

Mémoire de Fin d'Etudes

Licence Sciences et Techniques

Filière : **Eau & Environnement**

**Validation des produits satellitaires d'estimation
des précipitations au niveau de la zone d'action
de l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift, Marrakech**

Par :

DAOUAJI Ghariba

AMEGDOUL Ibtissam

AHSAINI Nour El Houda

Dirigées par :

Mohamed Elmehdi SAIDI

Intissar ABOUNKI

Mariame RACHDANE

Soutenu le 19/06/2023 devant la commission d'examen composée de :

Pr. **M. E. SAIDI**

Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

Ing. **I. ABOUNKI**

Agence de Bassin Hydraulique de Tensift, Marrakech

Pr. **J. MOUSTADRAF**

Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

Dédicace

Nous dédions ce mémoire :

A nos Pères, nos Mères, nos Sœurs et nos Frères.

A tous nos meilleurs amis

**A tous ceux qui représentent beaucoup pour nous et
qui nous aiment très fort**

**A tous ceux qui sont pour nous une source
d'encouragement et de soutien, qu'ils voient dans ce
travail la récompense de leurs endurance et de leurs
nombreux sacrifices.**

Remerciements

L'accomplissement du présent travail n'a été possible qu'avec le soutien d'Allah et de certaines personnes. Nous voudrions, en premier lieu nous remercier notre encadrant **M. Mohamed Elmehdi Saidi** qui a accepté de diriger nos travaux durant ces deux mois de stage, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son suivi durant toute la période de notre stage.

Nos remerciements vont également à notre encadrante externe à l'ABHT **Madame Intissar Abounki**, qui fut la première à nous faire découvrir le sujet et qui a guidé notre mémoire, pour sa gentillesse, sa modestie, sa riche expérience et l'accueil cordial qu'elle nous a toujours réservé.

Nous tenons aussi à témoigner toute notre reconnaissance à notre co-encadrante interne **Mariame Rachdane** pour son effort et son temps à nous initier à la partie pratique de notre sujet.

Nos vifs remerciements vont également au membre du jury Mr. **Moustadraf Jalal** qui a consacré son temps et son attention afin d'évaluer notre travail.

Nous remercions également toute l'équipe de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift pour leur accueil et leur assistance.

Nos remerciements vont enfin à toutes personnes qui nous a, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, permis, par leur collaboration, leur soutien et leur avis judicieux, de mener à bien ce travail.

Sommaire

D E D I C A C E	2
R E M E R C I E M E N T S	3
R E S U M E	6
T A B L E S D E S F I G U R E S :	7
T A B L E S D E S T A B L E A U X :	8
T A B L E S D E S A B R E V I A T I O N S :	9
I N T R O D U C T I O N	10
P A R T I E I : E S T I M A T I O N D E S P R E C I P I T A T I O N S P A R S A T E L L I T E	12
1- Les systèmes d'observation des précipitations :	12
a) Les systèmes d'observation au sol :	12
b) Les systèmes d'observation depuis l'espace :	13
2- Principe d'estimation des précipitations par satellite :	15
3- Les produits courants d'estimation des précipitations par satellite :	15
a) The Tropical Rainfall Measuring Mission 'TRMM' (TMPA):	15
b) Climate Hazards center InfraRed Precipitation with Station data 'CHIRPS':	16
c) PERSIANN CCS-CDR :	16
d) Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurements 'IMERG (GPM)':	17
P A R T I E I I : M A T E R I E L S E T M E T H O D E S	19
1- Zone d'étude :	19
a) Situation géologique et géographique :	19
b) Climatologie :	20
c) Hydrologie :	21
2- Présentation des données utilisées :	21
a) Réseau d'observation au sol :	21
b) Données estimées par satellites des précipitations :	22
3- Traitement des données :	23
a) Coefficient de corrélation 'r' :	23
b) Biais :	24
c) ME (erreur moyenne)	24
d) MAE (erreur absolue moyenne)	24
e) RMSE (erreur quadratique moyenne)	24
P A R T I E I I I : R E S U L T A T S D E T R A I T E M E N T	25
1- Résultats du traitement avec le produit IMERG(GPM) Final :	25
a) IMERG GPM-F en montagne :	26
b) IMERG GPM-F en plaine :	32
c) IMERG GPM-F en zone côtière :	33

d)	Variation des indicateurs statistiques en fonction de l'altitude :	37
2-	Résultats de traitement avec le produit PERSIANN CCS-CDR :	39
a)	PERSIANN CCS-CDR en montagne :	41
b)	PERSIANN CCS-CDR en plaine :	45
c)	PERSIANN CCS-CDR en zone côtière :	46
d)	Les indicateurs statistiques en fonction d'altitude :	53
3-	Comparaison des résultats d'évaluation de IMERG GPM-F et PERSIANN CCS-CDR :	55
PARTIE IV: DISCUSSION		57
CONCLUSION		59
BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE		60

Résumé

Les précipitations constituent une donnée météorologique essentielle pour alimenter les modèles hydrologiques, qui sont utilisés pour la gestion générale des ressources hydriques. Cependant, leur mesure est complexe en raison de leur variabilité dans l'espace et dans le temps. Afin d'évaluer correctement les ressources en eau, il est primordial de connaître la répartition spatio-temporelle des précipitations, ce qui peut poser un problème majeur compte tenu de la limite du réseau de mesures pluviométriques dans le bassin Tensift. Par conséquent, cette étude se concentre sur l'évaluation des performances de produits satellites à savoir IMERG GPM Final et PERSIANN CCS CDR par rapport aux données des précipitation provenant de dix stations météorologiques dans le bassin versant Tensif, Maroc situées à différentes zones (zone de montagne, plaine et côtière), à différentes altitudes, latitudes et échelles temporelles (journalière, mensuelle et annuelle), sur la période allant du septembre 2000 à aout 2020. Les données ont été comparées et analysées à l'aide de statistiques telles que le coefficient de corrélation r , le biais, ME, MAE et RMSE. Les résultats montrent que la performance des produits satellitaires dépend des variations d'altitudes, saisons et du régime hydro climatique à l'échelle de pixel de chaque satellite. Le GPM-F est le plus performant et le plus fiable en ce qui concerne sa capacité à simuler la précipitation dans le bassin et plus spécifiquement dans les zones de plaine et côtière . Cela se manifeste par des taux significatifs pour les différentes statistiques ($r_{\text{moy}} = 0.45$ journalier , Biais : 4.26% (Adamna) , RMSE : 2,66mm/j (journalier à Chichaoua), 2.46mm/j (journalier à Adamna), $r : 0,9$ (mensuel à Adamna et Talmest)). Les meilleures performances ont été attribuées à PERSIANN CCS CDR en haute montagne (Biais : -0.19% (journalier à Amenzel), -11,47 (journalier à Armed) RMSE 5,5mm/j (Amenzel)). L'étude comparative montre également que les deux produits ont une tendance à sous-estimer les évènements intenses ($P > 20\text{mm/j}$) et à surestimer les événements légers ($P < 5\text{mm/j}$).

Mots-clés : IMERG GPM-F, PERSIANN CCSCD, satellite, validation, Tensift.

Tables des figures :

FIGURE 1 : SYSTEMES D'ESTIMATION DE LA PRECIPITATION	12
FIGURE 2: CARTE DE RESEAU D'OBSERVATION CONVENTIONNEL AU MAROC (DMN ET CNP 2019)	13
FIGURE 3: LE SYSTEME OPERATIONNEL MONDIAL D'OBSERVATION PAR SATELLITE.....	14
FIGURE 4: TAUX DES PRECIPITATIONS EN (MM/H) ESTIMES PAR LE PRODUIT TRMM3B42(V6) LE 1 AOUT 2005. ^[14]	16
FIGURE 5: TAUX DES PRECIPITATIONS EN MM/3H ESTIMES PAR LE PRODUIT PERSIANN CCS-CDR LE 59 ^e JOUR DE L'AN 2021 A 3H (UTC) ^[14]	17
FIGURE 6: CARTE GEOGRAPHIQUE DU BASSIN TENSIFT ^[19]	19
FIGURE 7: LA REPARTITION SPATIALE DE CES STATIONS PLUVIOMETRIQUES DANS LE BASSIN DE TENSIFT	22
FIGURE 8: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AMENZEL ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE JOURNALIERE (2000-2020).	27
FIGURE 9: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AMENZEL ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020).	27
FIGURE 10: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AMENZEL ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020).....	28
FIGURE 11: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AGHBALOU ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE JOURNALIER (2000-2020).....	29
FIGURE 12: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AGHBALOU ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020)	29
FIGURE 13: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AGHBALOU ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020).....	30
FIGURE 14: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION ILOUDJANE ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE JOURNALIER (2000-2017).....	30
FIGURE 15: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION ILOUDJANE ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020)	31
FIGURE 16: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION ILOUDJANE ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020).....	31
FIGURE 17: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION MARRAKECH ET LES DONNEES DE GPM-F A L'ECHELLE JOURNALIERE (2000-2020).....	32
FIGURE 18: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION MARRAKECH ET LES DONNEES GPM-F A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020).....	32
FIGURE 19: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION MARRAKECH ET LES DONNEES GPM-F A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020)	32
FIGURE 20: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION TALMEST ET LES DONNEES GPM-F A L'ECHELLE JOURNALIER (2000-2020)	33
FIGURE 21: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION TALMEST ET LES DONNEES GPM-F A L'ECHELLE MENSUEL (2000-2020).....	34
FIGURE 22: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION TALMEST ET LES DONNEES GPM-F A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020)	34
FIGURE 23: CORRELATION ENTRE LES DONNEES OBSERVEES ET LES DONNEES IMERG (GPM) FINAL POUR LA STATION AMENZEL, AGHBALOU, ILOUDAJNE, MARRAKECH ET TALMEST SELON LES TROIS ECHELLES.....	36
FIGURE 24: VARIATION DU R EN FONCTION DE L'ALTITUDE.....	37
FIGURE 25: VARIATION DU BIAIS EN FONCTION D'ALTITUDE.....	38
FIGURE 26: VARIATION DE RMSE EN FONCTION DE L'ALTITUDE	39
FIGURE 27: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AMENZEL ET LES DONNEES DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE JOURNALIERE (2000-2020).....	41
FIGURE 28: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AMENZEL ET LES DONNEES DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020).....	41
FIGURE 29: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AMENZEL ET LES DONNEES DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020)	42

FIGURE 30: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AGHBALOU ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE JOURNALIERE (2000-2020)	42
FIGURE 31: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AGHBALOU ET LES DONNEES DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020).....	43
FIGURE 32: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION AGHBALOU ET LES DONNEES DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020)	43
FIGURE 33: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION ILOUDJANE ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE JOURNALIERE (2000-2017)	44
FIGURE 34: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION ILOUDJANE ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020)	44
FIGURE 35: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION ILOUDJANE ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020).....	45
FIGURE 36: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION MARRAKECH ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE JOURNALIERE (2000-2020).....	45
FIGURE 37: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION MARRAKECH ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020).....	46
FIGURE 38: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION MARRAKECH ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020)	46
FIGURE 39: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION TALMEST ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE JOURNALIERE (2000-2020)	47
FIGURE 40: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION TALMEST ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020)	47
FIGURE 41: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION TALMEST ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020).....	48
FIGURE 42: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION ADAMNA ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE JOURNALIERE (2000-2020)	48
FIGURE 43: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION ADAMNA ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE MENSUELLE (2000-2020)	49
FIGURE 44: VARIATION DES DONNEES OBSERVEES DE LA STATION ADAMNA ET DE PERSIANN CCS-CDR A L'ECHELLE ANNUELLE (2000-2020).....	49
FIGURE 45: CORRELATION ENTRE LES DONNEES PERSIANN CCS-CDR ET LES DONNEES OBSERVEES AU NIVEAU DES STATIONS : AMENZEL, AGHBALOU, ILOUDJANE, MARRAKECH, TALMEST ET ADAMNA SELON LES TROIS ECHELLES.....	52
FIGURE 46: VARIATIONS DE R EN FONCTION DE L'ALTITUDE	53
FIGURE 47: VARIATIONS DE BIAIS EN FONCTION DE L'ALTITUDE	54
FIGURE 48: VARIATIONS DE RMSE EN FONCTION DE L'ALTITUDE.....	54
FIGURE 49: COMPARAISON DES INDICATEURS STATISTIQUES DES DEUX PRODUITS IMERG FINAL ET PERSIAN CCS CDR A L'ECHELLE JOURNALIERE.....	55
FIGURE 50: COMPARAISON DES INDICATEURS STATISTIQUES DES DEUX PRODUITS IMERG FINAL ET PERSIAN CCS CDR A L'ECHELLE MENSUELLE.. ..	56
FIGURE 51: COMPARAISON DES INDICATEURS STATISTIQUES DES DEUX PRODUITS IMERG FINAL ET PERSIAN CCS CDR A L'ECHELLE ANNUELLE.....	56

Tables des tableaux :

TABLEAU 1:LES TYPES DU PRODUIT IMERG GPM.....	18
TABLEAU 2: PRODUITS D'ESTIMATION DES PRECIPITATIONS PAR SATELLITE.....	18
TABLEAU 3: STATIONS PLUVIOMETRIQUES	22
TABLEAU 4:PRODUITS D'ESTIMATION DES PRECIPITATIONS UTILISES	23
TABLEAU 5: LES INDICATEURS STATISTIQUES UTILISES	24
TABLEAU 6: RESULTATS DE TRAITEMENT DES DONNEES AVEC IMERG GPM-F.....	26
TABLEAU 7: RESULTATS DE TRAITEMENT AVEC PERSIANN CCS-CDR.....	40

Tables des abréviations :

ABHT : Agence du Bassin Hydraulique du Tensift

CHIRPS: Climate Hazards center InfraRed Precipitation with Station data

DMN : Direction de la Météorologie Nationale

FOV: Field Of View

GEO: Geostationary Equatorial Orbit

IMERG GPM-F: Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement Final

IR: Infra-rouges

LEO: Low Earth Orbit

MW: micro-ondes

Obs: Observé

P: Précipitations

PERSIANN CCS CDR: Precipitation Estimation from Remote Sensed Information using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System-Climate Data Record

SAT: Satellite

SO: Système observation

TRMM: The Tropical Rainfall Measuring Mission

INTRODUCTION

Depuis la conférence de Rio en 1992, les changements climatiques ont progressivement gagné en importance, incitant les pays du monde entier à reconnaître le danger qui les accompagne. Au fil des années, les effets du changement climatique se sont confirmés, notamment sur le cycle de l'eau, avec des conséquences importantes dans la région de la Méditerranée et en Afrique. Au Maroc, le réchauffement climatique s'est accompagné d'une irrégularité des précipitations depuis les années 70. Aujourd'hui, après 30 ans de manifestations marquantes de cette problématique hydro-climatique, l'instabilité et l'irrégularité du climat ont atteint un seuil qui exige une anticipation et une planification adéquates de la gestion des ressources en eau ^[1]

A ce facteur hydro-climatique handicapant s'ajoute la forte variabilité spatiale des précipitations du régime pluviométrique au Maroc. Le nord-ouest est en moyenne, plus arrosé que le reste du Royaume. ^[2] Au centre ouest du Maroc, se situe le grand bassin Tensift-Ksob, un des plus importants bassins du pays qui s'étend sur une superficie de 24 800 Km² ^[2], soit près de 3 % de la superficie totale du pays ^[3] et constitué des bassins de l'oued Tensift et des oueds Ksob et Igouzoulen. Les précipitations annuelles moyennes varient dans ce bassin entre 200 et 400 ^[2]. Cette variabilité est exacerbée par la topographie accidentée du bassin, qui est dominé par l'Atlas.

En raison de cette complexité, les mesures traditionnelles de précipitation ne sont pas suffisantes pour comprendre pleinement le régime hydrique du bassin. Les stations météorologiques traditionnelles ne permettent pas de saisir précisément la variabilité spatiale et temporelle des précipitations, ce qui limite notre capacité à prévoir les inondations, la recharge des eaux souterraines et de manière générale, la gestion efficace de l'eau dans le bassin Tensift.

Dans ce contexte, la télédétection est devenue une méthode prometteuse pour surmonter ces limitations. Plusieurs études ont déjà appliqué la télédétection pour estimer les précipitations dans des bassins versants similaires et ont montré que cette méthode fournit des données précises et fiables pour la gestion des ressources en eau dans ces régions pour mesurer les précipitations dans les régions où la collecte de données sur le terrain est difficile ou impraticable ^{[4] [5] [6]}

La télédétection est une méthode basée sur des capteurs à distance pour mesurer la réflexion et l'émission de l'énergie électromagnétique par la surface de la terre. En se basant sur ces mesures, il est possible d'estimer les précipitations et d'analyser les régimes de précipitations dans une région donnée. Cependant, malgré les avantages offerts par la télédétection pour l'analyse des précipitations, il existe toujours des défis pour la fiabilité et l'exactitude des résultats obtenus.

A cet effet, notre travail consiste à valider l'estimation de produits satellitaires de précipitations au niveau de la zone d'action de l'ABHT.

Les estimations des précipitations obtenues par le biais des satellites fournissent une meilleure couverture spatiale que les pluviomètres. Actuellement, il existe de multiples options de produits d'estimation des précipitations par satellite disponibles pour la recherche, tels que IMERG GPM (Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement) et PERSIANN CCS CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Cloud Classification System-Climate Data Record).

Partie I : Estimation des précipitations par satellite

1- Les systèmes d'observation des précipitations :

La précipitation est un paramètre clé dans la modélisation du cycle hydrologique, il existe plusieurs instruments, capteurs et méthodes qui déterminent les quantités de pluies tombées. Parmi ceux-ci on trouve notamment les pluviomètres (mesures directes au sol), les capteurs embarqués dans les satellites (mesures indirectes), les produits de réanalyses (estimation à l'aide des modèles de prévision numérique combinés avec les observations) et les radars au sol.

[7]

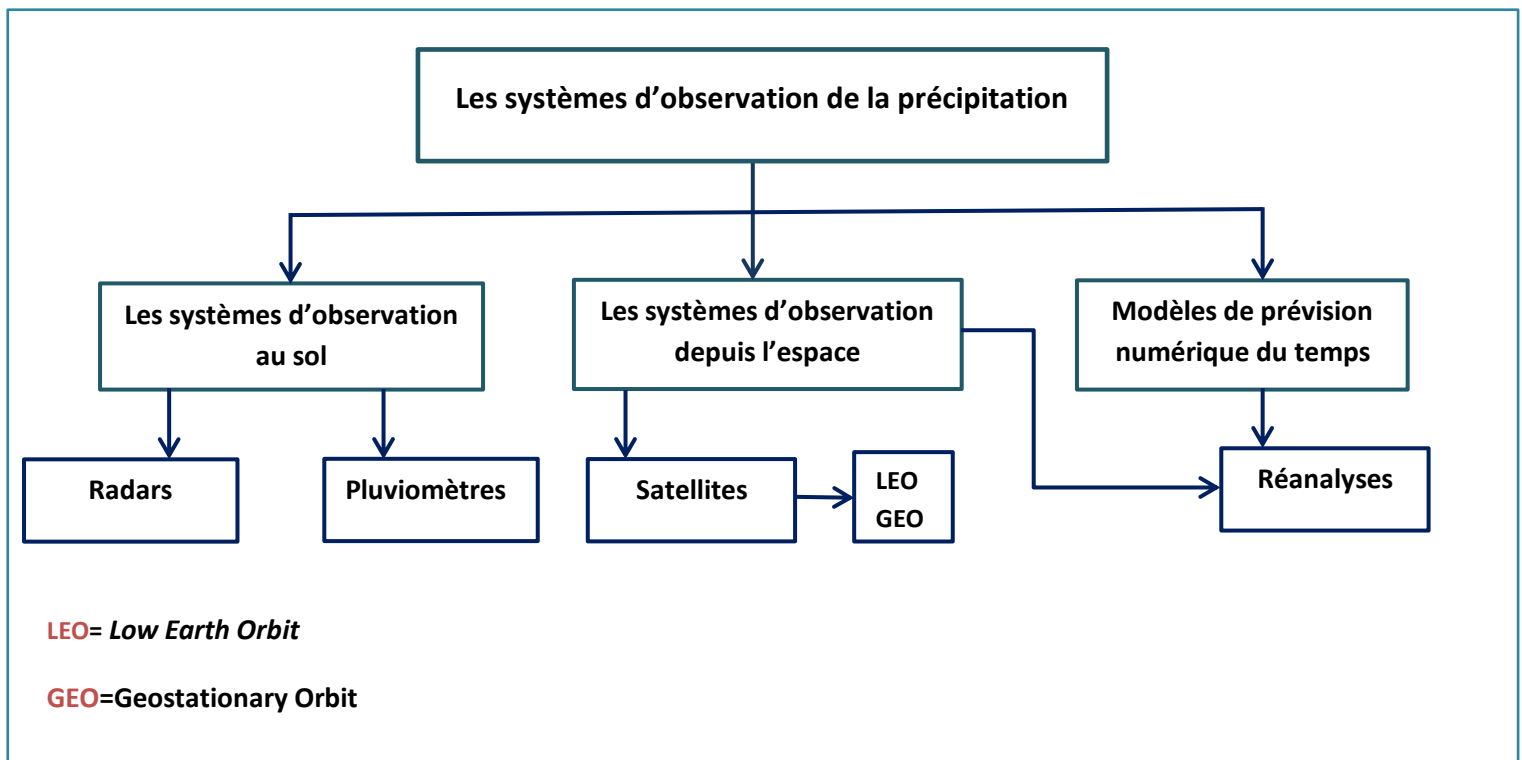


Figure 1 : Systèmes d'estimation de la précipitation

a) Les systèmes d'observation au sol :

Les SO conventionnels de la pluie sont les pluviomètres et les radars météorologiques. A l'échelle planétaire, la qualité et la densité des réseaux de ces instruments de mesure sont relativement inégales d'une région à l'autre avec de réelles difficultés d'implantation dans certaines régions pour des raisons naturelles (régions désertiques, forêts denses...) ou économiques (régions sous-développées).^[8]

L'une des conséquences de cet effet est l'absence de données précises sur la répartition spatiale des quantités de précipitations tombées. La connaissance imparfaite de la répartition spatio-temporelle de la précipitation va affecter d'une manière directe la qualité des apports hydrologiques estimés à l'exutoire des bassins versants et par conséquent ceci va soulever des enjeux qui touchent la sécurité et la vie des gens tels que : le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, la gestion des barrages pendant les périodes de crues, etc. Au Maroc, d'après la Direction de la Météorologie Nationale (DMN), le SO au sol constitué par 7 radars météorologiques, 4 stations de radiosondage, 156 stations automatiques et 44 stations synoptiques.

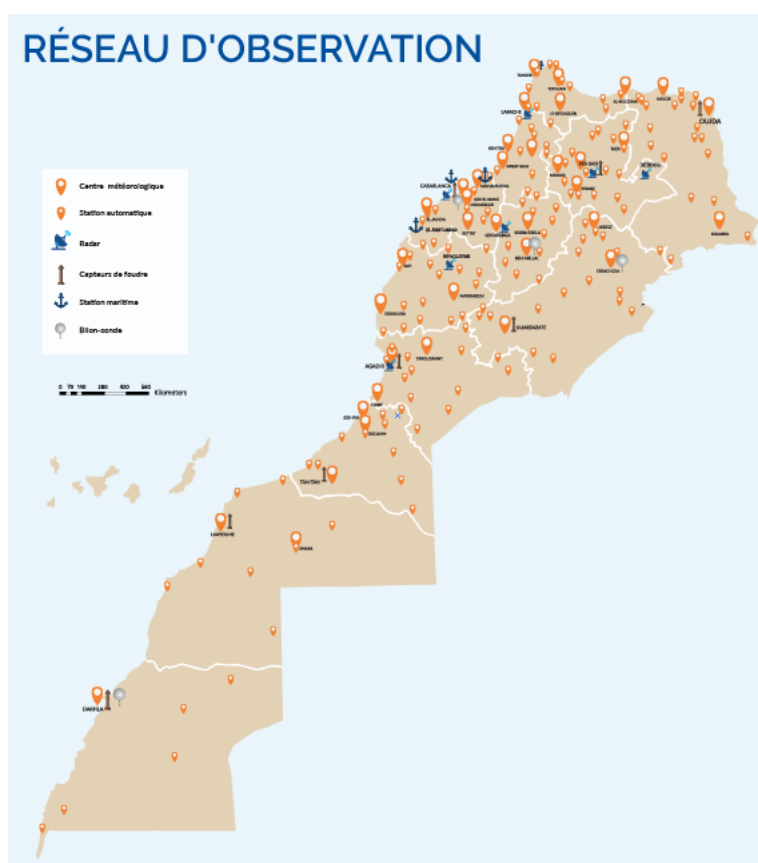


Figure 2: Carte de réseau d'observation conventionnel au Maroc ^[9]

b) Les systèmes d'observation depuis l'espace :

Le système d'observation des précipitations par satellite est caractérisé par une résolution spatiale, une résolution temporelle et le domaine spectral de la mesure de l'instrument embarqué. Ces caractéristiques dépendent du capteur, de l'altitude et de l'orbite de la plateforme. ^[8]

Le suivi et la prévision du temps et du climat sera possible grâce à deux familles de satellites météorologiques qui existent: Les satellites géostationnaires Geostationary Equatorial Orbit (GEO) et les satellites à Low Earth Orbit (LEO), qui incluent les satellites à orbite polaire. ^[8]



Figure 3: le système opérationnel mondial d'observation par satellite

(© The COMET Program/EUMETSAT/NASA/NOAA/WMO)^[8]

❖ **Satellites géostationnaires 'GEO':**

Les satellites GEO sont placés en orbite dans le plan équatorial de la Terre à une altitude de 35786 km, ils ont une résolution d'environ 3 Km. Leur vitesse angulaire est identique à celle de la rotation du globe terrestre. Ainsi, par rapport à un point sur la Terre, ces satellites apparaissent fixes. Ces différentes caractéristiques leur permettent d'avoir un Field Of View (FOV) important et toujours identique de la surface terrestre. Cependant, les zones polaires n'apparaissent pas dans leur FOV.^[8]

Le principal instrument utilisé dans les expérimentations météorologiques sur les satellites géostationnaires est le radiomètre-imageur, ou imageur. Cet instrument estime le rayonnement arrivant au satellite et provenant d'un élément de la surface et de l'atmosphère terrestres.^[9]

❖ **Satellites défilants héliosynchrones 'LEO' :**

La majorité des satellites LEO sont situés à une altitude entre 800 et 900 km en orbite quasi polaire et héliosynchrone ou le plan de l'orbite suit le déplacement apparent du soleil autour de la Terre. Ils ont une résolution d'environ 1 Km et avec une inclinaison d'environ 99°. Les principaux satellites météorologiques en orbite polaire sont entretenus par les États-Unis (NOAA), la Russie (Meteor) et la Chine (Fengyun-3).^[10]

Comme les satellites géostationnaires, les satellites défilants météo sont munis d'un imageur à plusieurs canaux qui vise la surface de la Terre. L'imageur permet de surveiller les masses nuageuses, en particulier dans les régions de haute latitude qui échappent au satellite géostationnaire, les satellites défilants ne survolent une région de moyenne latitude que deux fois par jour. L'image d'une partie du globe terrestre est obtenue en combinant l'avance du satellite sur son orbite et le balayage de l'imageur dans la direction perpendiculaire. Le principal atout des satellites défilants est ailleurs : Ceux-ci sont munis d'un autre instrument, le radiomètre-sondeur. Il mesure, comme l'imageur, le rayonnement arrivant au satellite et provenant d'un élément de la surface et de l'atmosphère. ^[11]

2- Principe d'estimation des précipitations par satellite :

