
Figure 35 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station d'Amenzel à l'échelle annuelle .....	44

## Acronymes

**ABHT** : l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift

**RSO** : Radar à synthèse d'ouverture

**CC** : Coefficient de Corrélation

**R2** : Coefficient De Détermination

**PBIAS** : Pourcentage De Biais

**RMSE** : L'erreur Quadratique Moyenne

**NSE** : Le coefficient D'efficacité De Nash-Sutcliffe :

**TRMM** : La Mission de Mesure des Précipitations Tropicales

**NASA** : National Aeronautics and Space Administration

**IMERG** : Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM

**CMORPH** : Climate Prediction Center morphing technique

**CDR** : L'enregistrement de données climatiques

**CPC** : Centre de prévision climatique

**CHIRPS** : Le Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

**USGS** : l'US Geological Survey

**USAID** : Agence américaine pour le développement international

**NOAA** : National Oceanic and Atmospheric Administration

**PERSIANN** : Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks



## Table des matières

I.	Introduction générale.....	11
II.	Synthèse de la bibliographie :.....	12
1.	Historique des données pluviométriques :.....	12
2.	Travaux antérieurs :.....	14
III.	Cadre général de site d'étude : .....	15
1.	Description du bassin de Tensift .....	15
2.	Contexte géographique :.....	16
3.	Contexte climatique :.....	16
4.	Contexte géologique :.....	17
IV.	Présentation de l'organisme d'accueil.....	20
1.	Présentation de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT).....	20
2.	Objectifs de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift :.....	20
3.	Zone d'action de l'ABHT :.....	20
V.	Matériels :.....	21
1.	Les données de précipitation satellitaires :.....	21
2.	Recours aux produits satellitaires de précipitation :.....	22
3.	Les données satellitaires disponibles.....	23
3.1	TRMM :.....	23
3.2	IMERG :.....	24
3.3	CMORPH :.....	25
3.4	CHIRPS :.....	26
3.5	PERSIANN : .....	27
VI.	Méthodologies :.....	28
1.	Les données utilisées .....	28
2.	Procédure de téléchargement :.....	29
3.	Méthodologie : .....	29
3.1	Évaluation statistique et métriques .....	29
3.2	Indices statistiques :.....	30
3.3	Les stations de mesures :.....	31
VII.	Résultats et Discussions : .....	32
1.	Résultats mensuels .....	32
1.1	Analyse de graphe des indices statistique à l'échelle mensuel :.....	32
1.2	Analyse des résultats mensuels moyens pour chaque station :.....	34
2.	Résultats annuelles :.....	39

2.1	Analyse du graphe des indices statistiques à l'échelle annuel :.....	39
2.2	Analyse des résultats annuels pour chaque station :.....	41
VIII.	Conclusion :.....	46
IX.	Recommandations :.....	46
Annexes	.....	48

## I. Introduction générale

Les précipitations sont un élément essentiel pour évaluer les conséquences du changement climatique à l'échelle mondiale. Elles jouent un rôle crucial dans l'élaboration des plans hydrologiques et météorologiques, et sont considérées comme une variable clé dans la gestion des ressources en eau. De plus, elles sont d'une importance capitale dans de nombreux domaines tels que l'agriculture, l'approvisionnement en eau potable, la préservation de l'environnement, l'industrie et la prévention des catastrophes naturelles. Les précipitations sont également essentielles pour observer et étudier les effets du changement climatique, en particulier dans les régions confrontées à une rareté des ressources en eau, comme c'est le cas de l'Afrique du nord comme par exemple le Maroc.

Au Maroc, le changement climatique impacte significativement la disponibilité des ressources en eau. Et cela peut aggraver la situation du pays en matière d'approvisionnement durable en eau, afin de satisfaire les besoins croissants des populations, de l'agriculture et des autres activités urbaines (BENNOUNA, 2020).

Toutefois, afin de mieux appréhender et étudier ce phénomène, de nouvelles techniques et méthodes sont utilisées, ce qui permet d'améliorer la collecte et le traitement des données, ainsi que d'accroître la fiabilité et la précision des mesures.

Les données satellitaires sur les précipitations sont recueillies à l'aide de satellites météorologiques, permettant de mesurer la quantité et l'intensité des précipitations sur une zone spécifique. Étant donné que les mesures pluviométriques au sol sont limitées dans de nombreuses régions et ne couvrent pas une vaste étendue, la télédétection spatiotemporelle est utilisée pour évaluer les précipitations à grande échelle. Ces données sont obtenues à partir d'une combinaison d'instruments, de capteurs et de méthodes qui déterminent les quantités de pluie enregistrées. Parmi ces méthodes figurent les pluviomètres (mesures directes au sol), les capteurs embarqués dans les satellites (mesures indirectes), les produits de réanalyse (estimations basées sur les modèles de prévision numérique combinés aux observations) et les radars au sol (kouki, 2022).

Dans les pays méditerranéens, situés en zone subtropicale semi-aride, la pluviométrie est le paramètre climatique prédominant. D'une part, elle est généralement insuffisante et, d'autre part, elle est beaucoup plus variable que la température. Le changement climatique entraînera probablement le déplacement des zones climatiques et des modifications dans les régimes de

précipitations (GIEC, 2007). Au cours des dernières décennies, on a observé une prolongation des périodes de sécheresse dans cette région, notamment au Maroc. Par conséquent, l'impact du changement climatique sur différents secteurs au Maroc, notamment les ressources en eau, se fait sentir. La disponibilité de la ressource en eau est étroitement liée aux précipitations. En raison de la vulnérabilité du climat méditerranéen, de nombreuses recherches ont été menées sur la caractérisation du climat, en particulier sur les précipitations en Afrique du Nord (SEBBAR, 2013).

En effet, la pluviométrie revêt une importance socioéconomique majeure et joue un rôle crucial dans différents secteurs, tels que les ressources en eau et l'agriculture. Lors d'une année sèche, comme celle de 1994-1995, qui est considérée comme l'une des sécheresses les plus étendues du pays au cours du XXe siècle, les réserves d'eau des barrages ont considérablement diminué, menaçant non seulement l'agriculture irriguée, mais aussi l'approvisionnement en eau potable et la production d'électricité. Pendant les périodes humides, comme celle de novembre 2009 à février 2010, les réservoirs d'eau des barrages et les nappes phréatiques sont bien approvisionnés, mais des vies et des infrastructures peuvent être détruites par des inondations (Driouech, 2010).

Dans ce sens, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer la fiabilité, la concordance et les performances des données satellitaires de précipitation par rapport aux mesures directes au sol. Nous entreprenons une analyse statistique approfondie pour comparer les deux ensembles de données et identifier les biais, les erreurs systématiques et les sources de variabilité. Cette évaluation est essentielle pour améliorer notre compréhension des conditions météorologiques, optimiser les prévisions et faciliter la prise de décisions dans divers domaines liés à la météorologie et aux ressources en eau.

## **II. Synthèse de la bibliographie :**

### **1. Historique des données pluviométriques :**

Les données de précipitations proviennent de mesures directes, donc observées, ou bien de mesures indirectes fournissant des estimations des pluies. Les données observées sont des mesures au sol obtenues par l'intermédiaire de pluviomètres. Pendant longtemps les pluviomètres n'ont été que manuels, ce qui rendait nécessaire qu'un observateur se déplace quotidiennement pour faire un relevé de la quantité de précipitation tombée. Ce type d'appareillage est particulièrement contraignant du point de vue logistique puisqu'il implique

la présence régulière d'une personne sur le site de mesure. Ceci est d'autant plus handicapant dans les territoires très peu occupés par les populations humaines et difficiles d'accès.

Les données au sol sont également très souvent lacunaires et comportent de nombreuses valeurs aberrantes, un contrôle de qualité scrupuleux doit donc absolument être réalisé avant de les utiliser pour une quelconque analyse climatique. Toutefois, même au sol, obtenir de longues séries temporelles est un défi. En effet, les difficultés d'accès et le faible peuplement n'ont permis la mise en place de réseaux de mesure que récemment dans certaines régions.

Petit à petit les enregistrements ont été automatisés, tout d'abord grâce aux pluviographes qui permettent d'inscrire directement et en continu sur papier la quantité de précipitation, les données doivent cependant toujours être retranscrites informatiquement. Des stations automatiques disposent désormais d'un enregistreur numérique des données permettant d'effectuer des relevés à des pas de temps plus distants ou pouvant même transmettre des données à distance. En effet, les données observées renseignent de façon très ponctuelle sur les événements pluviométriques et, du fait de leur répartition spatiale très hétérogène, les réseaux au sol ne permettent d'obtenir qu'une part de l'information sur les précipitations. La télédétection, particulièrement celle issue de capteurs embarqués sur des plateformes satellitaires, permet désormais de fournir une information plus exhaustive spatialement et temporellement. Une information spatiale plus dense permettrait alors de préciser les limites des régions climatiques homogènes et celles de transition (MICHOT, 2017).

Plusieurs estimations des précipitations par satellite deviennent disponibles à l'échelle mondiale, offrant de nouvelles possibilités pour la modélisation des ressources en eau, en particulier dans les régions où les données sont rares et dans les pays en développement (MC Acreman, 2016).

Les satellites peuvent potentiellement répondre à la problématique de la pluviométrie en temps réel et de son utilisation en prévision hydrologique. En effet, leur large couverture spatiale leur permet d'accéder aux zones les plus reculées, avec une fréquence temporelle allant jusqu'à deux fois par heure. Leurs données sont facilement et librement accessibles en quasi-temps réel.

Avec l'augmentation de la population mondiale et le changement climatique important qui se dessine, la pression sur les ressources en eau est plus forte que jamais. Des outils de suivi hydrologiques sont nécessaires (BROCHART et al., 2017)

Il est nécessaire d'évaluer ces estimations satellitaires des précipitations pour différents bassins versants situés dans les pays du Maghreb, afin d'analyser si l'adéquation de ces produits peut être différente selon les caractéristiques climatiques, topographiques et d'occupation des sols des bassins. En particulier, ces produits devraient être testés dans les zones montagneuses, qui fournissent la contribution majeure aux ressources en eau de surface, telles que les chaînes du Rif et de l'Atlas au Maroc fournissant la plupart des eaux de surface des bassins du Loukkos, du Sebou, du Tensift et de l'Oum Rbia. Ces bassins versants montagneux restent un grand défi de modélisation car ils cumulent les difficultés liées à la variabilité spatiale induite par la topographie et l'élévation, les processus nivaux mais aussi la rareté des données (McAcreman, 2016).

## 2. Travaux antérieurs :

Dans le cadre de notre étude autour du bassin du Tensift, les précipitations sont faibles et se caractérisent par une grande variabilité spatiotemporelle. La pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 250 mm à Marrakech et peut atteindre 800 mm sur les sommets de l'Atlas (RESSA et al., 2010).

L'évaluation des données pluviométriques PERSIANN-CCS-CDR, ERA5 et SM2RAIN-ASCAT pour l'évaluation des précipitations et de la sécheresse dans le bassin versant du Tensift a été réalisée sur une période de 34 ans, de 1983 à 2017. Les indices statistiques utilisés comprenaient le NSE (coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe), le R<sup>2</sup> (coefficient de détermination), le CC (coefficient de corrélation), le RMSE (erreur quadratique moyenne) et le BIAS (biais en pourcentage). (Najmi, 2023).

Les résultats de l'évaluation ont montré que le produit PERSIANN-CCS-CDR était le plus performant, notamment pour les estimations mensuelles, dans les régions semi-arides du Maroc. Le produit a démontré une bonne concordance avec les mesures observées de précipitations et de sécheresse. Cela suggère que PERSIANN-CCS-CDR est un outil fiable pour évaluer les conditions hydrologiques dans les régions semi-arides comme le bassin du Tensift (Najmi, 2023).

La comparaison des produits de précipitations par satellite à haute résolution a été réalisée dans les bassins du Souss Massa et du Haut Draa au Maroc sub-saharien. Ces bassins se caractérisent par un climat semi-aride à aride. L'étude a porté sur la période de septembre 2000 à août 2020, en utilisant les produits GPM, CHRS et CHIRPS v2.0 (Rachdane, 2022). Les indices

statistiques utilisés pour l'évaluation étaient le coefficient de corrélation (CC), le biais relatif (R Bias), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE).

Les résultats de l'étude ont montré que le produit GPM-F présentait les résultats les plus satisfaisants, que ce soit à l'échelle spatiale ou temporelle. Ce produit a démontré une bonne corrélation avec les mesures observées de précipitations et il a obtenu des performances positives à différentes échelles (Rachdane, 2022).

L'évaluation des performances des produits de précipitations TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) et GPM (Global Precipitation Measurement) par rapport aux mesures de précipitation au sol dans le bassin du Tensift, situé dans le Haut Atlas marocain, en utilisant les produits 3B42 V7 de TRMM et IMERG V5 de GPM. L'étude démontre que les produits de précipitations TRMM et GPM évalués ont une bonne performance dans l'estimation de la précipitation au sol dans le bassin du Tensift. Cependant, leurs performances varient en fonction de l'échelle de temps considérée, avec IMERG V5 étant plus adapté aux échelles de temps plus courtes et 3B42 V7 étant plus adapté aux échelles de temps plus longues (Benkirane, 2022)

L'utilisation des données ouvertes CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) pour la surveillance de la sécheresse dans le bassin du Tensift au Maroc, a montré que CHIRPS présentait une bonne corrélation avec les pluviomètres situés dans la partie centrale du bassin, caractérisée par des basses altitudes. Le produit satellite CHIRPS a enregistré une bonne concordance entre la configuration spatiale des précipitations et les données des stations. CHIRPS a démontré une capacité raisonnable à identifier et à caractériser les épisodes de sécheresse (Habitou, 2020).

### **III. Cadre général de site d'étude :**

#### **1. Description du bassin de Tensift**

Le bassin versant de Tensift est situé dans la partie centrale du Maroc, dans la région de Marrakech. Il est caractérisé par des reliefs très complexes comprenant à la fois des montagnes et de vastes plaines alluviales. Il couvre une superficie importante et il est principalement alimenté par les précipitations qui s'écoulent vers les différents cours d'eau et rivières de la région. Le climat semi-aride à aride entraîne des précipitations irrégulières et des conditions de sécheresse.

Ainsi, le bassin versant de Tensift représente une région essentielle pour la gestion des ressources en eau et le développement agricole grâce à la présence de barrages et de systèmes d'irrigation, tout en offrant une grande diversité de paysages et des écosystèmes.

## 2. Contexte géographique :

Situé au centre-ouest du Maroc, le bassin du Tensift s'étend sur 24 000 km<sup>2</sup> et couvre sept préfectures et provinces (TANOUTI et al ., 2013). Il est limité au sud par la ligne de crête de la chaîne du Haut Atlas, au nord par le massif de petites montagnes nommé « Jbilet » avec des altitudes inférieures à 1000 mètres, à l'est par la ligne de partage des eaux, peu marquée, séparant le bassin du Tensift de celui du Tessaout, affluent d'Oum Er R'bia et à l'ouest par l'océan Atlantique où se situe son exutoire (Fig. 1)(KHOMSI 2014).



