



كلية العلوم
والتقنيات - مراكش

FACULTE DES SCIENCES
ET TECHNIQUES - MARRAKECH

Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Département des Sciences de la Terre
Marrakech



Licence en Sciences et Techniques
Eau & Environnement
Mémoire de Fin d'études

**Validation des produits de réanalyses pluviométriques.
Exemple des produits TerraClimate et ERA-5 au bassin versant de
Tensift**

Réalisé par :

SAMIA GHRIBIL

SANAA HAL BARIK

Sous la direction de :

Mr. Mohamed Elmehdi SAIDI

Mme. Intissar ABOUNKI

Soutenu le 10/06/2024 devant la commission d'examen composée de :

Pr. M. E. SAIDI

Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

Pr. J. MOUSTADRAF

Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

Pr. M. HIBTI

Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

Mme. Intissar ABOUNKI

Agence du Bassin Hydraulique du Tensift , Marrakech

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2023-2024

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à ALLAH, le Tout-Puissant, qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous souhaitons ensuite saisir cette occasion pour exprimer notre sincère reconnaissance à Monsieur **Mohamed Elmehdi SAIDI** pour son précieux encadrement tout au long de notre projet de fin d'études. Sa contribution et son soutien ont été essentiels à la réalisation de notre travail. Nous le remercions chaleureusement pour son dévouement et sa bienveillance durant toute cette expérience.

Nous tenons également à remercier tous les membres de l'Agence du Bassin Hydraulique Tensift, et tout particulièrement Madame **Intissar Abounki**, notre encadrante, pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période de notre stage.

Notre profonde gratitude et nos plus sincères remerciements vont aussi à Mademoiselle **Mariame RACHDANE** pour sa disponibilité, son aide quotidienne, le temps qu'elle nous a consacré malgré ses nombreux engagements, ainsi que pour ses opinions, ses explications et ses judicieux conseils qui ont grandement enrichi ce travail.

Mes vifs remerciements et reconnaissance pour Monsieur **Jalal MOUSTADRAF** pour avoir accepté de juger ce travail et de m'avoir honoré en acceptant de siéger dans le Jury de ce Projet de Fin d'Etudes.

Enfin, nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

RESUME

Dans les régions où les données météorologiques sont limitées, notamment dans les pays en développement comme le Maroc, il peut y avoir des répercussions socio-économiques graves dues à des phénomènes météorologiques extrêmes. Dans de tels contextes, les réanalyses pluviométriques sont devenues essentielles pour estimer les précipitations, en particulier dans les régions montagneuses. Cette étude s'est concentrée sur l'évaluation de deux produits de réanalyse pluviométrique, à savoir ERA5 et TerraClimate (TC), sur une période allant de 1970 à 2020, dans le bassin versant de Tensift.

L'objectif principal était de valider la précision de ces réanalyses pluviométriques en les comparant avec les observations in situ provenant de huit stations météorologiques dans la région, couvrant différentes zones géographiques (moyenne montagne et plaine), altitudes, latitudes et échelles temporelles (mensuelle et annuelle). Cette comparaison s'est appuyée sur des mesures statistiques telles que le biais, l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur absolue moyenne (MAE) et le coefficient de corrélation (CC).

Les résultats de l'évaluation quantitative ont révélé des différences significatives entre les performances des deux produits. TerraClimate a montré une précision et une stabilité supérieures, avec des biais et des RMSE plus faibles, indiquant des prévisions plus cohérentes et précises sur le long terme. Cette fiabilité accrue en fait un choix privilégié pour les applications nécessitant des prévisions à long terme. En revanche, ERA5 a affiché un coefficient de corrélation légèrement supérieur, suggérant une meilleure concordance avec les observations à court terme. Cependant, cette corrélation plus élevée était accompagnée de biais et de RMSE plus importants, réduisant ainsi la précision globale des prévisions. De plus, ERA5 présentait une variabilité plus importante dans toutes les mesures, ce qui peut poser des défis en termes de fiabilité et de prévisibilité, notamment pour les applications où la stabilité est cruciale.

Mots clés : Produit de réanalyse, ERA5, TerraClimate, Validation, Tensift.

ABSTRACT

In areas where weather data is limited, especially in developing countries like Morocco, extreme weather events can cause serious social and economic problems. In these situations, rainfall reanalysis has become important for estimating rainfall, especially in mountainous regions. This study focused on evaluating two rainfall reanalysis products, ERA5 and TerraClimate (TC), from 1970 to 2020, in the Tensift watershed.

The main goal was to check how accurate these rainfall reanalyses are by comparing them with real observations from eight weather stations in the region, covering different geographic areas (mid-mountain and plain), altitudes, latitudes, and time scales (monthly and yearly). This comparison used statistical measures such as bias, root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and correlation coefficient (CC).

The results showed significant differences between the two products. TerraClimate had better accuracy and stability, with lower bias and RMSE, indicating more consistent and precise long-term forecasts. This makes it a preferred choice for applications needing long-term predictions. On the other hand, ERA5 had a slightly higher correlation coefficient, suggesting better short-term agreement with observations. However, this higher correlation came with larger biases and RMSE, reducing the overall accuracy of forecasts. Additionally, ERA5 showed more variability in all measures, which can be challenging for reliability and predictability, especially in applications where stability is crucial.

Keywords: Reanalysis product, ERA5, TerraClimate, Validation, Tensift.

TABLE DE MATIERES :

Remerciements.....	2
Résumé.....	3
Absract.....	4
Table de matières :	5
Liste des tableaux.....	8
Liste de figures.....	9
Liste des abréviations.....	13
Introduction.....	14
Chapitre 1 : revue de littérature	16
I. Les produits de réanalyses :	16
1. Qu'est-ce qu'une réanalyse ?.....	16
2. Les produits de réanalyse pluviométriques :.....	16
a. L'importance des produits de réanalyse pluviométriques :.....	16
b. Principaux types de produits de réanalyses pluviométriques :.....	17
3. Le produit ERA-5 :.....	18
4. Le produit TerraClimate :	20
II. Comparaison entre ERA5 et TerraClimate :.....	22
III. Études Antérieures :.....	22
Chapitre2 : Présentation de la zone d'étude et données utilisées.....	24
I. Présentation du bassin versant Tensift :.....	24
1. Contexte général :.....	24
2. Contexte Géologique :.....	25
3. Climat :	26
4. Régimes pluviométriques :.....	27
5. Couverture végétale :	27
II. Les données utilisées.....	28
1. Les données mensuelles et annuelles observées :.....	28

2.	Les données de réanalyse d'ERA5 :	30
3.	Les données de réanalyse TerraClimate :	30
III.	Traitement des données :	30
1.	Le coefficient de corrélation :	30
2.	Le Biais :	31
3.	L'erreur moyenne ME :	31
4.	L'erreur absolue moyenne MAE :	31
5.	L'erreur quadratique moyenne (RMSE) :	31
CHAPITRE 3 : Résultat de traitements et discussion.....		33
I.	Résultats du traitement.....	33
1.	Résultats du traitement avec le produit ERA5	33
a.	ERA5 en moyenne montagne :	34
❖	Aghbalou (1070 m).....	34
❖	Tahnaout (1064 m).....	37
❖	Imin El Hammam (772 m).....	39
❖	Sidi Rahal (690 m).....	41
❖	Lalla Takerkoust (614m).....	43
b.	ERA5 en plaine:	45
❖	Marrakech (460 m).....	45
❖	Chichaoua (340 m)	47
❖	Abadla (263 m)	49
2.	Résultats du traitement avec le produit TerraClimate.....	51
❖	Le coefficient de corrélation CC :	51
❖	Les erreurs ME et MAE et RMSE :	51
❖	Le BIAIS :	51
a.	TerraClimate en moyen montagne	52
❖	Aghbalou (1070m)	52
❖	Tahnaout (1064m)	55
❖	Imin El hammam (752m)	56
❖	Sidi Rahal (690m)	59
❖	Lalla Takerkoust (614m).....	61

b.	TerraClimate en plaine	63
❖	Marrakech (460m)	63
❖	Chichaoua (340m).....	65
❖	Abadla (263m).....	67
II.	Comparaison des résultats d'évaluation des deux produits ERA5 et TerraClimate :	69
1.	L'évaluation quantitative des produits :	69
a.	Le Biais:	69
b.	L'Erreur quadratique moyen (RMSE) :	69
c.	L'Erreur absolue moyen (MAE) :	69
d.	Le Coefficient de corrélation (CC) :	70
2.	Exemple d'évaluation comparative des deux produits :	72
❖	En plaine :.....	72
❖	En moyenne montagne :.....	72
III.	Discussion:.....	73
	Conclusion générale	74
	Références.....	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Caractéristiques des produits de réanalyse	18
Tableau 2: Réanalyses atmosphériques du ECMWF	20
Tableau 3: Ensemble de données utilisées pour produire l'ensemble de donnée TerraClimate	21
Tableau 4: Caractéristiques du produit ERA5 et TerraClimate	22
Tableau 5: Etudes antérieures au Maroc	23
Tableau 6: Stations pluviométriques.....	29
Tableau 7: Les indicateurs statistiques utilisés	32
Tableau 8: Résultats de traitement des données avec le produit ERA5	33
Tableau 9: Résultats de traitement des données avec le produit TerraClimate	52

LISTE DE FIGURES

Figure 1: Principe d'assimilation des données dans la réanalyse du climat	19
Figure 2: Situation géographique du bassin versant de Tensift	25
Figure 3: Situation géologique et carte lithologique simplifiée du bassin versant du Tensift	26
Figure 4: Carte d'occupation de sol et de végétation du bassin versant de Tensift	28
Figure 5: La répartition spatiale de stations pluviométriques dans le bassin versant de Tensift	29
Figure 7: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station AGHBALOU	35
Figure 8: Variation des données observées de la station AGHBALOU et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)	36
Figure 9: Variation des données observées de la station AGHBALOU et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)	36
Figure 10: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 à la station TAHNAOUT	37
Figure 11: Variation des données observées de la station TAHNAOUT et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)	38
Figure 12: Variation des données observées de la station TAHANAOUT et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)	38
Figure 13: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station IMIN EL HAMMAM	39
Figure 14: Variation des données observées de la station IMIN EL HAMMAM et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)	40
Figure 15: Variation des données observées de la station IMIN EL HAMMAM et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)	40
Figure 16: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station SIDI RAHAL	41
Figure 17: Variation des données observées de la station SIDI RAHAL et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)	42
Figure 18: Variation des données observées de la station SIDI RAHAL et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)	42
Figure 19: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station TAKERKOUST	43
Figure 20: Variation des données observées de la station TAKERKOUST et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)	44

Figure 21: Variation des données observées de la station TAKERKOUST et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)	44
Figure 22: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station MARRAKECH	45
Figure 23: Variation des données observées de la station MARRAKECH et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)	46
Figure 24: Variation des données observées de la station MARRAKECH et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)	46
Figure 25: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station CHICHAOUA	47
Figure 26: Variation des données observées de la station CHICHAOUA et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2002)	48
Figure 27: Variation des données observées de la station CHICHAOUA et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)	48
Figure 28: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station ABADLA	49
Figure 29: Variation des données observées de la station ABADLA et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)	50
Figure 30: Variation des données observées de la station ABADLA et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)	50
Figure 31: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station AGHBALOU	53
Figure 32: Variation des données observées de la station AGHBALOU et celles de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)	54
Figure 33: Variation des données de la station AGHBALOU et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)	54
Figure 34: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station TAHNAOUT	55
Figure 35: Variation des données de la station TAHNAOUT et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)	56
Figure 36: Variation des données observées de la station TAHNAOUT et des données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)	56
Figure 37: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station IMIN EL HAMMAM	57