Les produits satellitaires de pluie reposent principalement sur l'utilisation de deux types de mesures:

- D'une part, les images infrarouges (IR) fournissent une mesure de la température de brillance du sommet des nuages, qui est corrélée à la probabilité de précipitation du nuage : plus un nuage est froid, plus il est haut, et plus il a de chances de précipiter. Cette information est assez peu fiable, mais elle a l'avantage d'être fournie par des satellites géostationnaires, qui « voient » toujours le même disque terrestre et peuvent le balayer toutes les demi-heures. Aujourd'hui, la constellation des satellites météorologiques permet de couvrir toute la planète.
- D'autre part, des satellites en orbite basse embarquent des imageurs micro-ondes (MW), absorbées par les nuages. Ils donnent des estimations beaucoup plus fiables que les images infrarouges, mais comme il ne sont pas géostationnaires, ils balayent la planète en environ une journée, et donnent donc une mesure par jour. En combinant les deux types de mesures par différentes techniques, on tente de profiter de la qualité des données MW et de la fréquence d'échantillonnage des données IR. ^[12]

3- Les produits courants d'estimation des précipitations par satellite :

a) The Tropical Rainfall Measuring Mission 'TRMM' (TMPA):

Cet ensemble de données est le résultat de l'algorithme TMPA (analyse des précipitations multi-satellites TRMM). Il fournit des estimations de précipitations dans les régions TRMM qui ont le biais (presque nul) de l'estimation de précipitations " instrument combiné TRMM ". Il a une couverture temporelle est de l'ordre de 3h et journalière. La zone géographique couverte s'étend de la latitude 50° N à 50° S pour une grille de résolution spatiale de 0,25° x 0,25°. Les données du produit sont disponibles depuis le 1er janvier 1998 jusqu'à présent. ^[13]

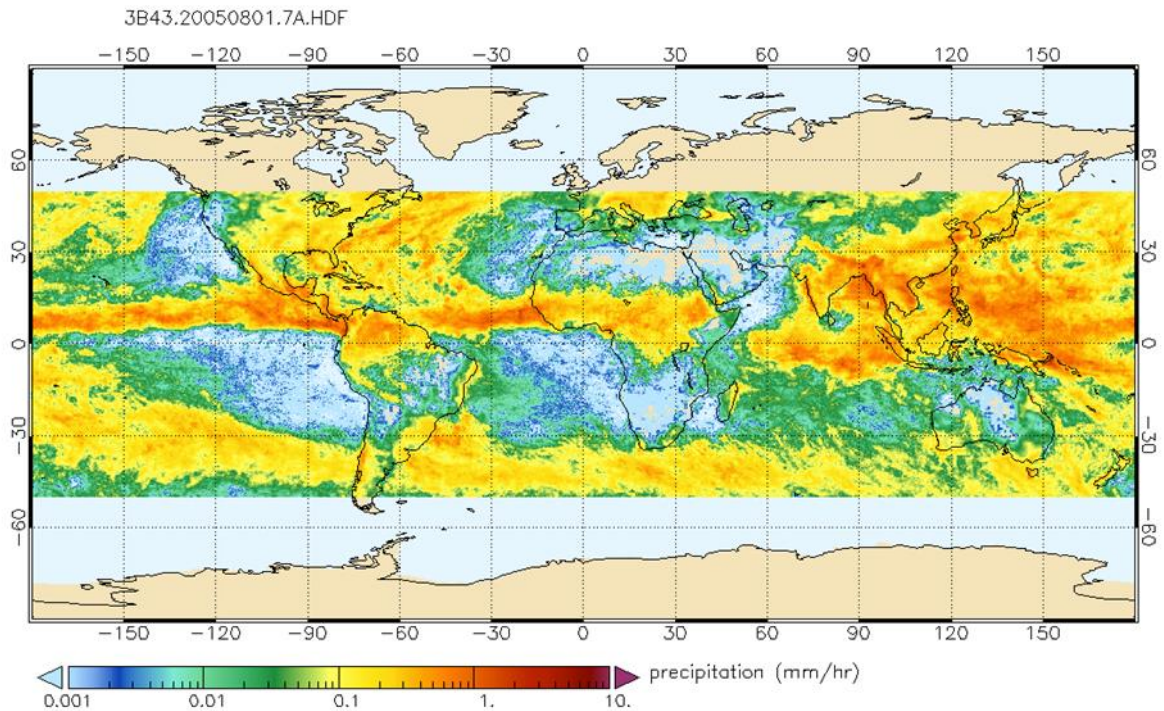


Figure 4: Taux des précipitations en (mm/h) estimés par le produit TRMM3B42(v6) le 1 Août 2005. ^[14]

b) Climate Hazards center InfraRed Precipitation with Station data 'CHIRPS':

Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) est un ensemble de données pluviométriques quasi mondiales sur plus de 35 ans (allant de 1981 à presque aujourd'hui). CHIRPS a été développé pour soutenir le réseau des systèmes d'alerte précoce contre la famine de l'Agence des États-Unis pour le développement international, et pour l'analyse des tendances et des saisons de sécheresse. ^[15]

Les données CHIRPS soutenues par un financement de l'USAID, de la NASA et de la NOAA, avec deux blocs principaux de données : le premier est quasi-global (couvrant 50° S-50° N, et toutes les longitudes) et à une grille de 5 km (0,05°) par pas de temps journalier. Le second couvre l'Afrique et certaines parties du Moyen-Orient. Il couvre la zone de 40° N à 40° S et de 20° W à 55° E à une grille de 10 km (0,1°) par pas de temps de 6 heures. ^[16]

c) PERSIANN CCS-CDR :

PERSIANN-CCS-CDR (**P**recipitation **E**stimation from **R**emote Sensed **I**nformation using **A**rtificial **N**eural **N**etworks-**C**loud **C**lassification **S**ystem-**C**limate **D**ata **R**ecord) est un ensemble de données des précipitations sur 40 ans et plus, avec des résolutions spatiales et temporelles élevées (0,04° x 0,04° spatial et 3 heures temporelles). Il est développé par the Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS) de l'Université de Californie, Irvine (UCI). Il couvre la zone de 60°S à 60°N.

PERSIANN-CCS-CDR combine les algorithmes qui ont été utilisés dans le développement de PERSIANN-CCS et PERSIANN-CDR et utilise l'information des satellites GEO comme données d'entrée afin de fournir un ensemble de données de précipitations spatiotemporelles fines avec une longue période d'enregistrement depuis 1983 jusqu'à présent.

L'élaboration de PERSIANN-CCS-CDR a été motivée par les besoins de la communauté scientifique qui s'intéresse à une résolution spatiotemporelle à long terme des données de précipitations pertinentes pour les applications hydro climatologiques, l'étude des régimes de précipitations diurnes et des événements extrêmes avec de fortes pluies. [14]

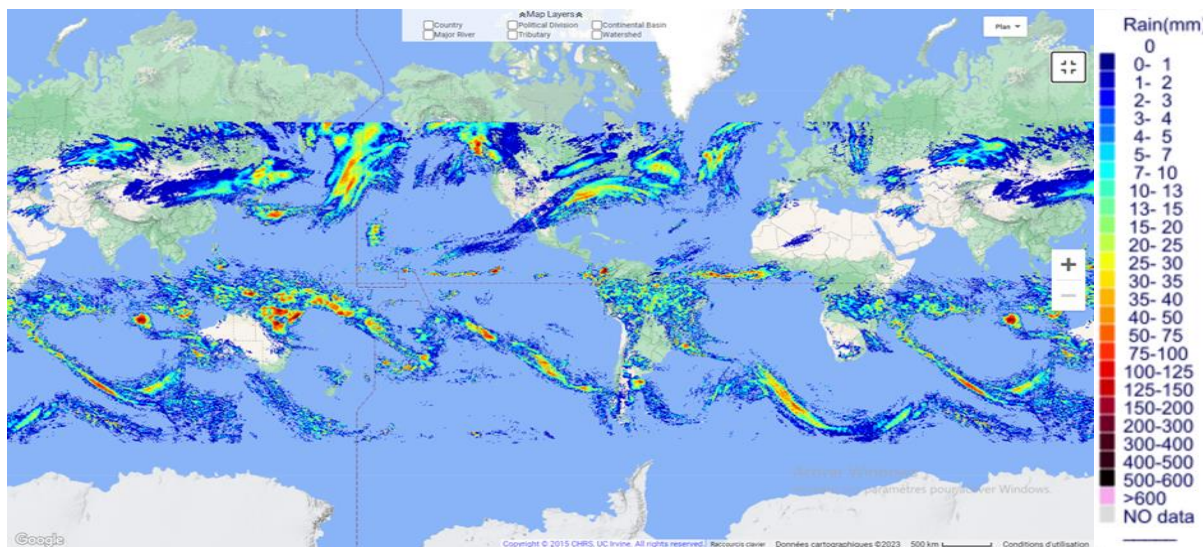


Figure 5: Taux des précipitations en mm/3h estimés par le produit PERSIANN CCS-CDR le 59^e jour de l'an 2021 à 3h (UTC) [14]

d) Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurements 'IMERG (GPM)':

Le Global Precipitation Measurement (GPM) est un réseau de satellites internationaux dont le but est de produire des champs de précipitation à une échelle quasi globale. Le satellite principal de la mission est le GPM Core Observatory, lancé le 27 février 2014. Ce satellite est le résultat d'un partenariat entre les agences spatiales américaine (NASA) et japonaise (JAXA). Il s'agit de la version évoluée du Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) qui a été disponible de 2000 jusqu'à aujourd'hui (Liu et al., 2012) il permet de détecter les précipitations liquides à forte et à moyenne intensité. [17]

La couverture spatiale de ce produit est de (60° S – 60° N), une résolution spatiale approximative de 10 km (0.1°) et une résolution temporelle de 30 minutes et quotidienne (Hou et al. 2014).

L'avantage du GPM Core Observatory est qu'il est capable de détecter en plus les pluies à faible intensité (inférieur à 0,5 mm/h) et de mesurer la précipitation solide qui tombe sous forme de neige.

Ce produit est construit avec les estimations de précipitations micro-ondes disponibles, les estimations IR étalonnées par micro-ondes, les analyses de jauge au sol et d'autres estimations possibles à des échelles temporelles et spatiales fines sur l'ensemble du globe (Huffman et al. 2018). [18]

IMERG GPM composé par trois produits multi-satellite : GPM-EARLY, GPM-LATE et GPM-FINAL avec des temps de latence différents.

Tableau 1: les types du produit IMERG GPM

Produit	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Domaine	Temps de latence
IMERG-EARLY	Journalière	0.1°	60 ° S – 60 ° N	4h après l'heure d'observation
IMERG-LATE	Journalière	0.1°	60 ° S – 60 ° N	14h après l'heure d'observation
IMERG-FINAL	Journalière	0.1°	60 ° S – 60 ° N	3.5 mois après le mois d'observation

Tableau 2: Produits d'estimation des précipitations par satellite

Produits	Développeur	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Couverture	Disponibilité des données
TRMM (TRMPA)	NASA	0.25°x0.25°	3heures et journalière	50 °S - 50 °N	1998- Aujourd'hui
CHIRPS	CHG	0.05°x0.05°	Journalière	60 °S - 60 °N	1981- Aujourd'hui
PERSIANN CCS-CDR	CHRS	0.04°x 0.04°	Journalière 3 h, 6h et	50°S -50 °N	1983- Aujourd'hui
IMERG(GPM)	NASA JAXA et	0.1°x 0.1°	30minutes et Journalière	60°S–60° N	2000- Aujourd'hui

Partie II : Matériels et méthodes

1- Zone d'étude :

a) Situation géologique et géographique :

Le bassin du Tensift est situé dans la partie occidentale du Maroc entre les latitudes 32° 10' et 30° 50' Nord et les longitudes 9° 25' et 7° 25' Ouest, couvrant une superficie d'environ 24 800 Km². Ce large domaine continental 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. De ce fait, l'altitude est très variable, allant de 0 mètre à l'exutoire à 4167 mètres à Jbel Toubkal.

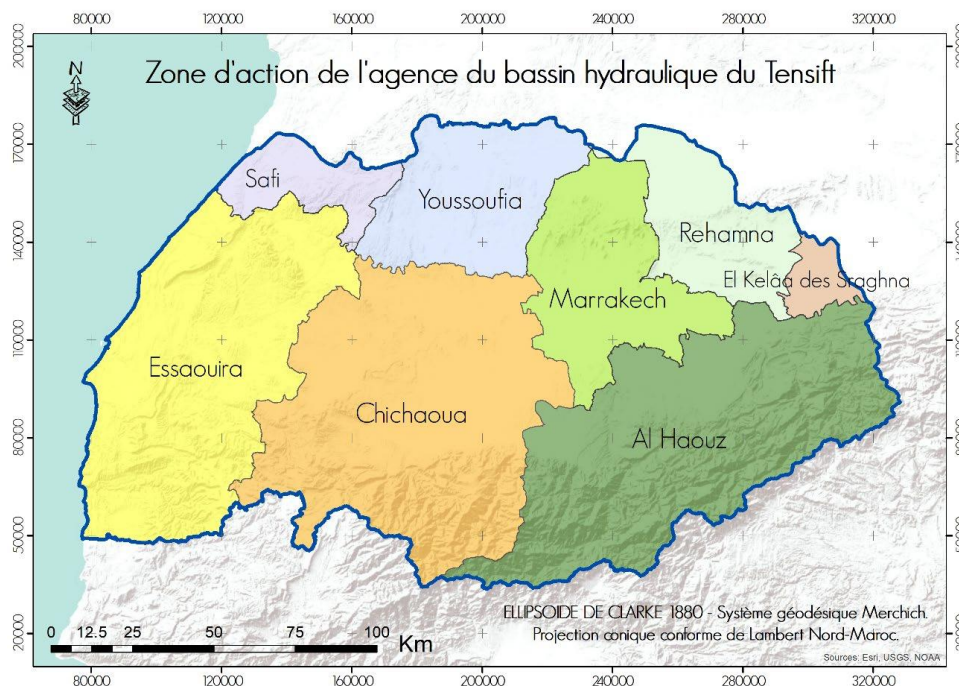


Figure 6: Carte géographique du bassin tensift [19]

Le bassin-versant de Tensift est constitué de quatre grandes unités qui sont définies en fonction de leur position géographique et de leurs caractéristiques géologiques :

- ❖ HAUT ATLAS : Il s'agit d'une région montagneuse, des vallées encaissées et des plaines alluviales. Le Haut Atlas est caractérisé par des formations sédimentaires quaternaires, des

roches métamorphiques, des granites et des basaltes du Paléozoïque et du Mésozoïque. La région est également connue pour ses formations géologiques particulières telles que les gorges du Dadès et du Todgha, ainsi que pour ses gisements minéraux

- ❖ La plaine côtière d'Essaouira : cette unité est située à l'ouest du bassin et est principalement constituée de plaines, de collines et de zones côtières. Elle est traversée par plusieurs rivières qui se jettent dans l'océan Atlantique. La région est également connue pour ses formations sédimentaires de différentes périodes géologiques, et des roches métamorphiques, des basaltes et des granites du Paléozoïque et du Mésozoïque.
- ❖ La plaine du Haouz: Cette région couvre une superficie totale d'environ 6000 km² et fournissent une source d'eau importante pour les rivières et les aquifères souterrains qui alimentent la région, la plaine est prédominée par des formations sédimentaires quaternaires, telles que des alluvions et des limons, ainsi que par des formations géologiques plus anciennes du Crétacé et du Tertiaire.
- ❖ Les Jbilet : sont une chaîne de montagnes de faible altitude qui s'étend sur environ 150 km² dans la partie nord de la Plaine du Haouz. La géologie de Jbilet est caractérisée par la prédominance de roches métamorphiques, telles que des schistes, des gneiss, des micaschistes et des quartzites, ainsi que par des formations volcaniques telles que des tufs, des basaltes et des andésites. ^[20]

b) Climatologie :

Le climat dominant sur l'ensemble du bassin est du type aride à semi-aride à influence océanique près des côtes, avec des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux.

Elle est influencée par l'emplacement géographique de la région qui se trouve à la fois proche des montagnes de l'Atlas et de l'océan Atlantique :

- Semi-aride influencé par le courant froid des Canaries dans la zone côtière d'Essaouira.
- Semi-aride chaud dans les Jbilet.
- Continental de type aride dans le Haouz et le Mejjat.
- Tempéré en moyenne montagnes et froid, humide en haute montagnes du Haut Atlas. ^[20]

En général la climatologie de bassin Tensift est également marquée par une forte variabilité interannuelle :

- En été, les températures peuvent atteindre jusqu'à 40°C, tandis qu'en hiver, les températures moyennes varient entre 10°C et 20°C.
- Les précipitations annuelles dans la région de Tensift est importante, environ 800 mm principalement concentrées entre novembre et avril.

-L'humidité de l'air relativement faibles qui peuvent augmenter pendant les mois d'hiver en 40%, et peut tendre vers 0% en raison du climat semi-aride à aride de la région.

c) Hydrologie :

Le bassin de Tensift est caractérisé par un régime d'écoulement irrégulier, dépend de la pluviométrie dans le bassin et la fonte de neige sur le Haut Atlas. Les eaux de surface proviennent des oueds qui prennent naissance dans le Haut Atlas, qui sont caractérisés par des ruissellements torrentiels. Elles sont par la suite collectées par le réseau hydrographique Tensift et évacuées vers l'Atlantique.

Le bassin est subdivisé en deux compartiments :

- Le premier correspond au flanc nord du Haut Atlas occupé par une succession de bassins d'orientation Sud-Nord, bien arrosés qui constituent les affluents rives gauches de l'oued Tensift. Tel un château d'eau, il constitue la zone de production des eaux de surface, caractérisée aussi par des précipitations importantes (pluie et neige sous l'effet de l'altitude).
- Le deuxième représente la zone de consommation ou de transit, constituée de la plaine centrale semi-aride du Haouz. ^[21]

2- Présentation des données utilisées :

a) Réseau d'observation au sol :

Les données observées utilisées dans ce travail sont les données journalières pour la période de 2000 à 2017 et les données mensuelles et annuelles pour la période de 2000 à 2020.

Ces données comprennent 10 stations pluviométriques dispersées dans le bassin versant de Tensift, dont six stations sont placées en montagne, deux stations en plaine et deux stations dans la zone côtière.

La carte suivante représente la répartition spatiale de ces stations pluviométriques dans la zone d'étude :



Figure 7: la répartition spatiale de ces stations pluviométriques dans le bassin de Tensift

Tableau 3: Stations pluviométriques

Stations :	Code	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Emplacement	Données disponibles	Cours d'eau
Amenzal	N°1004	31,178	-7,726	2230	Montagne	1996-2020	OURIKA
Armed-Imlil	N°1182	31,124	-7,92	1940	Montagne	1998-2020	Imlil
Aghbalou	N° 6193	31,32	-7,751	1070	Montagne	1970-2020	OURIKA
Sidi_Hsain	N°6826	31.20	-8,24	1030	Montagne	1998-2020	AMEZMIZ
Iloudjane	N° 4222	31.05	-8,79	757	Montagne	1989-2020	SEKSAOUA
Sidi-Rahal	N° 6976	31,639	-7,476	690	Montagne	1967-2020	R'DAT
Marrakech	N° 5229	31,612	-8,033	460	Plaine	1971-2020	Oued Issil
Chichaoua	N°2601	31,551	-8,754	340	Plaine	1971-2020	CHICHAOUA
Talmest	N° 7660	31,865	-9,271	53	Côtière	1985-2020	Tensift
Adamna	N°50	31,458	-9,684	70	Côtière	1977-2020	Ksob

b) Données estimées par satellites des précipitations :

❖ Produits utilisés :

Le choix des produits d'estimation des précipitations par satellite est basé sur différents critères :

- Une résolution spatiale et temporelle adéquate à la topographie de la zone d'étude.
- Une période de latence et une couverture spatiale adaptée à nos besoins.

-Les données sont disponibles gratuitement et faciles à télécharger.

-les produits les plus recommandés.

Tableau 4: Produits d'estimation des précipitations utilisés

Produit	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Domaine	Temps de latence	Disponibilité des données
PERSIANN-CCS CDR	3 h, 6h et journalière	0,04°	50°S -50 ° N	3–3.5 mois	1983- Aujourd'hui
IMERG-GPM FINAL	Journalière	0.1°	60 ° S – 60 ° N	3.5 mois après le mois d'observation	2000- Aujourd'hui

❖ **Téléchargement des données satellitaires des précipitations :**

-**IMERG (GPM) FINAL v6** : Les données utilisées d'IMERG(GPM)'FINAL' ont été téléchargées d'après le site suivant gratuitement : <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> avec un format CSV, pour une fourchette de 2000 jusqu'à aujourd'hui, ce sont des données journalières en mm, avec une résolution de pixel **0.1°**.

-**PERSIANN CCS-CDR** : Le jeu de données de PERSIANN CCS-CDR est disponible avec une licence libre à savoir ce site web : <https://chrsdata.eng.uci.edu> . Les données sont de format CSV, avec une période allant de 1983 jusqu'à présent, ce sont des données journalières en mm avec une grille de **0.05°**.

3- Traitement des données :

Dans cette étude, nous avons réalisé une comparaison entre les données des dix stations météorologiques (Aghbalou, Sidi Rahal, Sidi Hsain, Iloudjane, Aremd, Amenzel, Marrakech, Chichaoua, Talmest, Adamna) dans le bassin du Tensift et le pixel correspondant à chaque produit satellitaire (IMERG GPM-F et PERSIANN CCS CDR). Ceci à différentes altitudes et échelles spatio-temporelles (journalières, mensuelles et annuelles).

Afin de comprendre la relation entre les différents produits satellitaires et les observations des stations météorologiques, ainsi que de caractériser et analyser les biais et les erreurs, cinq indices statistiques largement utilisés pour évaluer les produits satellites ont été utilisés pour évaluer quantitativement ces produits:

a) Coefficient de corrélation 'r' :

Le coefficient de corrélation 'r' est un indice reflétant une relation linéaire entre deux variables continues. Il varie entre -1 et +1, mesure le degré d'association linéaire entre les distributions estimées et observées. r est utilisé pour évaluer dans quelle mesure les estimations correspondent aux valeurs observées. ^[21]

b) Biais :

Il qui décrit le biais systématique entre les précipitations estimées par chaque produit et les précipitations observées. Les valeurs de biais négatives indiquent une sous-estimation des précipitations, tandis que les valeurs positives indiquent une surestimation. [22]

c) ME (erreur moyenne)

Elle correspond à la moyenne de toutes les erreurs qui présentent la différence entre la valeur mesurée et l'autre estimée. L'erreur moyenne se traduit généralement par un nombre qui n'est pas utile car les positifs et les négatifs s'annulent. [23]

d) MAE (erreur absolue moyenne)

Elle est la moyenne des valeurs absolues des erreurs. Elle est utile lorsque l'on s'intéresse à la quantité globale d'erreur, peu importe la taille de chaque erreur. La MAE pénalise autant les grandes erreurs que les petites erreurs. [24]

e) RMSE (erreur quadratique moyenne)

Il mesure l'ampleur moyenne de l'erreur entre les précipitations estimées et observées et indique à quel point les données sont concentrées autour de la ligne de meilleur ajustement [23].

*RMSE (erreur quadratique moyenne) et MAE (erreur absolue moyenne) sont similaires ou, plutôt, ont les mêmes objectifs.

Une description détaillée de ces approches empiriques et des équations utilisées est présentée dans le **tableau (5)** ci-dessous:

Tableau 5: les indicateurs statistiques utilisés [4]

Indicateurs statistiques	Formules	Valeurs possibles	Valeurs parfaites
Coefficient de corrélation	$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (Gi - \bar{G})(Si - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Gi - \bar{G})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (Si - \bar{S})^2}} \quad (1)$	- 1 à 1	1
Erreur quadratique moyenne	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Si - Gi)^2}{N}} \quad (2)$	0 à + ∞	0
Biais (%)	$Biais = \frac{\sum_{i=1}^N (Si - Gi)}{\sum_{i=1}^N Gi} \times 100 \quad (3)$	0 à + ∞	0
Erreur Moyenne	$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (Si - Gi)}{N} \quad (4)$	- ∞ à + ∞	0
Erreur absolue moyenne	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N (Si - Gi) }{N} \quad (5)$	- ∞ à + ∞	0

-N est le nombre d'observation des précipitations par produits.

-Si est l'estimation des précipitations par produit.

-Gi est la pluie observée et \bar{G} est la pluie moyenne observée.

- \bar{S} est l'estimation des précipitations moyennes par produit.

Partie III : Résultats de traitement

1- Résultats du traitement avec le produit IMERG(GPM) Final :

Le **tableau (6)** présente les résultats du traitement des données observées de 10 stations pluviométriques et les données simulées du produit IMERG (GPM) Final, ces résultats montrent que :

- A l'échelle annuelle, les données observées sont bien corrélées avec les données estimées par l'IMERG-F avec un coefficient de corrélation r qui atteint 0.95 dans la station Adamna et 0.88 dans la station Talmest. Cependant, la valeur minimale de ce coefficient atteint une valeur de 0.43 dans la station Aghbalou et 0.46 dans la station Amenzel.

A l'échelle mensuelle, les données observées sont bien estimées par le produit d'où la valeur maximale du coefficient de corrélation r est 0.9 pour les deux stations Talmest et Adamna. Tandis que la valeur minimale du ce coefficient est d'environ 0.60 pour les deux stations Sidi-Hssain et Iloudjane.

Par contre, les données journalières estimées par IMERG sont faiblement corrélées avec les données observées dans les stations en présentant un r d'une valeur minimale n'atteint que 0.21 dans le cas de station Sidi-Hssain, alors que sa valeur maximale est de 0.60 dans la plaine Chichaoua et dans la zone côtière Talmest.

- le paramètre **RMSE** enregistre une ampleur d'erreur à l'échelle annuelle surtout dans les régions montagneuses qui est comprise entre [107,06-246,91mm/an] par rapport à la zone côtière où l'erreur est minimale qui varie entre [42,9-95,35 mm/an], alors que mensuellement, RMSE présente des erreurs moyennes comprennent entre [19,17-33,50mm/mois] en allant de la zone côtière vers les montagnes. De même, à l'échelle journalière, cet indicateur présente moins d'erreurs que les autres échelles qui varient entre [2.43-5.16mm/j].

- Dans les trois échelles, les stations Sidi-hssain et Adamna sont marquées par des **biais** proches à la valeur parfaite (0%) avec des valeurs respectivement de -1,01% et 4,26% alors que les restes stations sont caractérisées par des mauvais biais sur tout la station Amenzel qui atteint 56,51%.