**Figure 1: Principaux Oueds du bassin versant du Tensift (Pascon, 1986, modifiée).**

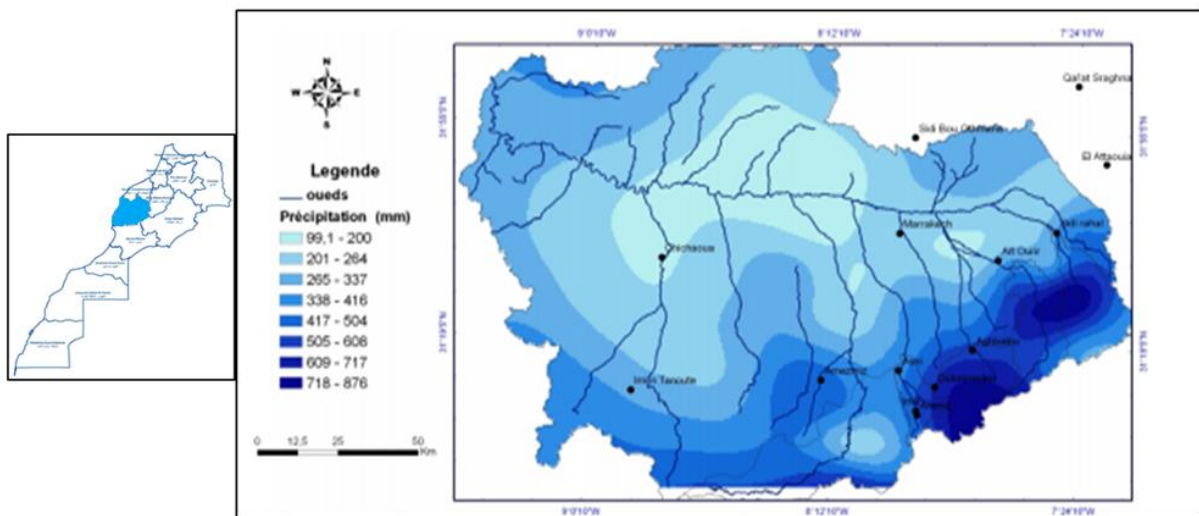
## 3. Contexte climatique :

Le climat régional est de type semi-aride avec une pluviométrie faible et irrégulière, caractérisé par des épisodes de sécheresse épisodiques. Dans la plaine du Haouz, le climat est continental aride à semi-aride, la pluviométrie faible et marquée par une forte hétérogénéité spatio-temporelle. L'hétérogénéité spatiale des précipitations reflète celle de la topographie (HAJHOUI 2018).

Le climat du bassin du Tensift est caractérisé par l'influence de l'Atlantique, cette influence diminuant d'autant plus qu'on s'éloigne vers l'intérieur. La zone est du bassin du Tensift est influencée par la présence du Haut Atlas. Les températures moyennes annuelles sont de l'ordre



de 18°C à 20°C. Les précipitations y sont en général modestes. Le total annuel dépasse rarement 350 mm mais peut dépasser 500 mm sur la zone de montagnes(Fig.2) (KHOMSI 2014).



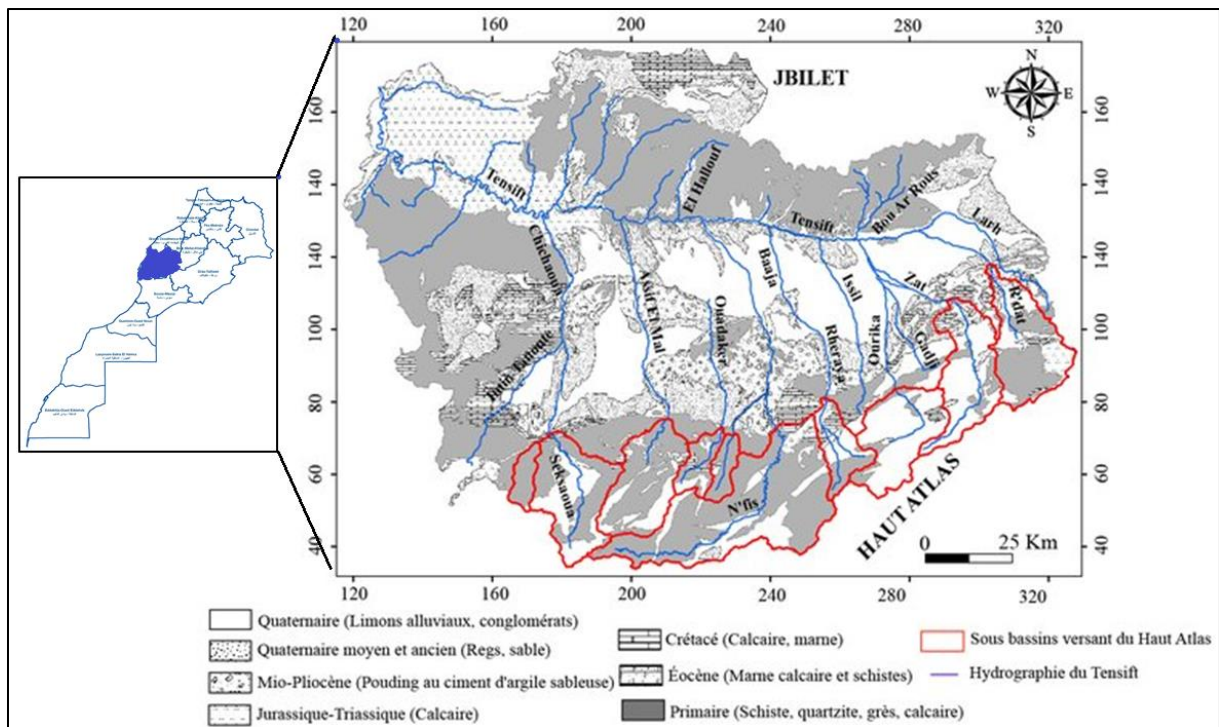
**Figure 2: Carte de répartition des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant du Tensift, enregistrées entre 1972 et 2002 (BOUDHAR, 2009, modifiée).**

La situation climatique de ce bassin est très contrastée en fonction des unités géographiques qui le composent : si le haut Atlas reçoit des précipitations de 800 mm/an, la plaine du Haouz (au cœur de laquelle se trouve la ville de Marrakech), la Bahira et les Jbilet ne reçoivent, eux, que 250 à 270 mm/an<sup>2</sup>. Cette disparité spatiale se double d’une variabilité temporelle, à la fois saisonnière et interannuelle. (TANOUDI et al.. 2013)

Ainsi, sur la période de 1962 à 2015, la moyenne des précipitations enregistrée au niveau de la station d’Aghbalou (altitude : 985 m) dans le Haut Atlas (bassin versant de Ourika) est 527 mm.an-1 alors qu’elle vaut 184 mm.an-1 au niveau de la station de Marrakech située dans la plaine. (HAJHOUI, 2018).

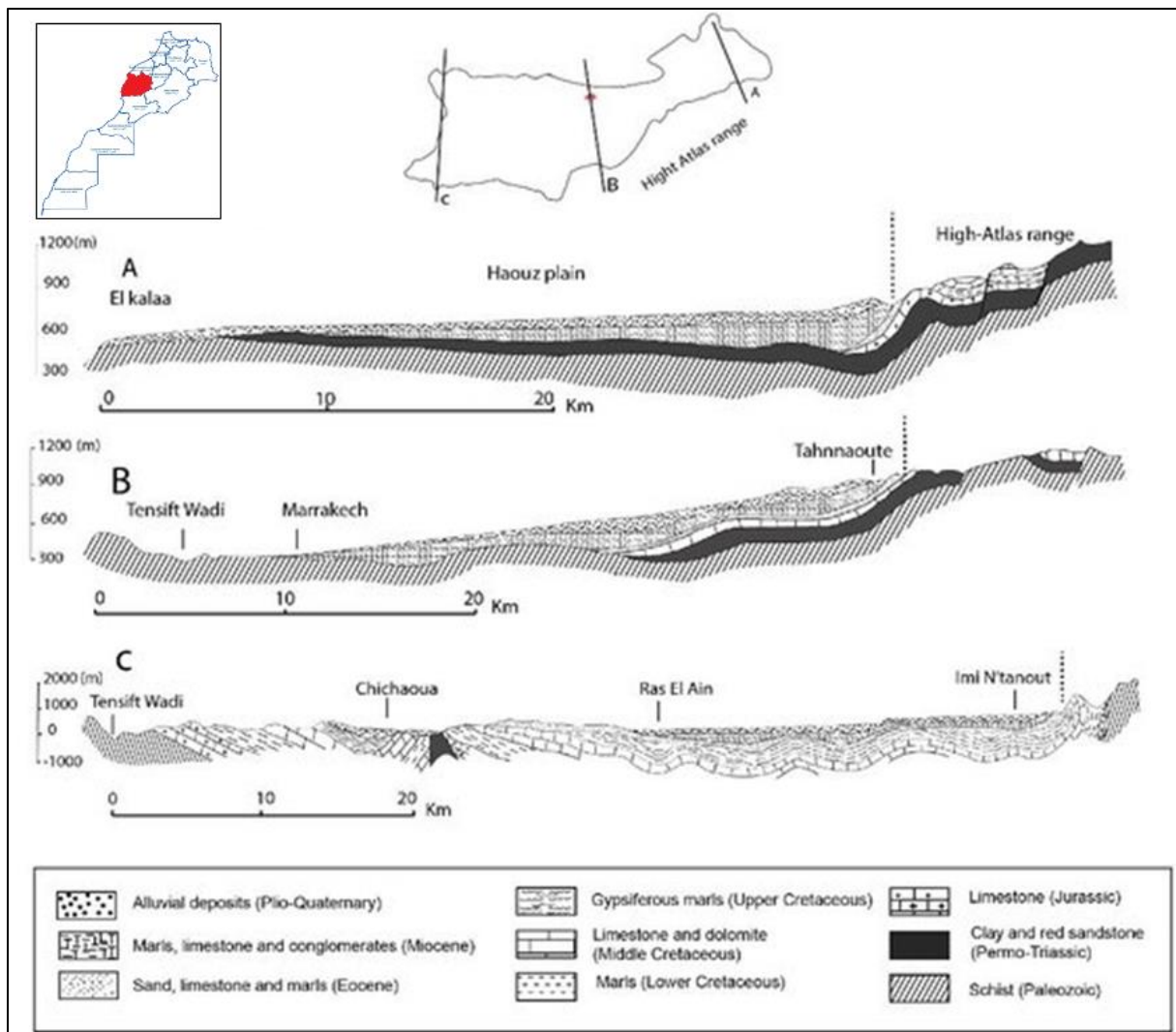
#### 4. Contexte géologique :

Les formations géologiques constituant le bassin du Tensift sont diversifiées (Fig3)



**Figure 3: Formations géologiques du bassin versant de Tensift (HAJJOUJI, 2018, modifiée)**

Initialement, le domaine de la plaine du Haouz est une dépression d'origine tectonique remplie par des dépôts silicoclastiques qui résultent de l'érosion de la chaîne du Haut-Atlas lors de sa surrection durant le Néogène et le Quaternaire (DUTOUR et al., 1985). Ces dépôts sont en général des cônes alluviaux et à des formations fluviatiles, transportés et déposés par le réseau des oueds atlasiques. La plaine est surplombée par la chaîne montagneuse du Haut-Atlas, subdivisée en trois zones s'étageant depuis les sommets de la chaîne vers la plaine (OUANAÏMI et al., 2011).



**Figure 4: Coupes géologiques dans la plaine du Haouz (HAJJOUJI, 2018modifiée)**

Les coupes géologiques synthétiques dans la direction nord-sud montrent la structure géologique de la plaine du Haouz (Fig 4). La partie inférieure de l'aquifère alluvial est généralement constitué de terrains miocènes. Le permo-triasique (contenant du sel) pourrait se trouver sous les dépôts alluviaux à l'est (section A). L'Eocène et le Crétacé forment un grand synclinal dans la plaine (coupe C) tandis que leur étendue est limitée sous la plaine dans le Haouz moyen et oriental à cause du soulèvement du socle paléozoïque. (HAJJOUJI, 2018).

Dans la chaîne atlasique, les affleurements lithologiques sont dominés par les faciès suivants : des roches éruptives et métamorphiques précambriennes notamment les granites, diorites, dolérites, andésites et rhyolites, des schistes primaires, des formations secondaires fortement colorées en rouge et largement dominées par des calcaires, des grès, des marnes et des argiles. Bien que qualifiées d'imperméables, les formations métamorphiques ou éruptives comportent

des zones d'altérations dont la capacité de rétention est significative étant donné la pérennité de plusieurs cours d'eau qui ne peut pas être attribuée au seul stock neigeux (HUVELIN, 1973 ; MOUKHCHANE ,1983 ; SINAN, 2000).

#### **IV. Présentation de l'organisme d'accueil**

##### **1. Présentation de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT)**

L'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT) est une agence gouvernementale marocaine chargée de la gestion et de la protection des ressources en eau dans le bassin hydraulique du Tensift, qui couvre une grande partie du territoire du Maroc, notamment la région de Marrakech-Safi. L'ABHT a pour mission principale de gérer de manière durable les ressources en eau de la région, en veillant à leur utilisation rationnelle, à la préservation de la qualité de l'eau et à la protection des écosystèmes aquatiques. Elle met en œuvre des programmes et des projets visant à optimiser l'utilisation de l'eau, à lutter contre la pollution, à développer l'irrigation, à prévenir les risques d'inondations et à assurer une gestion équilibrée et équitable des ressources en eau. L'ABHT travaille en étroite collaboration avec les autres acteurs du secteur de l'eau, tels que les collectivités locales, les agriculteurs, les industriels et les associations, afin de promouvoir une gestion participative et concertée des ressources en eau dans la région du Tensift. En résumé, l'ABHT joue un rôle important dans la gestion de l'eau dans la région du Tensift au Maroc, en s'efforçant d'assurer la disponibilité et la durabilité des ressources en eau pour les besoins des différentes parties prenantes, tout en préservant l'environnement aquatique.

##### **2. Objectifs de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift :**

Les objectifs de création des Agences de Bassins Hydrauliques :

- Planification cohérente et concertée à l'échelle du bassin hydraulique ;
- Gestion intégrée, décentralisée et concertée des ressources en eau et du domaine public hydraulique ;
- Protection et conservation quantitative et qualitative des ressources en eau ;
- Utilisation rationnelle et optimale de l'eau(<https://www.eau-tensift.net>)

##### **3. Zone d'action de l'ABHT :**

Située au centre ouest du Maroc, le bassin du Tensift-Ksob-Igouzoulen s'étend sur une superficie de l'ordre de 26.035 Km<sup>2</sup> Selon le nouveau découpage adopté en 2018. Le bassin du Tensift comprend une superficie estimée à 20323 km<sup>2</sup>, les bassins côtiers comme bassin de

Laksoub d'une superficie estimée à 1664 km<sup>2</sup> et le bassin d'Egozulen d'une superficie de 1035 km<sup>2</sup>. Administrativement, la zone d'action couvre totalement la préfecture de Marrakech et quasi-totalité des provinces d'Al Haouz, de Chichaoua, d'Essaouira et de Youssoufia et partiellement les provinces de Rehamna, de Kelaâ des Sraghnas et de Safi. Selon le recensement de 2014, la population du bassin est de 3.04 millions habitants, soit près de 67.5% de la population de la région de Marrakech-Safi et 9% de la population du Royaume (Fig. 5).