Figure 38: Variation des données observées de la station IMIN EL HAMMAM et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)	58
Figure 39: Variation des données observées de la station IMIN EL HAMMAM et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020).....	58
Figure 40: Corrélacion entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station SIDI RAHAL.....	59
Figure 41: Variation des données observées de la station SIDI RAHAL et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)	60
Figure 42: Variation des données observées de la station SIDI RAHAL et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)	60
Figure 43: Corrélacion entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station TAKERKOUST.....	61
Figure 44: Variation des données observées de la station TAKERKOUST et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)	62
Figure 45: Variation des données observées de la station TAKERKOUST et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020).....	62
Figure 46: Corrélacion entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station MARRAKECH.....	63
Figure 47: variation des données observées se la station MARRAKECH et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)	64
Figure 48 : Variation des données observées de la station MARRAKECH àet les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020).....	64
Figure 49: Corrélacion entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station CHICHAOUA.....	65
Figure 50: Variation des données observées de la station CHICHAOUA et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)	66
Figure 51: Variation des données observées de la station CHICHAOUA et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)	66
Figure 52: Corrélacion entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station ABADLA.....	67
Figure 53: Variation des données observées de la station ABADLA et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)	68
Figure 54: Variation des données de la station ABADLA et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020).....	68
Figure 55: Comparaison entre les biais des deux produits ERA5 et TerraClimate	70

Figure 56: Comparaison des indicateurs statistiques des deux produits ERA5 et TerraClimate à l'échelle mensuelle et annuelle.....	71
Figure 57: Somme annuelle des pluies observées et celle réanalysée par les deux produits de 1970 à 2020 sur la station MARRAKECH.....	72
Figure 58: Somme annuelle des pluies observées et celle réanalysée par les deux produits de 1970 à 2020 sur la station IMIN EL HAMMAM.....	72

LISTE DES ABREVIATIONS

ABHT : Agence du Bassin Hydraulique du Tensift

CC : Coefficient de Corrélation

CEPMMT : Le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme

CFSR: Climate Forecast System Reanalysis

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ERA: ECMWF Re-Analysis

FGGE: First GARP (Global Atmospheric Research Program) Global Experiment

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

JMA: Japan Meteorological Agency

JRA-55: the Japanese 55-year Reanalysis

JRA-3Q: Japanese 55-year Reanalysis Quarterly Update

LMR: Last Millennium Reanalysis

MAE: Mean absolute error

ME: Mean Error

MERRA-2: Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version

NARR: North American Regional Reanalysis

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NCEP: National Centers for Environmental Prediction

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

PSL Physical : Sciences Laboratory

RMSE : stands for Root Mean Square Error (L'erreur quadratique moyenne)

TC : TerraClimate

INTRODUCTION

Les informations sur les précipitations sont essentielles pour comprendre le bilan hydrologique à l'échelle mondiale et les interactions complexes entre les différentes composantes du cycle hydrologique, à la fois à petite et à grande échelle. Le réchauffement latent causé par les précipitations est une source d'énergie atmosphérique primordiale. Par conséquent, il est crucial de connaître la répartition spatiale et temporelle des précipitations à travers le globe afin d'améliorer les diagnostics climatiques, ainsi que les modèles de prévision météorologique et climatique. De plus, la répartition des précipitations revêt une grande importance pour la gestion de l'eau en agriculture, dans la production d'énergie électrique, la prévention des inondations, ainsi que pour la surveillance des sécheresses et des inondations.

Les précipitations sont mesurées avec des pluviomètres, des radars météorologiques et des capteurs satellitaires. À l'échelle continentale, les observations sont intégrées dans des modèles météorologiques ou climatiques pour produire des réanalyses des précipitations, essentielles en modélisation hydrologique. Divers produits de réanalyse existent, chacun ayant des objectifs, périodes, sources de données et résolutions différents. Ces réanalyses fournissent des estimations détaillées de la répartition des précipitations et sont utilisées pour comprendre les tendances climatiques, analyser les extrêmes, évaluer les modèles climatiques et étudier les impacts environnementaux et sociétaux[1].

Un problème majeur souvent rencontré lors de la réalisation de telles études est le manque de données climatiques à long terme. Les informations météorologiques sont généralement obtenues à partir de stations locales, mais ces réseaux sont souvent clairsemés[2], en particulier dans les régions inhabitées. Cela entraîne un déficit d'informations essentielles pour les modèles hydrologiques.

Nous avons choisi deux réanalyses pluviométriques : TerraClimate et ERA5. TerraClimate, développé par des scientifiques de l'Université d'Idaho, présente l'avantage d'une résolution spatiale élevée d'environ 4 km et d'une résolution temporelle mensuelle, ce qui correspond parfaitement à nos objectifs de comparaison avec les mesures des stations climatiques locales [3].

ERA5, la cinquième génération de réanalyse atmosphérique du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT), offre des estimations horaires pour de nombreuses variables climatiques couvrant l'atmosphère, les sols et les océans. Hébergées sur Google Cloud, les données ERA5 couvrent la période de 1950 à nos jours à l'échelle mondiale, avec une grille de 31 km de maillage et une résolution verticale de 137 niveaux allant de la surface de la Terre jusqu'à une altitude de 80 km[4].

Ces caractéristiques nous permettent de comparer efficacement les précipitations issues des réanalyses avec celles mesurées par les stations climatiques du bassin versant de Tensift, afin de valider la fiabilité et la précision de ces produits de réanalyse.

Cette étude se concentre sur l'évaluation et la validation de ces deux produits de réanalyse pluviométrique dans le bassin de Tensift. L'objectif principal est d'examiner dans quelle mesure ERA5 et TerraClimate reproduisent fidèlement les schémas de précipitations observés dans la région, en tenant compte de la variabilité spatiale et temporelle des événements pluvieux. Une validation rigoureuse est essentielle pour évaluer la fiabilité de ces produits dans des contextes locaux spécifiques, et pour garantir leur utilisation appropriée dans la gestion des ressources en eau et la planification régionale.

Cette étude abordera également les défis potentiels liés à l'utilisation de réanalyses climatiques dans des zones semi-arides comme le bassin de Tensift, où la précision des données de précipitations est cruciale pour la résilience climatique et la durabilité environnementale. En analysant les performances de ERA5 et TerraClimate à différentes échelles spatiales et temporelles, nous visons à fournir des recommandations pratiques pour améliorer leur utilisation et leur interprétation dans le contexte local.

Chapitre 1 : revue de littérature

I. Les produits de réanalyses :

1. Qu'est-ce qu'une réanalyse ?

Les réanalyses représentent une nouvelle approche d'investigation en climatologie, apparue au milieu des années 90. Elle consiste à combiner différentes sources de données météorologiques, telles que les observations des stations météorologiques au sol, les ballons-sondes, les bouées océaniques, les radars météorologiques et les mesures satellitaires. En associant ces données à des modèles numériques de prévision météorologique, on peut reconstruire rétrospectivement les conditions atmosphériques et climatiques passées. Cette combinaison d'observations et de modélisations présente de nombreux avantages par rapport à l'observation seule. Elle permet d'obtenir une couverture spatiale et temporelle continue à l'échelle mondiale, d'étudier le climat en temps réel, même dans des zones peu peuplées ou inhabitées, de surmonter les problèmes liés aux frontières politiques, et de réduire les erreurs d'estimation des paramètres atmosphériques en les recalant systématiquement avec les observations.[5]

Les réanalyses atmosphériques fournissent un ensemble cohérent de variables pour étudier les fluctuations du temps et du climat à différentes échelles de temps[6]. Trois principaux organismes produisent ce type de données : le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF), la NASA Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (NASA DAO), et le National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). Ces réanalyses sont essentielles pour la recherche climatique et météorologique, car elles offrent des données homogènes et fiables sur de longues périodes.

2. Les produits de réanalyse pluviométriques :

Les produits de réanalyses pluviométriques sont des ensembles de données météorologiques qui utilisent des techniques avancées de modélisation et d'assimilation de données pour estimer les quantités de précipitations passées sur de vastes zones géographiques et sur une période prolongée.

a. L'importance des produits de réanalyse pluviométriques :

Les produits de réanalyse pluviométrique sont essentiels pour la recherche climatique et hydrologique, ainsi que pour l'évaluation des risques liés aux phénomènes météorologiques extrêmes. Ils contribuent également à la validation des modèles climatiques et à l'amélioration des prévisions

météorologiques et climatiques. Ces données jouent un rôle crucial dans la gestion des ressources naturelles et la planification en période de changement climatique mondial.

b. Principaux types de produits de réanalyses pluviométriques :

De nos jours, plusieurs organismes météorologiques offrent des réanalyses climatiques en utilisant des jeux de données globales ou régionales. On peut mentionner parmi les réanalyses qui ont une portée globale :

L'analyse rétrospective de l'ère moderne pour la recherche et les applications MERRA-2 qui produite par le Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) de la NASA, c'est la première réanalyse globale à long terme à assimiler les observations spatiales des aérosols et à représenter leurs interactions avec d'autres processus physiques du système climatique[7]. Elle commence en 1980 avec une résolution latitudinale d'environ 50 km et a remplacé le premier MERRA en raison d'un nombre croissant d'observations satellitaires disponibles[8].

Le National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) produit plusieurs réanalyses climatiques, dont la Reanalysis I et la Reanalysis II couvrant respectivement jusqu'en 2014 et 2008. La NCEP/DOE Reanalysis II se concentre sur les variables énergétiques et hydriques de 1979 à 2012, tandis que le CFS Reanalysis offre des données atmosphériques et océaniques jusqu'à aujourd'hui[5].

De même l'Agence météorologique japonaise (JMA) a réalisé le deuxième projet de réanalyse, connu sous le nom de réanalyse japonaise de 55 ans (ou JRA-55). Ce projet a permis de produire un ensemble de données climatiques homogènes de haute qualité, couvrant le dernier demi-siècle[9].

Le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF) a réalisé plusieurs réanalyses climatiques. Tout d'abord, le produit ERA-15 a été développé pour une période de 15 ans, de décembre 1978 à février 1994. Ensuite, le produit ERA-40 a été développé pour une période de 45 ans, de 1957 à 2002. Le ECMWF a ensuite publié ERA-Interim pour la période de 1979 à 2019[10], et enfin ERA5 pour la période de 1950 à nos jours.