Tableau 6: Résultats de traitement des données avec IMERG GPM-F

Station	Altitude	Emplacement	Echelle	r	ME	MAE	BIAS (%)	RMSE
AMENZEL	2230	Montagne	Journalière	0,34	0,52	1,67	56,51	4,40
			Mensuelle	0,66	15,61	23,35	54,49	33,50
			Annuelle	0,46	185,73	205,15	54,49	246,91
ARMED-IMLIL	1940	Montagne	Journalière	0,40	-0,15	1,38	-13,45	4,57
			Mensuelle	0,70	-4,67	19,18	-13,45	31,31
			Annuelle	0,74	-55,57	79,45	-13,56	114,99
AGHBALOU	1070	Montagne	Journalière	0,43	-0,58	1,54	-40,62	5,14
			Mensuelle	0,69	-16,05	24,41	-38,6	36,12
			Annuelle	0,43	-192,59	206,41	-38,6	231,67
SIDI-HSSAIN	1030	Montagne	Journalière	0,21	-0,01	1,82	-1,01	5,16
			Mensuelle	0,60	-1,01	20,02	-2,93	32,71
			Annuelle	0,62	-12,16	96,62	-2,93	111,71
ILOUDJANE	757	Montagne	Journalière	0,43	0,13	1,13	15,57	4,11
			Mensuelle	0,65	2,86	16,89	11,93	28,21
			Annuelle	0,67	34,27	79,05	11,93	107,06
SIDI-RAHAL	690	Montagne	Journalière	0,47	-0,25	0,96	-28,80	3,54
			Mensuelle	0,8	-6,48	12,78	-24,87	20,8
			Annuelle	0,72	-82,11	85,43	-24,87	100,72
MARRAKECH	460	Plaine	Journalière	0,48	0,11	0,80	19,06	3,43
			Mensuelle	0,78	2,64	10,25	14,58	16,99
			Annuelle	0,78	31,67	45,58	14,58	70,34
CHICHAOUA	340	Plaine	Journalière	0,60	0,18	0,59	39,32	2,66
			Mensuelle	0,84	5,59	8,95	41,20	15,65
			Annuelle	0,78	67,12	67,89	41,20	82,29
ADAMNA	70	Côtière	Journalière	0,56	0,02	0,92	4,41	2,43
			Mensuelle	0,9	1,06	9,46	4,26	17,59
			Annuelle	0,95	12,75	36,26	4,26	42,9
TALMEST	53	Côtière	Journalière	0,57	0,22	0,85	32,76	4,11
			Mensuelle	0,9	6,61	10,87	32,62	19,17
			Annuelle	0,88	79,32	80,44	32,62	95,35
		Moyenne	Journalière	0,4	0,02	1,17	8,38	3,96
			Mensuelle	0,75	0,62	15,62	7,92	25,21
			Annuelle	0,70	6,38	97,87	7,82	120,39

a) IMERG GPM-F en montagne :

- AMENZEL (haute montagne) :

La performance du produit IMERG Final en haute montagne (Cas de la station Amenzel) à l'échelle journalière entre 2000-2020 est représentée dans la figure 8 par une surestimation moyenne, pour les événements pluviaux légers ($P < 10\text{mm}$) qui peut atteindre 20-30 mm/j.

cette surestimation est intense pendant la période de neige. Une sous-estimation intense est notable pour les évènements ($P > 10\text{mm}$) avec une différence de l'ordre de 30-60 mm/j.

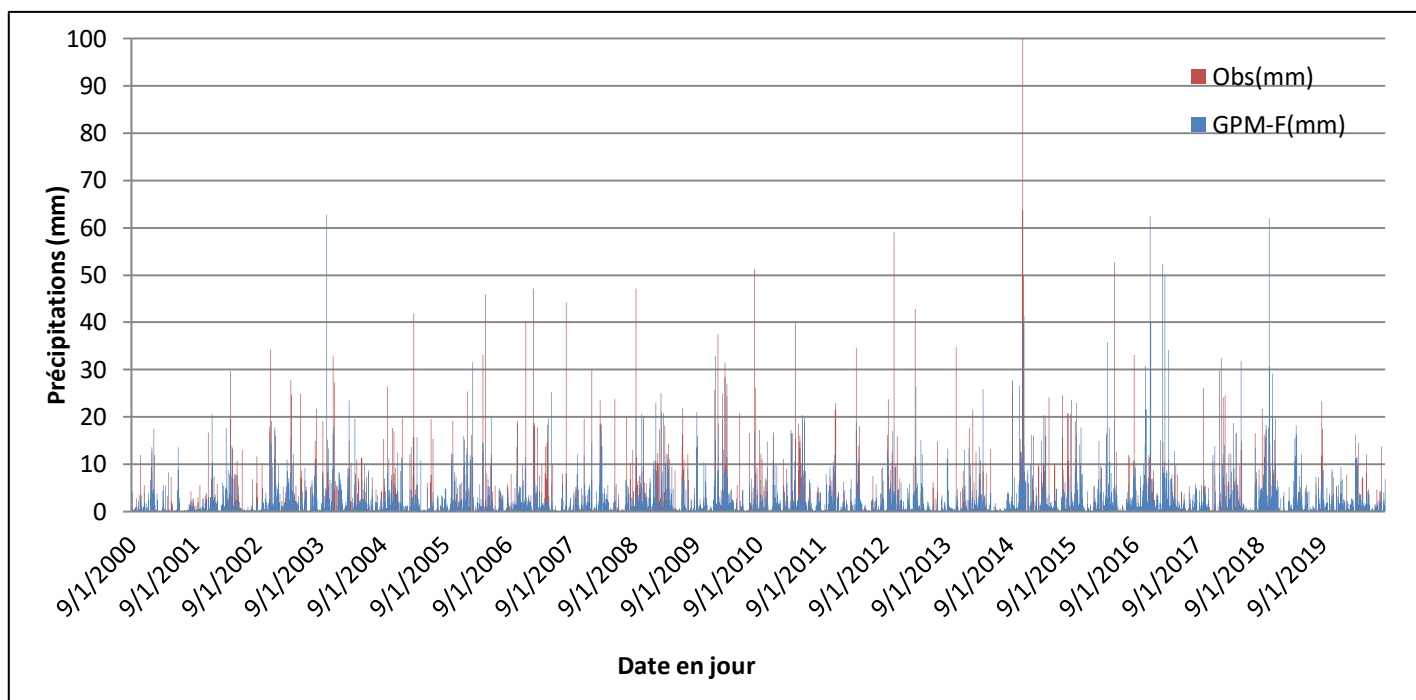


Figure 8: Variation des données observées de la station AMENZEL et les données de GPM-F à l'échelle journalière (2000-2020).

À l'échelle mensuelle, la figure 9 montre la performance du produit de 2000 à 2020, représentant une surestimation moyenne de tous les événements pluvieux pouvant atteindre 67 mm pour $P < 50$ mm et 146,02 mm pour $P < 100$ mm. En outre, une légère sous-estimation est remarquable pour les précipitations d'une hauteur comprise entre 50 mm et 100 mm.

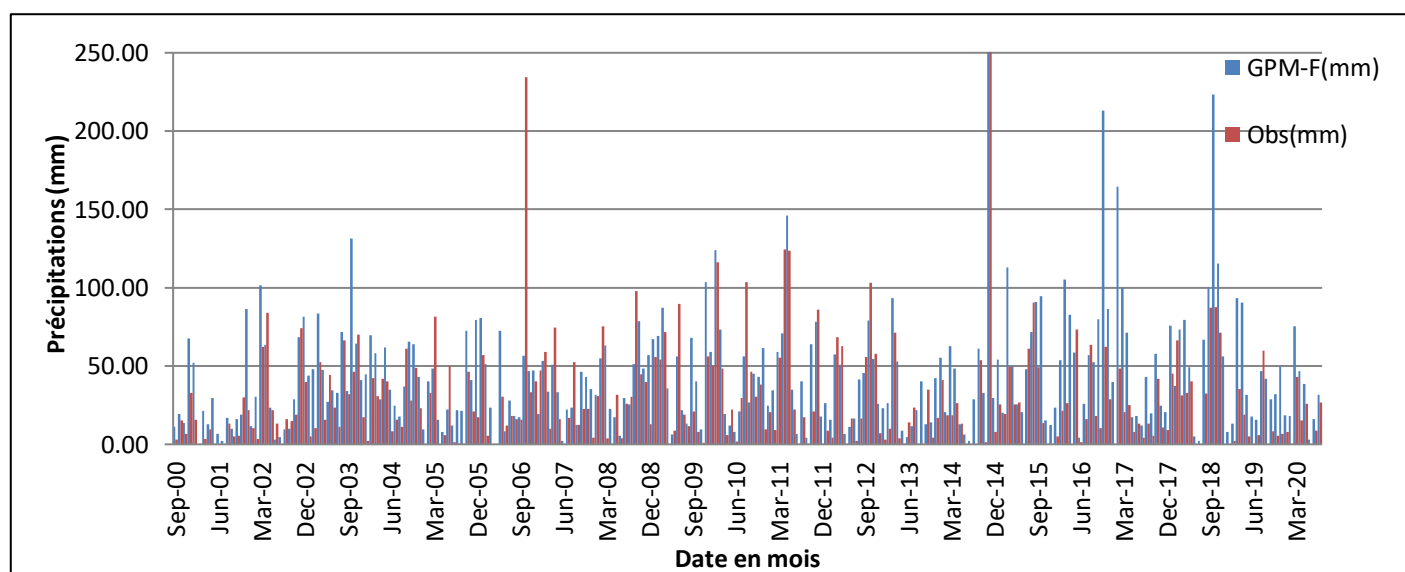


Figure 9: Variation des données observées de la station AMENZEL et les données de GPM-F à l'échelle mensuelle (2000-2020).

A l'échelle annuelle, la figure 10 montre que Les précipitations sont marquées par une surestimation légère qui varie en moyenne entre 100mm-200mm pour chaque précipitation observée.

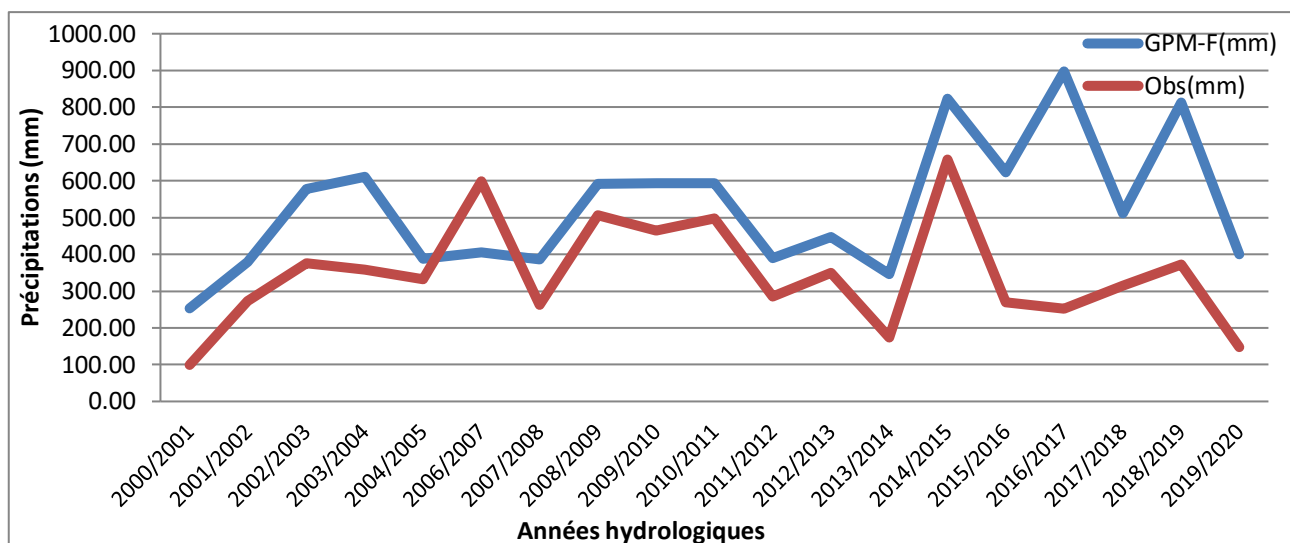


Figure 10: Variation des données observées de la station AMENZEL et les données de GPM-F à l'échelle annuelle (2000-2020).

On constate que le produit IMERG Final surestime les événements pluviaux aux trois échelles (journalière, mensuelle et annuelle).

Cependant, les surestimations intenses observées depuis la fin de 2015 peuvent être expliquées par le résultat de l'union entre la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) pour fournir la génération IMERG GPM Final, basée sur les estimations TRMM disponibles de 2000 à 2015.

Par ailleurs, la sous-estimation extrême en 2006 est due à une crue qu'a connue l'Oued Ourika le 28 octobre 2006.

- AGHBALOU (moyenne montagne) :

Les résultats journaliers (figure 11) montrent une légère surestimation des précipitations légères de hauteurs inférieures à 5 mm, tandis que les événements pluvieux de hauteurs comprises entre 10 mm et 30 mm ont été sous-estimés par le produit. Cependant, cette sous-estimation augmente à mesure que les précipitations deviennent plus intenses, atteignant un écart maximal de 80 mm/jour.

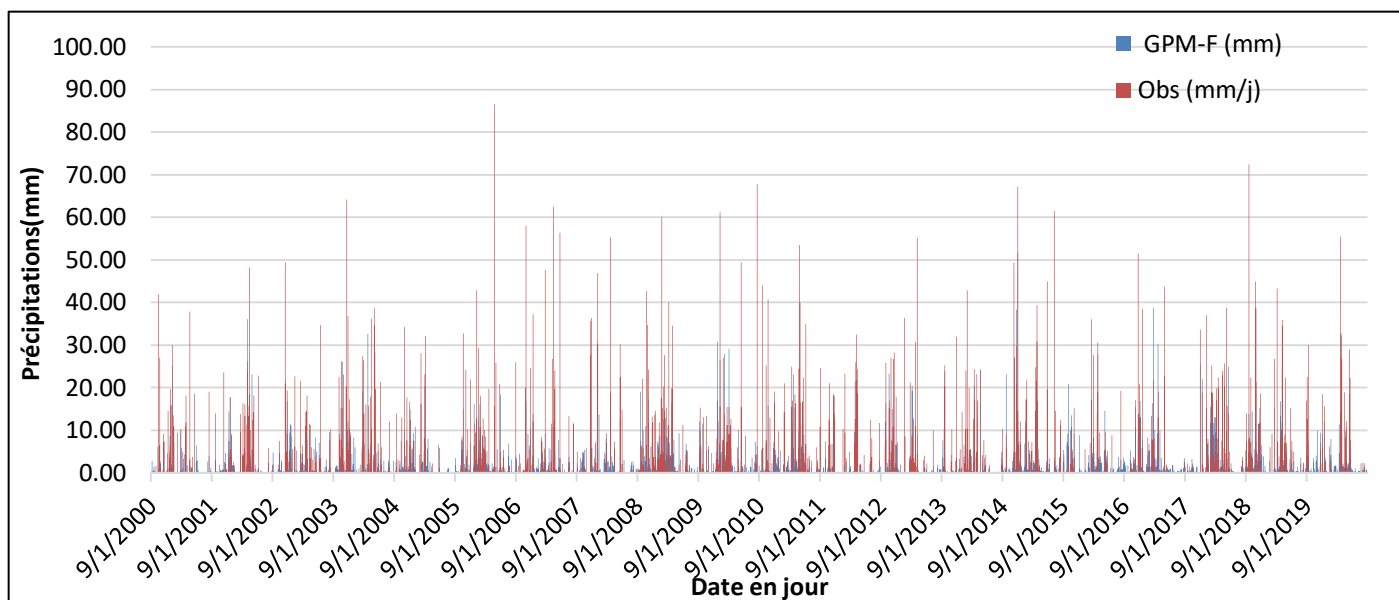


Figure 11: Variation des données observées de la station AGHBALOU et les données de GPM-F à l'échelle journalière (2000-2020)

Les variations mensuelles (**figure 12**) révèlent une tendance de surestimation pour les événements légers $P < 10$ mm un écart maximal de 10 mm/mois. De même, une surestimation est observée pour les précipitations moyennes $10 < P < 25$ mm avec un écart maximal de 15 mm/mois.

Cependant, une sous-estimation des précipitations est observée pour les événements pluvieux de hauteurs supérieures à 25 mm, avec une accentuation de cette sous-estimation pouvant atteindre des différences allant jusqu'à 130 mm/mois pour les fortes précipitations ($P > 50$ mm). De plus, il convient de noter une surestimation significative des mesures au cours de l'année 2016/2017.

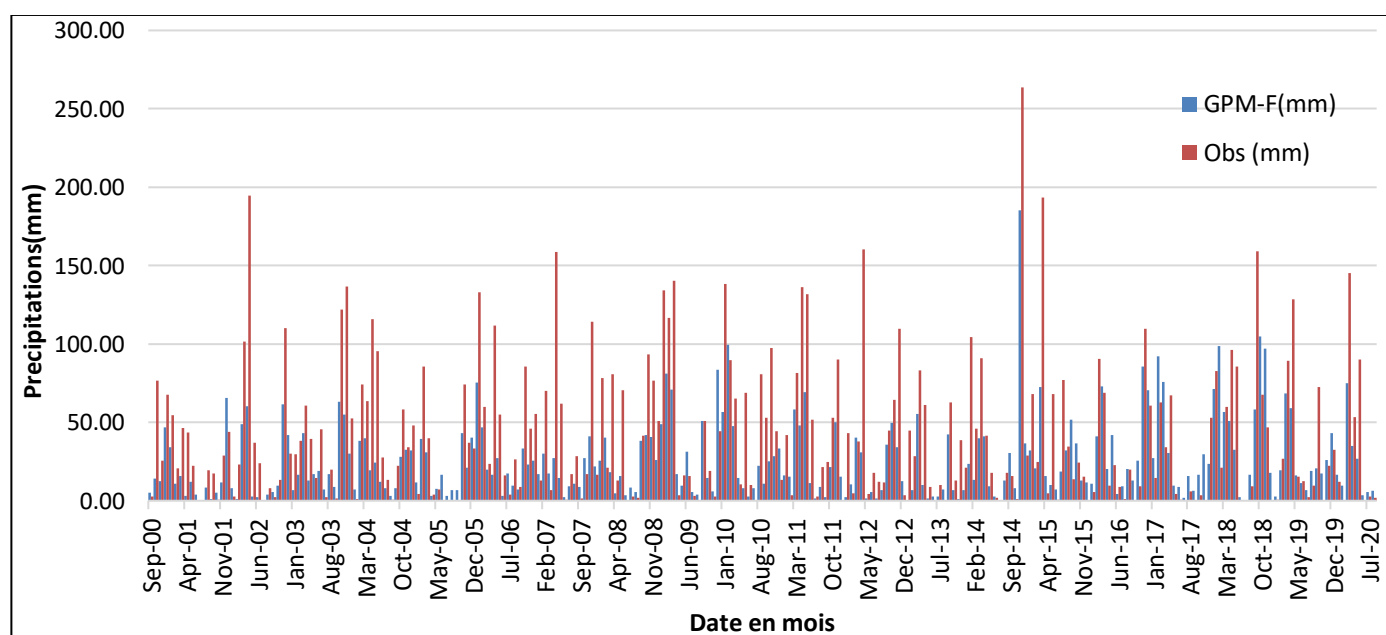


Figure 12: Variation des données observées de la station AGHBALOU et les données de GPM-F à l'échelle mensuelle (2000-2020)

Annuellement (**figure 13**), le produit démontre une sous-estimation des tous les évènements pluviaux d'une différence d'environ 150-200mm qui peut aller jusqu'à 400. Sauf que les précipitations durant l'année 2016/2017 sont marquées par une surestimation légère.

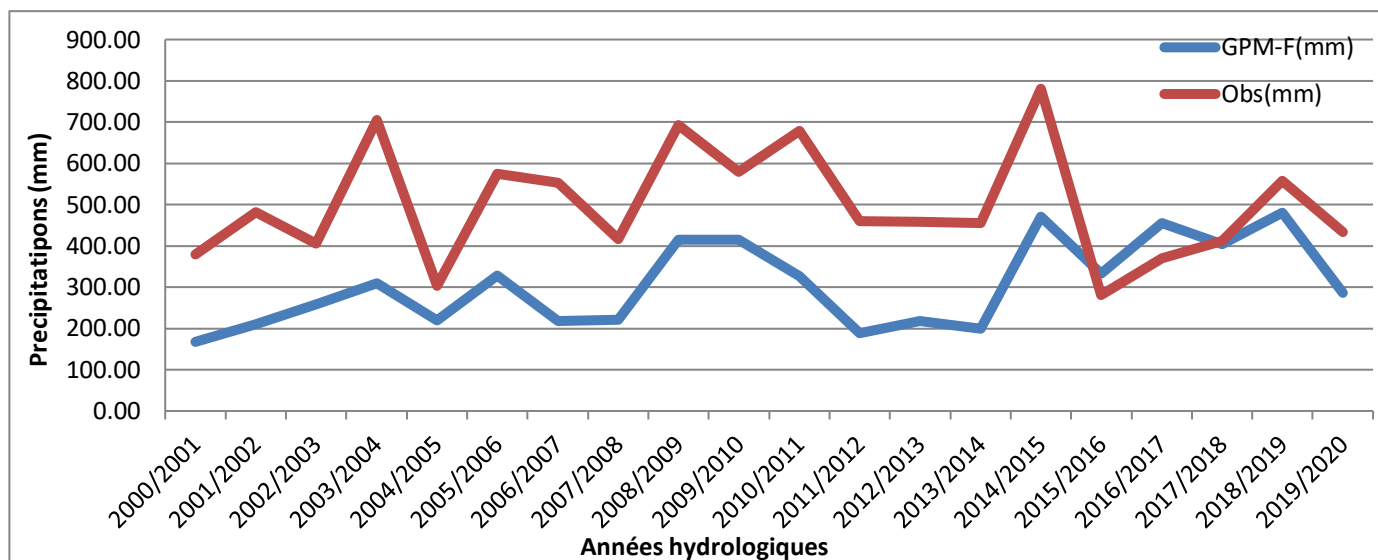


Figure 13: Variation des données observées de la station AGHBALOU et les données de GPM-F à l'échelle annuelle (2000-2020)

D'après ces constatations, La performance de IMERG GPM Final en moyenne montagne (Station Aghbalou) présente des sous-estimations des évènements pluviaux pour toutes les trois échelles temporelles d'un écart maximal de 80mm/j, 10-15mm/mois et 150-400mm/an.

- Iloudjane (basse montagne) :

L'analyse des précipitations journalières (**figure 14**) révèle une sous-estimation des évènements de pluie de hauteurs inférieures à 20 mm, tandis que les précipitations de hauteurs supérieures à 20 mm sont surestimées avec une différence allant jusqu'à 40 mm/jour.

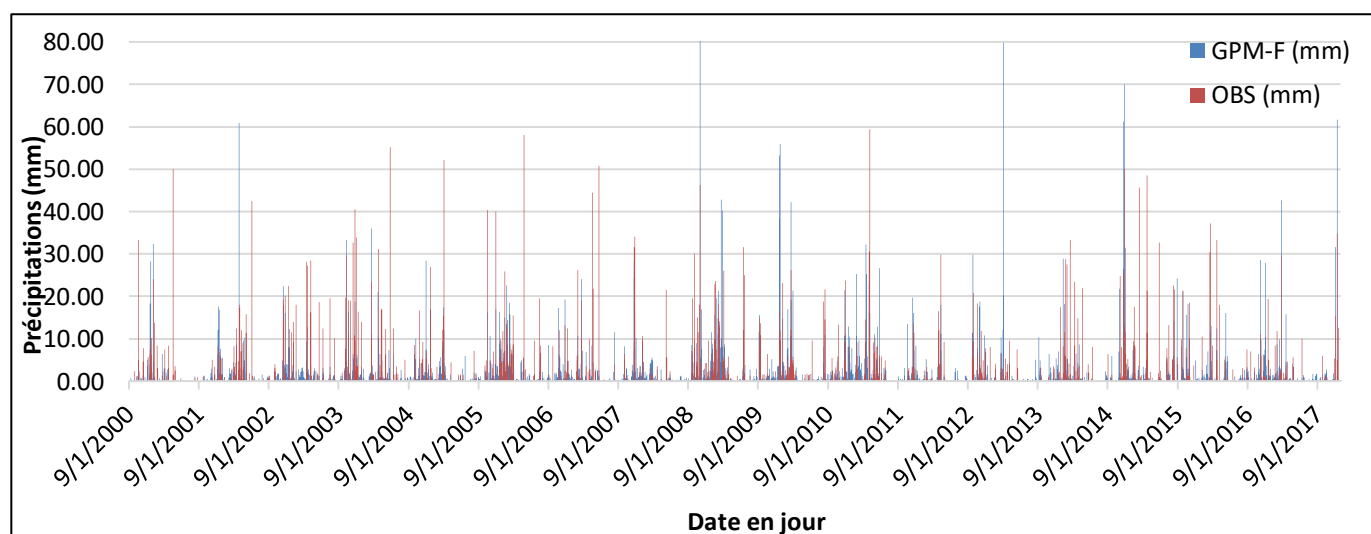


Figure 14: Variation des données observées de la station ILOUDJANE et les données de GPM-F à l'échelle journalier (2000-2017)

À l'échelle mensuelle (**figure15**), le produit tend à sous-estimer les précipitations de hauteurs inférieures à 10 mm, mais surestime les précipitations comprises entre 10 et 70 mm de 20 à 30 mm, et les précipitations intenses ($P > 70$ mm) parfois de 100 mm.

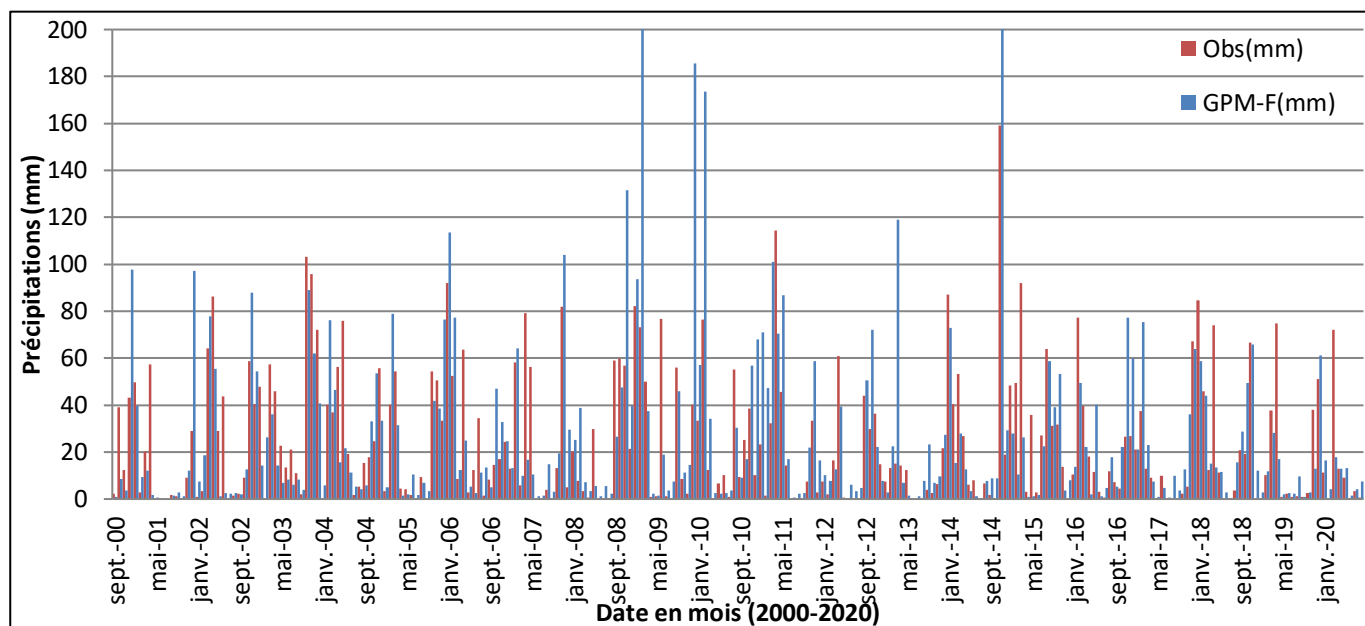


Figure 15: Variation des données observées de la station ILOUDJANE et les données de GPM-F à l'échelle mensuelle (2000-2020)

Sur une base annuelle (**figure16**), le produit montre une surestimation générale de tous les événements pluvieux, à l'exception de l'année 2003/2004 qui est marquée par une sous-estimation.