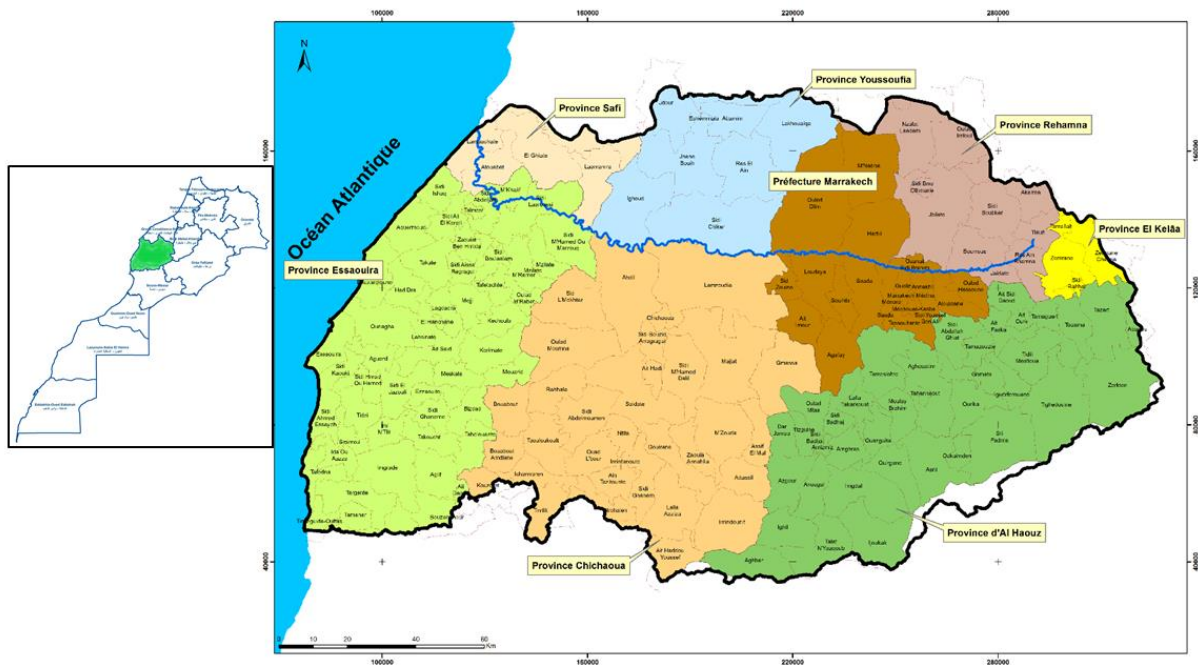


Figure 5: Zone d'action de l'ABHT (<https://www.eau-tensift.net>)

## V. Matériels :

### 1. Les données de précipitation satellitaires :

Les données satellites sont des informations recueillies par des satellites artificiels en orbite autour de la Terre et d'autres planètes, fournissant des renseignements sur la surface de la Terre et les changements météorologiques. Ces données sont générées à l'aide de technologies de télédétection, telles que le radar à synthèse d'ouverture (RSO), qui permettent d'obtenir des flux d'informations fiables et en temps réel pour de nombreuses applications terrestres et maritimes. Ces données sont précieuses car elles offrent des informations authentiques sur la surface terrestre, le climat et d'autres événements, permettant une compréhension à long terme des évolutions et une réaction rapide aux problèmes détectés. Les applications des données satellites sont infinies, offrant de nombreux avantages tant au niveau mondial que local (<https://www.iceye.com/satellite-data>).

Les données satellitaires utilisées pour estimer les précipitations proviennent de deux types de satellites. Les satellites géostationnaires, qui restent immobiles par rapport à la Terre, utilisent des canaux infrarouges pour déduire les taux de précipitations à partir des températures en altitude des nuages. Ils peuvent fournir des données à haute résolution, avec une couverture temporelle continue pour la région observée. Les satellites en orbite polaire utilisent des canaux de micro-ondes qui permettent de mieux estimer les précipitations en surveillant la diffusion des micro-ondes naturellement émises à l'intérieur des nuages. Cependant, ces satellites passent au-dessus d'un endroit donné seulement une ou deux fois par jour, ce qui crée des lacunes dans les séries temporelles de données pour toute région étudiée. Plusieurs produits cherchent à combiner de différentes manières la haute résolution temporelle des données infrarouges avec les estimations de qualité supérieure fournies par les micro-ondes, et certains conditionnent également les données satellitaires sur les observations au sol (ASADULLAH, 2008).

## **2. Recours aux produits satellitaires de précipitation :**

Les produits satellitaires présentent de nombreux avantages et sont largement Utilisés pour estimer et surveiller les précipitations pour diverses applications :

L'utilisation des produits des précipitations satellitaires permet une surveillance à grande échelle, une prévision météorologique précise, une gestion des ressources en eau plus efficace et une meilleure compréhension des phénomènes climatiques, de plus ils sont capables d'estimer les précipitations et les apports en eau dans les bassins versants, les niveaux des cours d'eau, réserves d'eau souterraine, cela contribue à la sécurité des populations, à la protection de l'environnement et à mieux planifier les activités qui dépendent des précipitations (ex: l'agriculture - gestion des barrages – alimentation en eau potable). Il est important de noter que dans les régions peu peuplées ou d'accès difficile, la connaissance pluviométrique est souvent très limitée. Cela signifie que les informations sur les précipitations, qui sont essentielles pour la gestion des ressources en eau et la prévention des catastrophes naturelles, sont insuffisantes dans ces zones. Il est donc nécessaire de trouver des moyens alternatifs pour obtenir des mesures précises des précipitations. C'est là que les estimations pluviométriques satellites entrent en jeu. La couverture mondiale offerte par les satellites en orbite présente une importance capitale, grâce à eux, il est possible de surveiller les régions éloignées, y compris les zones océaniques et les régions peu peuplées. Ce qui permet d'obtenir des données dans des endroits où les observations au sol sont limitées ou tout simplement indisponibles. Cette capacité à collecter

des informations à l'échelle mondiale est essentielle pour comprendre et prévoir les phénomènes naturels. (BROCHART et al., 2017)

Ainsi, les produits satellitaires fournissent une surveillance des conditions climatiques. Les données satellitaires permettent de surveiller les précipitations à l'échelle mondiale sur une longue période. Ces derniers contribuent à l'étude des variations climatiques, à la détection des tendances de précipitation et à l'évaluation des impacts du changement climatique sur les régimes de précipitation (ts2. space).

### **3. Les données satellitaires disponibles**

#### **3.1 TRMM :**

La mission de mesure des précipitations tropicales (TRMM) est une mission conjointe entre la NASA et l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA) pour étudier les précipitations pour la recherche météorologique et climatique. Le satellite TRMM a cessé de collecter des données le 15 avril 2015. Lancé fin novembre 1997, avec une durée de vie théorique de 3 ans, le satellite TRMM a produit plus de 17 ans de précieuses données scientifiques. TRMM embarquait 5 instruments : une suite pluviométrique à 3 capteurs (PR, TMI, VIRS) et 2 instruments associés (LIS et CERES). TRMM a fourni un ensemble de données unique de 17 ans sur les précipitations et la foudre tropicales mondiales. L'ensemble de données TRMM est devenu la norme spatiale pour mesurer les précipitations et a conduit à des recherches qui ont amélioré notre compréhension de la structure et de l'évolution des cyclones tropicaux, des propriétés du système convectif, des relations foudre-orage, de la modélisation du climat et du temps et des impacts humains sur les précipitations. Les données ont également soutenu des applications opérationnelles telles que la surveillance des inondations et de la sécheresse et les prévisions météorologiques (Fig. 6).

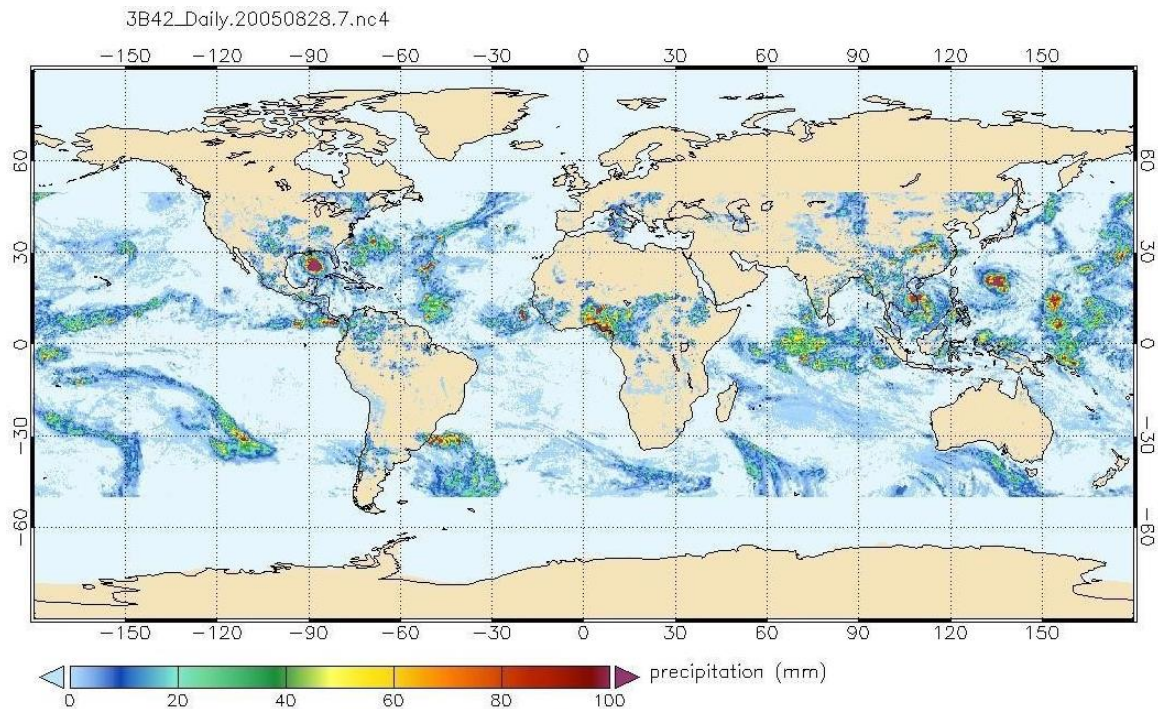
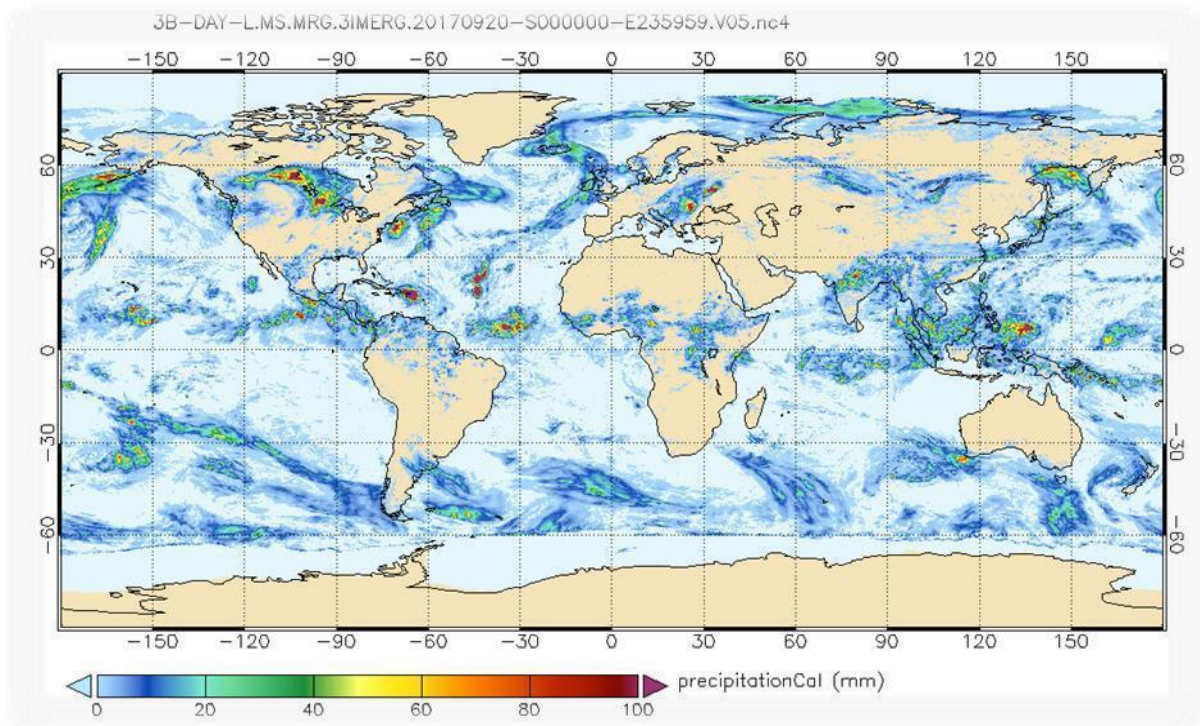


Figure 6: Image de TRMM(<https://trmm.gsfc.nasa.gov/>)

### 3.2 IMERG :

La NASA vient de publier sa dernière estimation de la pluie et de la neige couvrant les 19 dernières années. Son nom de code : Version 6 IMERG. L'IMERG de la NASA - Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM - combine les informations de n'importe quelle constellation de satellites fonctionnant en orbite terrestre à un moment donné, pour estimer les précipitations sur la majorité de la surface de la Terre. Cet algorithme est particulièrement précieux sur la majorité de la surface de la Terre dépourvue d'instruments de mesure des précipitations au sol. La nouveauté de la version 6 IMERG est que l'algorithme peut désormais fusionner les premières estimations de précipitations collectées en 2000-2014 pendant le fonctionnement du satellite TRMM avec des estimations de précipitations plus récentes collectées pendant le fonctionnement du satellite GPM. Plus l'enregistrement est long, plus il est précieux, comme en attesteront les chercheurs et les développeurs d'applications (Fig. 7).