Tableau 1:Caractéristiques des produits de réanalyse

Produit de réanalyse	Institution	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Couverture temporelle	Extension spatiale	Référence
ERA-Interim	ECMWF	0,75° x 0,75°	3h	1979-2010	Global	rda.ucar.edu/datasets/ds627.0/
Merra2	NASA	0,5° * 0,625 °	Variable	1980-présent	Global	MERRA-2 (nasa.gov)
JRA-55	JMA	0,56° * 0,56°	6 h, 3 h quotidien mensuel	1958-2012 (prolongé jusqu'en janvier 2024)	Global	Projet JRA-55 (kishou.go.jp)
JRA-3Q	JMA	0,56° * 0,56°	6 h, 3 h quotidien mensuel	Septembre 1947 - aujourd'hui	Global	Authentication for DIAS Systems (diasjp.net)
CFSR	NCEP	0.5°*0.5°	6 h quotidien mensuel annuel	1979-2010	Global	Projet de réanalyse et de réprévision du CSF (noaa.gov)
NARR	NCEP	0.288°*0.288°	Horaire	1979-présent	Amérique du Nord	Page d'accueil de la réanalyse régionale pour l'Amérique du Nord (noaa.gov)
NCEP/DOE Reanalysis 2 (R2)	NCEP/DOE	2.5°*2.5°	6 h quotidien mensuel annuel	1979-présent	Global	Centre de prévision climatique (noaa.gov)
NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis V2c	NOAA PSL	2°*2°	6 h quotidien mensuel	1871-2012	Global	NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (V2c): Laboratoire des sciences physiques de la NOAA NOAA-CIRES 20th Century Reanalysis (V2c)
LMR	NOAA PSL	2°*2°	Annuel	1850-2005	Global	Recherche de données paléo / Étude / Centres nationaux d'information sur l'environnement (NCEI) (noaa.gov)

3. Le produit ERA-5 :

ECMWF a une longue histoire de réanalyse, comme le montre le tableau 2. ERA5, quant à elle, est la cinquième génération de réanalyse atmosphérique produite. Les activités de réanalyse

atmosphérique ont débuté en 1979 avec le projet FGGE. Elles ont été suivies par la production d'ERA-15 au milieu des années 1990, d'ERA-40 de 2001 à 2003, puis d'ERA-Interim de 2006 à 2019[11].

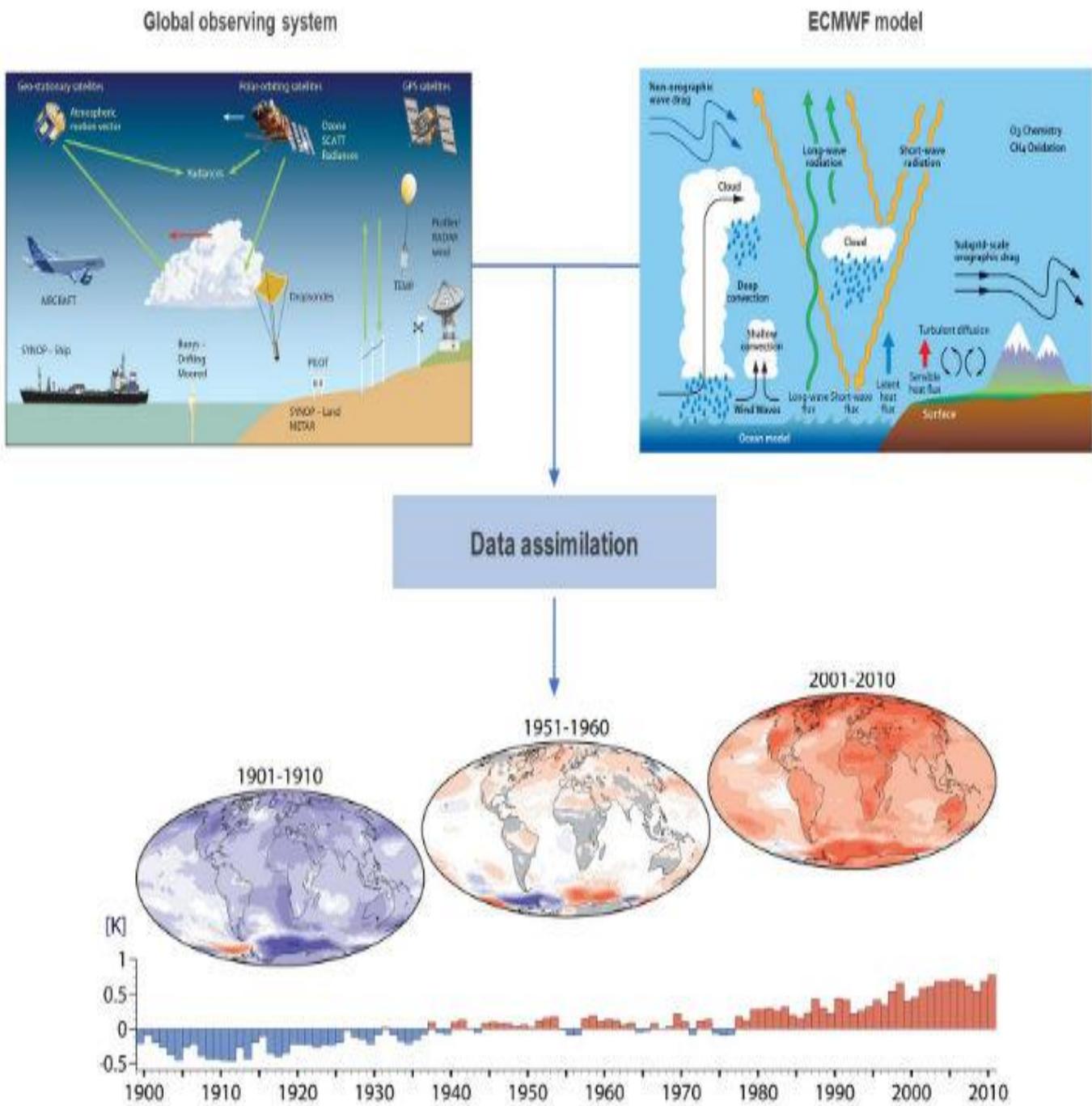


Figure 1: Principe d'assimilation des données dans la réanalyse du climat

Tableau 2: Réanalyses atmosphériques du ECMWF

Réanalyse	Période couverte	Résolution de la grille	Schéma d'assimilation	Cycle du modèle IFS (année)	Référence
FGGE	1979	208 km	OI	1980	Bengtsson et al. (1982)
ERA-15	1979–1994	125 km	OI	13R4 (1995)	Gibson et al. (1999)
ERA-40	1957–2002	125 km	3D-Var	23R4 (2001)	Uppala et al. (2005)
ERA-Interim	1979–2019	80 km	4D-Var	31R2 (2006)	Dee et al. (2011)
ERA5	1950 à aujourd'hui	31 km	4D-Var	41R2 (2016)	Hersbach, 2020)

Comme mentionné précédemment, ERA5 est une réanalyse des conditions météorologiques horaires à haute résolution spatiale et temporelles remontant à 1950, et intègre plus de jeux de données d'observations que les réanalyses précédentes, ce qui le rend encore plus précis[12]. Son contenu comprend des prévisions de variables atmosphériques telles que la température de l'air, la pression et le vent à différentes altitudes, ainsi que des variables de surface telles que les précipitations, l'humidité du sol et la hauteur des vagues océaniques.

La réanalyse ERA5 combine les observations avec le modèle de prévision numérique du temps du CEPMMT dans des champs complets à l'échelle mondiale en utilisant la méthode d'assimilation de données 4D-Var. Les principales différences sont que ERA5 utilise un système de prévision météorologique gelé tout au long (tel qu'opérationnel en 2016) pour des raisons de cohérence, et qu'il utilise une résolution inférieure à celle utilisée dans les prévisions météorologiques opérationnelles pour maintenir le système abordable. Contrairement aux réanalyses centenaires plus longues, qui n'ingèrent que des observations de surface, ERA5 utilise toutes les observations disponibles, in situ et par satellite. En outre, ERA5 comprend des observations provenant des instruments les plus récents tels qu'ils sont utilisés dans le système de prévision météorologique à moyen terme du CEPMMT, dans la mesure du possible.

4. Le produit TerraClimate :

TerraClimate est une base de données, développé et maintenu par le Laboratoire de sciences de la Terre et de l'environnement de l'Université de l'Idaho, qui fournit des informations sur le climat mensuel et le bilan hydrique des surfaces terrestres mondiales de 1958 à 2020[13]. Ces données sont

essentielles pour les études écologiques et hydrologiques à l'échelle mondiale, qui nécessitent une résolution spatiale élevée et des données temporelles variées. Toutes les données sont disponibles avec une résolution temporelle mensuelle et une résolution spatiale d'environ 4 km [10]

TerraClimate utilise une méthode d'interpolation climatique qui combine des données climatologiques à haute résolution spatiale provenant de l'ensemble de données WorldClim avec des données à résolution temporelle plus grossière provenant d'autres sources[14] (tableau 3). Cela permet de générer des données mensuelles sur les précipitations, les températures maximales et minimales, la vitesse du vent, la pression de vapeur et le rayonnement solaire. De plus, TerraClimate génère également des données mensuelles sur le niveau des eaux de surface en utilisant un modèle de bilan hydrique qui prend en compte l'évapotranspiration de référence, les précipitations, la température et la capacité en eau extraite des plantes dans le sol[15].

Tableau 3: Ensemble de données utilisées pour produire l'ensemble de donnée TerraClimate

Jeu de données	Résolution spatiale utilisée	Résolution temporelle utilisée	Variables
WorldClim v2	1/24°	Mensuel, normales de 1970 à 2000	Tas, vap, pr, srad, ws
WorldClim v1.4	1/24°	Mensuel, normales de 1960 à 1990	Tmax, Tmin, Tas
CRU Ts4.0	0.5°	Mensuel, 1958-2015	Tmax, Tmin, vap, pr, Tas
JRA-55	1.25°	Mensuel, 1958-2015	Tas, vap, pr, srad, ws
Capacité de stockage de la zone racinaire	0.5°	Invariant dans le temps	Capacité de stockage de l'eau

Les abréviations variables énumérées comprennent la température maximale mensuelle moyenne (Tmax), la température minimale (Tmin) et moyenne (Tas), la pression de vapeur (vap), la vitesse du vent (ws), le flux descendant en ondes courtes à la surface (srad) et les précipitations mensuelles accumulées (pr).

II. Comparaison entre ERA5 et TerraClimate :

En résumé, les produits climatiques ERA5 et TerraClimate sont de grande qualité, mais ils présentent chacun leurs propres avantages et limitations en fonction des besoins spécifiques de l'utilisateur. TerraClimate se concentre sur des variables spécifiques avec une résolution spatiale plus fine, mais une résolution temporelle plus détaillée, tandis qu'ERA5 offre une résolution spatiale plus grossière, mais une résolution temporelle plus fine. Souvent, le choix entre les deux sont influencé par les exigences de l'application spécifique.

Tableau 4: Caractéristiques du produit ERA5 et TerraClimate

Caractéristiques	ERA5	TerraClimate
Source des données	Modèle de réanalyse (combinaison de données observées et de modèles climatiques)	Principalement données observées (stations météorologiques, mesures satellitaires)
Résolution spatiale	31 Km	4 Km
Résolution temporelle	Horaire	Mensuelle
Couverture temporelle	1950 à aujourd'hui	1958 à l'année précédente
Extension spatial	Global	Global
Utilisation	Recherche climatique, météorologie, modélisation climatique, planification des ressources	Études environnementales, analyses hydrologiques, applications nécessitant haute résolution spatiale

III. Études Antérieures :

Plusieurs études de validation de ces produits et d'autres ont été menées dans différentes régions du monde, en particulier dans les régions où les données sont rares comme l'Afrique de l'Est et du Centre et aussi au Maroc, qui souffrent d'un manque de ressources en eau de surveillance de surface. Ces études ont mis en évidence le potentiel de cette nouvelle source de données[16]. Cependant, les études évaluant l'efficacité des produits de réanalyse pluviométrique dans le bassin versant du Tensift sont actuellement limitées, soulignant le produit TerraClimate, jamais testé dans notre zone d'étude en particulier.