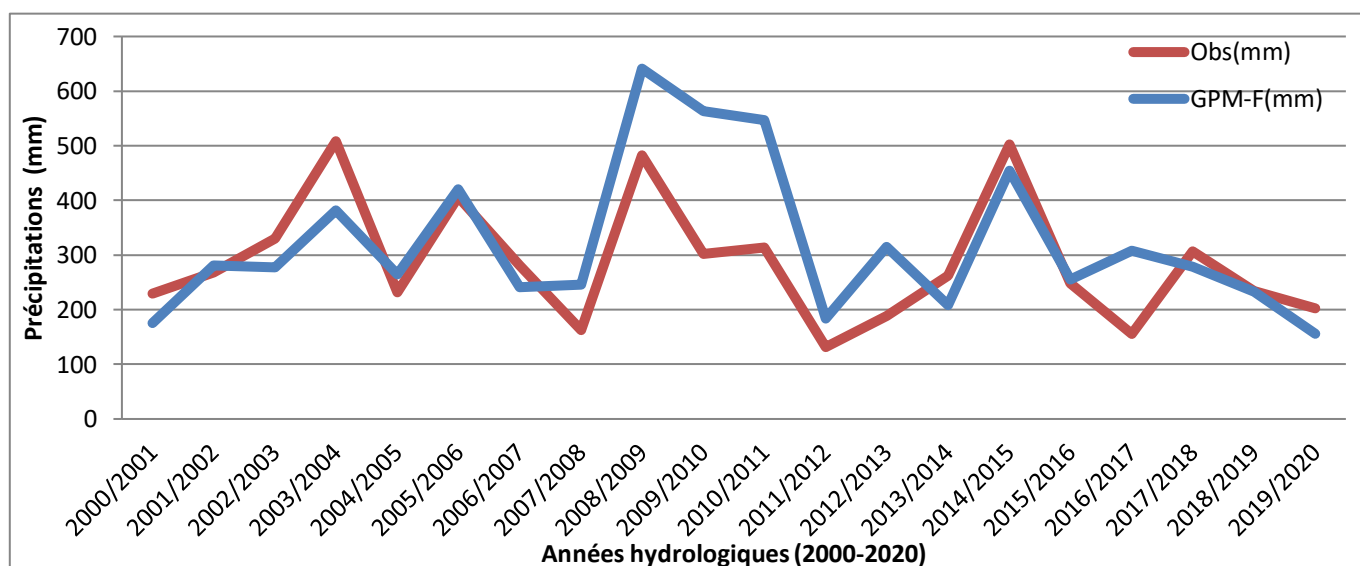


Figure 16: Variation des données observées de la station ILOUDJANE et les données de GPM-F à l'échelle annuelle (2000-2020).

Les performances du produit IMERG GPM Final au niveau de basse montagne (station d'Iroudjane), indiquent une tendance générale à surestimer les événements pluvieux, avec des différences d'ordre de 40 mm/jour, 100 mm/mois et 200 mm/an.

b) IMERG GPM-F en plaine :

- Marrakech :

L'évaluation du produit IMERG GPM Final à la station montre également une tendance générale à surestimer les événements pluvieux. Cette surestimation peut atteindre un maximum de 78mm/jour et de 50 mm/mois, bien que la surestimation annuelle reste faible. (figure17,18,19).

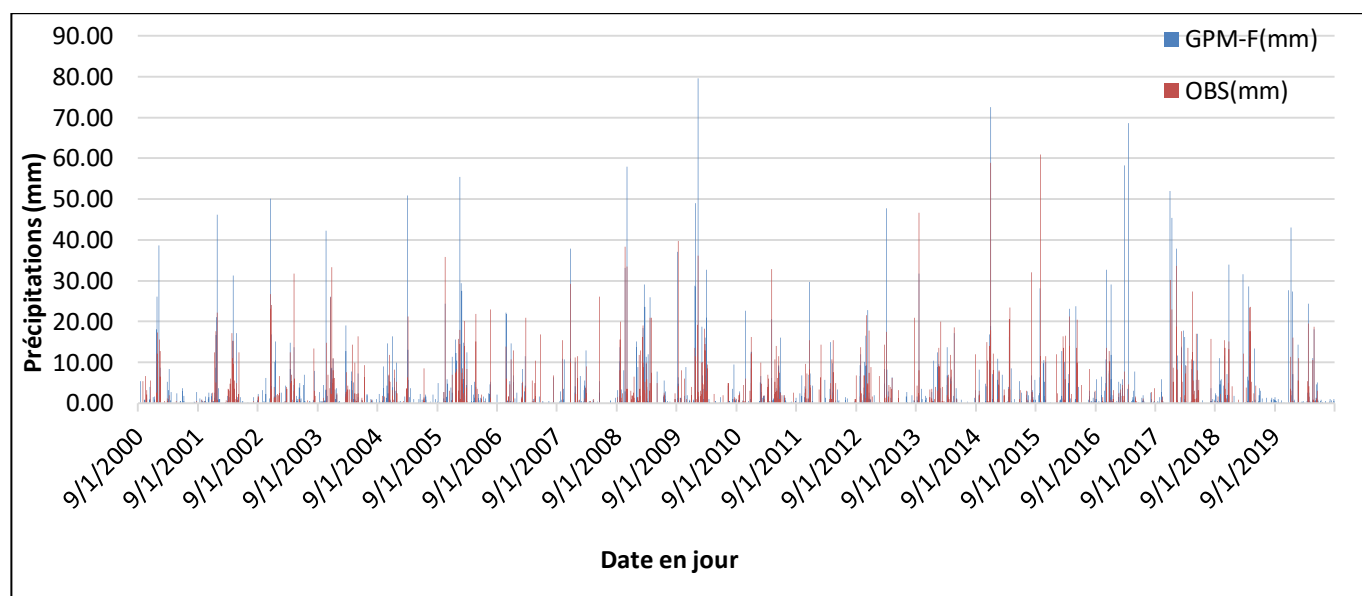


Figure 17: Variation des données observées de la station MARRAKECH et les données de GPM-F à l'échelle journalière (2000-2020).

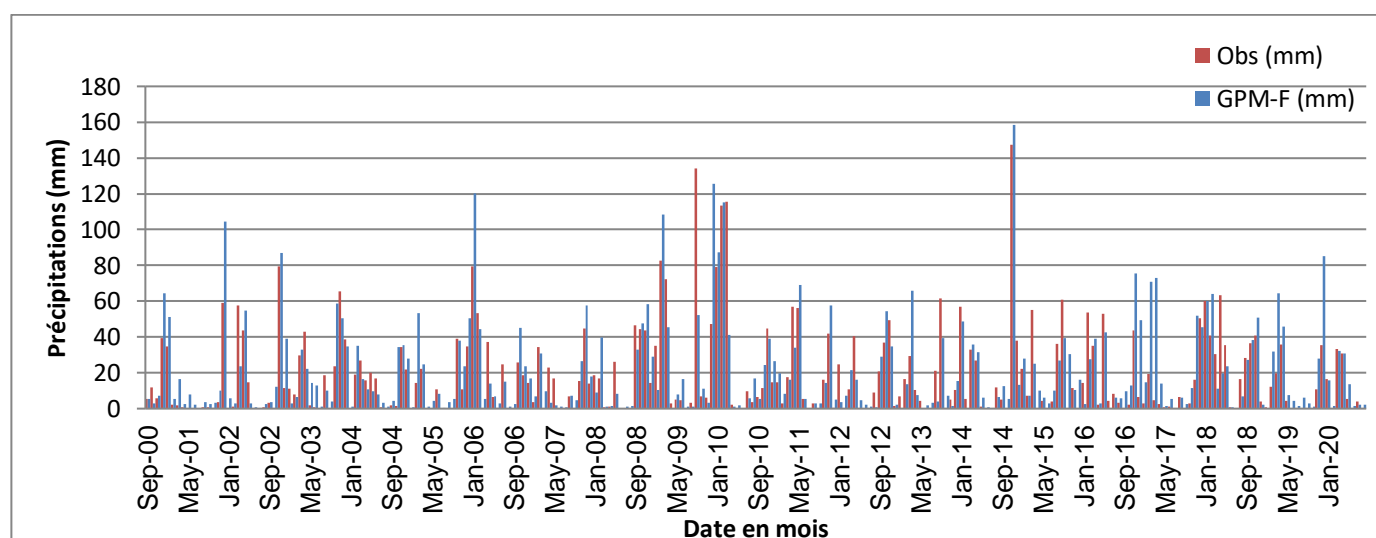


Figure 18: Variation des données observées de la station Marrakech et les données GPM-F à l'échelle mensuelle (2000-2020)

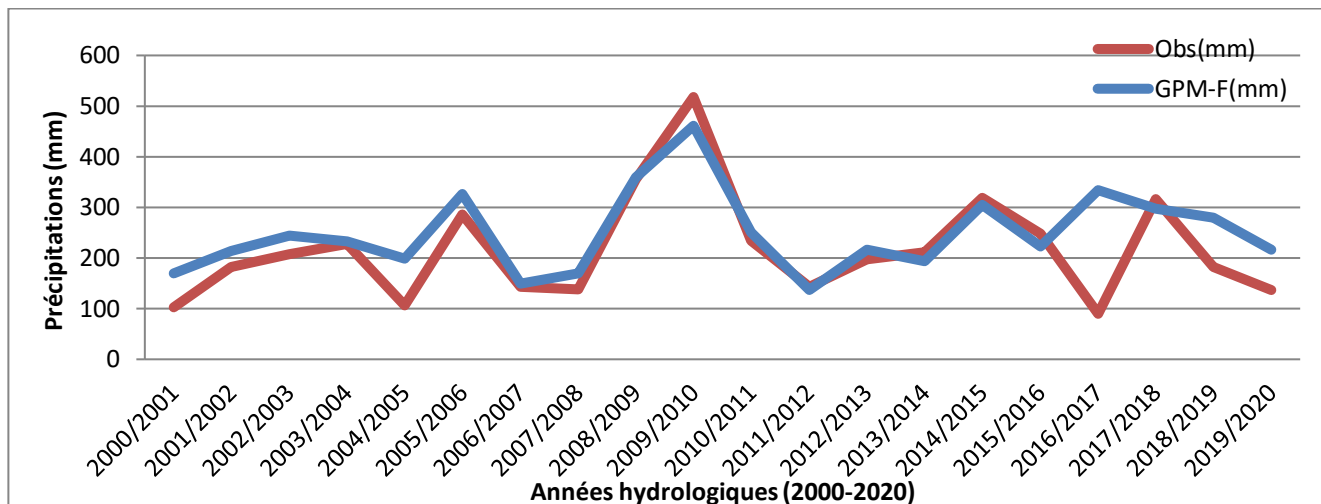


Figure 19: Variation des données observées de la station Marrakech et les données GPM-F à l'échelle annuelle (2000-2020)

c) IMERG GPM-F en zone côtière :

- Talmest :

Nos résultats journaliers (**figure 20**) indiquent que les précipitations de hauteurs inférieures à 20 mm sont généralement sous-estimées d'environ 10 mm par le produit, tandis que les précipitations de hauteurs supérieures à 20 mm sont surestimées d'un écart allant de 10 à 50mm.

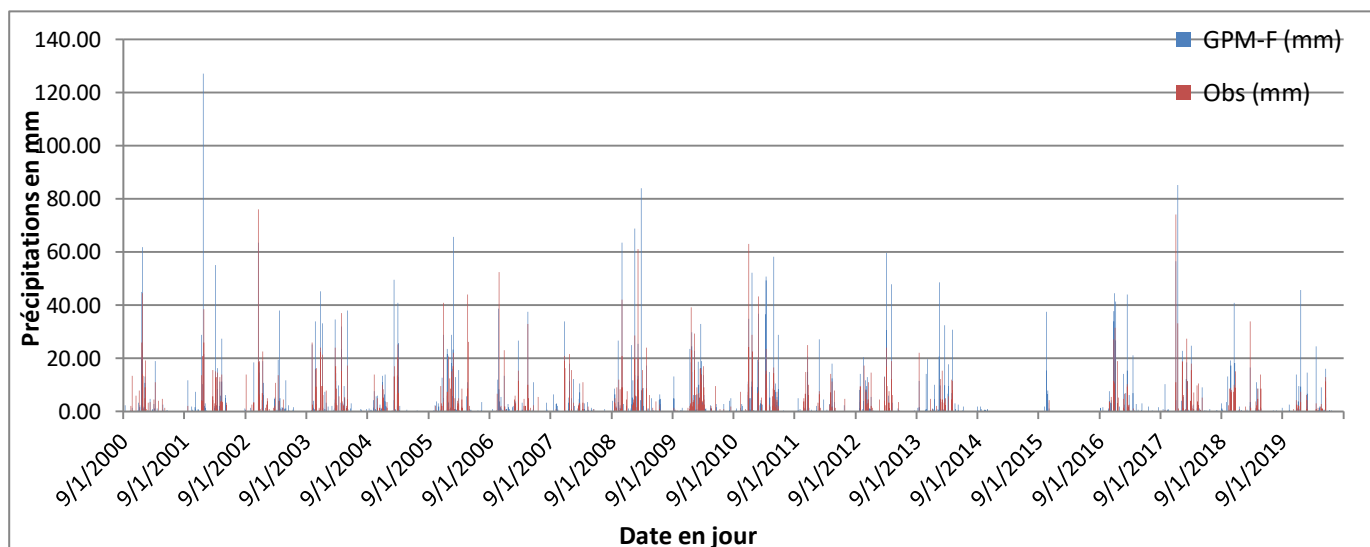


Figure 20: Variation des données observées de la station Talmest et les données GPM-F à l'échelle journalier (2000-2020)

En ce qui concerne les évaluations mensuelles (**figure 21**), nous avons constaté une sous-estimation des pluies inférieures à 20 mm, avec une différence allant de 15 à 80 mm.

En revanche, les pluies supérieures à 20 mm sont surestimées, avec un écart de 50 à 100 mm.

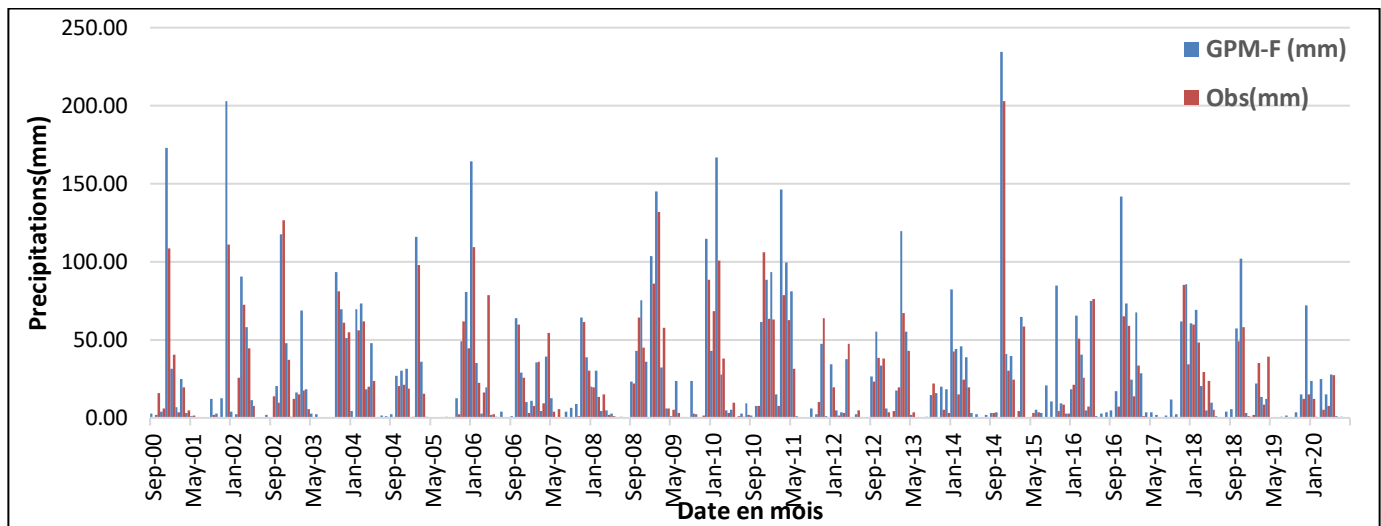


Figure 21: Variation des données observées de la station Talmest et les données GPM-F à l'échelle mensuel (2000-2020)

A l'échelle annuelle (**figure 22**), notre analyse révèle une tendance générale du produit à surestimer toutes les précipitations au fil des années.

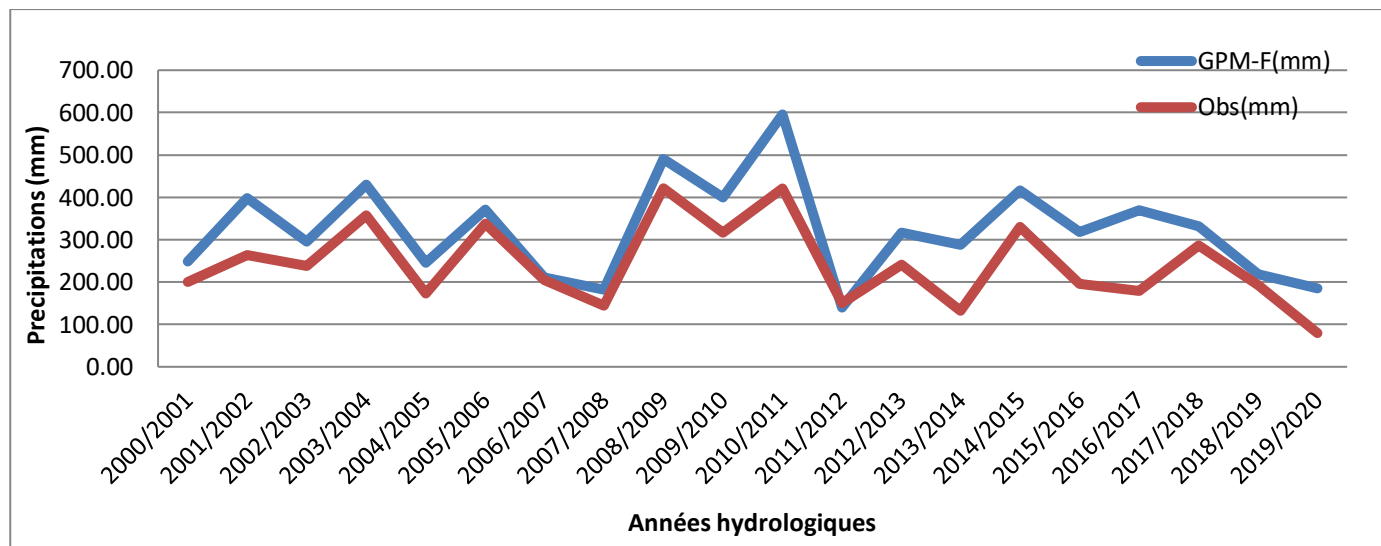
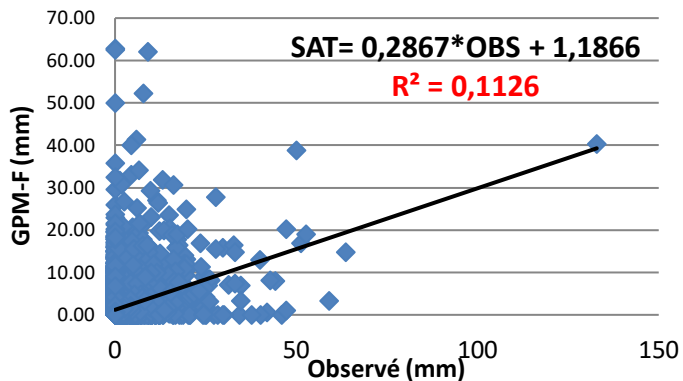


Figure 22: Variation des données observées de la station Talmest et les données GPM-F à l'échelle annuelle (2000-2020)

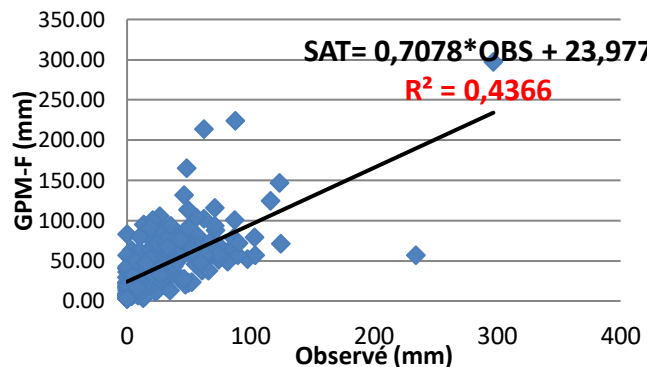
La performance du produit IMERG GPM-Final dépend de la topographie des stations. En haute montagne, ce produit a tendance à surestimer la plupart des événements pluvieux, à l'exception des précipitations de moyenne et forte intensité qui sont légèrement sous-estimées. En moyenne montagne, il présente une tendance inverse : il sous-estime l'ensemble des événements pluvieux, sauf les précipitations de faible intensité qui sont surestimées. En basse montagne, GPM-F montre une surestimation des précipitations de moyenne et forte intensité et une sous-estimation des précipitations de faible intensité.

Cette performance est illustrée par les droites de régression (**figure 23**) qui démontrent que le produit est influencé par le facteur d'altitude.

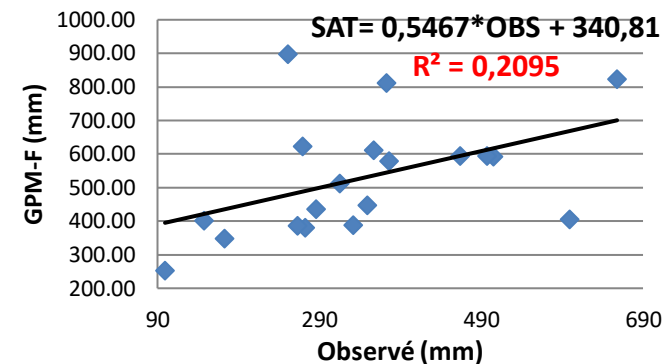
AMENZEL: échelle journalière



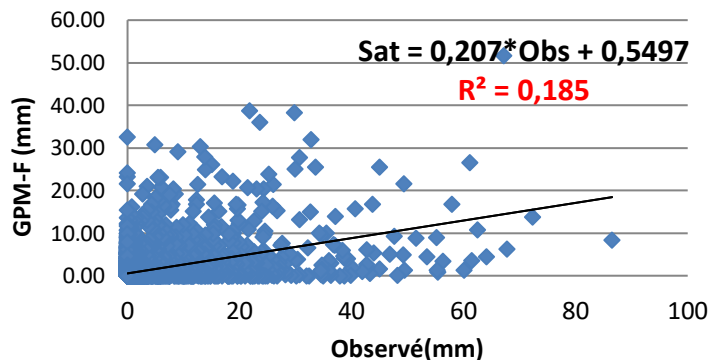
AMENZEL: échelle mensuelle



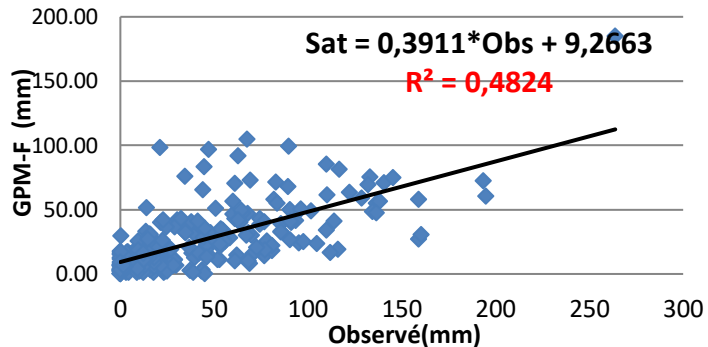
AMENZEL: échelle annuelle



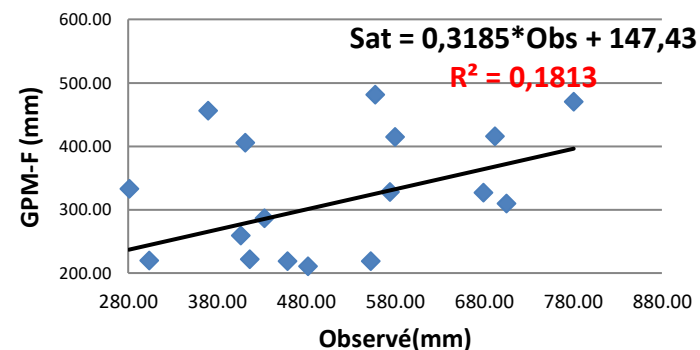
Aghbalou : échelle journalière



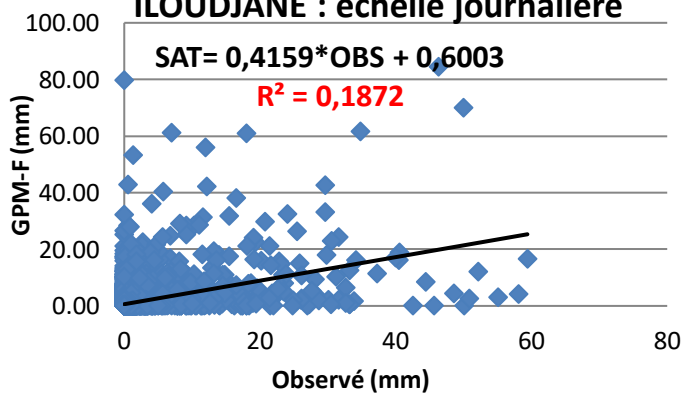
Aghbalou: échelle mensuelle



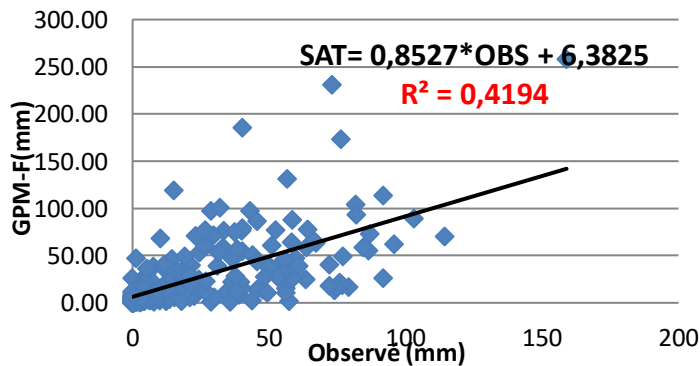
Aghbalou: échelle annuelle



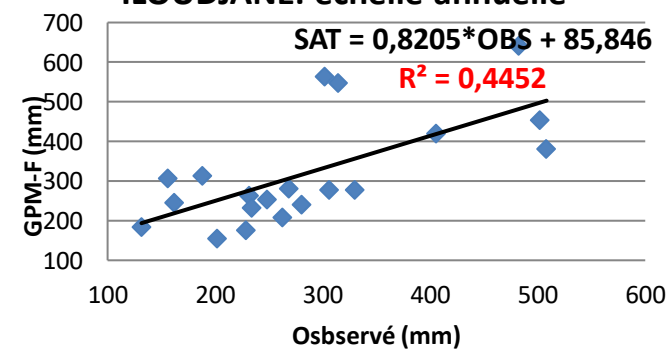
ILOUDJANE : échelle journalière



ILOUDJANE: échelle mensuelle



ILOUDJANE: échelle annuelle



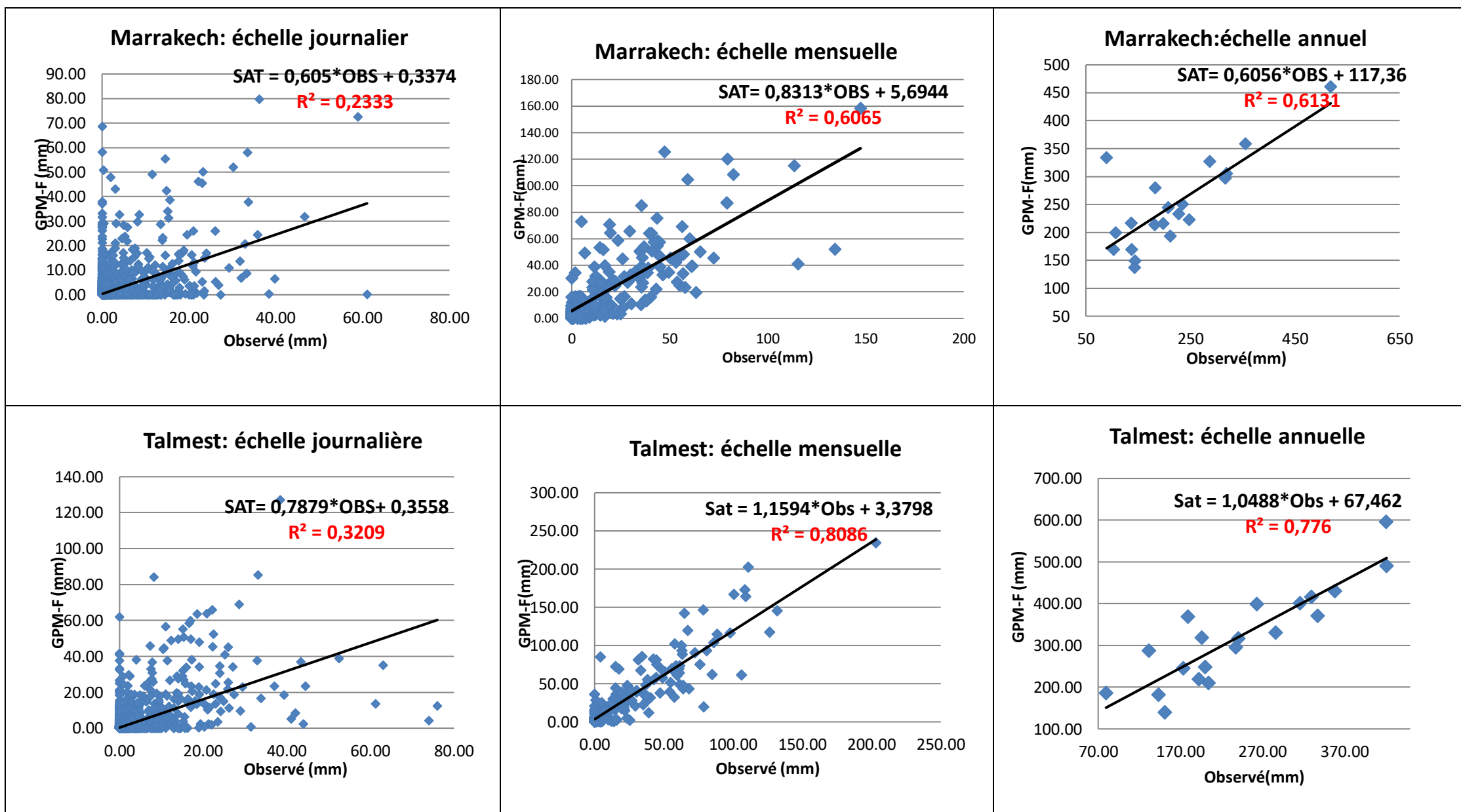


Figure 23: Corrélation entre les données observées et les données IMERG (GPM) Final pour la station AMENZEL, AGHBALOU, ILOUDAJNE, MARRAKECH et TALMEST selon les trois échelles

d) Variation des indicateurs statistiques en fonction de l'altitude :