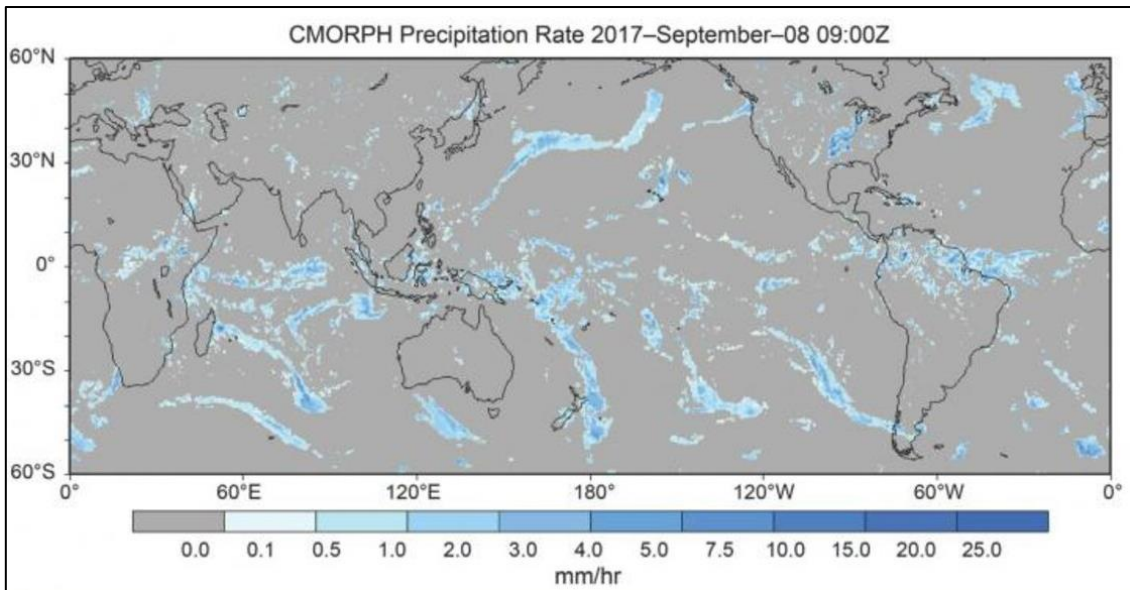




**Figure 7:** Image de IMERG (<https://gpm.nasa.gov/missions/two-decades-imerg-resources>)

### 3.3 CMORPH :

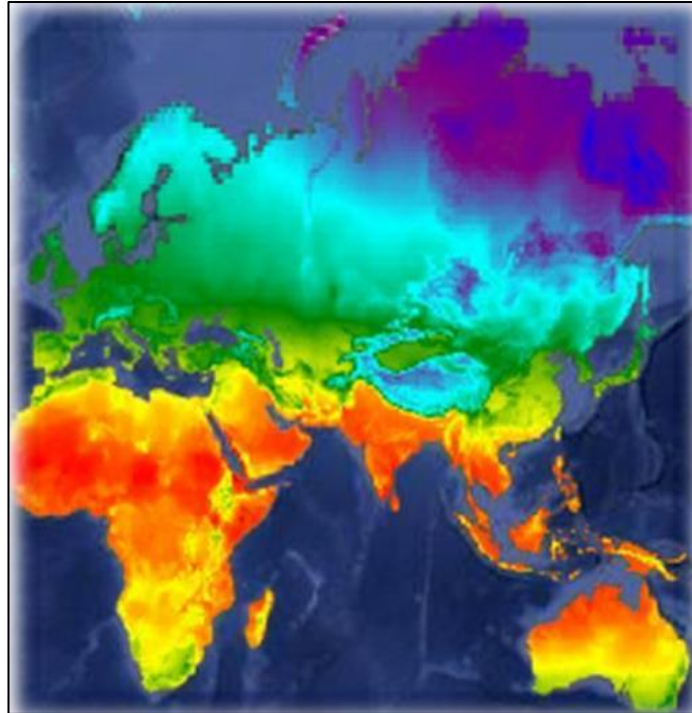
L'enregistrement de données climatiques (CDR) sur les précipitations satellitaires - CMORPH consiste à des estimations de précipitations satellitaires qui ont été corrigées des biais et retraitées à l'aide de la technique de morphing (MORPH) du Centre de prévision climatique (CPC) pour former une analyse globale des précipitations à haute résolution. Les données sont retraitées sur une grille globale avec une résolution spatiale de 8 km sur 8 km. La résolution temporelle est de 30 minutes sur une période d'enregistrement de 20 ans (de janvier 1998 à aujourd'hui). Les champs de précipitations de sortie sont produits sur trois résolutions spatio-temporelles différentes pour répondre aux exigences des utilisateurs (Fig. 8).



**Figure 8: Image de CMORPH**(<https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/precipitationcmorph>)

### 3.4 CHIRPS :

Le Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) est un ensemble de données pluviométriques quasi mondiales. Comme son titre l'indique, il combine les données des stations météorologiques d'observation en temps réel avec les données infrarouges pour estimer les précipitations. L'ensemble de données va de 1981 à nos jours. CHIRPS intègre des images satellites à résolution de  $0,05^\circ$  avec des données de stations in situ pour créer des séries chronologiques de précipitations maillées pour l'analyse des tendances et la surveillance de la sécheresse saisonnière. Depuis 1999, des scientifiques de l'US Geological Survey (USGS) et du CHG, soutenus par des fonds de l'Agence américaine pour le développement international (USAID), de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), développer des techniques de production de cartes pluviométriques, en particulier là où les données de surface sont rares. La création de CHIRPS a soutenu les efforts de surveillance de la sécheresse par le réseau de systèmes d'alerte précoce contre la famine de l'USAID. Il existe deux principaux ensembles de données. La première est quasi-globale et couvre le monde entier de  $50^\circ\text{N}$  à  $50^\circ\text{S}$ . Le second couvre l'Afrique et certaines parties du Moyen-Orient. Il couvre la zone de  $40^\circ\text{N}$  à  $40^\circ\text{S}$  et de  $20^\circ\text{W}$  à  $55^\circ\text{E}$ . L'ensemble de données global contient des données sur une grille de  $0,05^\circ$  à des pas de temps mensuels, pentadiques et quotidiens. Cela équivaut à  $31 \text{ km}^2$ . L'ensemble de données « Afrique » comprend également des données à une grille de  $0,10^\circ$  à un pas de temps de 6 heures (Fig. 9).



**Figure 9: Image de CHIRPS**(<https://www.watres.com/CHIRPS/>)

### 3.5 PERSIANN :

Les estimations du taux de pluie PERSIANN sont générées sous la forme d'un produit de résolution de 0,25 degré qui est ensuite calibré sur le produit mensuel in situ et satellite fusionné de 2,5 degrés produit par le Global Precipitation Climatology Project. Les données GridSat-B1 IRWIN sont utilisées comme entrée du modèle PERSIANN à une résolution de 0,25 degré et un pas de temps de 3heures. La sortie du modèle PERSIANN (avant correction du biais) est appelée PERSIANN-B1. Une valeur seuil (thd) doit être appliquée aux estimations du taux de pluie PERSIANN-B1 sur 3 heures pour filtrer les pixels bruyants. Ces pixels bruyants sont généralement associés à des pixels où le taux de pluie est « nul », mais le modèle de réseau de neurones estime une très petite valeur non nulle(Fig. 10).

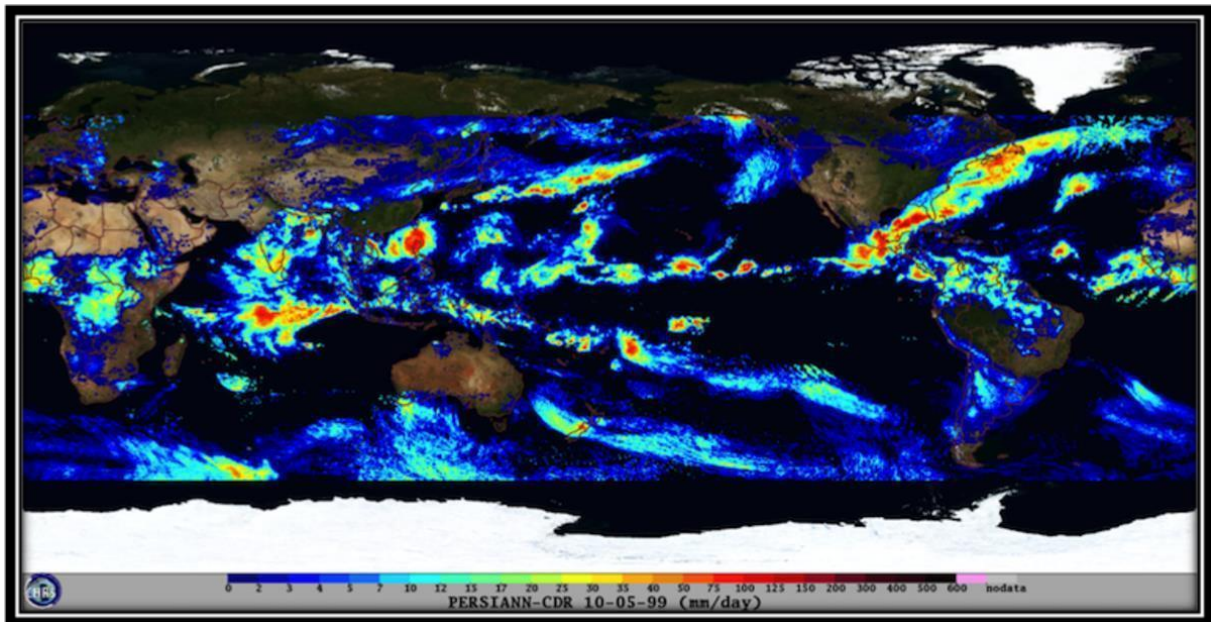


Figure 10: Image de PERSIANN(<https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-datarecords/precipitationpersiann>)

## VI. Méthodologies :

### 1. Les données utilisées

Le choix des données PERSIANN-CCR pour notre travail sur les précipitations est motivé par plusieurs facteurs. Tout d'abord, ce produit offre des données de haute qualité avec une résolution spatiale et temporelle élevée. Cela nous permet d'obtenir des estimations précises et continues des précipitations, ce qui est essentiel pour notre étude. La haute résolution spatiale nous permet de comprendre les schémas de précipitations à une échelle fine, tandis que la haute résolution temporelle nous permet de capturer les variations rapides des précipitations.

De plus, PERSIANN-CCR prend en compte les variations saisonnières et les changements climatiques. Cette prise en compte est importante car elle nous permet d'analyser les données dans un contexte plus large et de mieux comprendre les effets du changement climatique sur les précipitations. Cela est particulièrement pertinent pour nos travaux de surveillance et de gestion des ressources en eau, car le changement climatique peut avoir un impact significatif sur la disponibilité et la distribution des précipitations. Enfin, l'accessibilité aux données et le développement d'outils de traitement et d'exploitation des données de précipitation sont des facteurs importants dans notre choix. Les données PERSIANN-CCR offre des données facilement accessibles et des outils avancés pour l'analyse et la manipulation des données de précipitation. Cela facilite notre travail de

traitement, d'interprétation et d'exploitation des données, ce qui nous permet d'obtenir des résultats plus robustes et fiables.

## **2. Procédure de téléchargement :**

Afin de télécharger les données de précipitations à partir de PERSIANN, nous suivons un processus simple et efficace. Tout d'abord, nous spécifions la période temporelle pour laquelle nous souhaitons obtenir les données de précipitations. Cela peut inclure une plage de dates spécifiques ou une période continue. Ensuite, nous définissons la région géographique souhaitée. Une fois que nous avons délimité la zone d'étude, nous sélectionnons l'instrument de mesure que nous souhaitons utiliser pour obtenir les données de précipitations. PERSIANN-CCS-CDR offre différentes options d'instruments de mesure, ce qui nous permet de choisir celui qui convient le mieux à notre étude. Ensuite, nous choisissons le format de fichier de sortie, tel que CSV, NetCDF ou GeoTIFF, en fonction de nos besoins et des logiciels que nous utiliserons ultérieurement pour l'analyse des données. Enfin, nous lançons le processus de téléchargement et les données de précipitations correspondant à notre période et à nos régions spécifiées sont extraites et sauvegardées localement pour une utilisation ultérieure.

## **3. Méthodologie :**

### **3.1 Évaluation statistique et métriques**

Dans cette étude on a réalisé une évaluation classique en comparant les données de précipitations satellitaires de PERSIANN-CCS-CDR avec les données d'observation au sol provenant de 6 stations météorologiques sur une période de 20 ans (2000 à 2020). L'objectif était d'évaluer les performances du produit de précipitations par satellite en utilisant une comparaison directe avec les mesures ponctuelles obtenues à partir de pluviomètres pour évaluer la performance du produit de précipitations par satellite, un ensemble de paramètres statistiques largement utilisés a été utilisé. Ces paramètres permettent de quantifier et de comprendre la précision du produit de précipitations par satellite par rapport aux données d'observation au sol.

Tout d'abord, on a le coefficient de corrélation (CC) qui est une mesure spécifique qui quantifie la force de la relation linéaire entre deux variables d'une analyse de corrélation, avec des valeurs comprises entre  $-1$  et  $1$ . Une forte corrélation linéaire positive est trouvée, si la valeur R est près de  $1$  et vice versa (Salih et al. 2022). De plus, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) indique la différence quadratique moyenne entre les valeurs des données observées et les valeurs des

données estimées il nous donne une mesure pour juger de la qualité d'un estimateur en termes de variation et sa déformation. lorsqu'elle est égale à 0, elle indique une correspondance parfaite entre les ensembles de données, plus la valeur augmente, plus la deux séries de jeux de données ont une mauvaise correspondance (<https://boowiki.info/art/les-ratios-statistiques/erreur-quadratique-moyenne.html>). Ainsi, le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) est une mesure de la qualité de l'ajustement d'une régression linéaire lorsque la relation entre les deux variables est linéaire. Les valeurs de R<sup>2</sup> varient de 0 à 1, lorsque R<sup>2</sup> est proche de 1, cela indique que les deux ensembles de données sont étroitement alignés et que le modèle de régression linéaire est bien ajusté aux données. (Salih et al. 2022). Et Le coefficient d'efficacité de Nash – Sutcliffe (NSE) permet d'évaluer l'adéquation des projections par rapport aux observations avec des valeurs qui varie de l'infini négatif à 1. Lorsque NSE est proche de 1, cela indique un ajustement parfait entre les valeurs observées et projetées. Les valeurs de NSE entre 0 et 1 sont généralement considérées comme des niveaux d'efficacité acceptables, indiquant une bonne performance du modèle. Cependant, des valeurs inférieures à 0 indiquent que la valeur moyenne observée est supérieure à la valeur simulée, ce qui suggère une performance inacceptable du modèle (Golmohammadi et al. 2014). Le pourcentage de biais (PBIAS) mesure la tendance moyenne des données à être supérieures ou inférieures à leurs valeurs mesurées correspondantes. Un PBIAS optimal est de 0, ce qui indique un modèle de simulation précis. Des valeurs de PBIAS faibles suggèrent également une précision élevée de la simulation. Des valeurs positives du PBIAS indiquent un biais de surestimation, tandis que des valeurs négatives suggèrent un biais de sous-estimation (Vijai et al. 1999).

### **3.2 Indices statistiques :**

Les formules mathématiques des indices statistiques utilisés dans cette analyse comparative entre les données observées et les données estimées.

- Coefficient de détermination :  $R^2 = CC^2$
- Coefficient de corrélation :  $CC = \frac{n \sum xy - (\sum x \sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}}$

x : données observées

y : données estimées

- L'erreur quadratique moyenne :  $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Estim_i - Observ_i)^2}{n}}$
- Le coefficient d'efficacité de Nash – Sutcliffe :  $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - Estim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Obs_i - Obs_i)^2}$
- Pourcentage de BIAS :  $Pbias = \frac{(\sum_{i=1}^n Estim_i - \sum_{i=1}^n Observ_i)}{\sum_{i=1}^n Obs_i} \times 100$ .