Tableau 5: Etudes antérieures au Maroc

Titre	Auteur(s)	Objectif	Méthodologie	Résultat
Évaluation et correction spatio-temporelles des produits de précipitations maillés dans le nord-ouest du Maroc	L.Ait Dhmane, J.Moustadraf et al. 2023	Évaluer la fiabilité et la précision des produits de précipitations IMERG V06 et ERA5 pour estimer les précipitations dans le bassin versant du Bouregreg sur une période de 20 ans (2000-2020) à diverses échelles temporelles (quotidienne, mensuelle, saisonnière et annuelle) et corriger les biais de ces précipitations.	Évaluer la capacité d'estimation des produits de précipitation par divers scores d'évaluation notamment le coefficient de corrélation, l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur quadratique moyenne (EQM), la probabilité de détection (PDD) et le taux de fausses alarmes (FAR) ainsi que d'autres mesures d'apprentissage automatique.	Les produits GPM ont montré une grande précision avec une faible marge d'erreur en termes de biais, d'EMR et d'EDM. Cependant, il a été observé que ERA5 surpassait les produits GPM dans l'identification des modèles de précipitations spatiales et démontrait une corrélation plus forte[26].
Évaluation des produits de précipitations PERSIANN-CCS-CDR, ERA5 et SM2RAIN-ASCAT pour l'évaluation des précipitations et de la sécheresse dans un bassin versant semi-aride, Maroc	N. Adam, B.Igmoullan et al. 2023	Évaluer la précision des PERSIANN-CCS-CDR, ERA5 et SM2RAIN-ASCAT à une échelle mensuelle et leur pertinence pour l'évaluation de la sécheresse dans un bassin versant semi-aride marocain avec une période comprise entre 1983 et 2017.	Examiner La précision des données PERSIANN-CCS-CDR, ERA5 et SM2RAIN-ASCAT sur le bassin du Tensift au Maroc par comparaison avec les observations au sol. Sur la base de produits satellitaires/de réanalyse à long terme et de l'indice de sécheresse SPI3, cette étude évalue les trois produits à l'aide d'indices statistiques et applique les ensembles de données à l'évaluation des sécheresses météorologiques dans le bassin du Tensift.	A l'échelle du bassin pour les précipitations mensuelles, PERSIANN-CCS-CDR et ERA5 ont montré une bonne CC, avec une légère surestimation des précipitations observées par le PBIAS. Le NSE a obtenu un score de 0,41 pour PERSIANN-CCS-CDR et de 0,72 pour ERA5. Les résultats de SM2RAIN-ASCAT ont montré une surestimation des données de précipitations observées. À l'échelle du bassin, les coefficients de corrélation SPI3 entre les estimations mensuelles PERSIANN-CCS-CDR et les données de pluviométrie observées étaient supérieurs à 0,67, et l'EQM était plus proche de 0, surpassant ERA5 dans l'évaluation SPI3[17].
Évaluation et comparaison des produits pluviométriques satellitaires : validation par modélisation hydrologique à l'aide de la RNA dans une zone semi-aride	A. Rachidi, E.El Mazoudi et al. 2023	Validation de quatre produits de précipitations satellitaires, CHIRPS v2, Tamsat, Persiann CDR et TerraClimate, dans une région semi-aride de la ville d'Essaouira (Maroc).	Les données de précipitations de produits sont d'abord comparées aux observations au sol de 4 stations de mesure des pluviomètres à l'aide des différentes méthodes de comparaison, à savoir : coefficient de corrélation de Pearson (r), Biais, erreur quadratique moyenne (RMSE), coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe et erreur absolue moyenne (MAE). Deuxièmement, une modélisation pluie-ruisellement pour un bassin de la zone d'étude (bassin de Ksob) a été réalisée sur la base de réseaux de neurones artificiels de type MLP (Multi Layers Perceptron). Ce modèle a ensuite été utilisé pour évaluer les meilleurs produits satellitaires pour estimer le débit.	Les résultats indiquent que TerraClimate est le produit le plus approprié pour estimer les précipitations ($R^2 = 0,77$ et $0,62$ pour la phase d'entraînement et de validation, respectivement). En utilisant ce produit en combinaison avec une modélisation hydrologique basée sur l'approche ANN (Artificial Neural Network), les simulations du débit mensuel dans le bassin versant n'étaient pas très satisfaisantes[27].
Évaluation de la performance des données pluviométriques mensuelles de TerraClimate après correction du biais dans la région de Fès-Meknès (Maroc)	M.Hanchane, R.Kessabi et al. 2023	Validation des données TerraClimate sur une sélection de stations appartenant à des unités topographiques de plaine et de montagne et ayant des caractéristiques bioclimatiques et topographiques différentes. Cette validation ouvrira des perspectives pour l'application des données de la CT pour l'ensemble de la région Fès-Meknès, en particulier pour les endroits où les enregistrements de précipitations font défaut.	La validation consiste à comparer les données mensuelles observées et estimées. En plus de la méthode graphique, trois catégories de critères statistiques (Coefficient de corrélation, Index d'accord et Mesures de l'erreur) et réduire le biais, par application de la méthode de cartographie quantile (QM).	Les résultats montrent une capture précise du gradient altitudinal des précipitations, reflétant le climat méditerranéen. Cependant, des biais systématiques ont été identifiés, avec une sous-estimation en montagne et une surestimation en plaine, notamment des précipitations estivales surévaluées en montagne. La méthode de cartographie quantile a été appliquée pour corriger ces biais, montrant une amélioration significative dans la plupart des stations et mois, sauf en mai. Ces résultats soulignent l'importance des corrections mensuelles pour améliorer la qualité des données climatiques de TerraClimate[14].

Chapitre2 : Présentation de la zone d'étude et données utilisées

I. Présentation du bassin versant Tensift :

1. Contexte général :

Le bassin versant du Tensift est un hydrosystème semi-aride qui occupe une superficie de 20 450 km², dans le centre-ouest du Maroc entourant toute la région de Marrakech[17]. Ce large domaine continental se situe entre les latitudes 30°50' et 32°10' N et les longitudes 7°25' et 9°25' W. L'altitude varie entre 53m à Talmest et 4167m au Mont Toubkal (Fig. 2) avec une altitude moyenne de 1028m[18]. Il est limité au Sud par la ligne de crête de la chaîne du Haut Atlas, au Nord par le massif de petites montagne 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.

Le bassin versant de Tensift peut être subdivisée en deux parties dont le fonctionnement hydrologique est plus contrasté, à savoir :

- **Montagnes du Haut Atlas :** Elles constituent la zone de production des eaux caractérisée par une hydrologie de surface très active et des précipitations importantes. Sous l'effet de l'altitude, les précipitations sont sous deux formes, liquide et solide. Les oueds qui drainent ces versants Nord des montagnes atlasique constituent la seule source de l'alimentation des nappes dans la plaine du Haouz. A cet effet, ces montagnes constituent donc un véritable château d'eau pour la région[19].
- **Plaine centrale semi-aride du Haouz :** C'est une zone de transit et de consommation des eaux. L'irrigation y consomme plus de 85 % des ressources en eau disponibles.

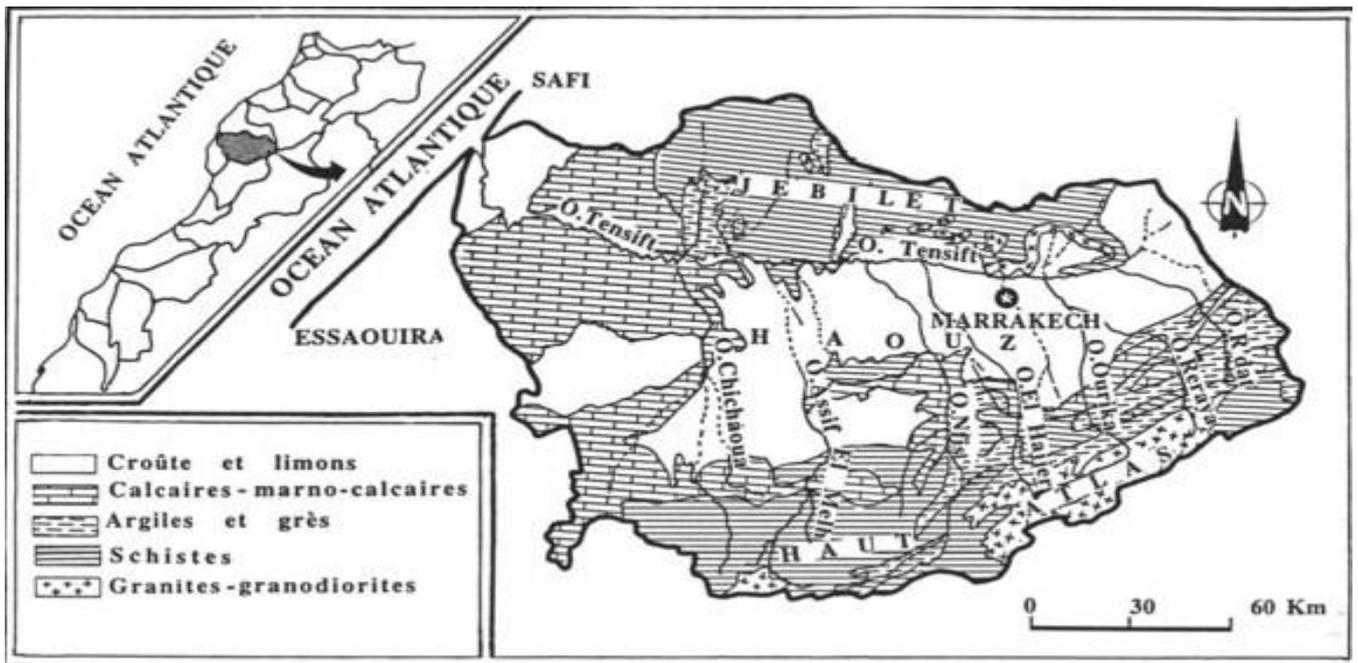


Figure 3: Situation géologique et carte lithologique simplifiée du bassin versant du Tensift

3. Climat :

Le bassin de l'oued Tensift, situé à des latitudes basses du domaine méditerranéen, est soumis à un climat de type continental semi-aride[20] caractérisé par un fort contraste saisonnier :

- Une saison humide hiverno-printanière à précipitations très fortes et concentrées dans le temps (en moyenne 50 à 60 jours de pluie en zone montagneuse et 30 jours en zone de plaine). Ces averses peuvent produire des ruissellements intenses sur les versants et des crues violentes et agressives dans les oueds. Ces pluies sont généralement maximales en novembre et en mars.
- Une saison sèche estivale très longue (environ 119 jours d'insolation continuant), à température élevée (plus de 38°C), se traduisant par une forte évaporation et des infiltrations pouvant être à l'origine d'un tarissement précoce des lits des oueds[21].

L'allure générale des isohyètes permet de distinguer l'influence du relief sur la répartition spatiale des précipitations. Elle traduit par ailleurs un fort contraste entre, d'une part les Jbilet et la plaine du Haouz où les précipitations moyennes annuelles ne dépassent que rarement 200 mm, et d'autre part la chaîne du Haut Atlas où les moyennes peuvent excéder 800 mm. Ces dernières sur les hautes altitudes (plus de 1500 m) cèdent la place à des précipitations neigeuses.

A ces altitudes, l'enneigement intervient de décembre à avril et ne persiste longtemps qu'à partir de 2000 m à 2500 m. En dessous de ces altitudes, il est intermittent. Soulignant l'aridité du climat,

l'humidité relative passe en moyenne de 72% en janvier, à 32% en juillet. Elle tombe brutalement lorsque soufflent les vents chauds et secs d'origine saharienne.