D'après les figures ci-dessous (figures 24,25,26), il apparaît que la variation des indicateurs statistiques est d'avantage liée à l'altitude, comme le montre le coefficient de détermination R^2 , qui est inférieur à 1 et dont la valeur maximale ne dépasse pas 0.5 à l'échelle journalière, 0,6 mensuelle et 0,8 annuelle. En observant les droites de régression, on peut déduire que le r et le **biais** diminuent avec l'augmentation de l'altitude, ce qui se traduit par une pente négative de la droite de régression. Toutefois, la droite de régression du biais est presque horizontale car elle est influencée par la surestimation en haute altitude (cas de la station Amenzel) due aux événements neigeux que le pluviomètre ne peut pas mesurer. Quant à l'indicateur **RMSE**, il reflète une tendance à augmenter proportionnellement à l'élévation de l'altitude, tendance confirmée par la droite de régression qui a une pente positive.

- Coefficient de corrélation r :

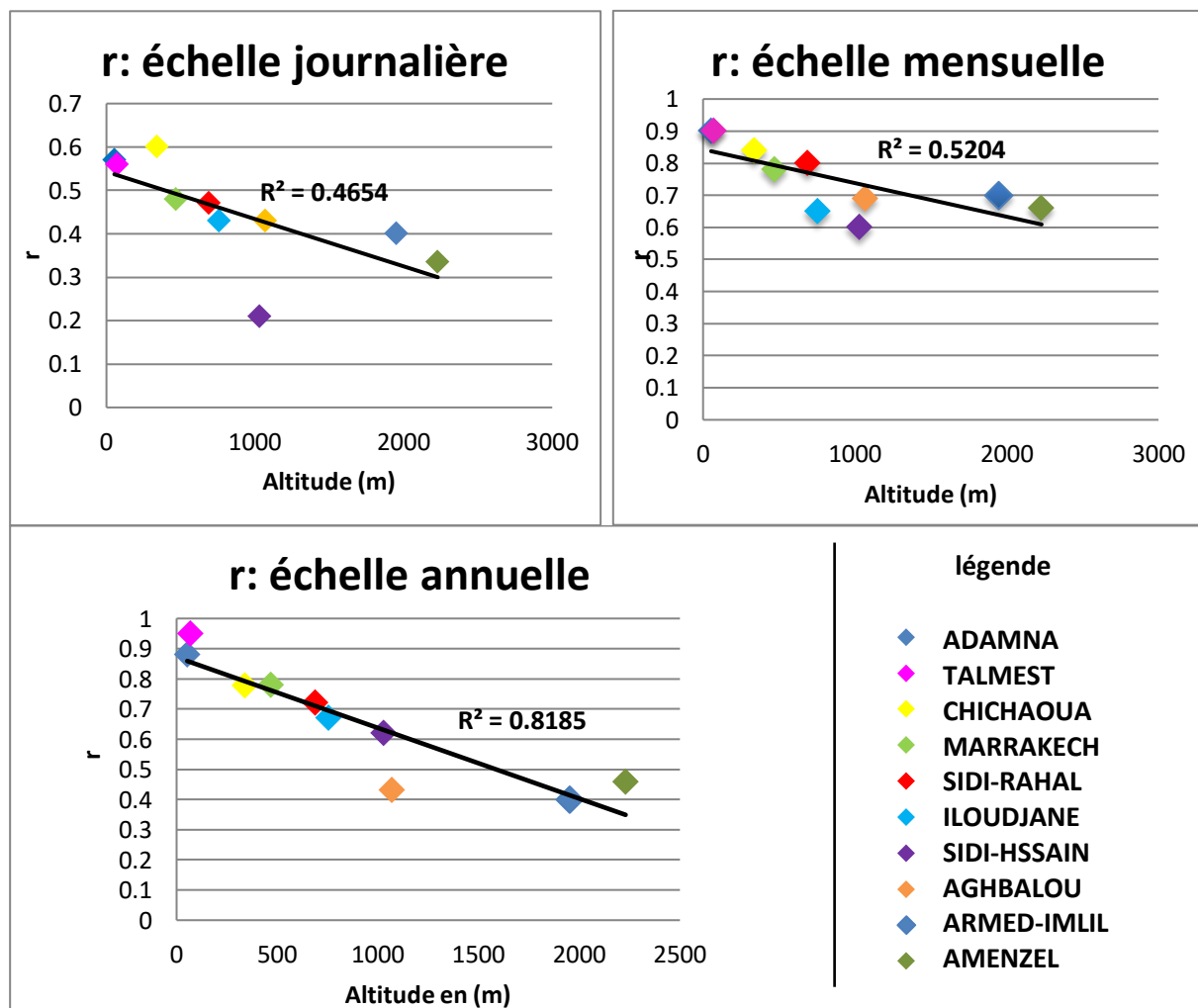


Figure 24: Variation du r en fonction de l'altitude

• **BIAIS :**

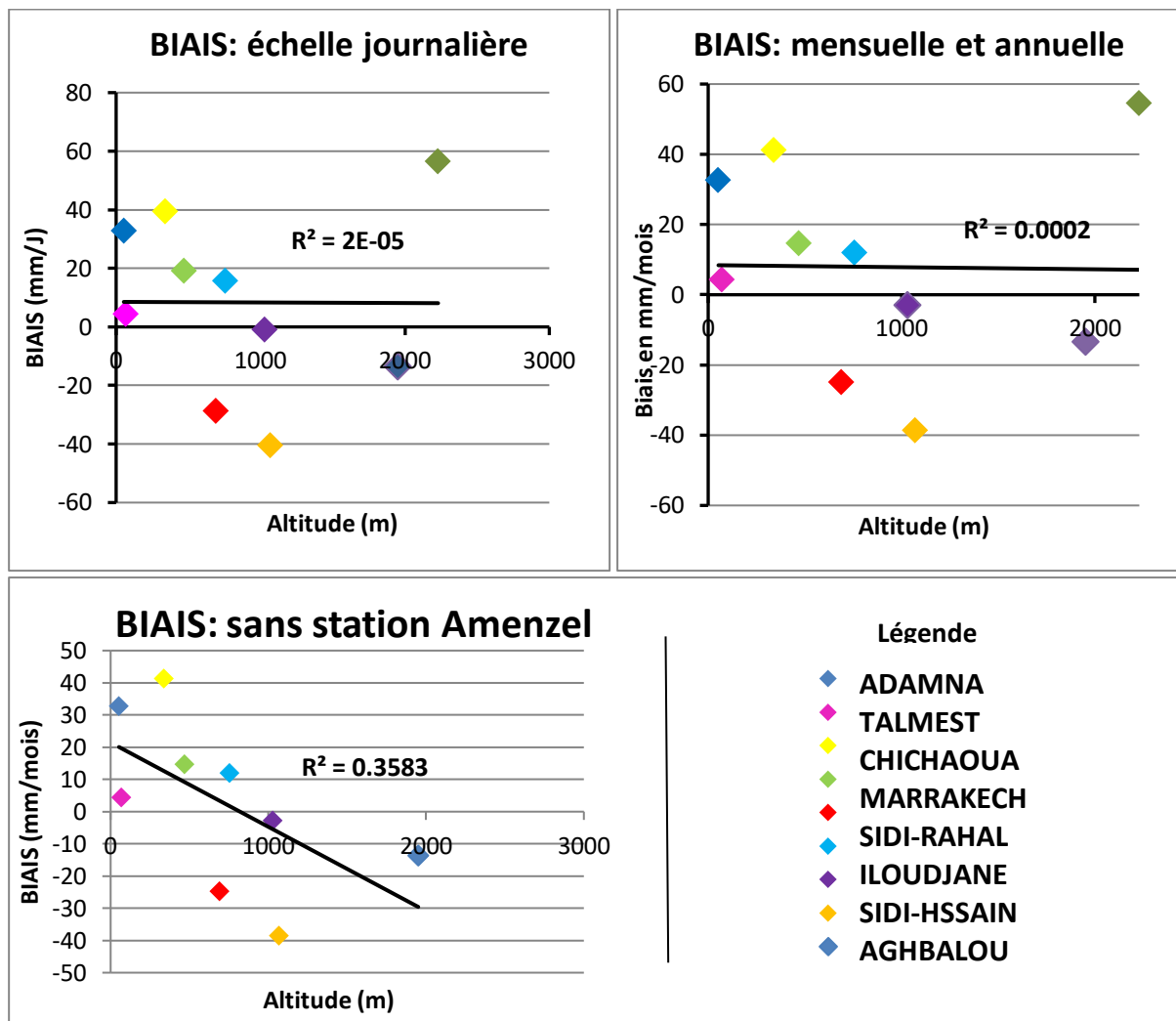
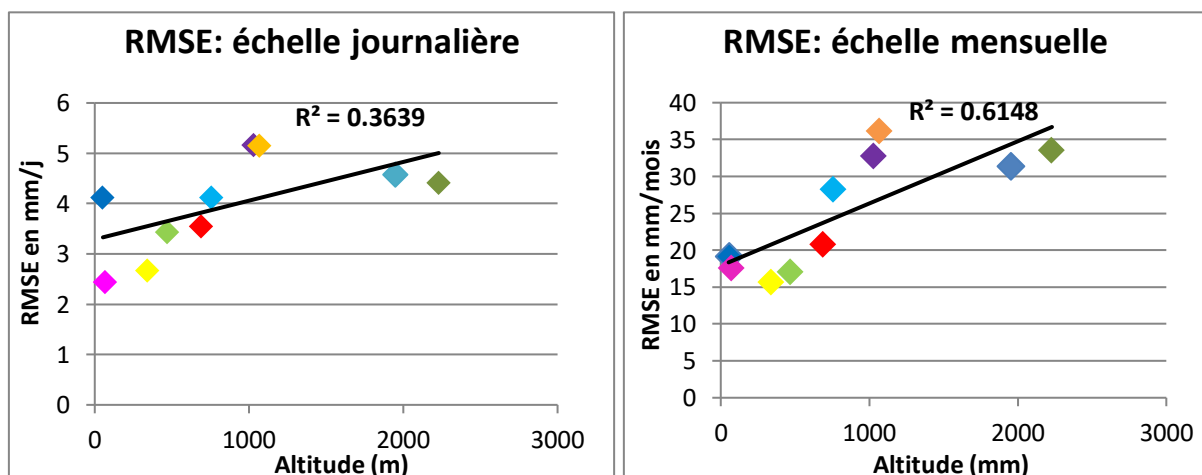


Figure 25: Variation du BIAIS en fonction d'altitude

• **RMSE :**



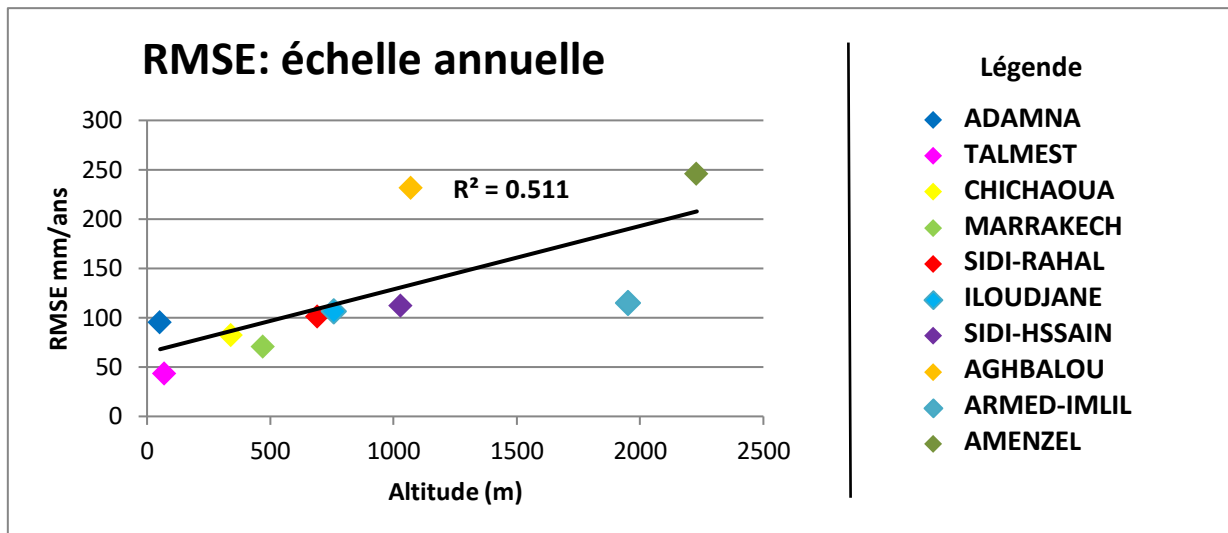


Figure 26: Variation de RMSE en fonction de l'altitude

2- Résultats de traitement avec le produit PERSIANN CCS-CDR :

Le tableau ci-dessous (**tableau 7**) présente les résultats de traitement des données observées des 10 stations pluviométriques avec les données estimées par PERSIANN CCS-CDR :

-Annuellement et mensuellement, les données observées sont bien corrélées avec les données estimées par le produit avec un coefficient de corrélation r qui atteint une valeur maximale de 0.79 dans la station Talmest. Cependant, la station Armed-Imlil enregistre le coefficient de corrélation minimal, avec une valeur mensuelle de 0,26 et une valeur annuelle de 0,42. En revanche, les données estimées par PERSIANN CCS-CDR présentent une faible corrélation avec les données observées des stations à l'échelle journalière, avec un coefficient de corrélation minimal n'atteint que 0.08 dans le cas de station Sidi Hssain, tandis que la valeur maximale de r est d'environ 0,3 dans la zone côtière.

-Le paramètre **RMSE** enregistre une ampleur d'erreur à l'échelle annuelle surtout dans les zones montagneuses. Il est très élevé dans les stations en haute altitude (la station Armed-Imlil), et moins intense principalement en plaine (station Chichaoua) et en zone côtière (station Talmest).

-Quant au **biais** indique une meilleure estimation dans les cas des stations Amenzel, Iلودجane et Talmest avec des valeurs qui ne dépassent pas 5% selon les trois échelles. Par contre il montre une surestimation importante de 40% dans la station de Chichaoua et une sous-estimation intense de 35% pour les deux stations Aghbalou et Adamna, et cela durant les trois échelles.

Tableau 7: Résultats de traitement avec PERSIANN CCS-CDR

Station	Altitude	Emplacement	Echelle	r	ME	MAE	BIAIS (%)	RMSE
AMENZEL	2230	Montagne	Journalière	0,21	-0,002	1,44	-0,19	5,52
			Mensuelle	0,44	-0,36	21,65	-1,25	37,09
			Annuelle	0,34	-25,81	97,51	-7,15	141,78
ARMED-IMLIL	1940	Montagne	Journalière	0,19	-0,13	1,64	-11,47	6,72
			Mensuelle	0,42	-3,97	26,80	-11,44	46,66
			Annuelle	0,26	-53,17	141,67	-13,00	185,42
AGHBALOU	1070	Montagne	Journalière	0,17	-0,51	1,88	-35,56	6,53
			Mensuelle	0,51	-13,93	28,11	-33,50	41,58
			Annuelle	0,55	-167,15	180,10	-33,50	203,91
SIDI-HSSAIN	1030	Montagne	Journalière	0,08	-0,27	1,79	-23,45	6,00
			Mensuelle	0,50	-8,88	22,51	-25,71	36,34
			Annuelle	0,55	-106,60	127,77	-25,71	154,07
ILOUDJANE	757	Montagne	Journalière	0,20	-0,04	1,24	-5,01	4,86
			Mensuelle	0,47	-1,33	18,84	-5,56	30,08
			Annuelle	0,39	-15,97	93,53	-5,56	113,22
SIDI-RAHAL	690	Montagne	Journalière	0,24	-0,13	1,22	-14,95	4,37
			Mensuelle	0,64	-4,14	15,58	-15,90	25,17
			Annuelle	0,59	-49,70	63,04	-15,90	89,38
MARRAKECH	460	Plaine	Journalière	0,24	0,13	1,00	22,48	4,05
			Mensuelle	0,72	3,21	12,57	17,73	19,06
			Annuelle	0,70	38,53	65,68	17,73	83,72
CHICHAOUA	340	Plaine	Journalière	0,30	0,19	0,80	42,34	3,48
			Mensuelle	0,74	6,03	11,44	44,41	18,53
			Annuelle	0,71	72,34	72,51	44,39	92,50
ADAMNA	70	Côtière	Journalière	0,31	-0,31	1,05	-36,66	4,70
			Mensuelle	0,70	-8,80	17,74	-35,27	30,47
			Annuelle	0,60	-105,64	113,17	-35,27	149,08
TALMEST	53	Côtière	Journalière	0,35	0,04	0,97	5,38	4,13
			Mensuelle	0,79	1,25	12,69	6,15	19,77
			Annuelle	0,79	14,96	60,18	6,15	68,66
		Moyenne	Journalière	0,28	-0,10	1,30	1,14	4,81
			Mensuelle	0,59	-3,41	18,82	-6,03	30,47
			Annuelle	0,55	-39,82	101,51	-6,78	128,17

a) PERSIANN CCS-CDR en montagne :

- AMENZEL (haute montagne) :

À l'échelle journalière (**figure 27**), le produit a tendance à surestimer les faibles précipitations ($P < 5 \text{ mm/j}$) avec une différence moyenne de $0,6 \text{ mm/j}$. Des fausses alarmes (absence de pluie, $P = 0 \text{ mm/j}$) sont détectées principalement pendant les hivers, avec un maximum de 131 mm/j le 30 novembre 2016. En revanche, le produit sous-estime les précipitations modérées ($5 < P < 20 \text{ mm/j}$) avec une moyenne de $6,3 \text{ mm/j}$, et cette sous-estimation s'aggrave pour les fortes précipitations ($P > 30 \text{ mm/j}$) jusqu'à une différence moyenne de $26,3 \text{ mm/j}$.

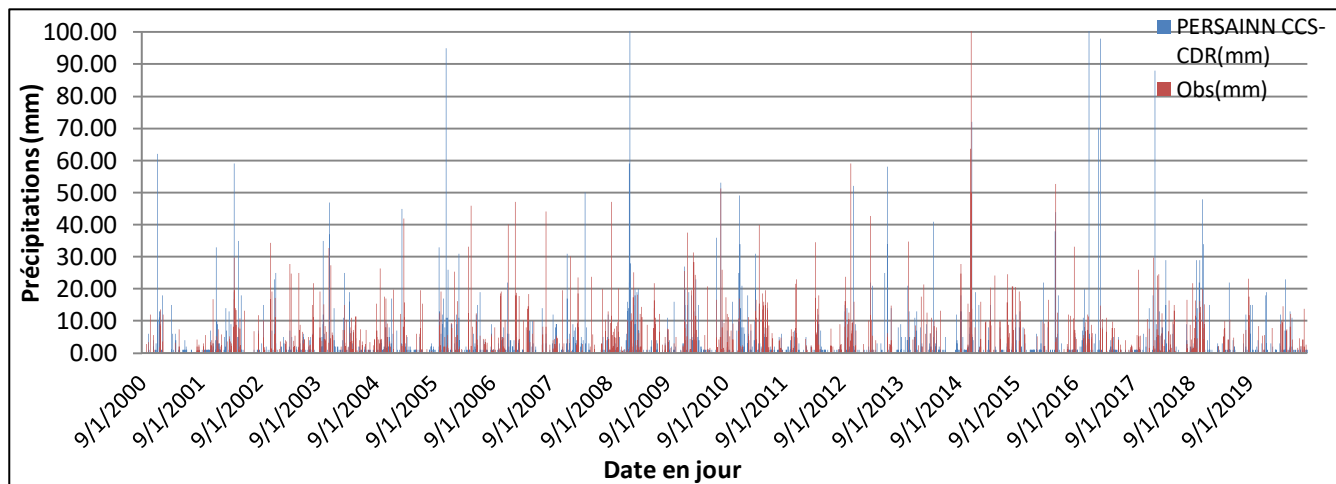


Figure 27: Variation des données observées de la station AMENZEL et les données de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle journalière (2000-2020)

Mensuellement (**figure 28**), les précipitations intenses ($P > 60 \text{ mm/mois}$) sont sous-estimées par le produit, avec un écart maximal de $214,3 \text{ mm}$ en octobre 2006. En revanche, les pluies légères ($P < 20 \text{ mm/mois}$) et pluies moyennes ($20 < P < 60 \text{ mm/mois}$) sont surestimées respectivement de 7 mm/mois et de 3 mm/mois en moyenne.

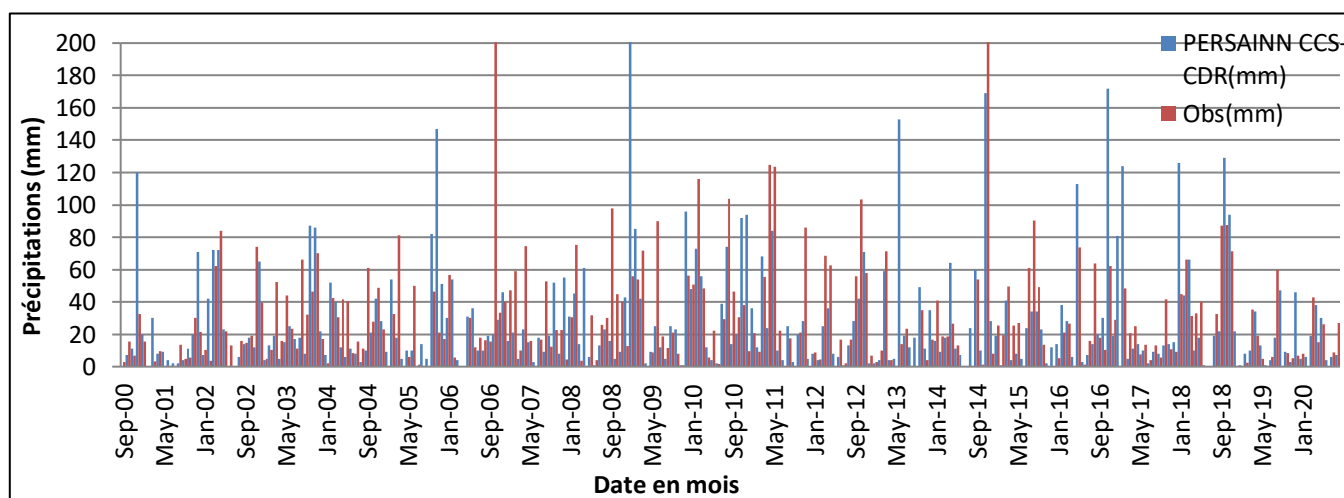


Figure 28: Variation des données observées de la station AMENZEL et les données de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle mensuelle (2000-2020)

Sur la base annuelle (**figure29**), le produit CCS CDR montre une tendance à sous-estimer tous les événements pluviaux, avec un seuil maximal de 337 mm et 288 mm respectivement pour les années 2006/2007 et 2014/2015.

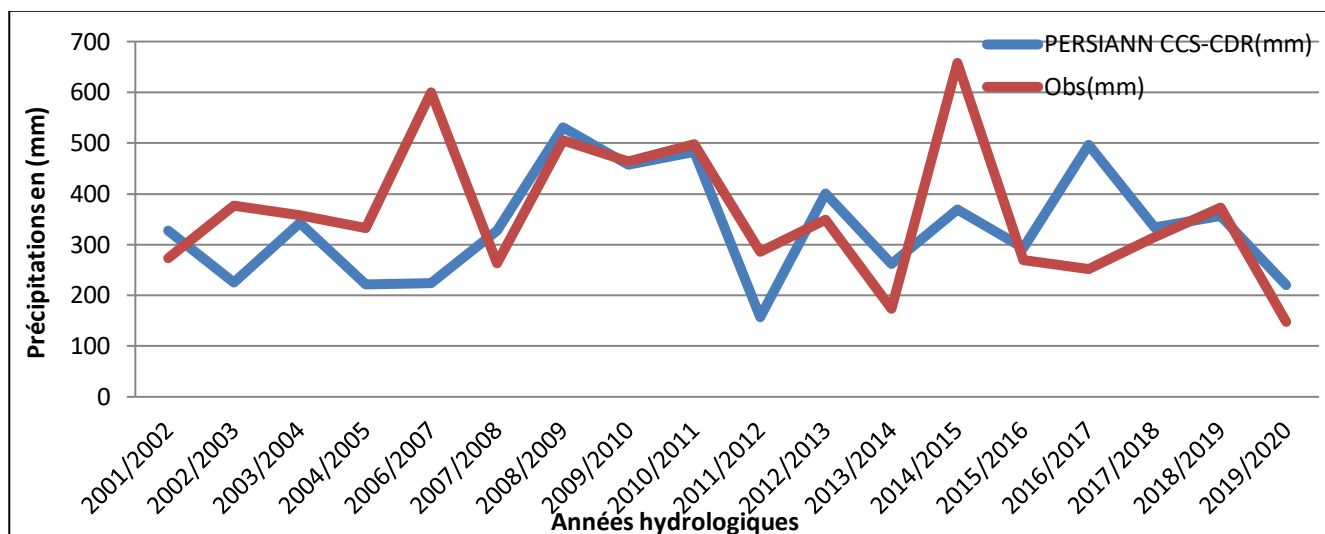


Figure 29: Variation des données observées de la station AMENZEL et les données de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle annuelle (2000-2020)

- AGHBALOU :

A l'échelle journalière (**figure30**), le produit satellitaire surestime les événements pluviaux ($P < 5\text{mm/j}$) avec une erreur moyenne de 1mm/j , alors qu'il sous-estime les pluies $P > 5\text{mm/j}$, cette sous-estimation augmente en allant vers les pluies intenses.