### 3.3 Les stations de mesures :

Les données mesurées de précipitations au niveau des stations pluviométriques, sont fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT), sur une période de 20 ans, de 2000 à 2020, est utilisée pour l'analyse annuelle, tandis que la comparaison mensuelle est effectuée sur la période du 01 septembre 2000 au 28 février 2021. Le choix de sélectionner les 6 stations est basé sur la disponibilité des données, le faible nombre de données manquantes et le fait que ces stations (Tableau en Annexe) n'ont pas été déplacées pendant la période de mesure

(Fig.11)

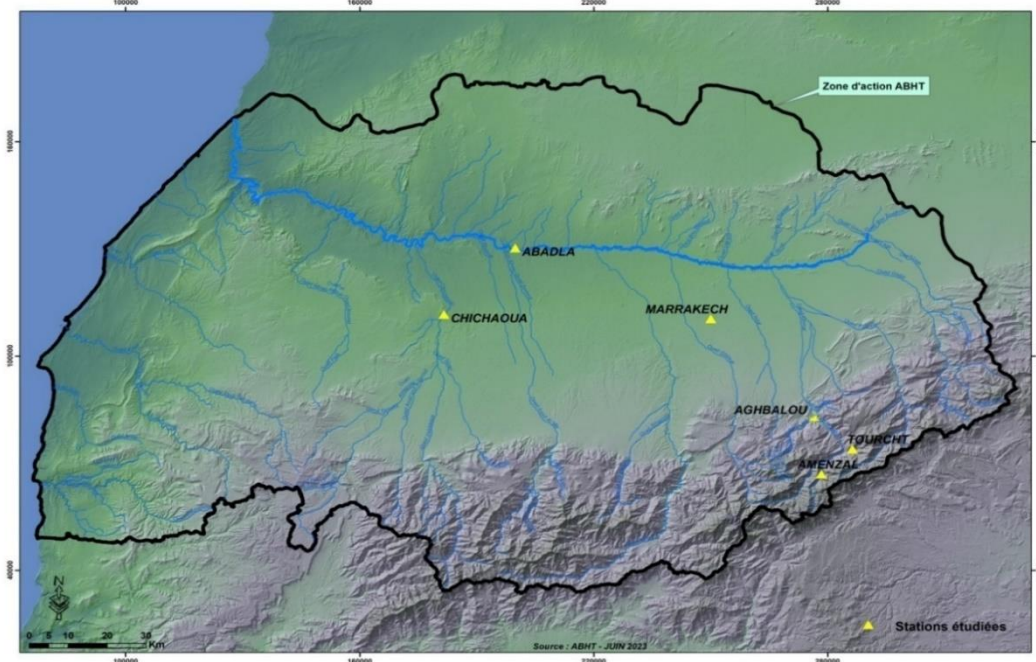


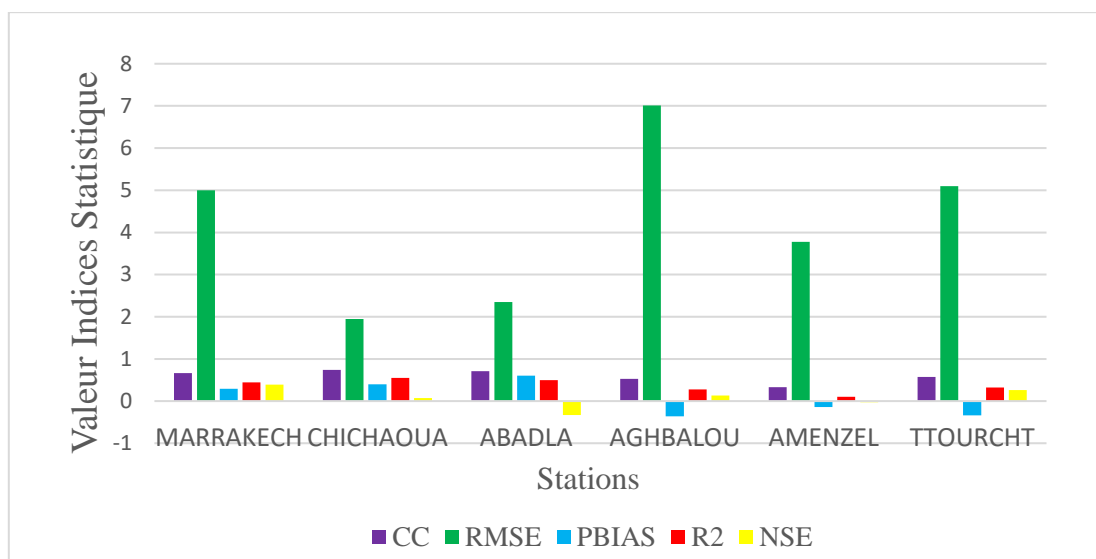
Figure 11: Carte des stations pluviométriques

## VII. Résultats et Discussions :

### 1. Résultats mensuels

#### 1.1 Analyse de graphe des indices statistique à l'échelle mensuel :

La figure ci-dessous offre une représentation détaillée des valeurs des indices statistiques au niveau des stations pluviométriques étudiées, en se focalisant sur une échelle mensuelle. Cette visualisation permet d'observer et d'analyser les variations mensuelles des indices statistiques, révélant ainsi les schémas des précipitations dans chaque station. En étudiant ces données mois par mois, nous pouvons mieux comprendre les fluctuations à court terme et les tendances des précipitations dans les différentes régions étudiées (Fig. 12).



**Figure12: Graphe des indices statistiques mensuels pour chaque station à l'échelle mensuelle**

En analysant les résultats pour différentes stations météorologiques, il est possible de déterminer celles qui ont obtenu les meilleurs résultats en termes d'estimations des précipitations.

La station d'Aghbalou suggère que les données de précipitations obtenues à partir des satellites sont corrélées de manière modérée avec les mesures de la station terrestre. Bien que les données de satellite présentent une certaine précision et une certaine capacité à estimer les précipitations, il existe encore des différences et de la variabilité qui ne peuvent pas être complètement expliquées par la corrélation. Il est important de prendre en compte ces facteurs lors de l'utilisation des données des satellites pour des analyses ou des prévisions liées aux précipitations à cette station.



Et pour la station de Tourncht on remarque une corrélation relativement modérée entre les précipitations mesurées par le satellite et celles de la station terrestre. Bien que les données de satellites présentent une précision raisonnable, elles ont tendance à sous-estimer légèrement les précipitations. Cependant, la variabilité non expliquée reste significative et l'efficacité de reproduction est relativement faible. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les limites des données satellites lors de leur utilisation pour analyser ou prévoir les précipitations à la station.

Les données pour la station d'Abadla indiquent une corrélation forte entre les données de précipitations satellitaire et celles de la station. Cependant, les estimations des précipitations basées sur les données satellites présentent une précision solide et une tendance à surestimer les précipitations.

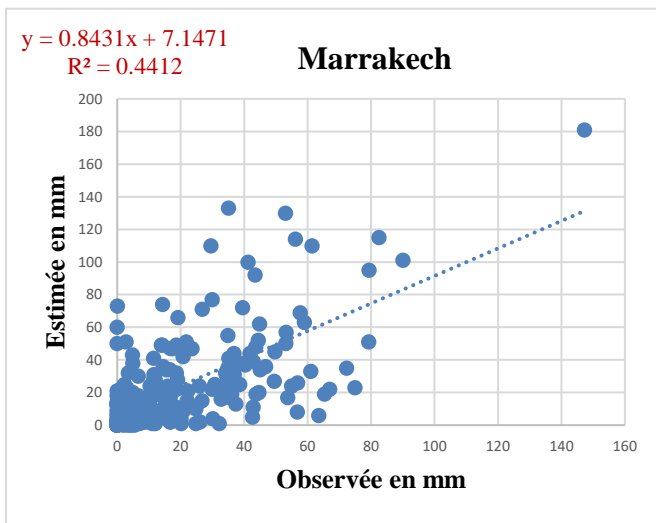
En revanche, au niveau des stations de Chichaoua et Marrakech les résultats sont encourageants mais présentent également des possibilités d'amélioration. Les estimations des précipitations montrent une corrélation positive modérée à forte avec les observations réelles, une précision élevée avec un faible RMSE pour la station de Chichaoua et moyenne pour la station de Marrakech, et un léger biais négatif. Cependant, il y a encore des possibilités d'amélioration pour mieux ajuster les estimations aux observations réelles et réduire le biais.

En fin, la station d'Amenzel révèle une corrélation faible entre les données satellitaire et les mesures de la station. Les estimations des précipitations présentent une précision relativement bonne, indiquant une faible erreur moyenne. Cependant, il y a une tendance à sous-estimer les précipitations, ce qui signifie que les données satellites montrent des valeurs légèrement inférieures aux mesures réelles de la station terrestre. Le coefficient de détermination  $R^2$  est faible, ce qui suggère que la corrélation entre les deux ensembles de données explique seulement 10% de la variabilité des précipitations. De plus, le NSE est négatif, indiquant une faible efficacité des données satellites à reproduire les mesures réelles.

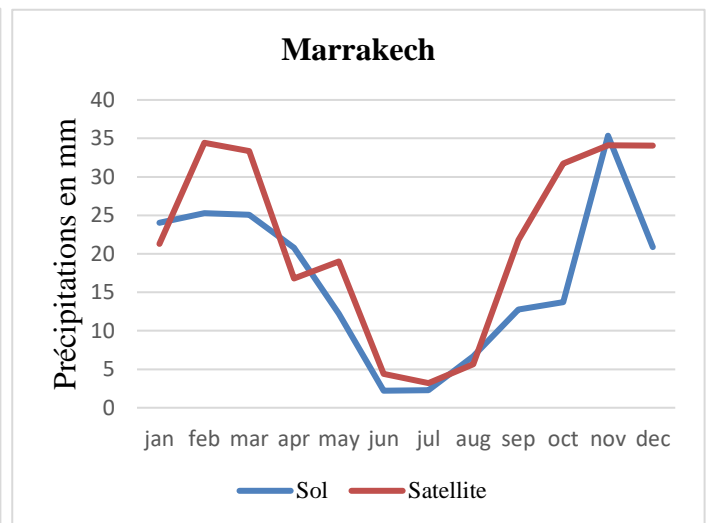
## 1.2 Analyse des résultats mensuels moyens pour chaque station :

### Station de Marrakech :

Les figures ci-dessous montrent la surestimation des données de satellites, ainsi, la capacité moyenne des données estimées à simuler les données observées, car on remarque la présence d'un écart important entre ces données surtout entre le mois de janvier et le mois de mars et entre le mois d'août le mois de novembre (Fig. 13 et 14).



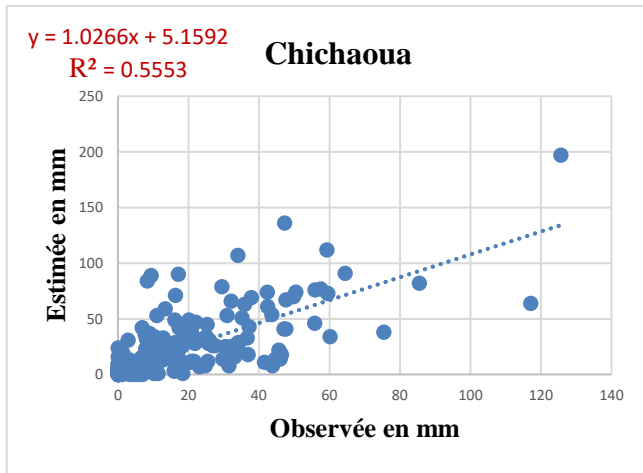
**Figure 13 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Marrakech à l'échelle mensuelle**



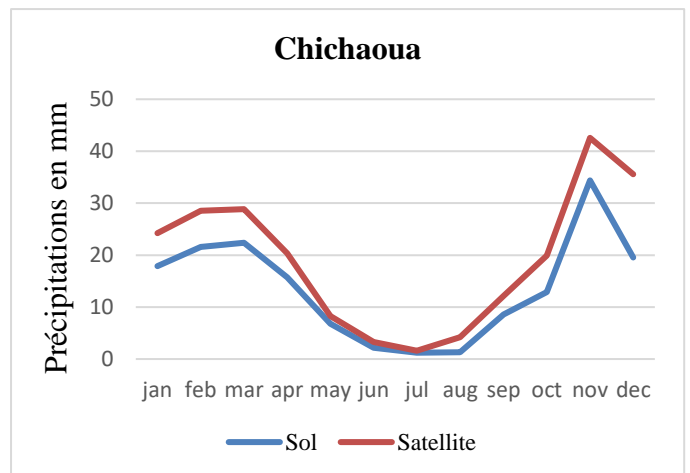
**Figure 14 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station de Marrakech à l'échelle**

### Station de Chichaoua :

Au niveau de la station de Chichaoua, on observe la surestimation des données satellitaires, mais cette fois avec un faible écart entre les données estimées et les données mesurées, plus que ça, le parallélisme entre les deux courbes prouve que les données satellitaires respect la variation des régimes de précipitation (Fig. 15 et 16).



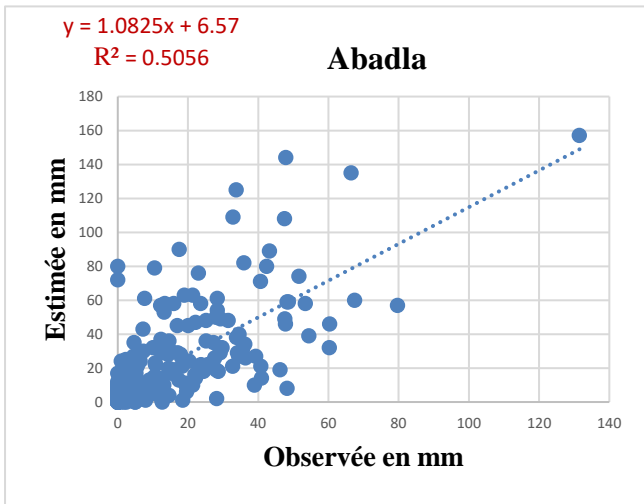
**Figure 14 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Chichaoua à l'échelle mensuelle**



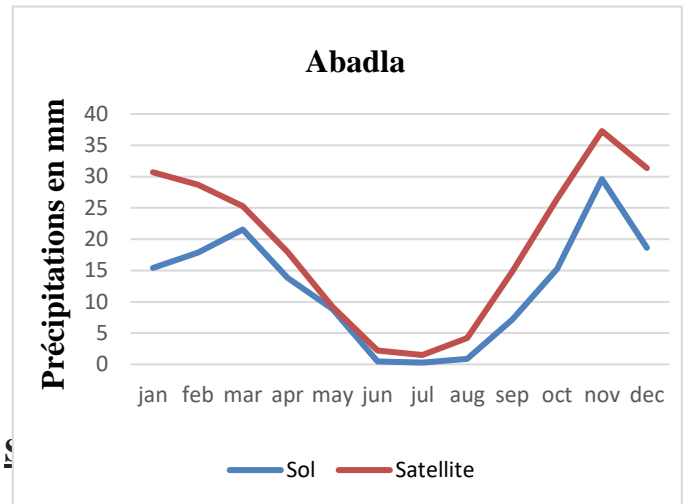
**Figure 13 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station de Chichaoua à l'échelle mensuelle**

### **Station d'Abadla :**

L'analyse des données au niveau de la station météorologique d'Abadla indiquent une tendance générale à la surestimation des précipitations estimées, avec des variations entre les mois. En général, les valeurs estimées de précipitations sont supérieures aux valeurs observées pour la plupart des mois, comme en janvier où la valeur estimée est d'environ 30,7 tandis que la valeur observée est d'environ 15,4. De même, les mois août, septembre, octobre, novembre et décembre montrent des valeurs observées inférieures aux valeurs estimées (Fig. 17 et 18).

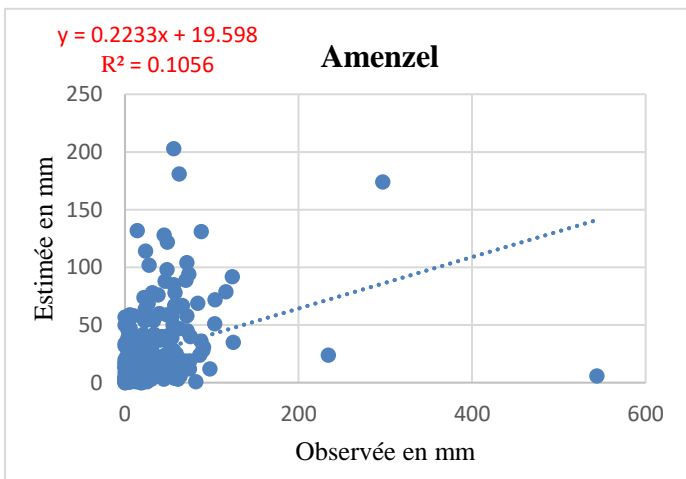


**Figure 16 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Abadla à l'échelle mensuelle**

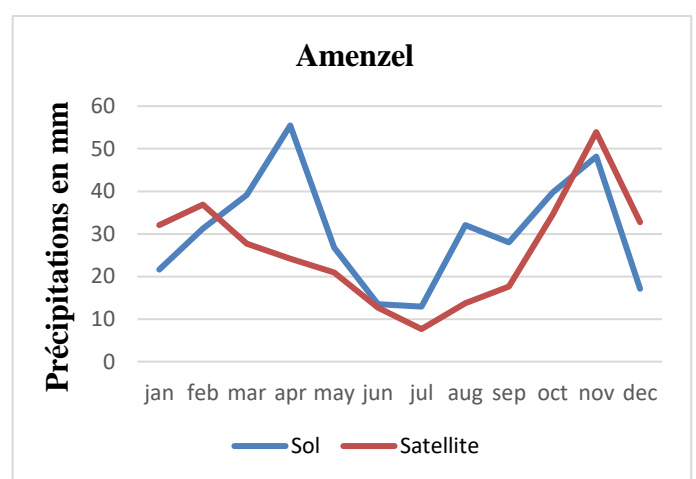


**Figure 15 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station de Abadla à l'échelle mensuelle**

Les figures ci-dessous, illustrent la comparaison entre les données observées et les données estimées pour la station d'Amenzel, en fonction des mois. Une observation importante est l'absence de parallélisme entre les deux courbes. De mars à octobre, les données observées dépassent les données estimées. En d'autres termes, les mesures réelles des précipitations pendant cette période sont généralement plus élevées que les estimations fournies par les données satellitaires. Cette différence suggère une certaine inexactitude ou un écart entre les données observées sur le terrain et les estimations basées sur les satellites (Fig. 19 et 20).