En résumé, les données climatologiques traduisent un caractère assez aride du climat actuel de la région du Tensift, même si ce caractère se trouve en partie limité par les influences montagnardes. Cette aridité va induire une végétation naturelle très réduite de type steppe saharienne [22] dont la raréfaction intense en saison sèche favorise un important décapage des profils de sols surtout lors des premières pluies automnales

4. Régimes pluviométriques :

Le bassin du Tensift présente deux régimes pluviométriques distincts, séparés par une ligne de partage orientée nord-sud. À l'ouest de cette ligne, le mois le plus pluvieux est novembre, avec une seconde saison des pluies, moins marquée, en mars-avril. À l'est de la ligne de partage, la situation est inversée : la première saison des pluies (novembre-décembre) est peu abondante, tandis que la seconde (février-avril) connaît les plus fortes précipitations de l'année. Dans l'ensemble du bassin, janvier est un mois relativement sec et juillet le mois le plus sec.

Ce régime pluviométrique se caractérise par une faible pluviométrie moyenne, comprise entre 250 et 350 mm/an, avec d'importantes variations interannuelles et saisonnières. Ces conditions climatiques limitent les possibilités d'amélioration et de diversification des activités agricoles dans la région. Elles soulignent ainsi l'importance d'une gestion rationnelle des ressources en eau, qui nécessite une connaissance précise des disponibilités hydriques à l'échelle du bassin [23]

5. Couverture végétale :

La végétation dans le bassin versant de Tensift varie selon l'altitude et la nature des terrains. La carte ci-dessous nous permet de distinguer 4 zones homogènes :

- Une région dans la partie du haut Atlas qui se caractérise par sa densité faible et ses plantes dispersées et assez faible.
- Une deuxième région dans la partie centrale entourant la zone de Marrakech avec une forte densité urbaine.
- Une troisième dans la partie Nord caractérisée par ses prairies et forêts.
- Une quatrième dans la partie ouest dans la plaine d'Essaouira qui se distingue par ses prairies et forêts et ses terres à usage agricole[24].

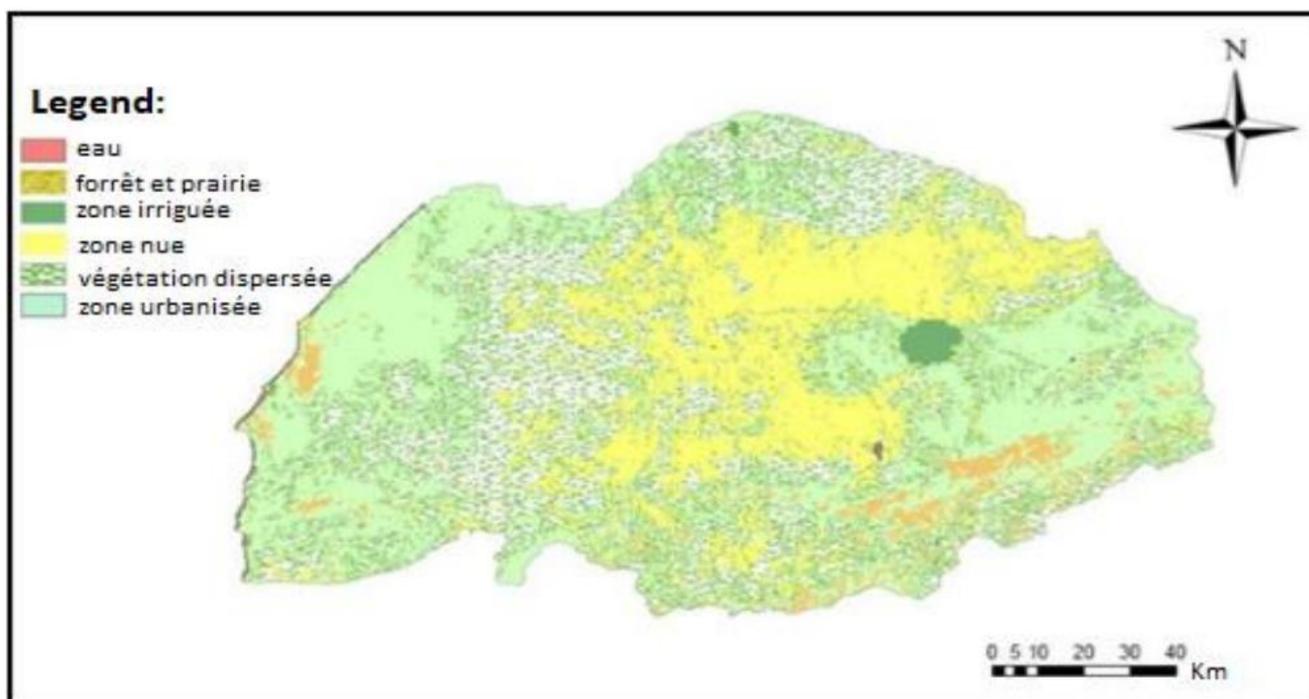


Figure 4: Carte d'occupation de sol et de végétation du bassin versant de Tensift

II. Les données utilisées

Le présent travail est réalisé à l'aide d'une base de données pluviométrique qui provient de trois sources différentes. Les données observées de l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT) et celle des réanalyses ERA5 et TerraClimate obtenues à partir du site

1. Les données mensuelles et annuelles observées :

Les données observées utilisées dans ce travail sont les données mensuelles et annuelles pour la période de 1970 à 2020 ; Ces données comprennent 8 stations pluviométriques dispersées dans le bassin versant de Tensift, dont cinq stations sont placées en montagne et trois stations en plaine. La carte suivante représente la répartition spatiale de ces stations pluviométriques dans la zone :

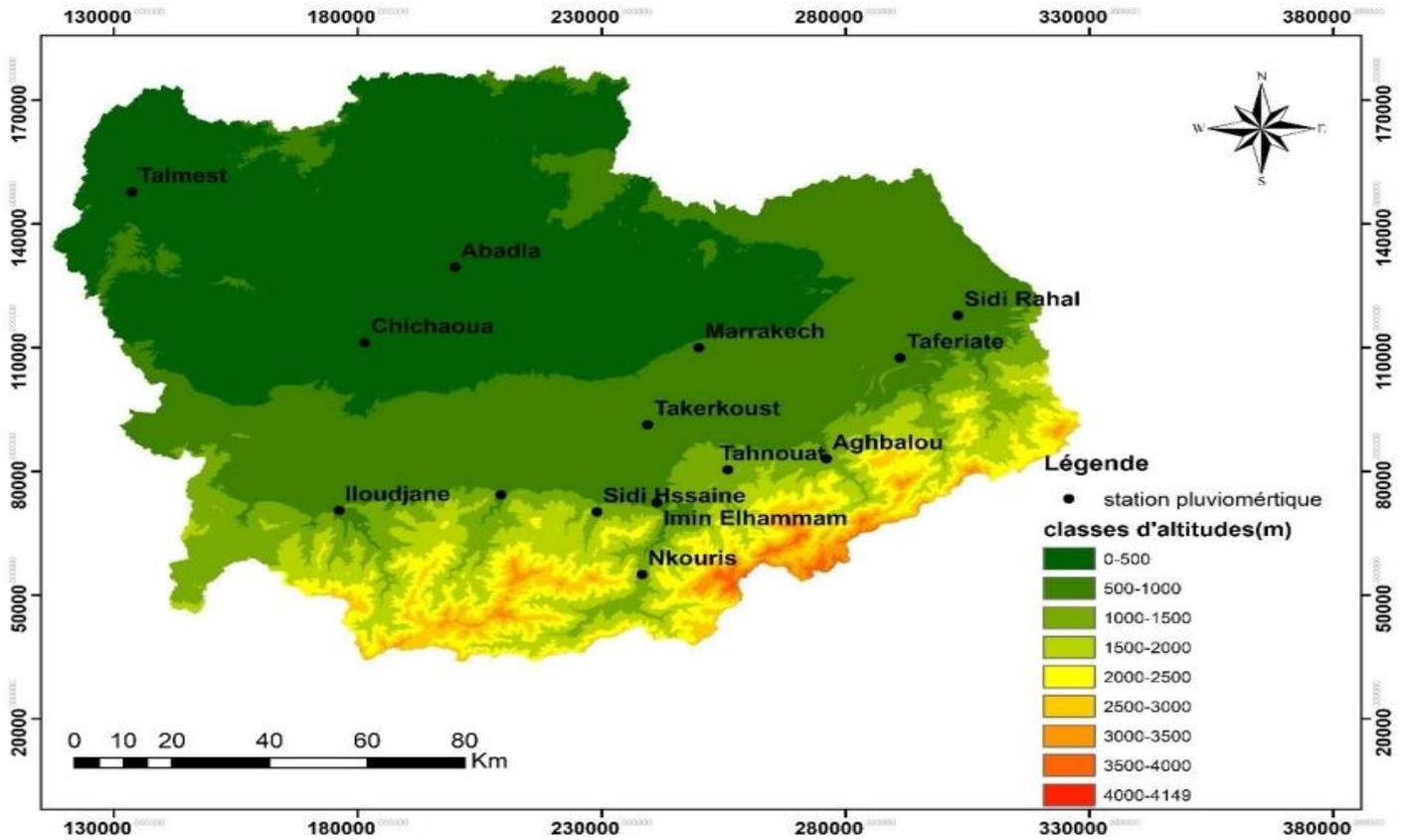


Figure 5: La répartition spatiale de stations pluviométriques dans le bassin versant de Tensift

Tableau 6: Stations pluviométriques

Stations Pluviométriques	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Emplacement	Durée d'enregistrement [années]
Abadla	31.72	-8.56	263	Plaine	1971-2020
Aghbalou	31.32	-7.75	1070	Montagne	1970-2020
Chichaoua	31.55	-8.75	340	Plaine	1970-2020
Imin El hammam	31.21	-8.11	752	Montagne	1970-2020
Lalla Takerkoust	31.38	-8.13	614	Montagne	1970-2020
Marrakech	31.55	-8.03	460	Plaine	1970-2020
Tahnaout	31.29	-7.96	1064	Montagne	1970-2020
Sidi Rahal	31.63	-7.47	690	Montagne	1970-2020

2. Les données de réanalyse d'ERA5 :

ERA5, qui succède à ERA-Interim, fournit des estimations horaires globales des variables atmosphériques, des ondes océaniques et de la surface terrestre, avec une résolution horizontale de 31 km et 137 niveaux verticaux, de la surface à 0,01 hPa (environ 80 km), Les données horaires de ce produit ont été téléchargées depuis le site des données climatiques Copernicus « <mailto:https://cds.climate.copernicus.eu/> » et ont été transformées au pas de temps journalier, mensuel et annuel pour être évaluées à différentes échelles.

3. Les données de réanalyse TerraClimate :

TerraClimate est un ensemble de données mondiales maillées de variables météorologiques et de bilan hydrique pour la période 1958-2020, disponibles à un pas de temps mensuel. Sa résolution spatiale relativement fine Site web (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>).

III. Traitement des données :

Dans cette étude, nous avons réalisé une comparaison entre les données des huit stations météorologiques (Aghbalou, Abadla, Imin El hammam, Tahnaout, Lalla Takerkoust, Sidi Rahal, Marrakech et Chichaoua) dans le bassin du Tensift et les données des deux produits de réanalyses (ERA5 et TerraClimate).