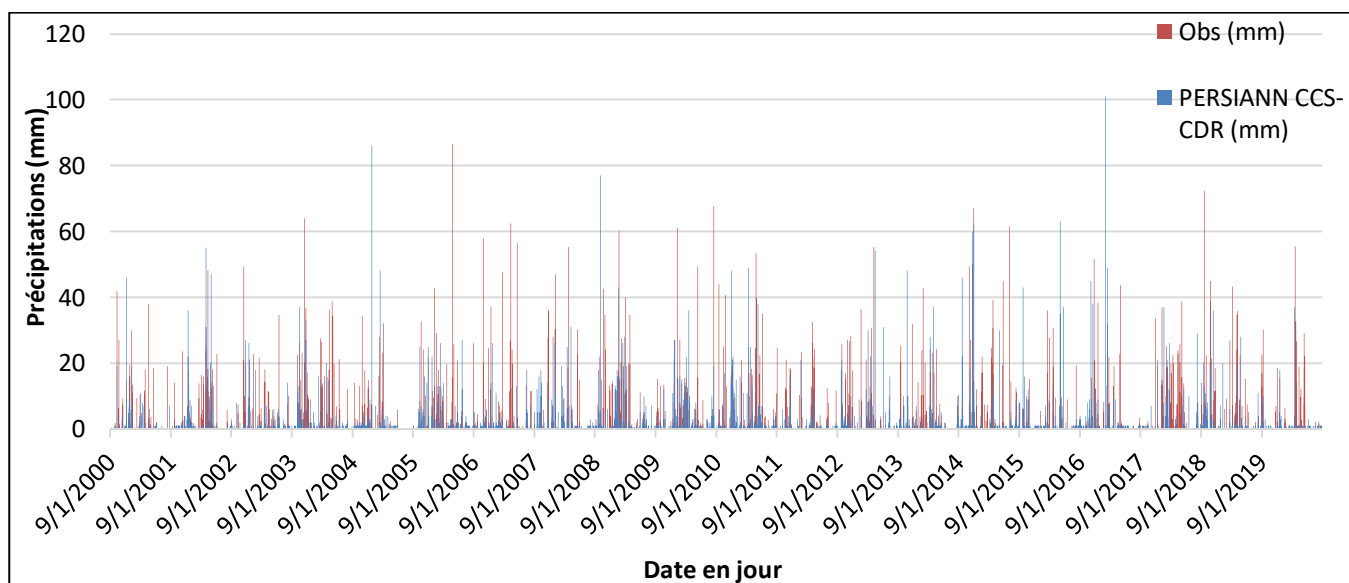


Figure 30: Variation des données observées de la station AGHBALOU et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle journalière (2000-2020)

Le produit PERSIANN CCS CDR surestime mensuellement (**figure31**) les précipitations légères ($P < 20\text{mm/mois}$) et sous-estime les précipitations moyennes et intenses, respectivement de 10mm/mois et 53mm/mois en moyenne.

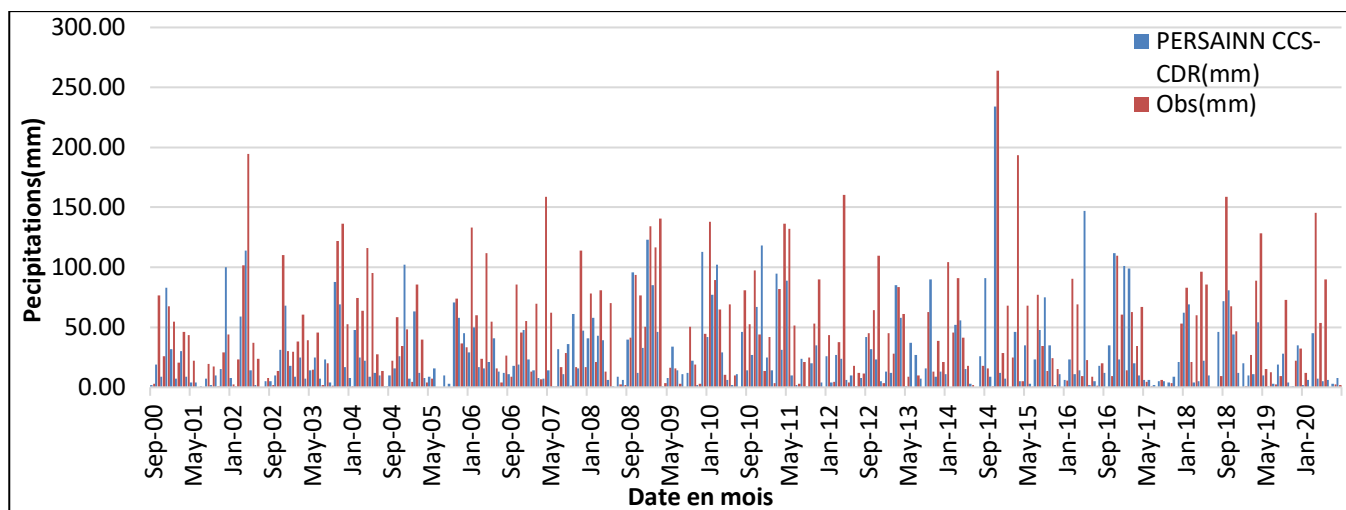


Figure 31: Variation des données observées de la station AGHBALOU et les données de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle mensuelle (2000-2020)

Au fil des années (**figure 32**), une tendance à la surestimation générale des précipitations est observé, atteignant un maximum de 391.07mm/an pendant l'année 2003/2004.

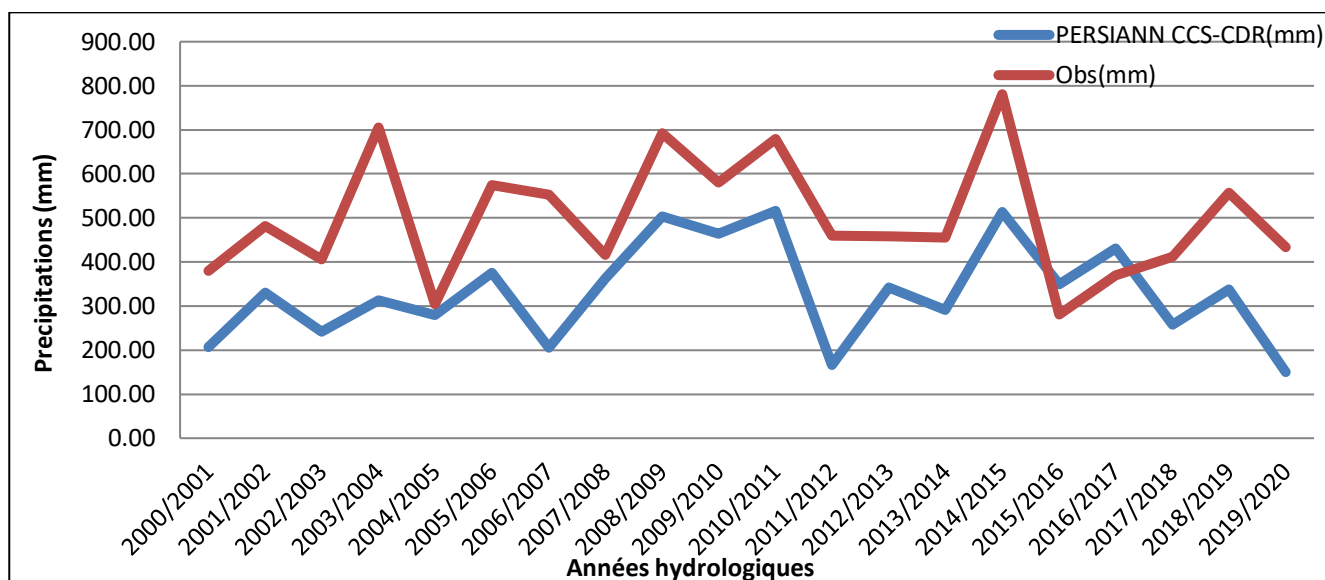


Figure 32: Variation des données observées de la station AGHBALOU et les données de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle annuelle (2000-2020)

- ILOUDJANE (base montagne) :

Les résultats journalières (**figure 33**), montre que la sous-estimation tend à s'accroître avec l'augmentation des événements pluvieux avec un écart moyen de 56mm/j .

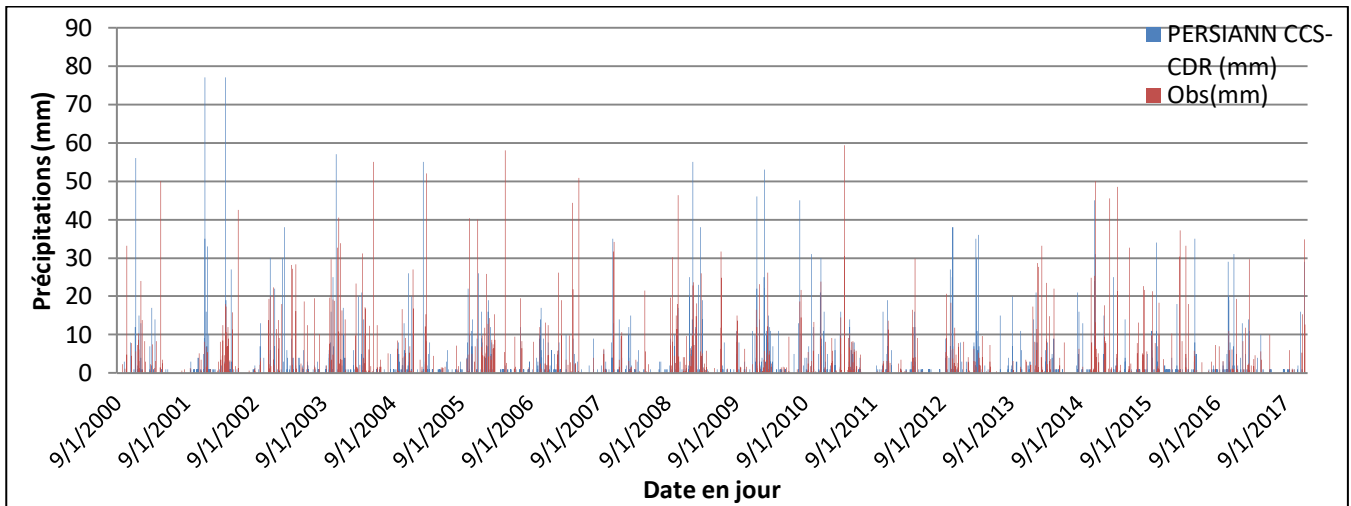


Figure 33: Variation des données observées de la station ILOUDJANE et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle journalière (2000-2017)

Mensuellement (**figure 34**), les événements pluviaux légers ($P < 20\text{mm/mois}$) sont surestimés d'une moyenne de 6,3mm/mois. Alors que, les pluies moyennes ($20 < P < 60\text{mm/mois}$) et les intenses ont été sous-estimées respectivement d'un écart moyen de 5,17mm/mois et 33,18mm/mois.

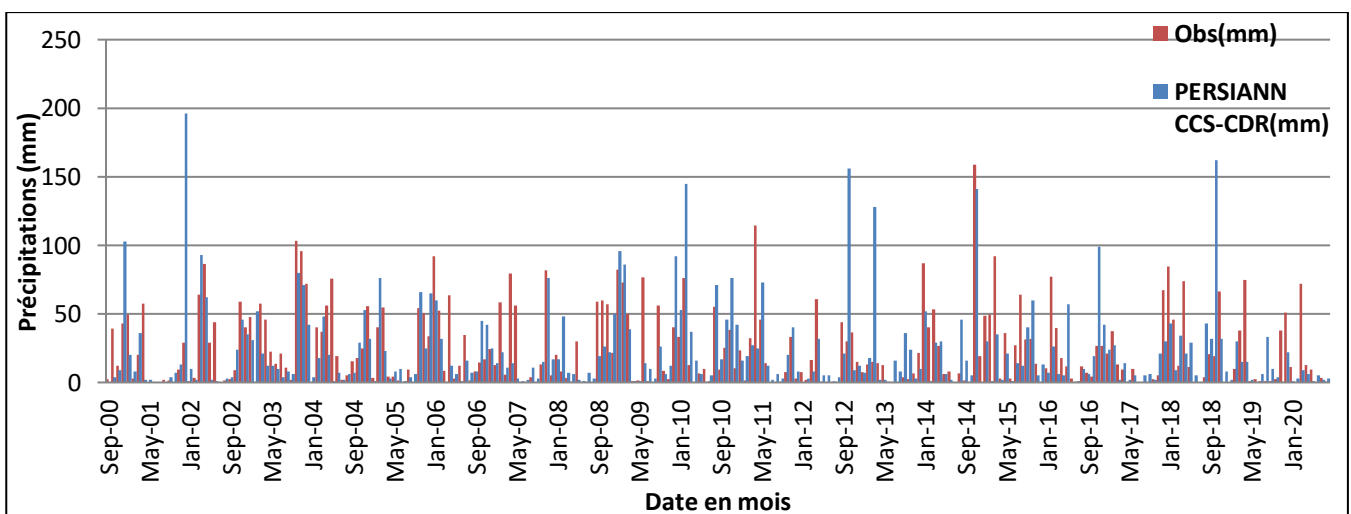


Figure 34: Variation des données observées de la station ILOUDJANE et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle mensuelle (2000-2020)

A l'échelle annuelle (**figure 35**), presque toutes les précipitations sont sous-estimées par le produit PERSIAN CCS-CDR. Cette sous-estimation est extrême durant les années 2003/2004 et 2014/2015.

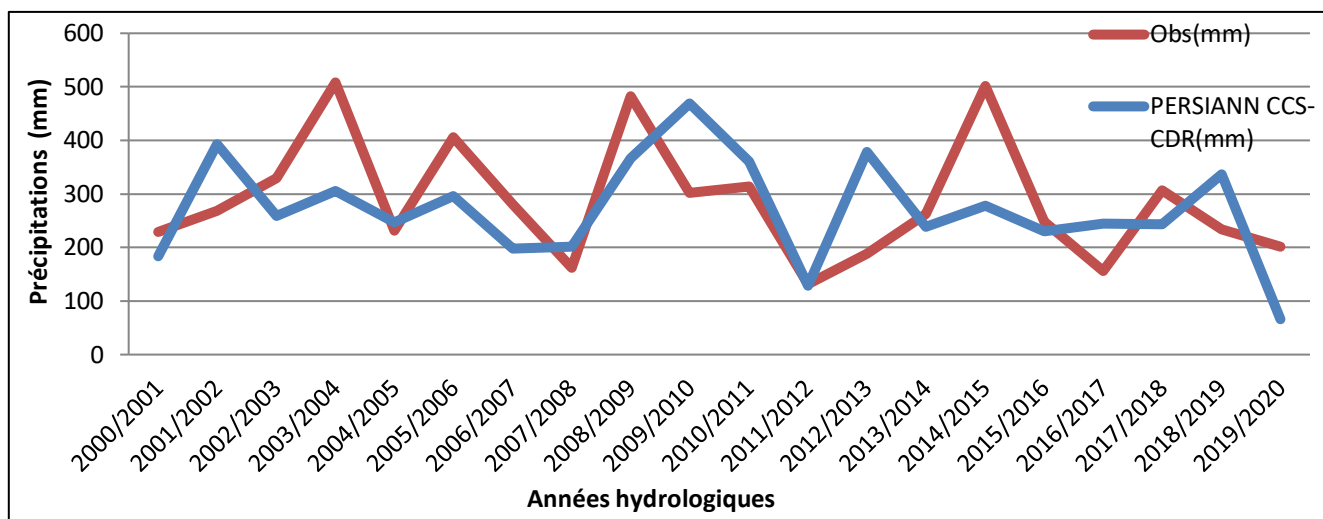


Figure 35: Variation des données observées de la station ILOUDJANE et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle annuelle (2000-2020)

b) PERSIANN CCS-CDR en plaine :

- MARRAKECH :

A l'échelle journalière (**figure 36**), les pluies de hauteurs inférieures à 20mm/j sont surestimées alors que celles de hauteurs supérieures à 20mm/j ont été sous-estimées par le produit d'un écart de 21,6 en moyenne. Or, il convient de noter que ces événements intenses restent peu fréquents.

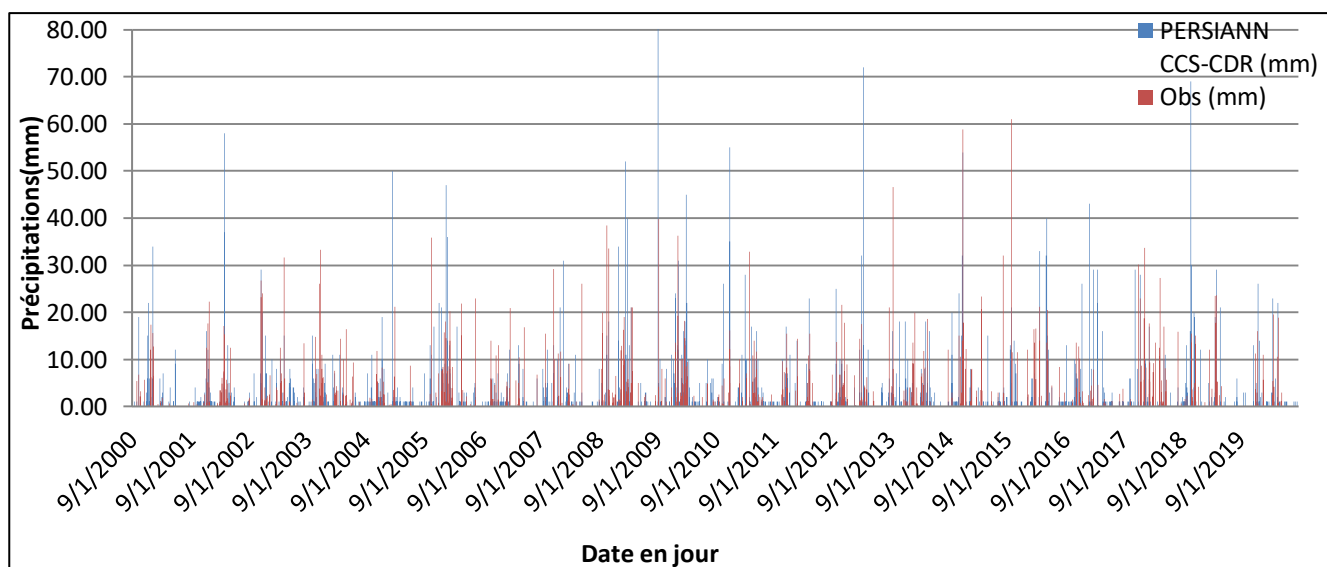


Figure 36: Variation des données observées de la station MARRAKECH et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle journalière (2000-2020)

A l'échelle mensuelle (**figure 37**), le produit tend à surestimer les précipitations légères ($P < 20$ mm/mois) d'une différence moyenne de 6,3 mm/mois tandis que cette surestimation devient faible pour les précipitations moyennes ($20 < P < 40$ mm/mois) d'un écart de 2 mm/mois en moyenne. Pour les pluies intenses, PERSIANN CCS-CDR tend à les sous-estimer d'un écart moyen de 10 mm/mois.

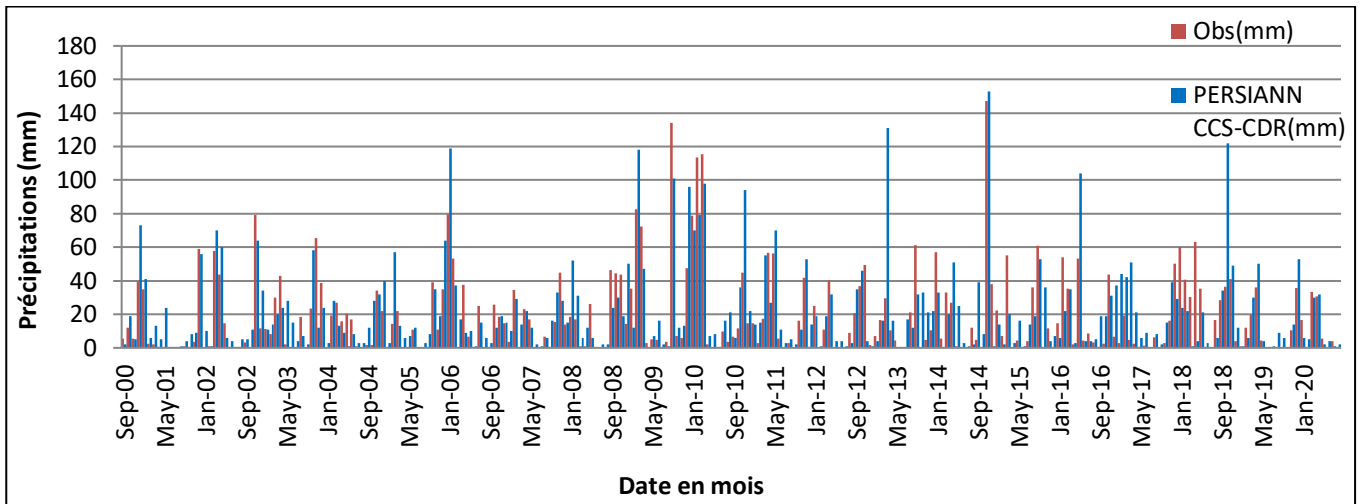


Figure 37: Variation des données observées de la station MARRAKECH et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle mensuelle (2000-2020)

Annuellement (**figure 38**), les événements pluvieux sont surestimés par le produit d'un écart faible de 38,53mm/an en moyenne.

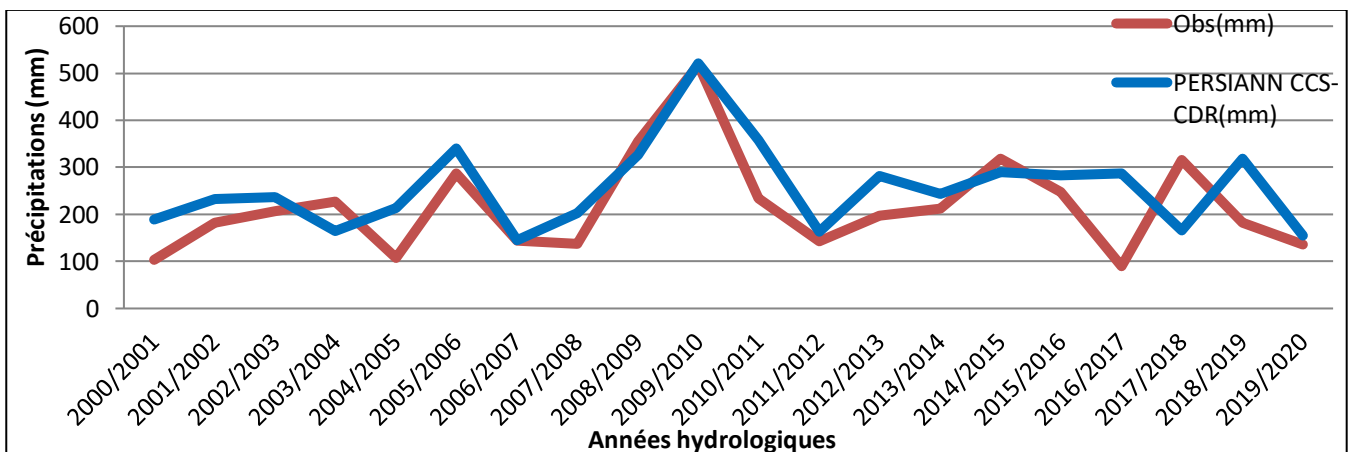


Figure 38: Variation des données observées de la station MARRAKECH et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle annuelle (2000-2020)

c) PERSIANN CCS-CDR en zone côtière :

- TALMEST :

Les variations des pluies journalières (**figure 39**) montrent surestimation dominante pour les précipitations légères ($P < 5\text{mm/j}$) avec une différence de $0,34\text{mm/j}$ en moyenne et une sous-estimation pour les pluies moyennes ($5 < P < 15\text{mm/j}$) et intenses ($P > 15\text{mm/j}$).

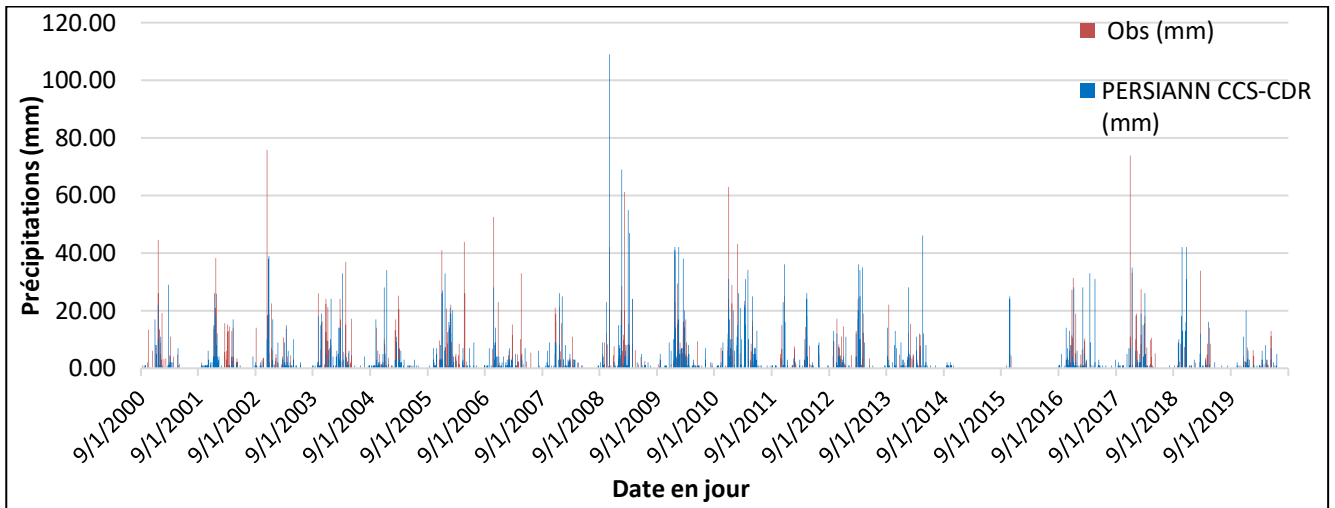


Figure 39: Variation des données observées de la station TALMEST et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle journalière (2000-2020)

L'écart moyen de la surestimation des précipitations mensuelles légères est de 5.23mm/mois, tandis que celui de la sous-estimation des précipitations moyennes et intenses est de 2mm/mois pour $20 < P < 50$ mm/mois et 13mm/mois pour $P > 50$ mm/mois. (Figure 40)

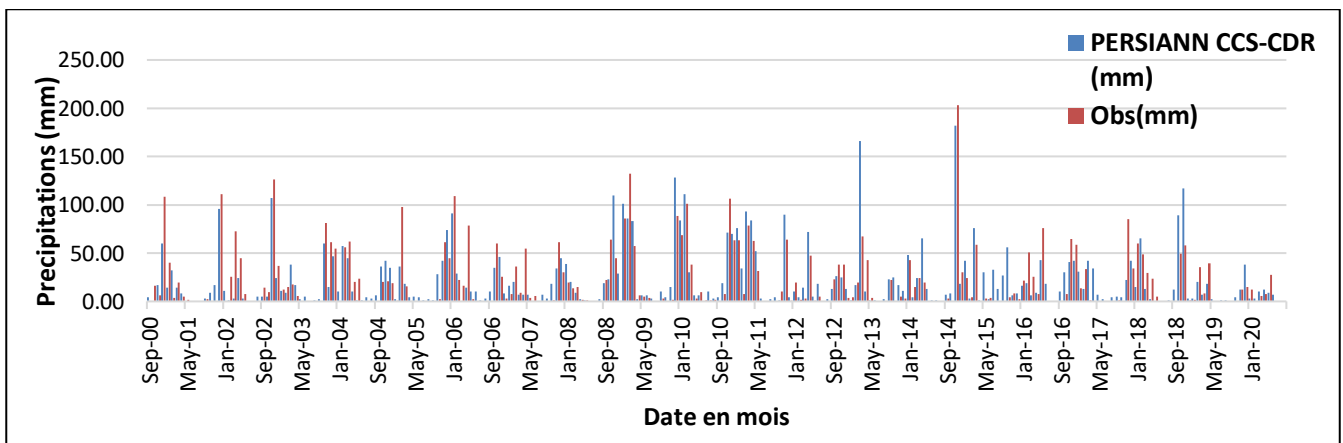


Figure 40: Variation des données observées de la station TALMEST et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle mensuelle (2000-2020)

L'analyse des données annuelles de la station Talмест (figure 41) révèle que le produit reflète partiellement ce qui est observé dans cette station. En effet, une sous-estimation des précipitations est relevée au cours de la période allant de 2000 à 2008, celle-ci est atténuée par une surestimation observée durant la période de 2008 à 2020.