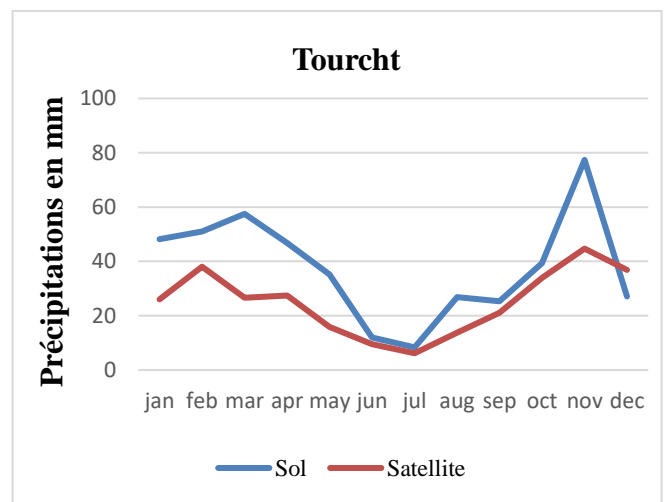
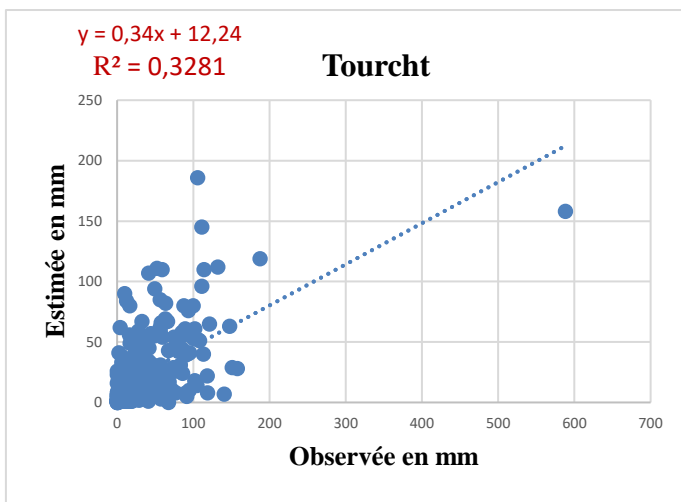
**Figure 18 : Graphe du coefficient de détermination de la station d'Amenzel à l'échelle mensuelle**



**Figure 17 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station d'Amenzel à l'échelle mensuelle**

### Station de Tourcht :

Les figures ci-dessous représentent les données observées et les données estimées en fonction des mois au niveau de la station de Tourcht. On remarque un grand écart entre les données observées et les données estimées durant toute la période d'étude surtout dans le mois de novembre où la valeur estimée atteint que 45 mm, alors que la valeur mesurée est d'environ 80 mm ce qui indique une sous-estimation pour les données satellitaires par rapport aux données observées (Fig. 21 et 22).

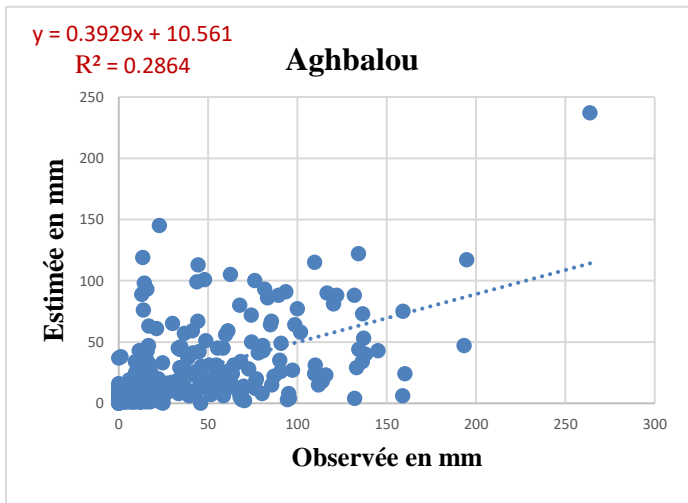


**Figur21: Graphe du coefficient de détermination de la station de Tourcht à l'échelle mensuelle**

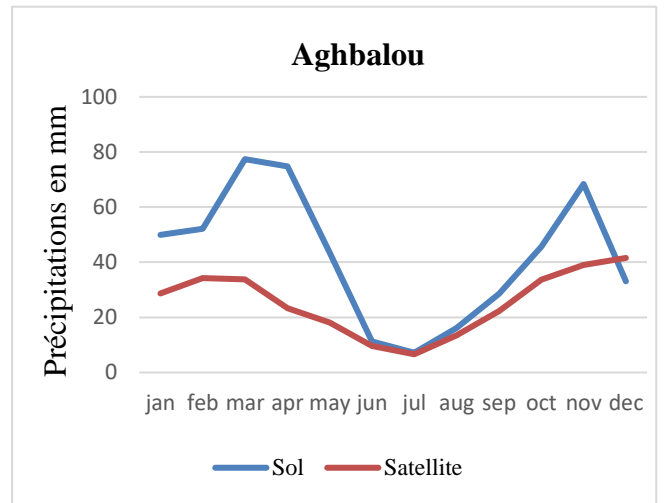
**Figure 22 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station de Tourcht à l'échelle mensuelle**

### Station d'Aghbalou

L'analyse des données au niveau de la station météorologique d'Aghbalou permet d'observer des variations significatives entre les données observées et estimées. Par exemple, en janvier, les précipitations moyennes observées s'élèvent à 49,92 mm, tandis que les estimations moyennes sont de 28,68mm. Cette différence indique que les estimations sous-estiment les précipitations réelles pour ce mois. De manière similaire, pour les mois de février, mars et novembre, les précipitations observées sont également supérieures aux estimations, montrant une tendance générale de sous-estimation des précipitations par les estimations.



**Figure 20 : Graphe du coefficient de détermination de la station d'Aghbalou à l'échelle mensuelle**



**Figure 19 : Courbe de confrontation des données observées et les données estimées de la station d'Aghbalou à l'échelle mensuelle**

## 2. Résultats annuelles :

### 2.1 Analyse du graphe des indices statistiques à l'échelle annuel :

Le graphique ci-dessous présente de manière complète les valeurs des indices statistiques dans les différentes stations pluviométriques sur une période étendue de 20 ans. Cette analyse approfondie permet de visualiser en détail l'évolution annuelle des précipitations, mettant en évidence les variations et les tendances sur une longue durée (Fig. 25).

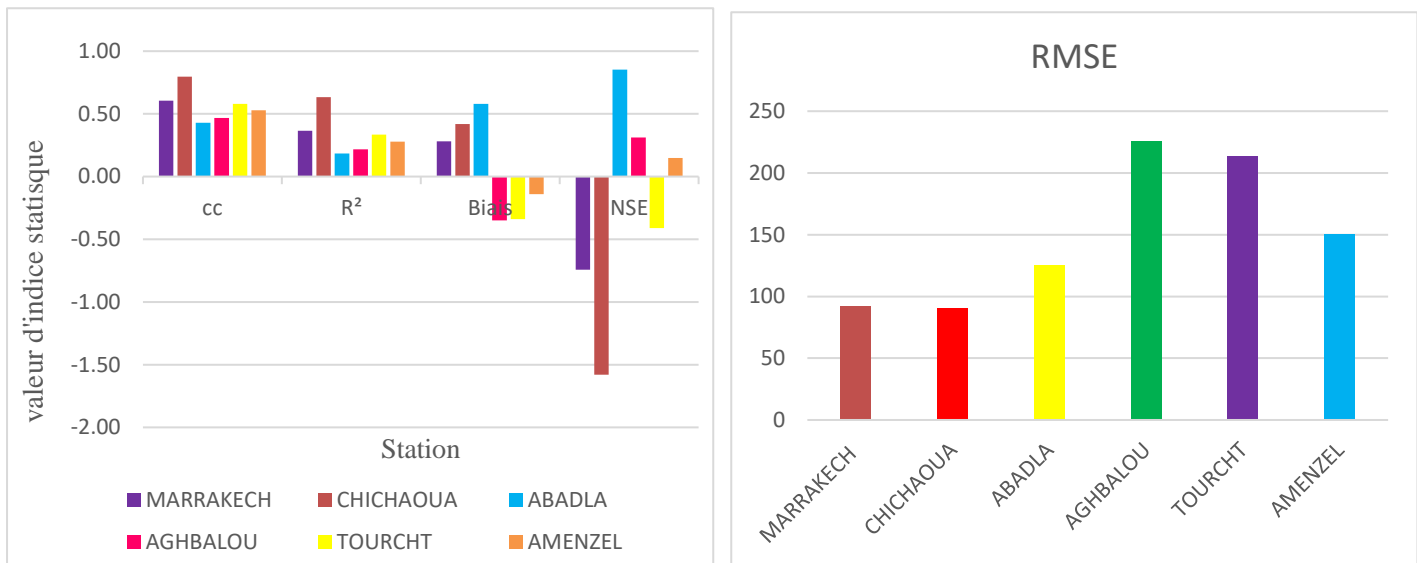


Figure 21 : Graphes des indices statistiques annuels pour chaque station à l'échelle annuelle

Les résultats de la simulation pour les différentes stations météorologiques fournissent des indications sur la corrélation entre les données simulées et les données observées, ainsi que sur la performance globale de la simulation. Pour la station de Marrakech, il existe une corrélation modérée entre les données simulées et les données observées, mais avec une tendance à surestimer les valeurs. La simulation présente une performance relativement faible, avec une erreur importante et une précision inférieure à la moyenne des observations. De même, la station de Chichaoua montre une corrélation forte entre les données simulées et observées, mais également une tendance à la surestimation. Bien que le coefficient de détermination soit relativement élevé, la performance globale de la simulation est faible, avec une erreur quadratique moyenne élevée et une précision inférieure à la moyenne des observations. La station d'Abadla présente une corrélation faible entre les données simulées et observées, avec une tendance à surestimer les valeurs. La performance globale de la simulation est relativement bonne avec une efficacité de simulation Nash-Sutcliffe positive, mais l'erreur quadratique

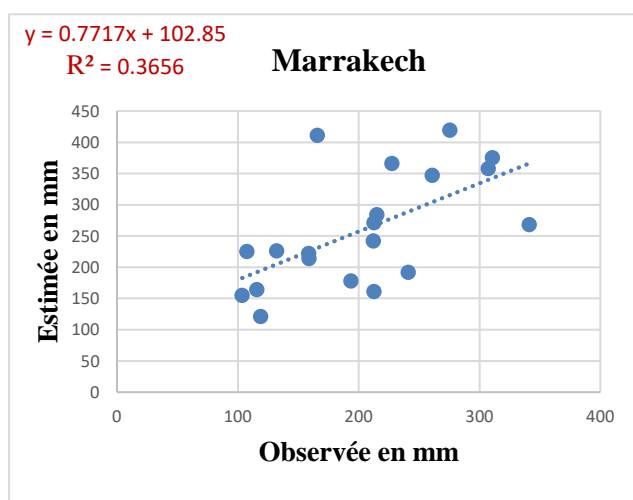
moyenne élevée indique une dispersion importante des erreurs. La station d'Aghbalou montre une corrélation modérée avec une tendance à la sous-estimation. Bien que le coefficient de détermination soit relativement faible, la performance globale de la simulation est acceptable avec une efficacité de simulation Nash-Sutcliffe positive. Cependant, l'erreur quadratique moyenne élevée indique une dispersion importante des erreurs. Enfin, pour la station de Tourcht, les résultats indiquent une corrélation modérée avec une tendance à la sous-estimation. Le coefficient de détermination est relativement faible et l'erreur quadratique moyenne élevée souligne la dispersion importante des erreurs. L'efficacité de simulation Nash-Sutcliffe est négative, ce qui indique que des améliorations sont nécessaires pour obtenir une meilleure concordance entre les données simulées et observées. De même, la station d'Amenzel montre une corrélation modérée avec une tendance à la sous-estimation. Bien que l'efficacité de simulation Nash-Sutcliffe soit positive, elle reste faible, suggérant une possible amélioration de la précision de la simulation par des ajustements ou des améliorations de la méthode utilisée.



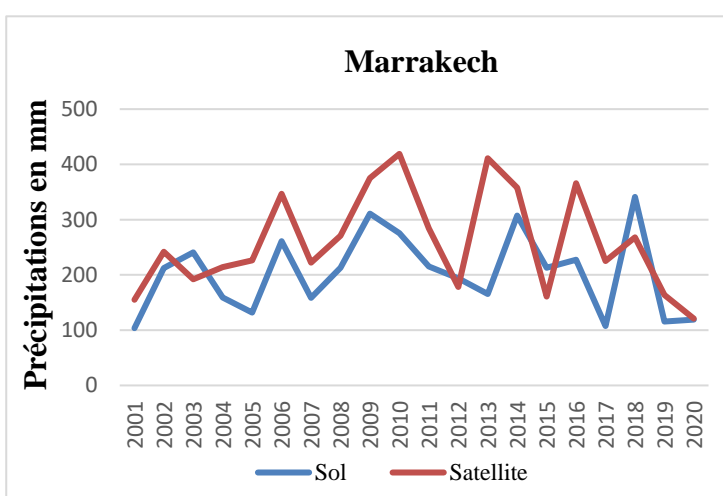
## 2.2 Analyse des résultats annuels pour chaque station :

### Station de Marrakech :

Les graphes ci-dessous (Fig 26 et 27), montrent la surestimation des données satellitaires avec un faible écart les données estimées et les données observées, la faible capacité du satellite à respecter les variations des régimes de précipitation, ainsi, à bien noter, qu'on observe un parallélisme entre les deux courbes sur une période de 4 ans (2005-2009).