Pour évaluer les produits de réanalyses pluviométriques ont été utilisés les cinq indices statistiques suivantes :

1. Le coefficient de corrélation :

Le coefficient de corrélation est la mesure spécifique qui quantifie la force de la relation linéaire entre deux variables d'une analyse de corrélation. Le coefficient est noté r ou CC sans unité comprise entre -1 et 1. La significativité statistique est indiquée par une valeur p Par conséquent, les corrélations sont généralement exprimées à l'aide de deux chiffres clés : $r =$ et $p =$.

- Plus r est proche de zéro, plus la relation linéaire est faible.
- Les valeurs positives de r indiquent une corrélation positive lorsque les valeurs des deux variables tendent à augmenter ensemble.
- Les valeurs négatives de r indiquent une corrélation négative lorsque les valeurs d'une variable tend à augmenter et que les valeurs de l'autre variable diminuent.

- Les valeurs 1 et -1 représentent chacune les corrélations « parfaites », positive et négative respectivement. Deux variables présentant une corrélation parfaite évoluent ensemble à une vitesse fixe. On dit que la relation est *linéaire* ; reportés dans un nuage de points, tous les points des données peuvent être reliés par une ligne droite.
- La *valeur p* indique si l'on peut ou non significativement conclure que le coefficient de corrélation de la population est différent de zéro, d'après nos observations de l'échantillon.

2. Le Biais :

Le biais permet d'évaluer si les prédictions sont précises ou non et si le modèle a tendance à sur- ou sous-estimer les valeurs de la variable d'intérêt[25]. Plus le biais est faible (proche de 0), meilleure est la prédiction. Il faut faire attention au fait que cet indicateur ne prend pas en compte la variabilité des prédictions. En effet, si les valeurs prédites sont à la fois très surestimées mais aussi très sous-estimées, le biais peut quand même être relativement faible.

3. L'erreur moyenne ME :

L'erreur moyenne additionne les variations et divise le résultat par n. Dans ce contexte, une erreur est une incertitude dans une mesure, ou la différence entre la valeur mesurée et la valeur correcte.

4. L'erreur absolue moyenne MAE :

L'erreur absolue moyenne (MAE) est une mesure couramment utilisée pour mesurer la précision des modèles de prévision. Il fournit un moyen simple et intuitif de quantifier l'ampleur moyenne des erreurs dans un ensemble de prédictions. Le MAE est calculé en prenant la différence absolue entre les valeurs réelles et les valeurs prédites, puis en faisant la moyenne de ces différences.

5. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) :

Un dernier indicateur pertinent est le RMSE. Cet indice fournit une indication par rapport à la dispersion ou la variabilité de la qualité de la prédiction. Le RMSE peut être relié à la variance du modèle. Souvent, les valeurs de RMSE sont difficiles à interpréter parce que l'on n'est pas en mesure de dire si une valeur de variance est faible ou forte[25]. Pour pallier à cet effet, il est plus intéressant de normaliser le RMSE pour que cet indicateur soit exprimé comme un pourcentage de la valeur moyenne des observations. Cela peut être utilisé pour donner plus de sens à l'indicateur.

Dans le tableau ci-dessous, vous trouverez une explication détaillée des méthodes empiriques utilisées, accompagnée des équations correspondantes.

Tableau 7: Les indicateurs statistiques utilisés

Indice statistique	Formule	Range	Valeur optimale
Coefficient de Corrélation	$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}}$	-1 à 1	1
Biais relatif	$\text{Biais} = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^N G_i} \times 100$	$-\infty$ à $+\infty$	0
Erreur quadratique moyenne	$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - G_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i}$	0 à $+\infty$	0
Erreur Moyenne	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^N G_i}$	$-\infty$ à $+\infty$	0
Erreur Moyenne absolue	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N S_i - G_i }{\sum_{i=1}^N G_i}$	0 à $+\infty$	0

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

S_i est l'estimation des précipitations par produit.

G_i est la pluie observée et **Ḡ** est la pluie moyenne observée.

S̄ est l'estimation des précipitations moyennes par produit.

CHAPITRE 3 : Résultat de traitements et discussion

I. Résultats du traitement

1. Résultats du traitement avec le produit ERA5

Pour évaluer la précision des produits par rapport aux observations sur la période de janvier 1970 à décembre 2020, nous avons utilisé cinq indices statistiques : le coefficient de corrélation (CC), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le biais, l'erreur moyenne (ME) et l'erreur absolue moyenne (MAE). Ces indices ont été calculés à l'échelle de la station pour deux échelles temporelles : annuelle et mensuelle.

Les résultats obtenus du produit ERA5 pour les huit stations sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 8: Résultats de traitement des données avec le produit ERA5

Station	Altitude (m)	Emplacement	Echelle	CC	ME (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)	BIAIS (%)
Aghbalou	1070	Montagne	Mensuelle	0,72	-1,04	22,52	34,11	-2,36
			Annuelle	0,72	-12,45	86,76	113,59	
Tahnaout	1064	Montagne	Mensuelle	0,72	12,18	20,69	31,28	39,68
			Annuelle	0,69	146,16	146,44	177,24	
Emin EL hammam	772	Montagne	Mensuelle	0,67	5,01	19,87	28,31	16,21
			Annuelle	0,75	60,09	80,00	150,10	
Sidi Rahal	690	Montagne	Mensuelle	0,71	26,01	28,86	39,28	91,53
			Annuelle	0,76	312,16	312,16	329,22	
Lalla Takerkoust	614	Montagne	Mensuelle	0,72	18,87	21,81	32,65	97,83
			Annuelle	0,71	226,45	226,45	241,52	
Marrakech	460	Plaine	Mensuelle	0,80	11,41	15,00	22,52	62,10
			Annuelle	0,77	134,18	136,91	148,95	
Chichaoua	340	Plaine	Mensuelle	0,87	5,30	8,51	13,17	35,24
			Annuelle	0,69	146,16	146,44	85,72	
Abadla	263	Plaine	Mensuelle	0,85	5,02	8,72	12,89	35,42
			Annuelle	0,76	61,89	63,48	77,13	

À l'échelle annuelle, le coefficient de corrélation (CC) montre une bonne corrélation entre les données observées et celles estimées par le produit. Il atteint 0,77 à la station de Marrakech et 0,76 aux stations de Sidi Rahal et d'Abadla. Cependant, la valeur minimale de ce coefficient atteint 0,69 pour les stations de Chichaoua et Tahnaout.

À l'échelle mensuelle, les données observées sont bien estimées par le produit, comme en témoigne la valeur maximale du coefficient de corrélation CC, qui est de 0,87 pour la station de Chichaoua. En revanche, la valeur minimale de ce coefficient est d'environ 0,71 pour la station de Sidi Rahal.

Les erreurs mensuelles sont faibles, avec un RMSE allant de 13,17 mm à Chichaoua à 39,28 mm à Sidi Rahal, un MAE allant de 8,51 mm à Chichaoua à 28,86 mm à Sidi Rahal, et un ME allant de -1,04 mm à Aghbalou à 26,01 mm à Sidi Rahal. En revanche, les erreurs annuelles sont plus importantes, avec un RMSE compris entre 77,13 mm à Abadla et 329,22 mm à Sidi Rahal, un MAE compris entre 63,48 mm à Abadla et 312,16 mm à Sidi Rahal, et un ME compris entre -12,45 mm à Aghbalou et 312,16 mm à Sidi Rahal.

Les valeurs du biais relatif varient entre -2,36% et 97,83%. Le produit surestime les précipitations observées pour 7 stations, tandis qu'il sous-estime celles de la seule station restante, Aghbalou.

a. ERA5 en moyenne montagne :

❖ Aghbalou (1070 m)

Les graphiques de la figure 7 illustrent la relation entre les précipitations observées et les précipitations réanalysées par le modèle ERA5 à la station Aghbalou, à la fois sur une base mensuelle et annuelle. Sur une base mensuelle, le coefficient de détermination (R^2) est de 0,5204, ce qui signifie que 52,04% de la variation des précipitations observées est expliquée par ERA5. Sur une base annuelle, ce R^2 est de 0,5115, représentant 51,15 % de la variance expliquée. Bien que ces chiffres démontrent une corrélation positive modérée, près de la moitié de la variance reste inexpliquée.

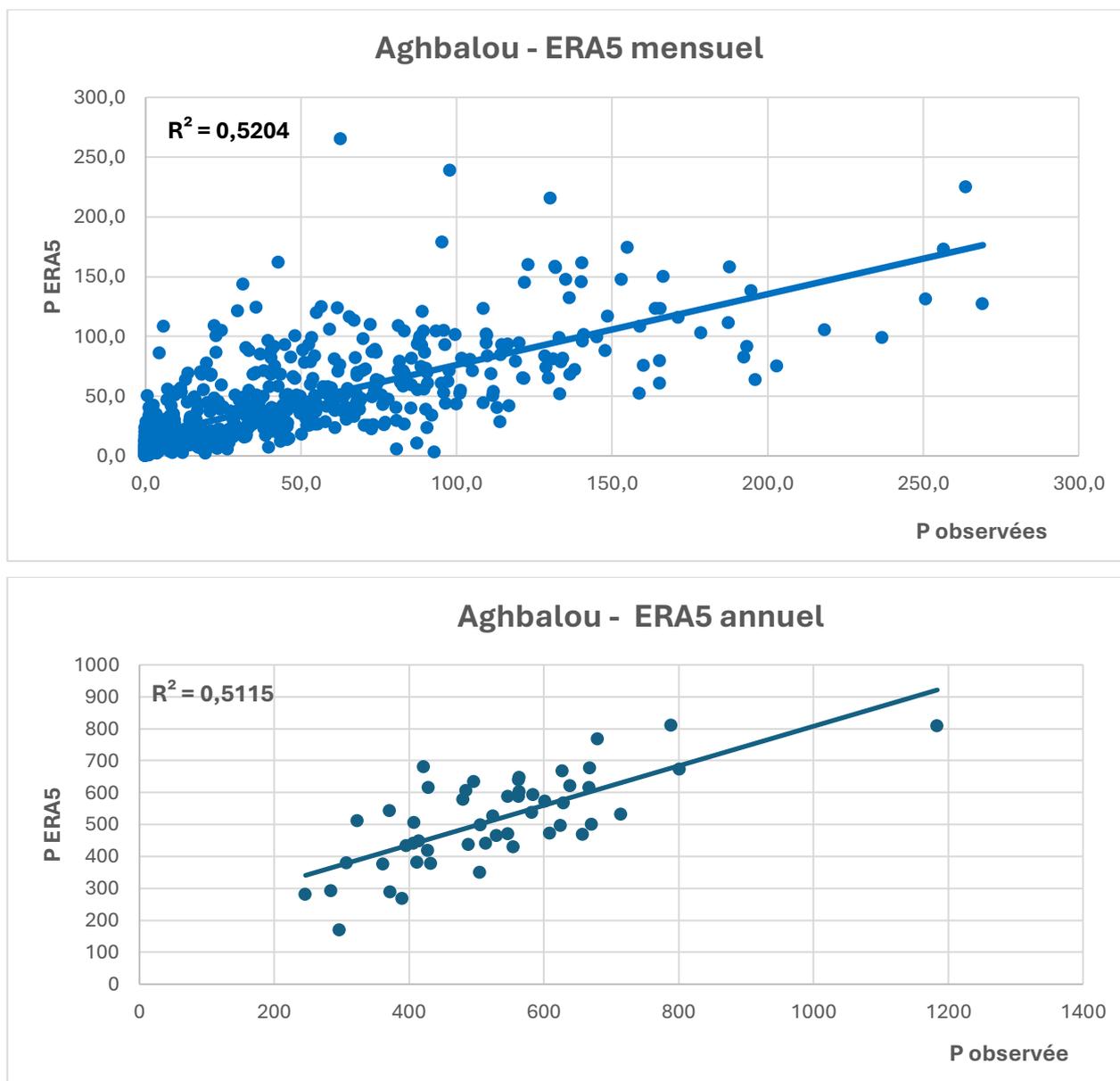


Figure 6: *Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station AGHBALOU*

La figure 8 compare la performance mensuelle de produit ERA5 aux précipitations observées de 1970 à 2020. Cependant, ERA5 a tendance à sous-estimer les précipitations lors des événements extrêmes, tels que ceux en janvier 1991 et juillet 2012, où les pics observés sont nettement plus élevés que ceux modélisés. En revanche, pour les précipitations modérées, ERA5 montre une meilleure concordance avec les observations. Il est important de noter que les périodes de faibles précipitations présentent également une légère divergence, où ERA5 peut indiquer des précipitations minimales même lorsque les observations montrent une absence totale de précipitation.