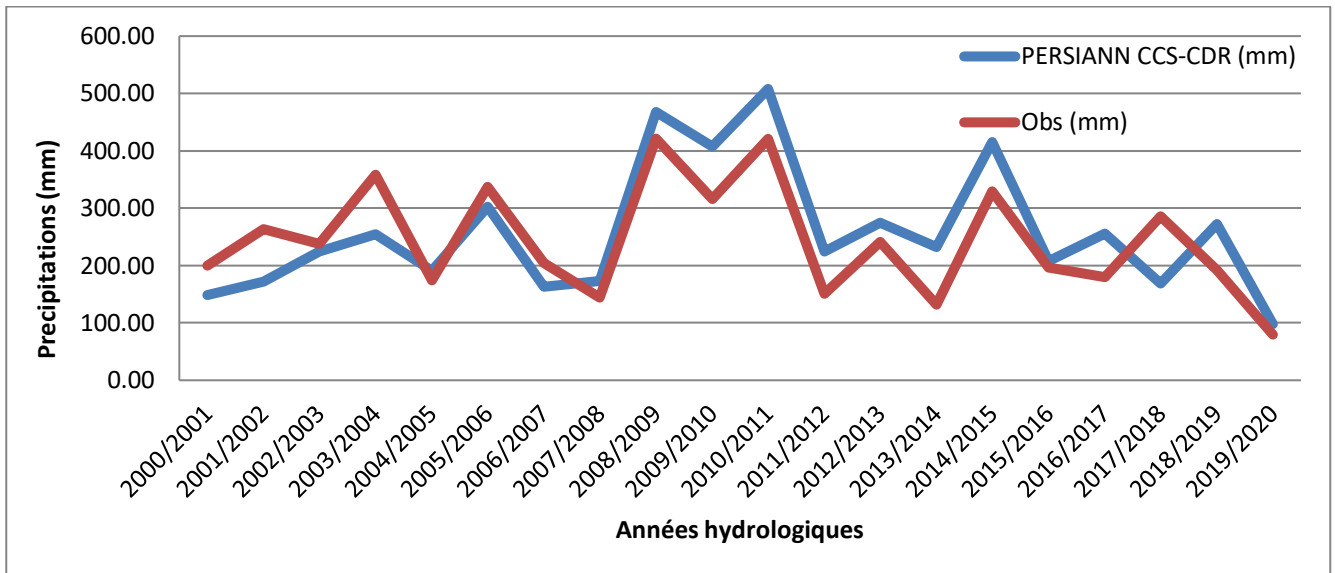


Figure 41: Variation des données observées de la station TALMEST et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle annuelle (2000-2020)

- ADAMNA :

Le produit PERSIANN CCS CDR démontre à l'échelle journalière (figure 42) une surestimation des précipitations légères ($P < 5\text{mm/j}$) d'un écart moyen $0,3\text{mm/j}$ et une sous-estimation es remarquable pour les précipitations moyennes et intenses respectivement d'un écart moyen $6,5\text{mm/j}$ et $22,4\text{mm/j}$.

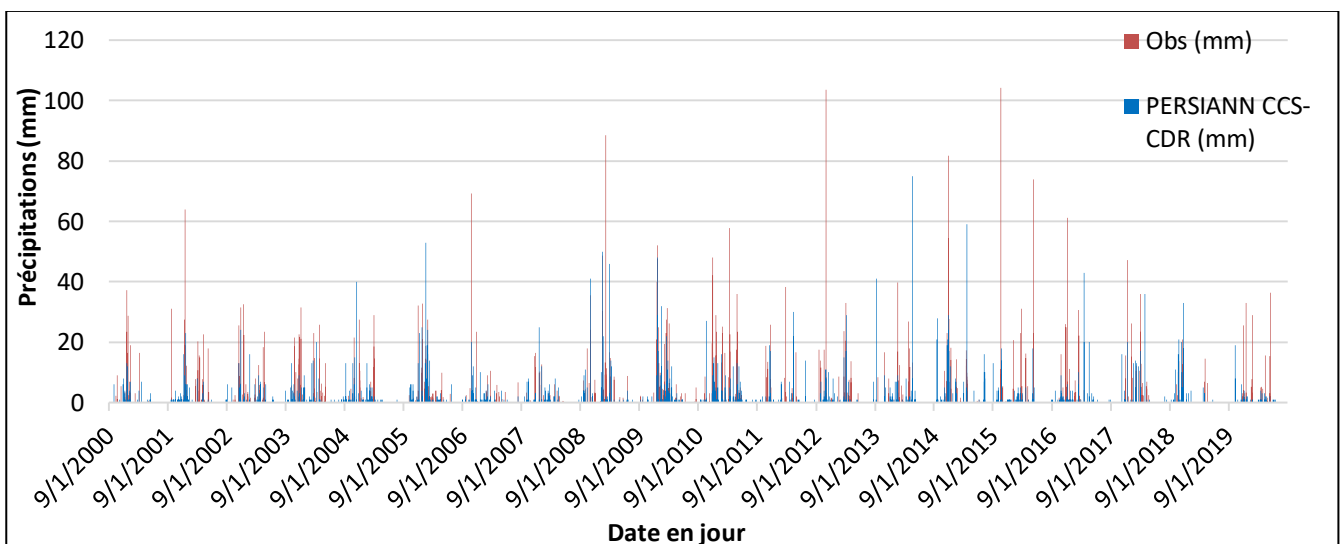


Figure 42: Variation des données observées de la station ADAMNA et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle journalière (2000-2020)

A l'échelle mensuelle (**figure 43**), les faibles pluies sont surestimées moyennement avec un écart de 4mm/mois. Cependant, les événements pluvieux de hauteurs comprises entre 20 mm et 60 mm ont été sous-estimés par le produit d'une différence de 16mm/mois et cette sous-estimation augmente à mesure que les précipitations deviennent plus intenses, atteignant un écart moyen de 55.4 mm/mois.

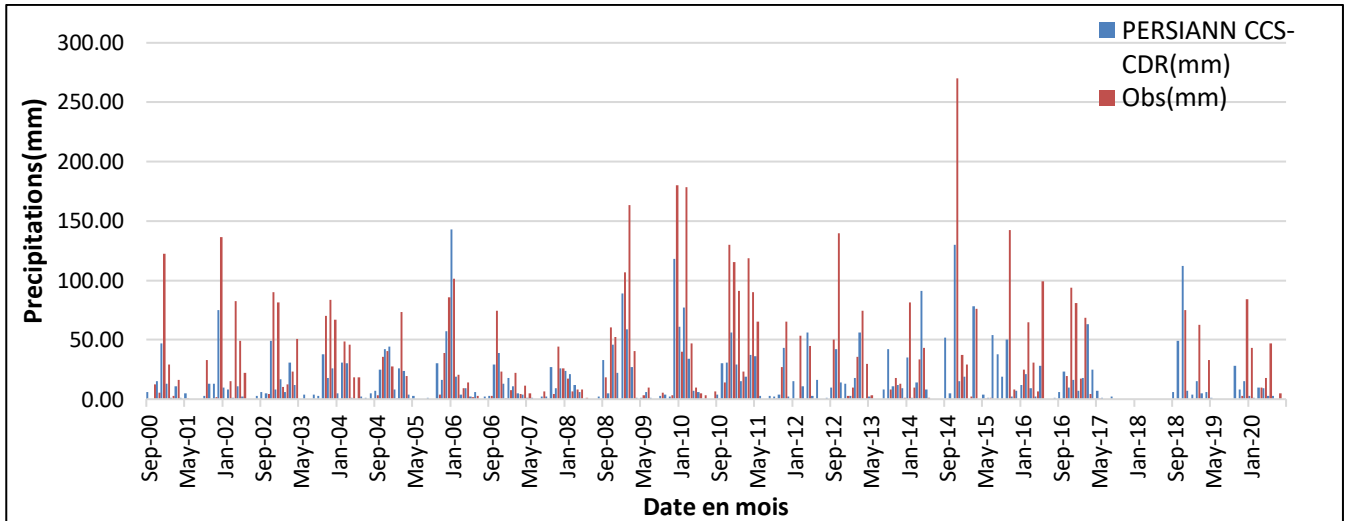


Figure 43: Variation des données observées de la station ADAMNA et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle mensuelle (2000-2020)

Les résultats annuels dans cette station présentent que le produit a une tendance moyenne à sous-estimer les événements pluviaux. Cette surestimation s'aggrave durant la période 2007 - 2012 d'un écart allant parfois jusqu'à 385.9mm/an. (**Figure 44**)

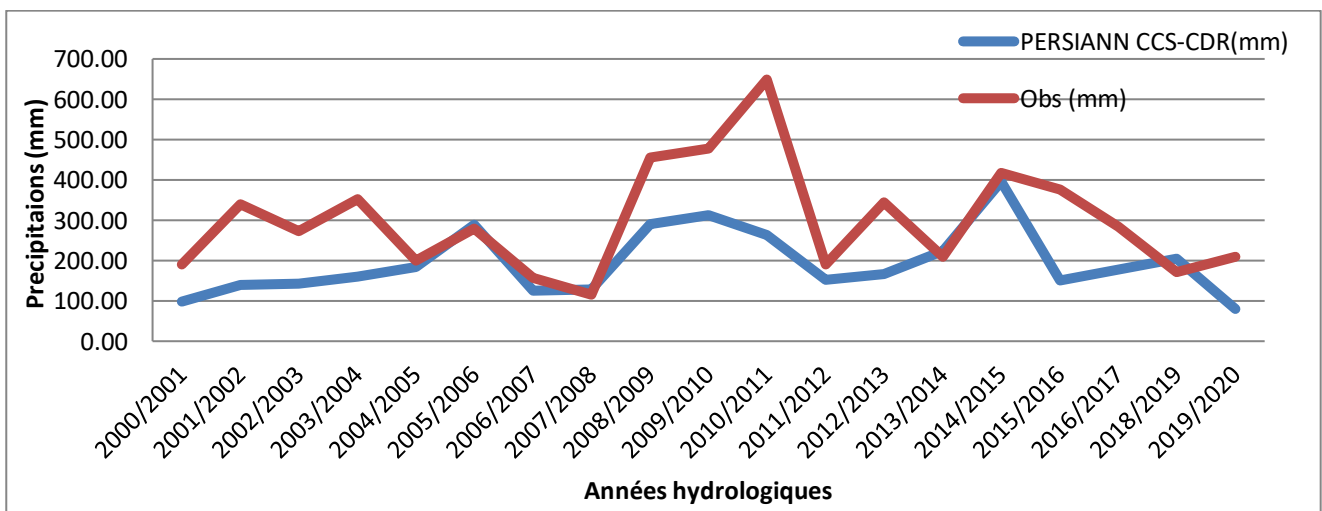
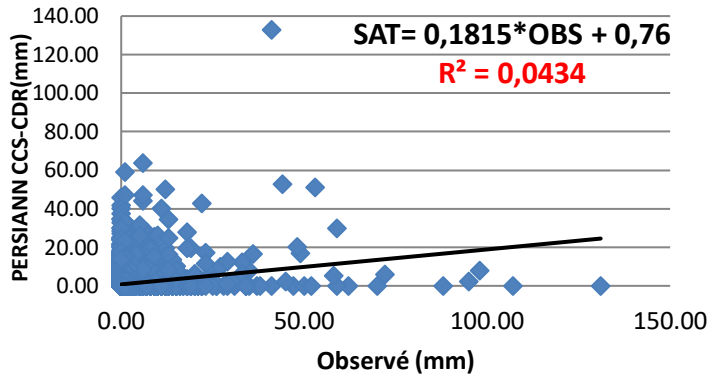


Figure 44: Variation des données observées de la station ADAMNA et de PERSIANN CCS-CDR à l'échelle annuelle (2000-2020)

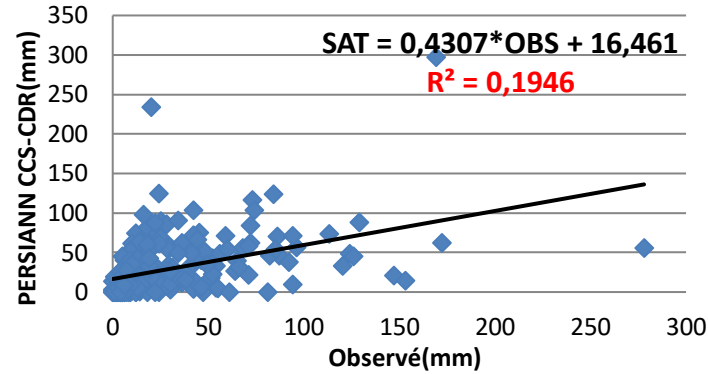
La performance du produit PERSIANN CCS CDR dépend de la topographie des stations. En montagne, ce produit tend à sous-estimer la majorité des événements pluvieux, à l'exception des précipitations de légère intensité qui sont faiblement surestimées. Cette sous-estimation est inversement proportionnelle à l'altitude. En plaine, il présente une tendance inverse : il surestime l'ensemble des événements pluvieux, sauf les précipitations intenses qui sont sous-estimées. Dans la zone côtière, PERSIANN CCS-CDR présente une surestimation faible des précipitations dans Talmest et forte sous-estimation des précipitations dans Adamna.

Cette performance est présentée par les droites de régression (**figure45**) qui montrent que le produit est affecté par le facteur d'altitude.

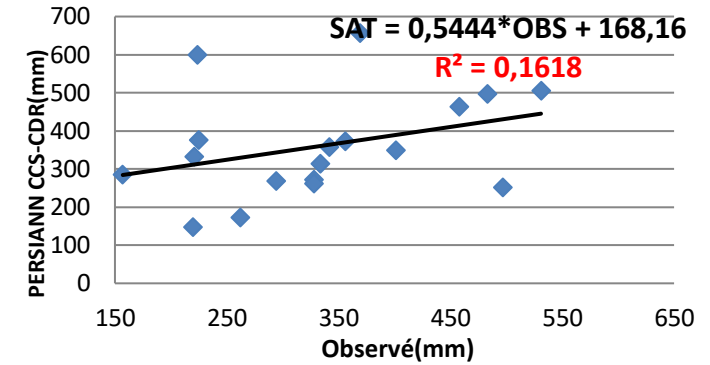
AMENZEL: échelle journalière



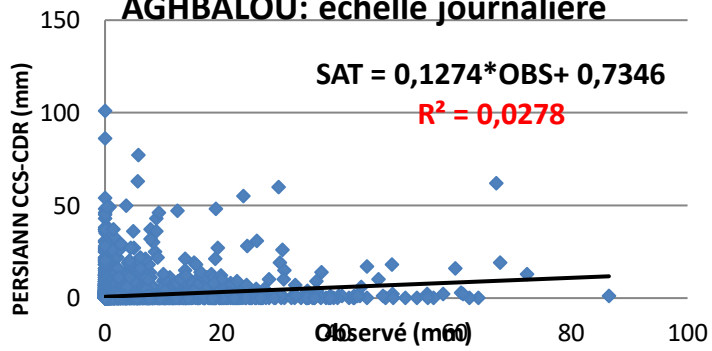
AMENZEL: échelle mensuelle



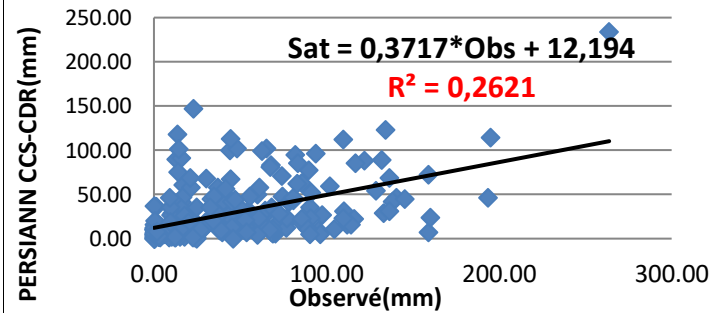
AMENZEL: échelle annuelle



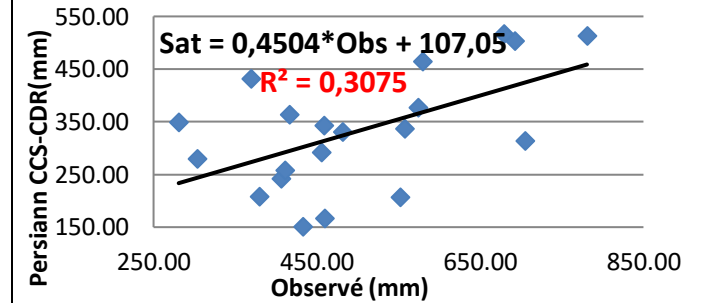
AGHBALOU: échelle journalière



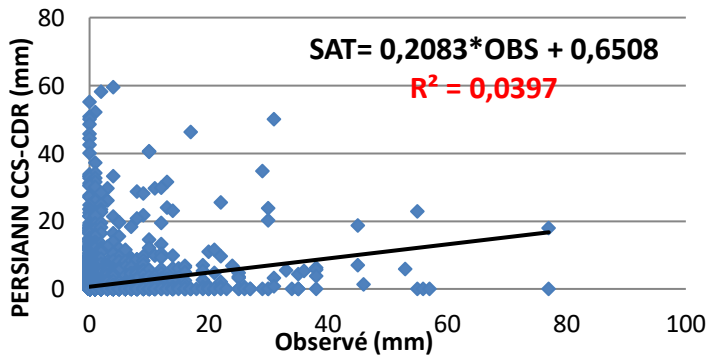
AGHBALOU: échelle mensuelle



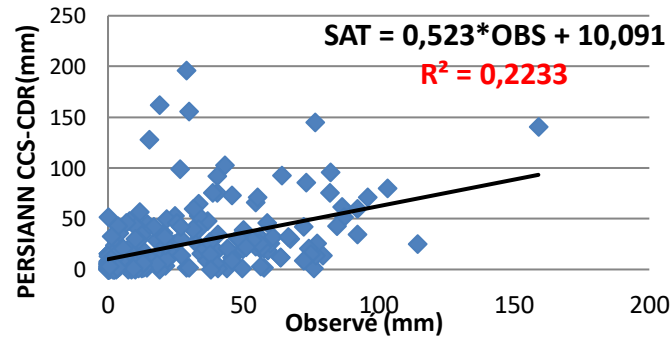
AGHBALOU: échelle annuelle



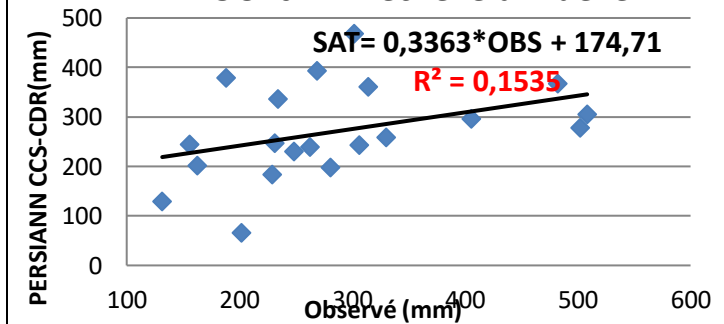
ILOUDJANE: échelle journalière



ILOUDJANE: échelle mensuelle



ILOUDJANE: échelle annuelle



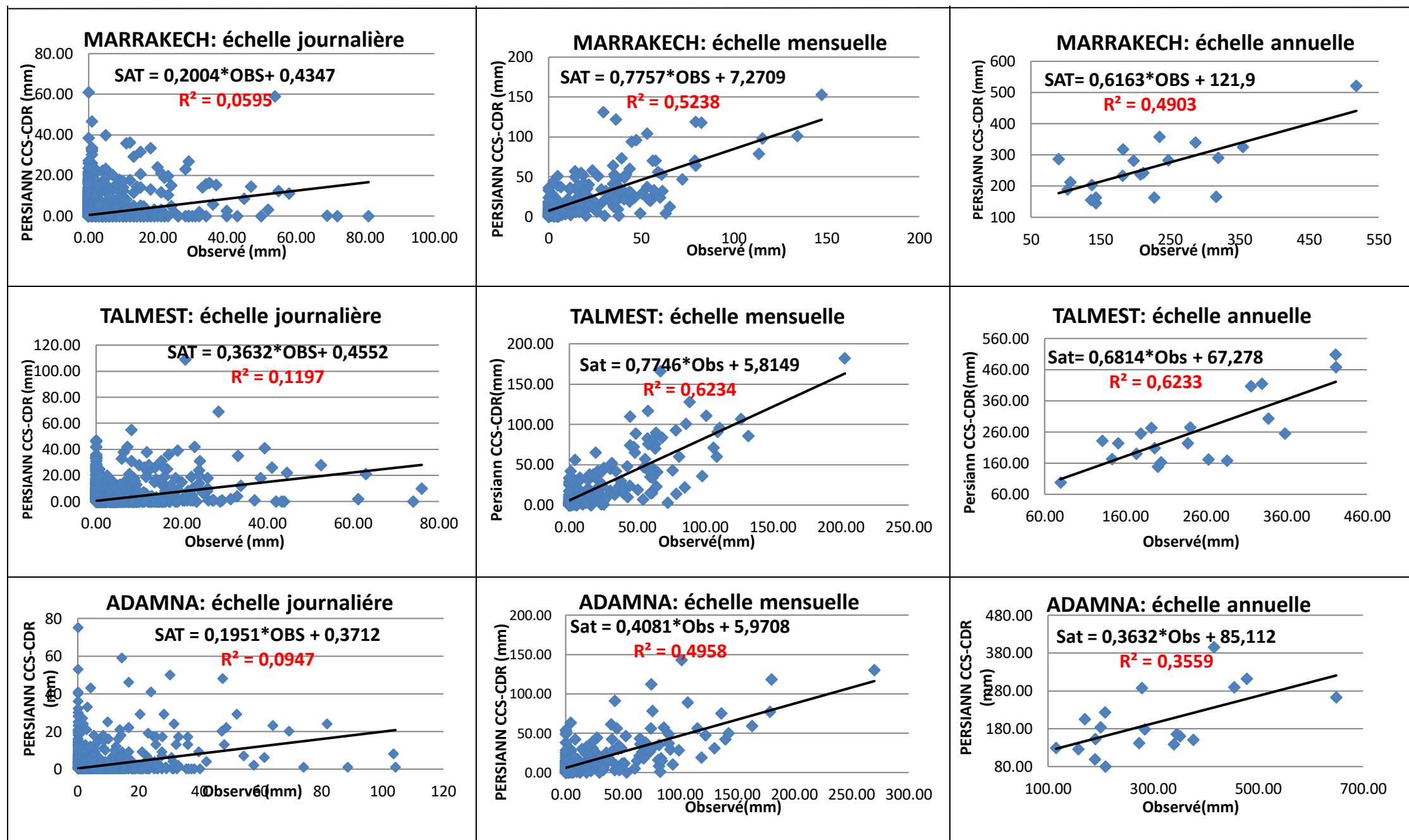


Figure 45: Corrélation entre les données PERSIANN CCS-CDR et les données observées au niveau des stations : AMENZEL, AGHBALOU, ILOUDJANE, MARRAKECH, TALMEST et ADAMNA selon les trois échelles.

d) Les indicateurs statistiques en fonction d'altitude :

D'après les figures ci-dessous (**figures 46,47,48**), il apparaît que la variation des indicateurs statistiques est d'avantage liée à l'altitude, comme l'indique le coefficient de détermination R^2 , qui est inférieur à 1 et dont la valeur maximale ne dépasse pas 0.6 à l'échelle journalière, 0,8 mensuelle et 0,7 annuelle. D'après les droites de régression, on peut déduire que le **r** et le **biais** diminuent avec l'augmentation de l'altitude, ce qui se traduit par une pente négative de la droite de régression. Quant à l'indicateur **RMSE**, il reflète une tendance à augmenter proportionnellement à l'élévation de l'altitude, cette tendance est confirmée par la droite de régression qui a une pente positive.