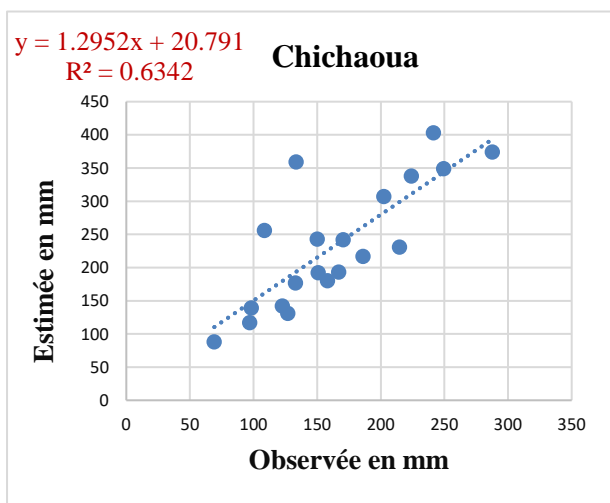
**Figure 22 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Marrakech à l'échelle annuelle**



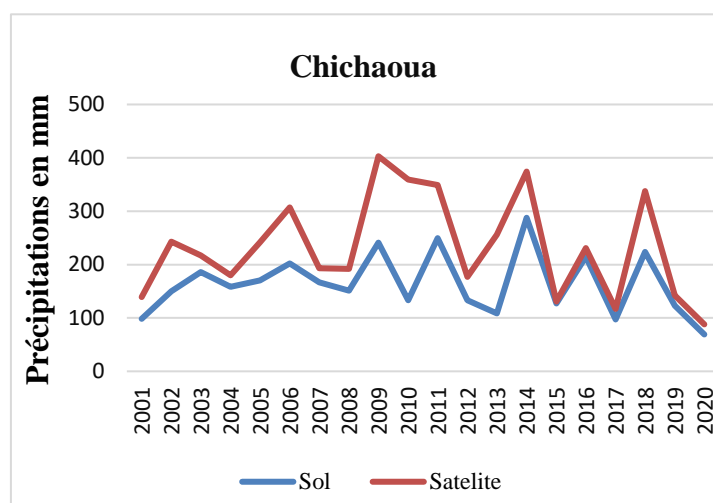
**Figure 23 : Courbe de confrontation des données observées et les données estimées de la station de Marrakech à l'échelle annuelle**

### Station de Chichaoua :

D'après ces figures on observe un parallélisme dans la plupart de la période étudiée, entre les données estimées et les données observées avec un écart moyen sauf entre 2008 et 2011 où on remarque un grand écart, durant cette période les valeurs estimées atteignent jusqu'à 400 mm alors que les valeurs observées n'arrivent qu'à 250 mm, ce qui indique qu'il y a surestimation des données satellitaires (Fig. 28 et 29).



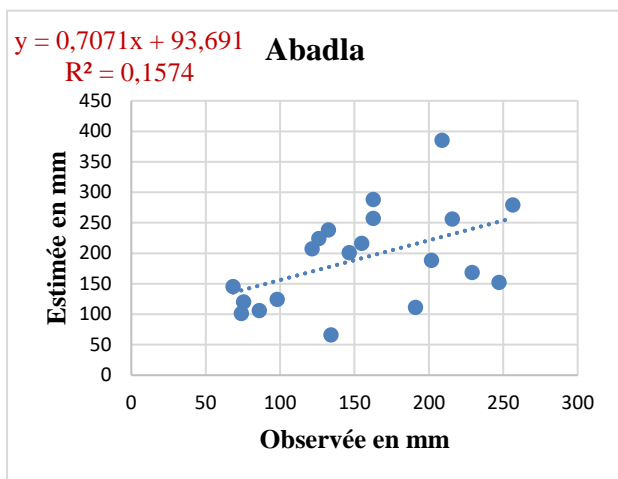
**Figure 25 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Chichaoua à l'échelle annuelle**



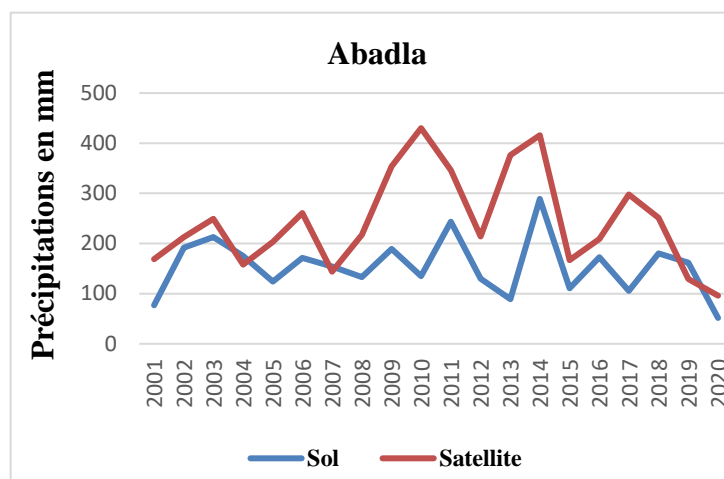
**Figure 24 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées à la station de Chichaoua à l'échelle annuelle**

### **Station d'Abadla :**

En examinant les données, certaines tendances peuvent être observées. Par exemple, en 2001, les précipitations observées étaient de 77,1 mm, mais selon les estimations, elles étaient beaucoup plus élevées à 169 mm. Cette disparité peut s'expliquer par les limites des méthodes de mesure terrestres par rapport aux observations satellitaires plus globales. Au fil des années, les variations entre les données observées et estimées se poursuivent. Parfois, les données observées sont supérieures aux estimations, comme en 2003, où les précipitations observées étaient de 213,1 mm par rapport aux estimations de 249 mm. Cependant, dans d'autres cas, les estimations dépassent les données observées, comme en 2011, où les précipitations observées étaient de 243,39 mm, tandis que les estimations étaient de 346 mm (Fig. 30 et 31).



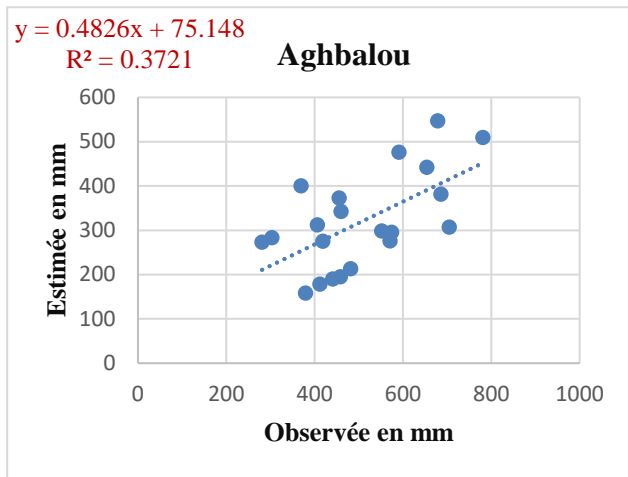
**Figure 27 : Graphe du coefficient de détermination de la station d'Abadla à l'échelle annuelle**



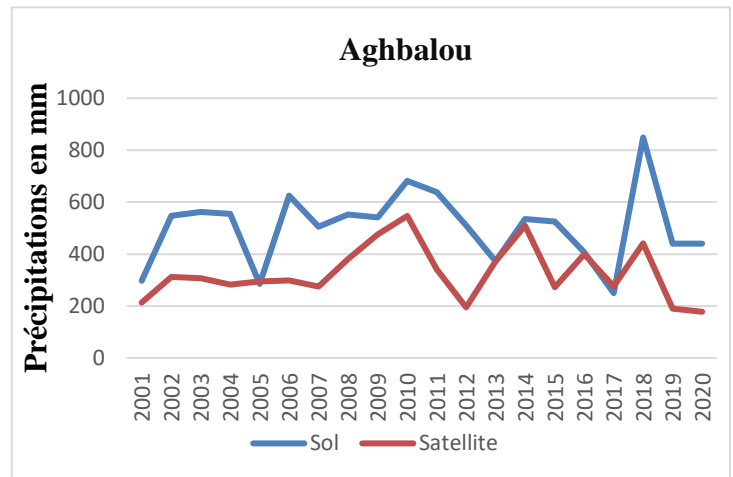
**Figure 26 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station d'Abadla à l'échelle annuelle**

**Station d'Aghbalou :**

D'après les graphes, on peut observer des fluctuations des niveaux de précipitations au fil des ans. Par exemple, en 2001, les précipitations observées étaient de 297,4 mm, tandis que la valeur estimée était de 213 mm. Cela suggère une possible sous-estimation. De même, en 2002, les précipitations observées étaient de 547 mm, nettement supérieures à la valeur estimée de 312 mm. Au fil des ans, il y a des cas où les valeurs observées et estimées sont relativement proches, comme en 2013 où les précipitations observées étaient de 371,9 mm, proches de la valeur estimée de 373 mm (Fig. 32 et 33).



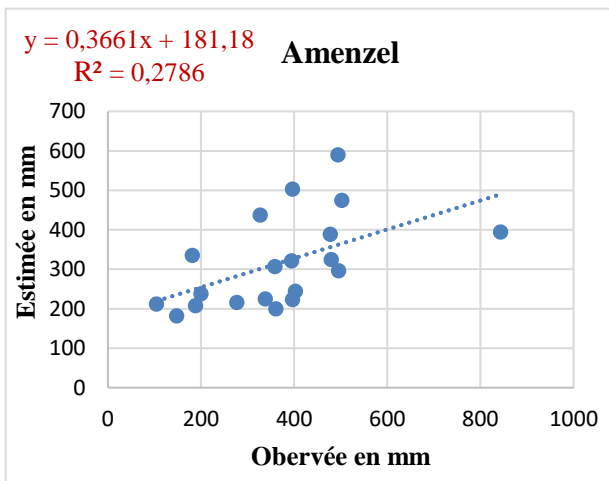
**Figure 29 : Graphe du coefficient de détermination de la station d’Aghbalou à l’échelle annuelle**



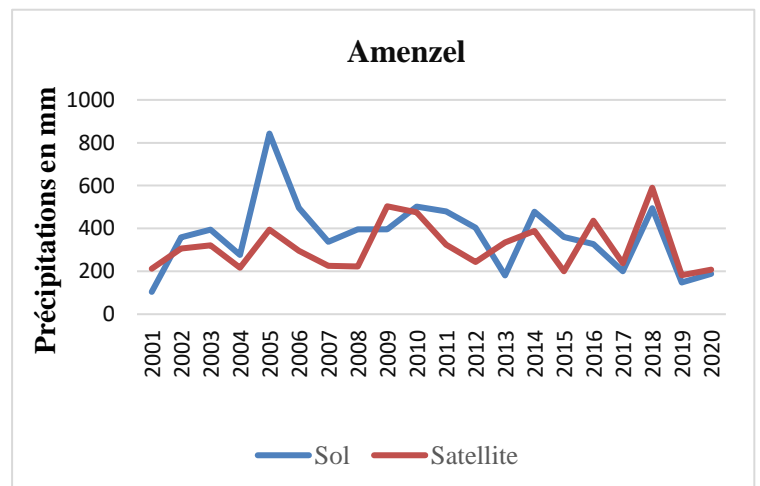
**Figure 28 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station d’Aghbalou à l’échelle annuelle**

**Station d’Amenzel :**

On remarque d’après les figures ci-dessus, une petite différence entre les données observées et les données estimées sauf pendant 2006, où les données observées arrivent à une valeur de 810mm pour les données observées et 400mm pour les données estimées, à bien noter, la capacité du satellite à respecter la variations du régime des précipitations (Fig. 34 et 35).



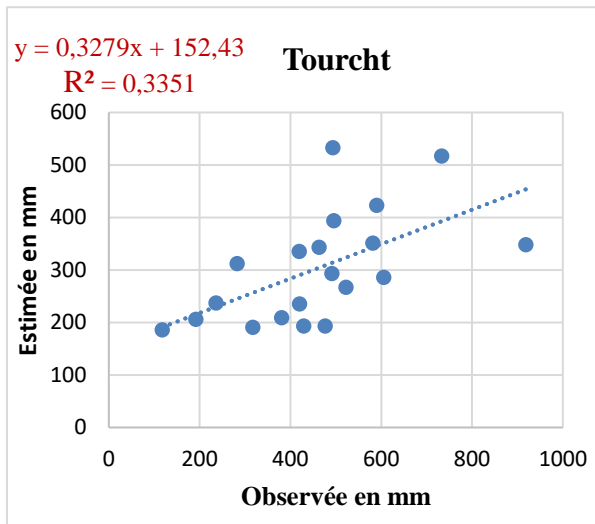
**Figure 30 : Graphe du coefficient de détermination de la station d’Amenzel à l’échelle annuelle**



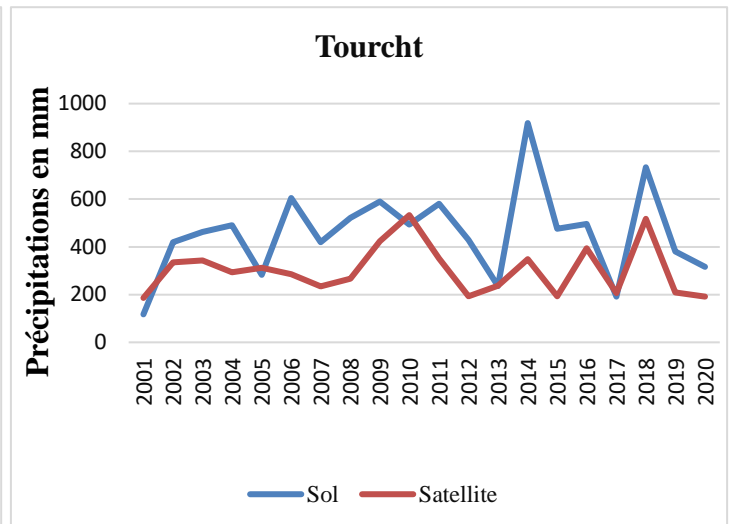
**Figure 31 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station d’Amenzel à l’échelle annuelle**

## Station de Ttourcht :

Les figures ci-dessus représentent au total de grands écarts entre les données observées et estimées, surtout à 2014, la valeur observée atteint jusqu'à 900mm et que 300mm pour la valeur estimée, aussi à 2007, il y a une différence de 80 mm entre les données observées et estimées. En général, il y a une sous-estimation des données satellitaires avec une moyenne capacité de respecter la variation des régimes de précipitations (Fig. 36 et 37).



**Figure 36 : Graphe du coefficient de détermination de la station de Ttourcht à l'échelle annuelle**



**Figure 37 : Courbe de la confrontation des données observées et les données estimées de la station de Ttourcht à l'échelle annuelle**

## VIII. Conclusion :

En analysant les résultats pour différentes stations météorologiques, il est possible de déterminer les meilleures performances en termes d'estimations des précipitations, tant à l'échelle annuelle qu'à l'échelle mensuelle.

Les résultats de l'analyse mensuelle des différentes stations météorologiques révèlent des corrélations variables entre les données de précipitations satellites et les mesures terrestres. La station d'Aghbalou présente une corrélation modérée, même que la station de Tourcht qui montre également une corrélation moyenne, mais avec une légère sous-estimation des précipitations. En revanche, la station d'Abadla affiche une forte corrélation, mais surestime les précipitations. Pour les stations de Chichaoua et Marrakech, les résultats sont encourageants avec une corrélation positive modérée à forte, une précision élevée, mais des possibilités d'amélioration pour réduire les biais. Enfin, la station d'Amenzel présente une corrélation faible, sous-estime les précipitations et montre une faible efficacité à reproduire les mesures réelles.

À l'échelle annuelle, les simulations montrent des corrélations variables entre les données satellitaires et au sol. La station de Marrakech et celle de Chichaoua affichent une corrélation modérée, mais surestimations des données satellitaire, avec une performance globale relativement faible. La station d'Abadla présente une corrélation faible, mais une performance globale relativement bonne. La station d'Aghbalou montre une corrélation modérée avec une tendance à la sous-estimation, et une performance globale acceptable. Pour la station de Tourcht et d'Amenzel, la corrélation est modérée avec une tendance à la sous-estimation. Des améliorations sont nécessaires pour obtenir une meilleure concordance entre les données simulées et observées.