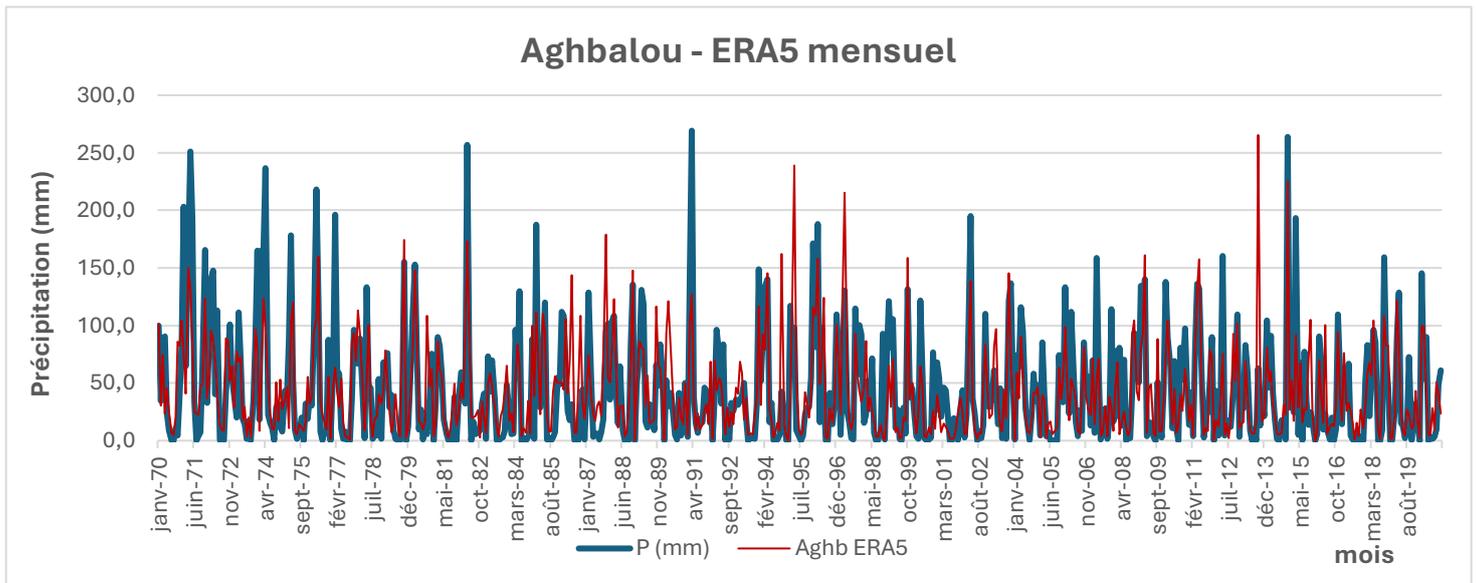


Figure 7: Variation des données observées de la station AGHBALOU et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)

À l'échelle annuelle, le produit montre une sous-estimation de tous les événements pluvieux, avec une différence d'environ 100-200mm pouvant atteindre jusqu'à 400mm. Cependant, les précipitations pendant les périodes de 1985-1988 et 1994-1996 sont légèrement surestimées. De 2015 à 2020, il y a eu une légère sous-estimation.

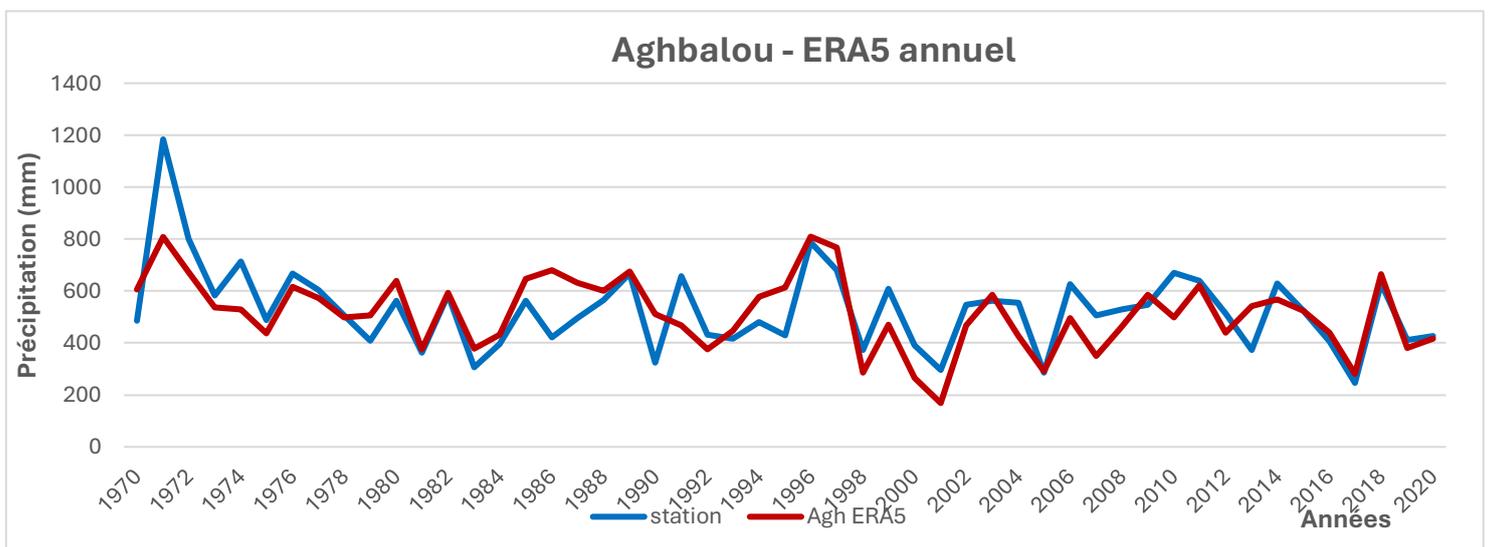


Figure 8: Variation des données observées de la station AGHBALOU et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)

D'après ces constatations, il semble que dans la région de moyenne montagne (station Aghbalou), ERA5 sous-estime les événements pluvieux pour les deux périodes de temps. Les écarts observés varient de 10 à 130 mm par mois et de 150 à 400 mm par an.

Les corrélations entre les données de la station et ERA5 sont modérées, mais elles révèlent également qu'une part importante de la variance des précipitations observées reste inexpliquée par ERA5, ce qui suggère l'influence d'autres facteurs non pris en compte par le modèle.

❖ Tahnaout (1064 m)

À l'échelle mensuelle, le coefficient de détermination R^2 est de 0,5114, ce qui signifie que 51,14% de la variation des précipitations observées est expliquée par les réanalyses du modèle. À l'échelle annuelle, R^2 diminue à 0,4697, ce qui indique que 46,97% de la variation est expliquée. Les deux graphiques montrent une corrélation positive modérée, avec une légère baisse de la précision des estimations à l'échelle annuelle par rapport à l'échelle mensuelle.

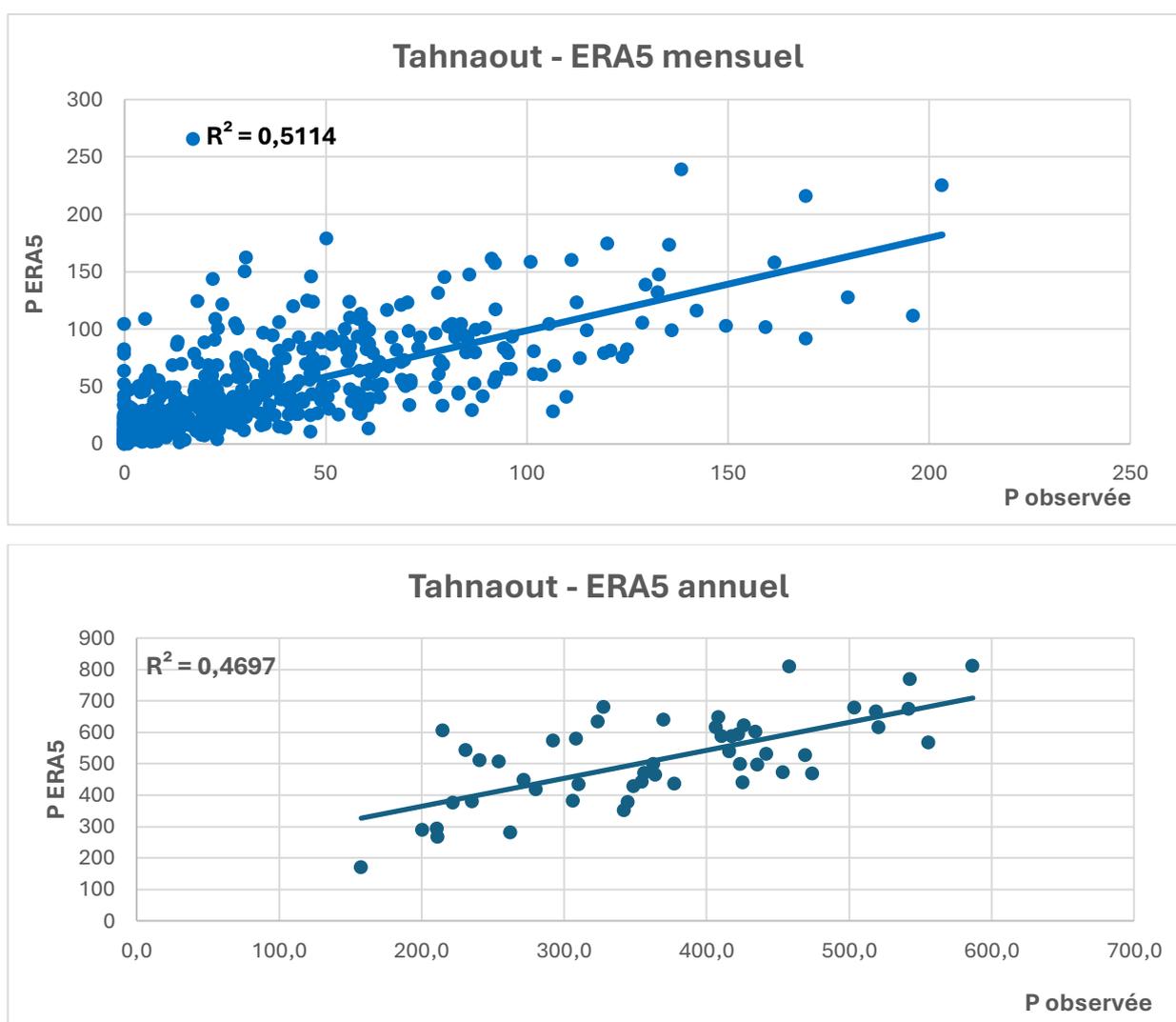


Figure 9: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 à la station TAHNAOUT

ERA5 a tendance à sous-estimer les précipitations intenses en moyenne mensuelle (figure11), avec un écart maximal de 85 mm par mois. Par contre, on a surestimé les précipitations de faible et moyenne intensité, avec un écart maximal de 248,3 mm par mois. Au niveau annuel (figure 12), le produit surestime les précipitations, avec un écart de 6,9 mm/an en 1992 à 390 mm/an en 1970.