- Coefficient de corrélation r :

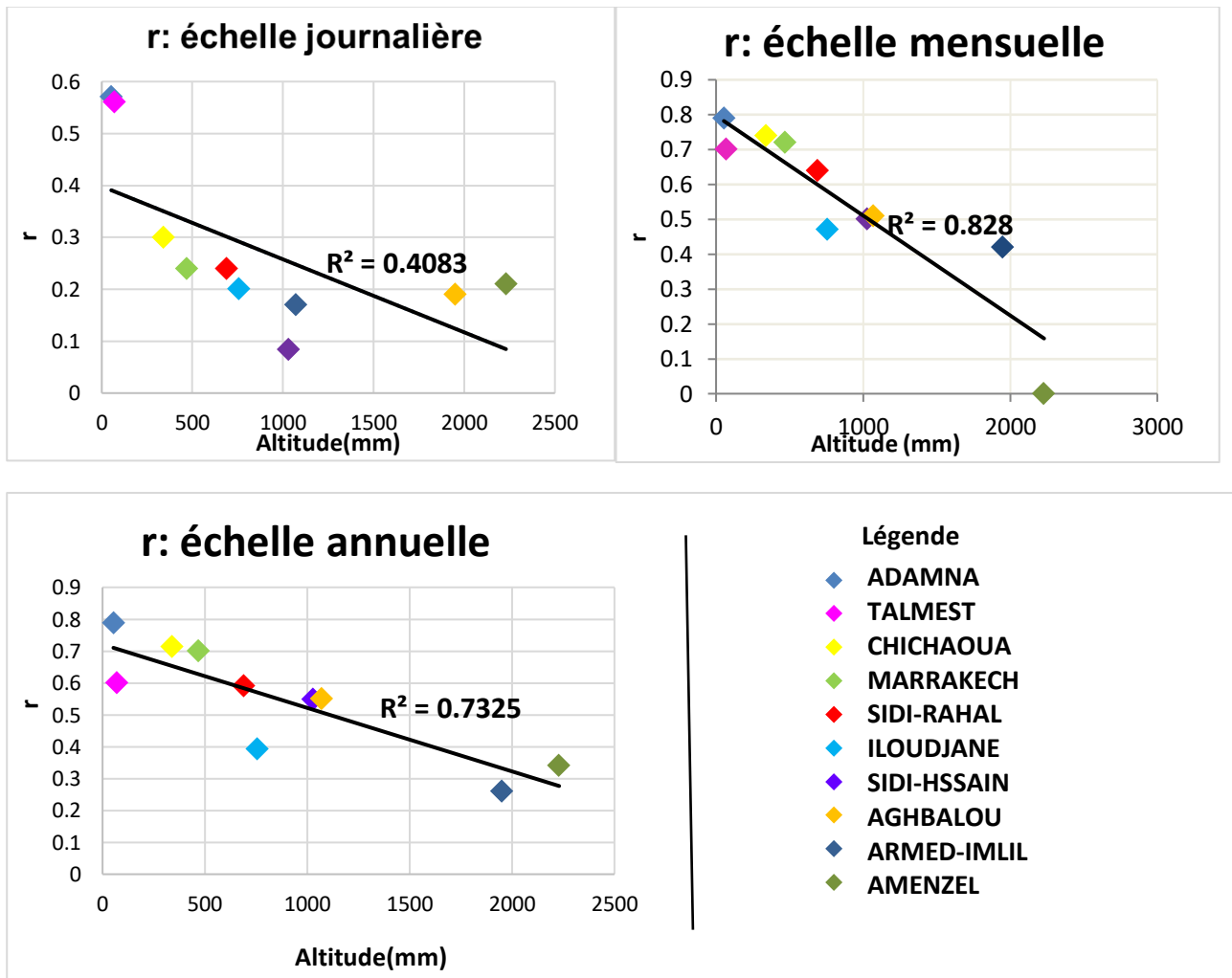


Figure 46: Variations de r en fonction de l'altitude

• BIAIS :

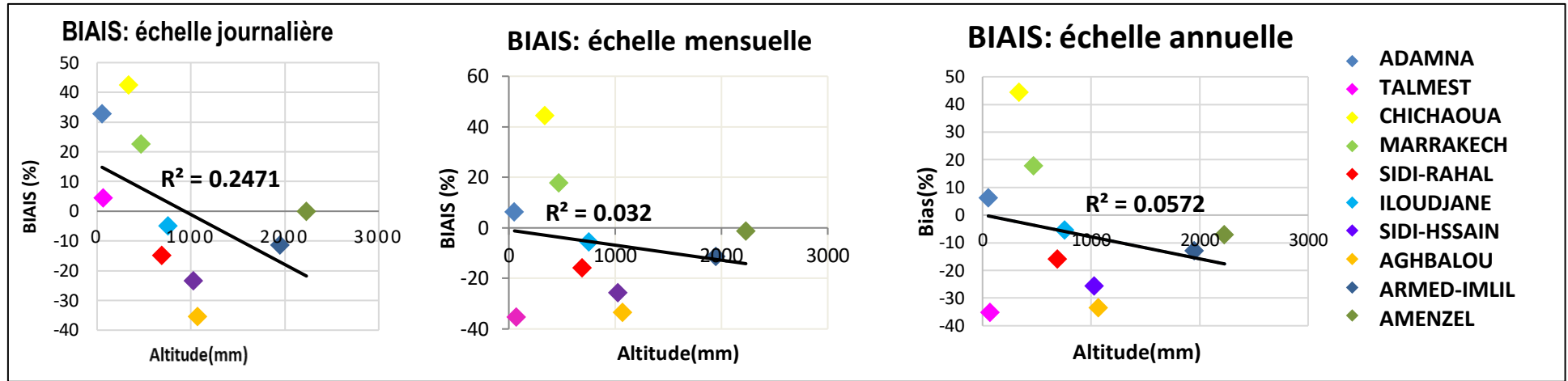


Figure 47: Variations de Biais en fonction de l'altitude

• RMSE :

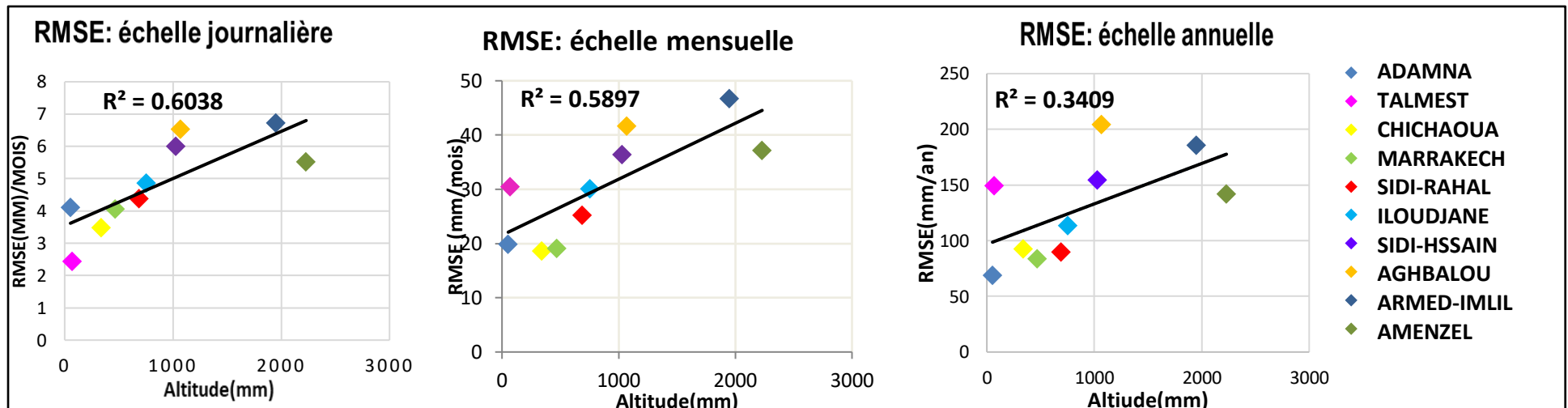


Figure 48: Variations de RMSE en fonction de l'altitude

3- Comparaison des résultats d'évaluation de IMERG GPM-F et PERSIANN CCS-CDR :

L'évaluation comparative de ces deux produits (figure 49,50,51) dans la zone d'étude a permis de déterminer leur performance respective à l'aide de différentes mesures statistiques (voir les figures ci-dessous). Les résultats de cette comparaison ont démontré que le produit PERSIANN obtient des scores inférieurs aux tests statistiques par rapport à IMERG Finals, à l'exception du biais qui peut atteindre jusqu'à 1 mm/jour. Cette mauvaise performance se manifeste particulièrement à travers l'indicateur RMSE, qui peut s'élever à environ 5 mm/jour, 30 mm/mois et 128 mm/an pour le produit PERSIANN CCS CDR. En revanche, IMERG présente de bons résultats, comme on témoigne son coefficient de corrélation journalier d'environ 0,5, mensuel de 0,75 et annuel de 0,70.

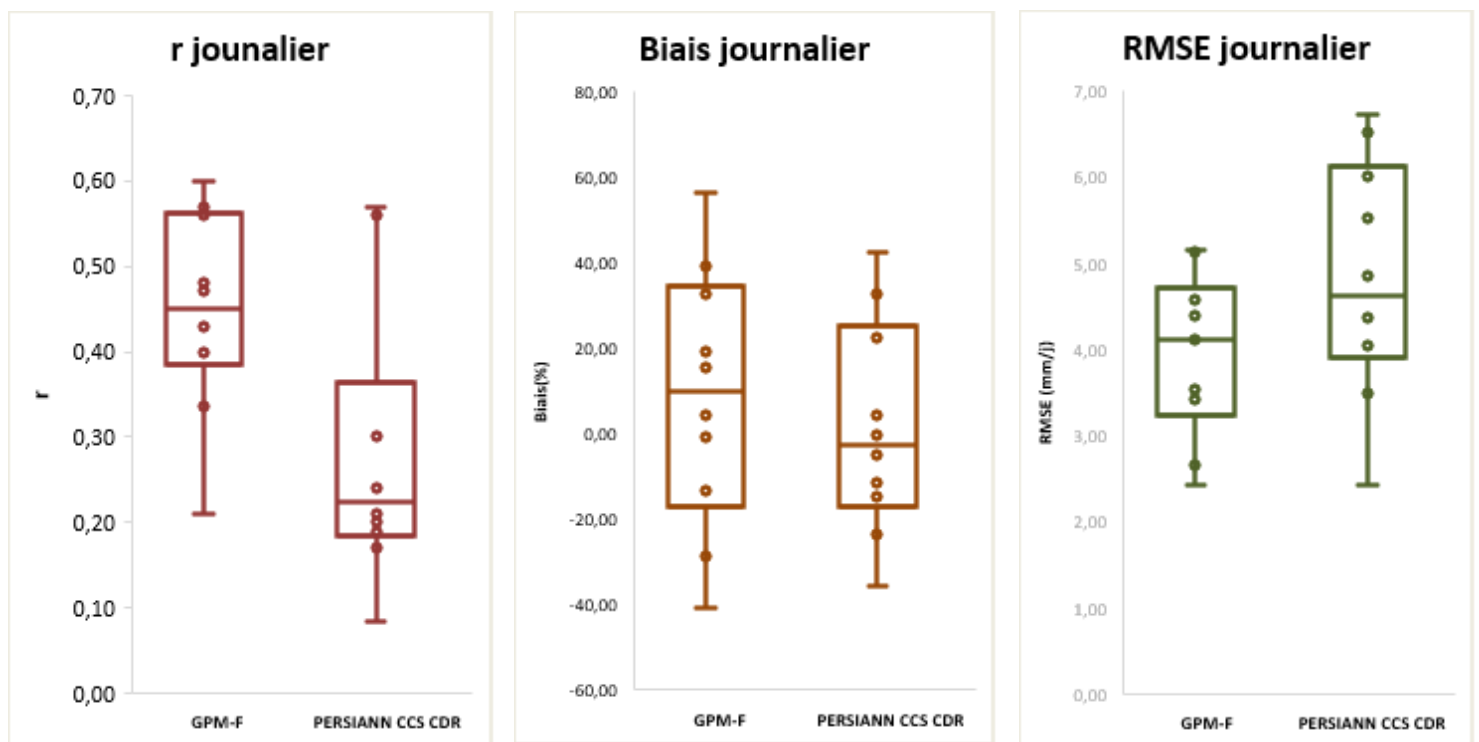


Figure 49: Comparaison des indicateurs statistiques des deux produits IMERG Final et PERSIAN CCS CDR à l'échelle journalière

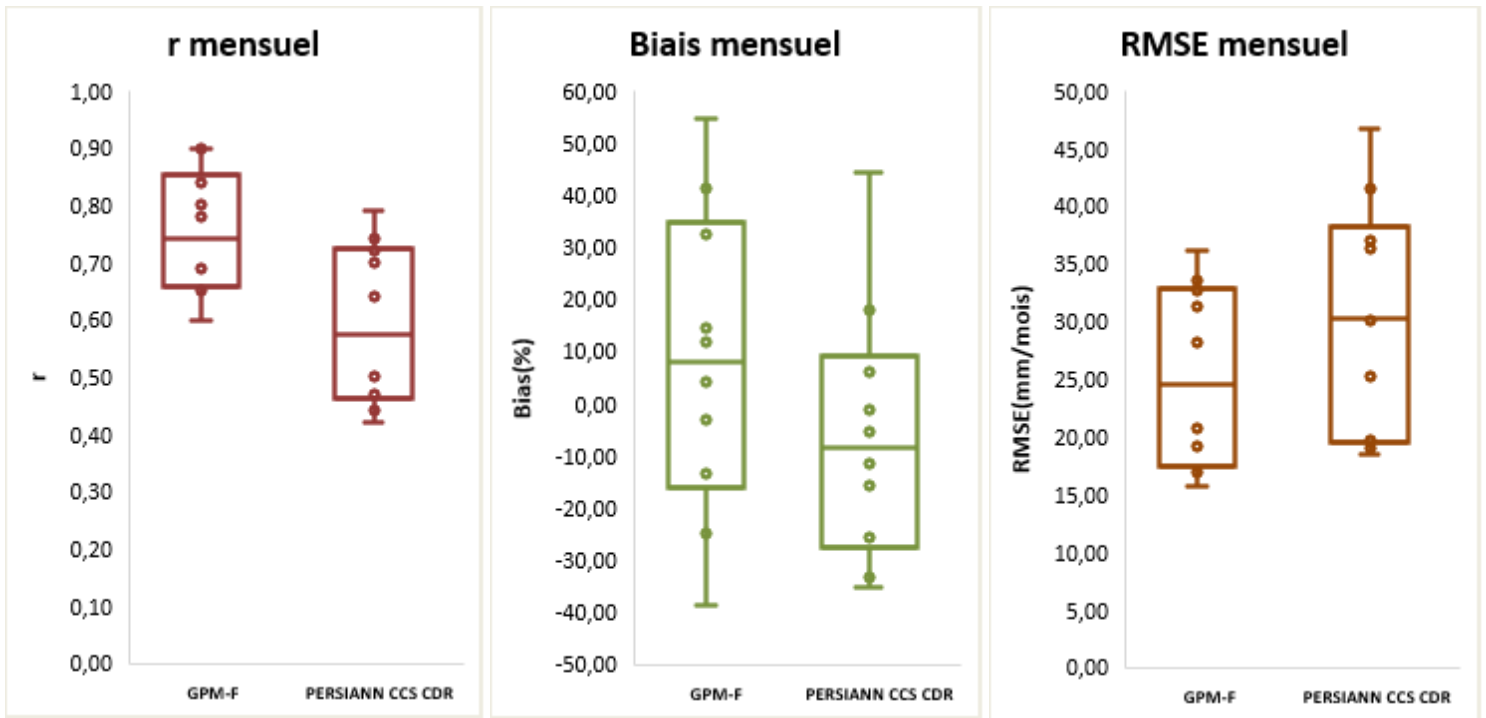


Figure 50: Comparaison des indicateurs statistiques des deux produits IMERG Final et PERSIAN CCS CDR à l'échelle mensuelle.

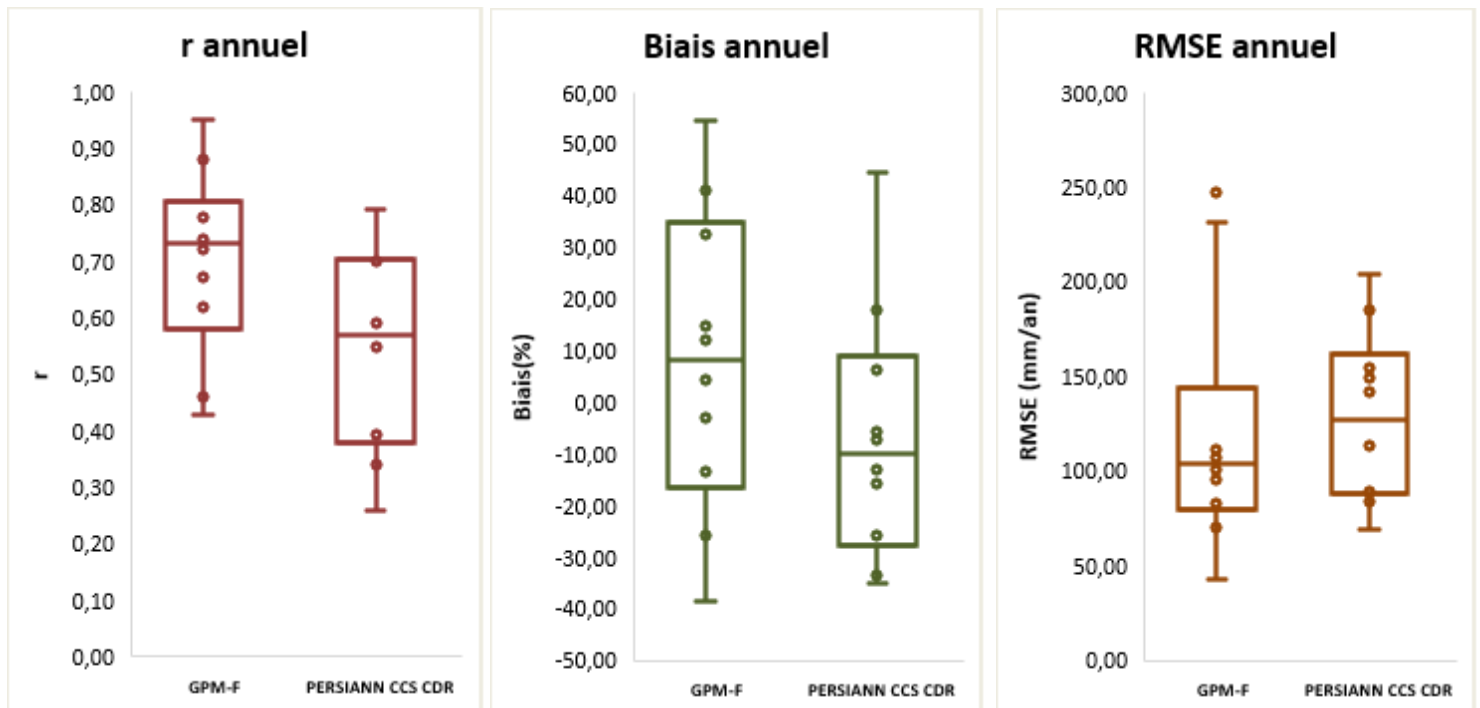


Figure 51: Comparaison des indicateurs statistiques des deux produits IMERG Final et PERSIAN CCS CDR à l'échelle annuelle.

Partie IV: Discussion

Les analyses des résultats ont montré que les données simulées des deux produits PERSIANN CCSCDR et IMERG (GPM) FINAL reflètent dans certaines mesures ce qui se passent dans les 10 stations pluviométriques, sans toutefois atteindre de très bonnes performances.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce problème, citant ainsi les erreurs liées à la détection et l'estimation des précipitations. Ces erreurs sont influencées par plusieurs facteurs, tels que l'intensité des précipitations, les variations saisonnières et le régime hydro-climatique.

Lors de fortes précipitations, les satellites peuvent éprouver des difficultés lorsqu'il s'agit d'estimer les quantités de pluie, en particulier dans les zones pluvieuses (Cas des sous-estimations des précipitations en périodes des crues) et littorales (Cas de PERSIANN CCSCCD dans station Adamna). Les précipitations intenses peuvent rendre la détection moins précise et entraîner des erreurs dans l'estimation des quantités précipitées. Cela peut se produire en raison de phénomènes d'atténuation : phénomène d'absorption et de diffusion qui entraînent une diminution de l'intensité du signal avant d'atteindre les capteurs en conduisant à une sous-estimation des précipitations intenses.

De plus, la saison influe la précision de la détection des pluies. En général, la détection des précipitations est plus fiable pendant la saison des pluies par rapport à la saison sèche car les conditions météorologiques pendant cette saison sont souvent plus propices à la formation de nuages et de précipitations, ce qui facilite la détection par les satellites. Alors que pendant la saison sèche, les précipitations sont moins fréquentes et les nuages sont moins présents, ce qui rend la détection des pluies plus difficile pour les satellites. En revanche, l'estimation devient plus performante en saison sèche qu'en saison de pluies.

En outre, l'altitude a un effet sur la phase des précipitations, déterminant si elles se présentent sous forme de pluie, neige ou grêle. Cette transition varie en fonction de la topographie, ce qui pose des problèmes aux capteurs satellitaires pour distinguer ces différentes phases de précipitations et entraîne des estimations erronées des précipitations en hautes altitudes (cas du GPM-F dans la station Amenzel).

Les variations topographiques à l'échelle du pixel peuvent également bloquer ou dévier la direction des précipitations qui peut entraîner des variations locales de l'intensité des précipitations dans certaines zones situées à l'abri des montagnes ou des collines où les stations pluviométriques peuvent recevoir de précipitations différentes que les zones avoisinantes. Les produits satellitaires, en particulier , ceux avec une résolution spatiale relativement importante, peuvent avoir du mal à capturer ces variations fines.(Cas de GPM-F dans la station de piémont Iloudjane)

Des améliorations sont nécessaires pour surmonter ces défis, à titre d'exemple les estimations de GPM-F étaient améliorées depuis la fin 2015 suite à l'union de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) et (JAXA) pour fournir la génération IMERG GPM Final qui est basé sur les estimations de TRMM disponibles depuis 2000-2015.

En outre, des méthodes de correction sont souvent appliquées pour tenir compte de l'effet de certains erreurs sur l'estimation des précipitations par satellite.

Cependant, il est important de noter qu'en dépit de ces corrections, certaines erreurs résiduelles peuvent persister, notamment celles liées aux échantillonnages incomplets du réseau pluviométrique ou à des données in situ douteuses. Ces facteurs posent des défis pour une estimation précise.

Conclusion

Cette étude a pour objectif la validation de deux produits d'estimation des précipitations par satellites dans la zone d'action de l'ABHT. Il s'agit d'IMERG(GPM) Final et PERSIANN CCS CDR, ces deux produits sont sélectionnés parmi une gamme des produits d'estimation des précipitations par satellite selon les critères de la résolution spatiale et temporelle, le recouvrement spatial et la disponibilité des données.

La validation de PERSIANN CCS CDR et IMERG (GPM) Final sur la zone d'étude, consiste à faire une comparaison des jeux de données simulées de ces deux produits avec une base des données in situ (avec un intervalle de temps des données observées situé entre 2000 et 2020) de 10 stations météorologiques dispersés dans le bassin de Tensift. Cette évaluation est basée sur des tests statistiques.

L'évaluation statistique de ces deux produits (basée sur 5 indicateurs statistiques : r, ME, MAE, Biais, RMSE) nous a permis de dire que les deux produits ont parfois des problèmes d'estimation des précipitations avec des mauvais scores principalement indiqués par le RMSE.

En termes de comparaison, entre les deux produits nous pouvons dire que tous les tests statistiques ont prouvé que le produit IMERG (GPM) Final a une bonne performance en plaine et en zone côtière par rapport au produit PERSIANN CCS CDR. Tandis que le produit PERSIANN CCS CDR est mieux performant en haute montagne et en piémont.

La performance des deux satellites dépend de l'altitude de la stations pluviométriques. Le produit PERSIANN CCS CDR montre une tendance, à sous-estimer la majorité des événements pluvieux intenses en montagne à l'exception des précipitations légères qui sont faiblement surestimées. Dans les zones de plaine et côtière, il présente une tendance inverse : il surestime l'ensemble des événements pluvieux légers, sauf les précipitations intenses qui sont sous-estimées. Les performances du produit IMERG GPM-Final dépendent aussi de la topographie des stations. En haute montagne, ce produit tend à surestimer la majorité des événements pluvieux. En moyen montagne, il présente une tendance inverse : il sous-estime l'ensemble des événements pluvieux et en piémont, il présente une surestimation des précipitations de moyenne et forte intensité. ; et il en est de même pour les zones de plaine et côtière.

Les produits évalués lors de cette étude, pourraient donc constituer une alternative aux mesures au sol à condition de corriger les biais qu'ils montrent par moment et par endroit.

Bibliographie et Webographie

- [1] Echakraoui, Z. (2018). Impact study of climate change on water resources in the Tessaout basin (Morocco). *Journal of Water Science & Environment Technologies*, 3(01).
- [2] Direction Générale de l'Hydraulique: <http://81.192.10.228/ressources-en-eau/presentation-generale/> .
- [3] SAHILI E. (1996) – Problématique des rejets liquides et solides au niveau de la région hydraulique du Tensift, diagnostic, impact sur le milieu naturel, humain et proposition d'un plan d'action. Thèse d'ingénieur chef, Direction Générale de l'Hydraulique, Ministre des travaux publics. p.178.
- [4] Rachdane, M., Khalki, E. M., Saidi, M. E., Nehmadou, M., Ahbari, A., & Trambly, Y. (2022). Comparison of High-Resolution Satellite Precipitation Products in Sub-Saharan Morocco. *Water*, 14(20), 3336. <https://doi.org/10.3390/w14203336>
- [5] Salih, W., Chehbouni, A., & Epule, T. E. (2022). Evaluation of the Performance of Multi-Source Satellite Products in Simulating Observed Precipitation over the Tensift Basin in Morocco. *Remote Sensing*, 14(5), 1171. <https://doi.org/10.3390/rs14051171> .
- [6] Tarik El Orfi, Mohamed El Ghachi, Sébastien Lebaut. Comparaison des données de précipitation satellitaires avec les données mesurées dans le bassin versant de l'Oued Oum Er Rbia en amont du barrage Ahmed El Hansali (Maroc). *Changement Climatique Et Territoires*, Jul 2020, Rennes, France. pp.271-276. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02928277>
- [7] Kouki, S. (2022). *Valorisation de la précipitation satellitaire pour l'amélioration de la modélisation et de la prévision hydrologique* (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke).
- [8] Delahaye, F. (2013). *Analyse comparative des différents produits satellitaires d'estimation des précipitations en Amazonie brésilienne* (Doctoral dissertation, Université Rennes 2).
- [9] Bouchaikh, A. , El Messoaudi., (2019). Le rôle de la DMN dans la prévention des risques naturels. Présentation interne, C N P / D M N, Marrakech.p71.
- [10] «thesesups,» <http://thesesups.ups-tlse.fr/3337/1/2016TOU30216.p> .
- [11] «fr.allmetsat,»: <https://fr.allmetsat.com/satellites-meteorologiques.php> .
- [12] Manitra, R. T. R.(2019). CONTRIBUTION A L'EVALUATION ET LA VALIDATION DE PRODUITS SATELLITAIRES D'ESTIMATION DE PRECIPITATIONS POUR MADAGASCAR. Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Antananarivo
- [13] Brochart, D., & Andréassian, V. (2014). 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*, 60(2), 361-370.

- [14] «GES DISC,»: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_7/summary .
- [15] «CHRSDATA,» <https://chrdata.eng.uci.edu/> .
- [16] «Climate Hazards Center,»: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps> .
- [17] Rivera, J. A., Hinrichs, S., & Marianetti, G. (2019). Using CHIRPS Dataset to assess wet and dry conditions along the Semiarid Central-Western Argentina. *Advances in Meteorology*, 2019.
- [18] «GLOBAL PRECIPITATION MEASUREMENT,»: <https://gpm.nasa.gov/missions/GPM> .
- [19] «science direct,» <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809520300557> .
- [20] A. ELHADDAJI. (2019). ETUDE DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS AU NIVEAU DU DOUAR LALLA AARIBA, COMMUNE DE NFIFA, PROVINCE DE CHICHAOUA (MAROC). Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, p43.
- [21] Z. SMAIJ. (2011). Typologie de la qualité des ressources en eaux du bassin de Tensift Al-Haouz et cadre juridique de protection et de préservation. Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, p96.
- [22] ZKHIRI.W. (2018). Variabilité des extrêmes hydrologiques et impact des changements climatiques dans les bassins du Haut Atlas de Marrakech. n° 121,.
- [23] «Agricultural and Meteorological Software,» <https://agrimetsoft.com/calculators/>
- [24] «ORACLE,» https://docs.oracle.com/en/cloud/saas/planning-budgeting/cloud/pfusu/insights_metrics.html .
- [25] «KOBIA,»: <https://kobia.fr/regression-metrics-quelle-metrique-choisir/>