En résumé, les résultats soulignent que les données satellitaires présentent des corrélations variables avec les mesures terrestres des précipitations. Les estimations des précipitations sont généralement précises, mais peuvent surestimer ou sous-estimer les valeurs réelles selon les stations. Des améliorations sont nécessaires pour réduire les biais, améliorer la concordance avec les observations réelles et augmenter la performance globale des simulations.

## IX. Recommandations :

Dans le cadre de notre étude sur les estimations des précipitations, nous avons conclu que l'utilisation combinée des données satellitaires et des mesures au sol permet d'obtenir une évaluation plus complète et précise des précipitations. Sur la base de cette conclusion, nous

formulons les recommandations suivantes pour améliorer la fiabilité et la précision de ces estimations.

**1. Améliorer calage des données :** Il est essentiel de continuer à affiner les techniques du calage des données satellitaires afin de réduire les biais et d'améliorer la qualité des estimations de précipitations. Cela permettra de garantir une meilleure correspondance entre les données prédites et les mesures réelles au sol.

**2. Développer des modèles plus avancés :** Investir dans la recherche et le développement de modèles de prévision des précipitations plus sophistiqués afin d'améliorer leur capacité à expliquer les variations observées. Cela contribuera à renforcer la précision des estimations et à mieux comprendre les schémas de précipitations.

**3. Encourager l'intégration des données :** Favoriser la collaboration entre les fournisseurs de données satellitaires et les organismes responsables des mesures au sol pour faciliter l'intégration des deux sources de données. Cela permettra d'obtenir une évaluation plus complète des précipitations et d'optimiser la gestion des ressources en eau.

**4. Cependant, il est important de reconnaître que notre travail et notre analyse actuels ne sont pas suffisants pour fournir une compréhension complète des estimations des précipitations. Il est nécessaire de poursuivre les recherches et d'approfondir notre étude pour obtenir des résultats plus approfondis et précis. Des analyses supplémentaires, des tests de validation croisée et des comparaisons avec d'autres sources de données sont nécessaires pour renforcer la robustesse de nos conclusions. De plus, l'étude de différentes régions géographiques est cruciale pour évaluer la variabilité spatiale des précipitations et comprendre les facteurs locaux qui influencent les modèles de précipitations. En élargissant notre champ d'étude, nous pourrions ainsi accroître la généralisation de nos résultats et mieux appréhender les complexités des estimations des précipitations à l'échelle mondiale.**

En suivant ces recommandations, nous pourrions bénéficier d'une évaluation plus précise des précipitations, ce qui est essentiel pour une gestion efficace des ressources en eau et une prise de décision éclairée dans notre région d'étude.

## Annexes

Tableau : Coordonnées des stations pluviométriques étudiées

<b>STATIONS</b>	<b>Longitude</b>	<b>Latitude</b>	<b>Altitude(m)</b>	<b>Pluviométrie moyenne par an durant la période 2001-2020 (mm)</b>
<b>AGHBALOU</b>	-7.74	31.31	1070	506,095
<b>AMENZEL</b>	-7.72	31.17	2230	368,205
<b>TTOURCHT</b>	-7.63	31.23	1650	457,995
<b>CHICHAOUA</b>	-8.56	31.71	340	164,535
<b>ABADLA</b>	-8.75	31.54	250	154,857
<b>MARRAKECH</b>	-8.03	31.55	460	203,565



Valeurs des indices statistiques :

<b>STATIONS</b>	<b>Date</b>	<b>COEF.CORRE.</b> <b>(r)</b>	<b>RMSE</b>	<b>BIAIS</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NASH</b>
<b>Marrakech</b>	Mensuelle	0,66	5	0,29	0,44	0,39
	Annuelle	0,60	91,79	0,28	0,37	-0,74
<b>Chichaoua</b>	Mensuelle	0,74	1,95	0,4	0,55	0,07
	Annuelle	0,80	90,20	0,42	0,63	-1,58
<b>Abadla</b>	Mensuelle	0,71	2,35	0,6	0,5	-0,33
	Annuelle	0,43	124,83	0,58	0,18	0,85
<b>Aghbalou</b>	Mensuelle	0,53	7,01	-0,36	0,28	0,13
	Annuelle	0,47	225,26	-0,35	0,22	0,31
<b>Tourcht</b>	Mensuelle	0,57	5,1	-0,34	0,1	0,26
	Annuelle	0,58	213,72	-0,34	0,34	-0,41
<b>Amenzel</b>	Mensuelle	0,33	3,78	-0,14	0,1	0,03
	Annuelle	0,53	150,07	-0,14	0,28	0,15

**Station de Chichaoua :**

**Annuel :**

DATE	Observée	Satellite
2001	98.3	139
2002	150.1	243
2003	186.1	217
2004	158.1	180
2005	170.5	242
2006	202.4	307
2007	167	193
2008	150.9	192
2009	241.3	403
2010	133.3	359
2011	249.4	349
2012	132.9	177
2013	108.4	256
2014	287.7	374
2015	126.9	131
2016	214.7	231
2017	96.9	117
2018	224	338
2019	122.7	142
2020	69.1	88

**Mensuel :**

DATE	Observée	Satellite
jan	17.9	24.2380952
feb	21.58571429	28.5238095
mar	22.355	28.85
apr	15.725	20.35
may	6.805	8.3
jun	2.16	3.3
jul	1.215	1.6
aug	1.32	4.2
sep	8.557142857	12.1428571
oct	12.88571429	19.9047619
nov	34.38095238	42.5714286
dec	19.53809524	35.5714286

**Station d'Aghbalou :****Annuel :**

DATE	Observée	Satellite
2001	297.4	213
2002	547	312
2003	562.8	307
2004	555.1	283
2005	284.9	295
2006	625.4	298
2007	505.5	275
2008	552.6	381
2009	541	476
2010	682	547
2011	639.2	342
2012	510.3	195
2013	371.9	373
2014	534.7	509
2015	525	273
2016	407.2	400
2017	249.8	276
2018	849	442
2019	440.6	190
2020	440.5	178

**Mensuel :**

DATE	Observée	Satellite
jan	49.92380952	28.6818182
feb	52.09047619	34.2727273
mar	77.39047619	33.8181818
apr	74.8047619	23.3181818
may	43.41428571	18.1363636
jun	11.18571429	9.59090909
jul	7.147619048	6.59090909
aug	16.12857143	13.4545455
sep	28.49047619	22.2272727
oct	45.58571429	33.6363636
nov	68.39047619	39.0454545
dec	33.04285714	41.5454545

**Station d'Abadla :****Annuel :**

DATE	Observée	Satellite
2001	77.1	169
2002	191.8	213
2003	213.1	249
2004	175	158
2005	124	203
2006	171.6	261
2007	154.2	144
2008	132.9	217
2009	189.2	354
2010	135.2	430
2011	243.39	346
2012	130	214
2013	89.1	376
2014	288.95	416
2015	110.7	167
2016	172.3	209
2017	105.4	298
2018	180.1	251
2019	161.5	129
2020	51.6	96

**Mensuel :**

DATE	Observée	Satellite
jan	15.41666667	30.6818182
feb	17.84285714	28.6818182
mar	21.54285714	25.2727273
apr	13.82380952	17.9545455
may	8.861428571	9.22727273
jun	0.461904762	2.18181818
jul	0.285714286	1.5
aug	0.866666667	4.18181818
sep	7.147619048	14.8181818
oct	15.26190476	26.4545455
nov	29.6	37.2727273
dec	18.64285714	31.3636364

**Station de tourcht:****Annuel :**

DATE	Observée	Satellite
2001	117.2	186
2002	419.2	335
2003	463	343
2004	490.8	293
2005	282.1	312
2006	605	286
2007	420.1	235
2008	522	267
2009	590	423
2010	493	533
2011	581.1	351
2012	429.2	193
2013	235.5	237
2014	918.5	348
2015	476.4	193
2016	495.4	394
2017	191.5	206
2018	733	517

**Mensuel :**

DATE	Observée	Satellite
JAN	48.13333333	25.95238095
FEV	51.05238095	38.04761905
MAR	57.525	26.65
AVR	46.765	27.45
MAI	35.15	15.85
JUI	11.935	9.55
JUIL	8.33	6.15
AOUT	26.87	13.8
SEP	25.33333333	21
OCT	39.2952381	33.85
NOV	77.36666667	44.7
DEC	27.01904762	36.85

**Station d'Amenzel :**

**Annuel :**

DATE	Observée	Satellite
2001	104	212
2002	358.5	307
2003	394.5	321
2004	276.9	216
2005	842.9	394
2006	495.4	296
2007	338	225
2008	396.5	223
2009	396.6	503
2010	502.3	475
2011	479.7	325
2012	402.8	244
2013	181.4	335
2014	477.8	389
2015	360.6	200
2016	326.6	437
2017	199.6	238
2018	494.3	590
2019	147.3	182
2020	188.4	208

**Mensuel:**

DATE	Observée	Satellite
jan	21.6047619	32.0952381
fev	31.2190476	36.8571429
mar	39.165	27.7
avr	55.47	24.2
mai	26.845	20.95
jui	13.51	12.65
juil	12.925	7.65
aout	32.085	13.7
sep	28.047619	17.6
oct	39.7047619	34.55
nov	48.147619	53.9
dec	17.0952381	32.75

## Station de Marrakech :

### Annuel :

DATE	Observée	Satellite
2001	103.6	155
2002	212.1	242
2003	241	192
2004	159	214
2005	132.1	226
2006	260.9	347
2007	158.7	222
2008	212.7	271
2009	310.6	375
2010	275.4	419
2011	215	284
2012	193.7	178
2013	165.7	411
2014	307.3	358
2015	212.8	161
2016	227.4	366
2017	107.4	225
2018	341.1	268
2019	115.8	164
2020	119	121

### Mensuel:

DATE	Observée	Satellite
jan	24.01904762	21.2857143
feb	25.3	34.4285714
mar	25.08095238	33.35
apr	20.8	16.8
may	12.20952381	19
jun	2.214285714	4.4
jul	2.271428571	3.2
aug	6.7	5.65
sep	12.74761905	21.8095238
oct	13.71428571	31.7142857
nov	35.35238095	34.0952381
dec	20.88095238	34.047619

## Référence bibliographique :

- BENNOUNA, A. (2020). Gestion de l'eau au Maroc et changement climatique. *Espace Géographique et Société Marocaine*, (32). (pp10)
- Kouki, S. (2022). Valorisation de la précipitation satellitaire pour l'amélioration de la modélisation et de la prévision hydrologique (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke). (pp.168).
- GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.
- Sebbar, A., Hsaine, M., Fougrach, H., & Badri, W. (2013). Carte des précipitations annuelles au Maroc (1935/2006). In Actes du 26ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Cotonou (pp. 37-43).
- Driouech, F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique: descente d'échelle et incertitudes (Doctoral dissertation) (pp.164).
- MICHOT V., (2017). Analyse spatiale et temporelle de la variabilité des régimes de précipitations dans le bassin amazonien. Géographie. Université Rennes 2, 2017. Français (pp.219)
- Tramblay, Y., Thiemig, V., Dezetter, A., & Hanich, L. (2016). Evaluation of satellite-based rainfall products for hydrological modelling in Morocco. *Hydrological Sciences Journal*, (pp.12)
- BROCHART D., ANDREASSIAN V., (2017). Correction des estimations des pluies par satellite pour les bassins versants de Guyane française. *Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer*, 2014, 60 (2), pp.361-370. hal-01504441
- RESSA B., CHADI H., (2010). Gestion de barrage de LALLA TAKERKOUST. Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech. (pp.70).
- Najmi, A., Igmoullan, B., Namous, M., El Bouazzaoui, I., Brahim, Y. A., El Khalki, E. M., & Saidi, M. E. M. (2023). Evaluation of PERSIANN-CCS-CDR, ERA5, and SM2RAIN-ASCAT rainfall products for rainfall and drought assessment in a semi-arid watershed, Morocco. *Journal of Water and Climate Change*, 14(5), 1569-1584. (pp.16)



- Rachdane, M., Khalki, E. M. E., Saidi, M. E., Nehmadou, M., Ahbari, A., &Tramblay, Y. (2022). Comparison of High-Resolution Satellite Precipitation Products in Sub-Saharan Morocco. *Water*, 14(20), 3336. (pp21)
- Benkirane, M., Laftouhi, N. E., Khabba, S., & El Mansouri, B. (2021). Multiscale assessment of TRMM (3B42 V7) and GPM (IMERG V5) satellite precipitation products over a Mediterranean mountainous watershed with sparse rain gauges in the Moroccan High Atlas (case study of Zat basin). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. (pp.18).
- Habitou, N., Morabbi, A., Ouazar, D., Bouziane, A., Hasnaoui, M. D., &Sabri, H. (2020). CHIRPS precipitation open data for drought monitoring: Application to the Tensift basin, Morocco. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(3), 034526-034526.(pp19)
- Tanouti, O., &Molle, F. (2013). Réappropriations de l'eau dans les bassins versants surexploités. Le cas du bassin du Tensift (Maroc). *Études rurales*, (192), 79-96.(pp19)
- Khomsî, K. (2014). Variabilité hydroclimatique dans les bassins versants du Bouregreg et du Tensift au Maroc: moyennes, extrêmes et projections climatiques. (pp.218).
- Pascon, P. (1986). *Capitalism and Agriculture in the Haouz of Marrakesh*. Taylor & Francis. (pp.248).
- Boudhar, A. (2009). Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des Oueds du Haut Atlas de Marrakech. *Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech*. (pp : 232)
- Hajhouji, Y. (2018). *Modélisation hydrologique du bassin versant de l'oued Rheraya et sa contribution à la recharge de la nappe du Haouz (bassin du Tensift, Maroc)* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).(pp :176)
- DUTOUR A., FERRANDINI J. (1985). Nouvelles observations néotectoniques dans le Haut Atlas de Marrakech et le Haouz central (Maroc). Apport sur l'évolution récente d'un segment du bâti atlasique. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 26(5) pp : 286-297

Ambroggi, R., &Thuille, G. (1952). Haouz de Marrakech. Hydrogéologie du Maroc. Notes et mémoires du Service Géologique du Maroc. (pp : 97.)

OUANAIMI H., SOULAIMANI A. (2011). Circuit C5, Anti-Atlas central. In: Nouveaux guides géologiques et miniers du Maroc. Vol.3, (A. Michard, H. Ouanaimi and A. Soulaïmani, eds). Notes Mém. Serv. Géol. Maroc, 558 pp : 73–122.

HUVELIN, P. (1973) Mouvements pré-atlasiques et récents dans les Jbilet et sur leurs pourtours. Notes du Service Géologique du Maroc, t.33, N°249, pp : 83-123.

Sinan, M. (2000). Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par couplage des SIG, de la géophysique et de la géostatistique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc) (Doctoral dissertation, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs).(pp.393).

MOUKHCHANE, M. (1983) Contribution à l'étude des réservoirs profonds de la bordure nord de l'Atlas entre Demnate et Imintanoute (Maroc). Thèse de doctorat, Besançon. Pp : 119.

### **Webographie :**

- <https://www.eau-tensift.net>
- <https://www.iceye.com/satellite-data>
- <https://trmm.gsfc.nasa.gov/>
- <https://gpm.nasa.gov/missions/two-decades-imerg-resources>
- <https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/precipitationcmorph>
- <https://www.watres.com/CHIRPS/>
- <https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-datarecords/precipitationpersiann>
- <https://boowiki.info/art/les-ratios-statistiques/erreur-quadratique-moyenne.html>