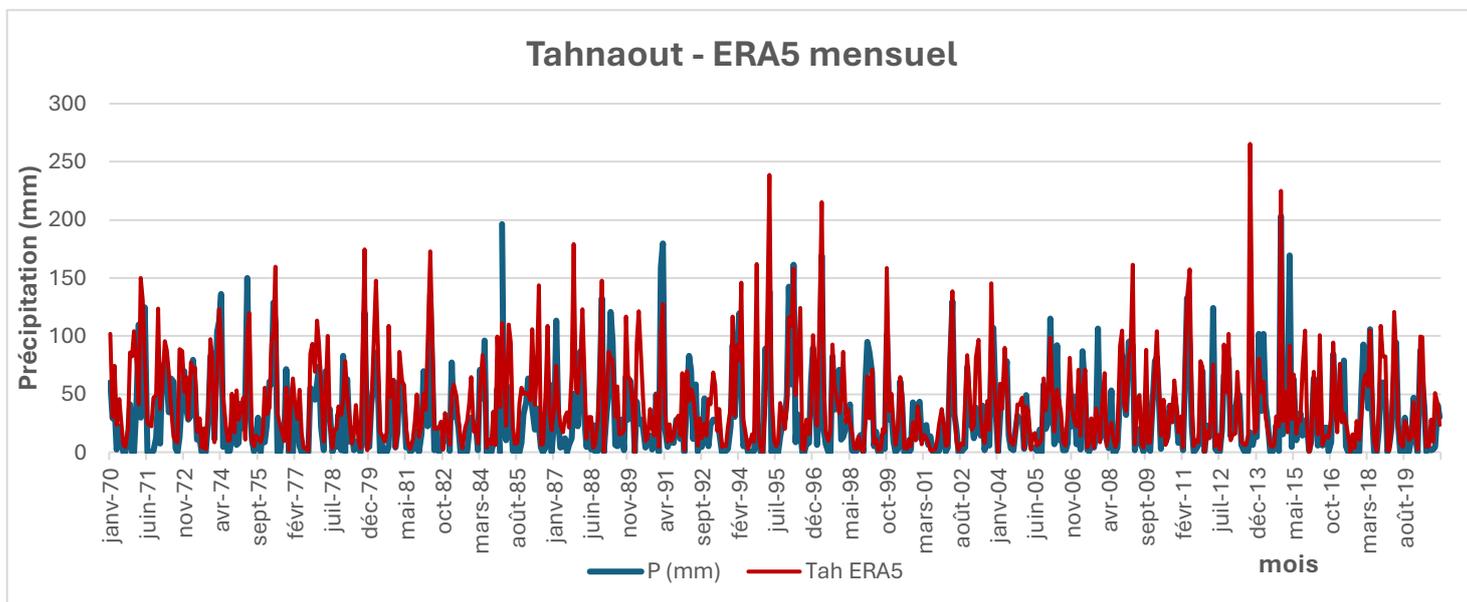


Figure 10: Variation des données observées de la station TAHNAOUT et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)

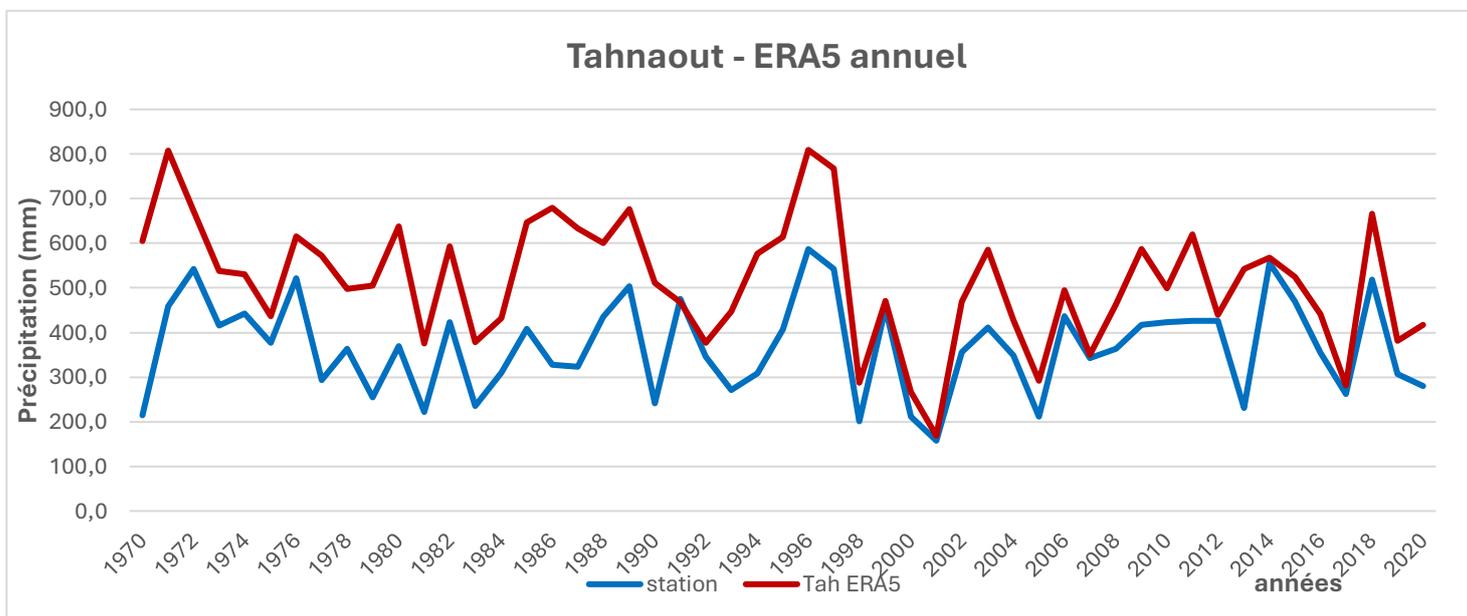


Figure 11: Variation des données observées de la station TAHANAOUT et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)

❖ **Imin El Hammam (772 m)**

Pour ce qui est de la station d'Emin El Hammam, les coefficients de détermination obtenus à l'échelle mensuelle et annuelle sont respectivement de 0,45 et 0,56. Ces valeurs indiquent que le modèle explique 45 % et 56 % de la variance des précipitations observées.

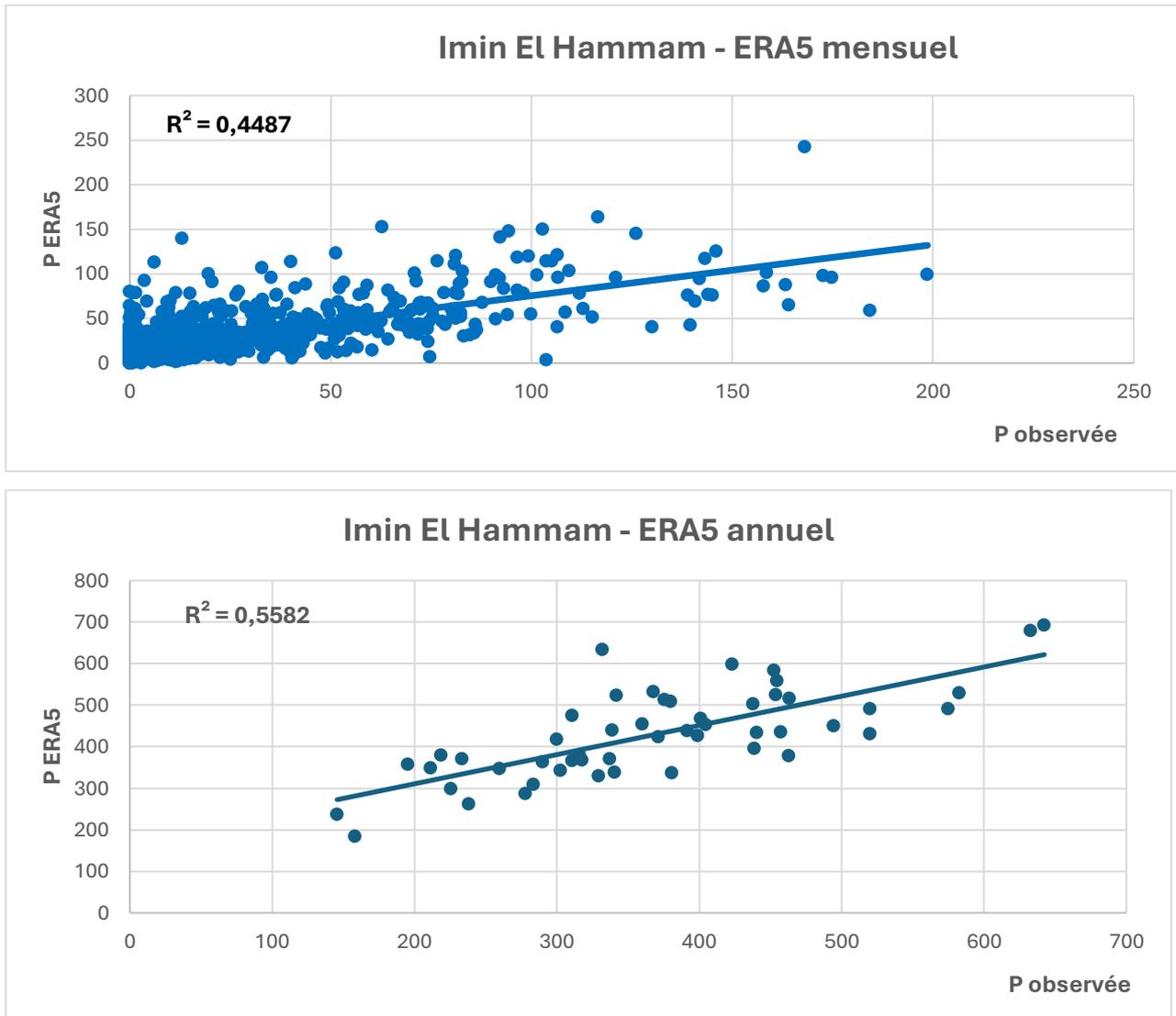


Figure 12: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station IMIN EL HAMMAM

Les variations des précipitations mensuelles (figure 14) révèlent une surestimation dominante pour les précipitations légères ($P < 20\text{mm/mois}$) et moyennes, avec une différence maximale de 80mm/mois . De plus, on observe une sous-estimation des pluies intenses ($P > 100\text{mm/mois}$) avec une différence maximale de 125mm/mois .

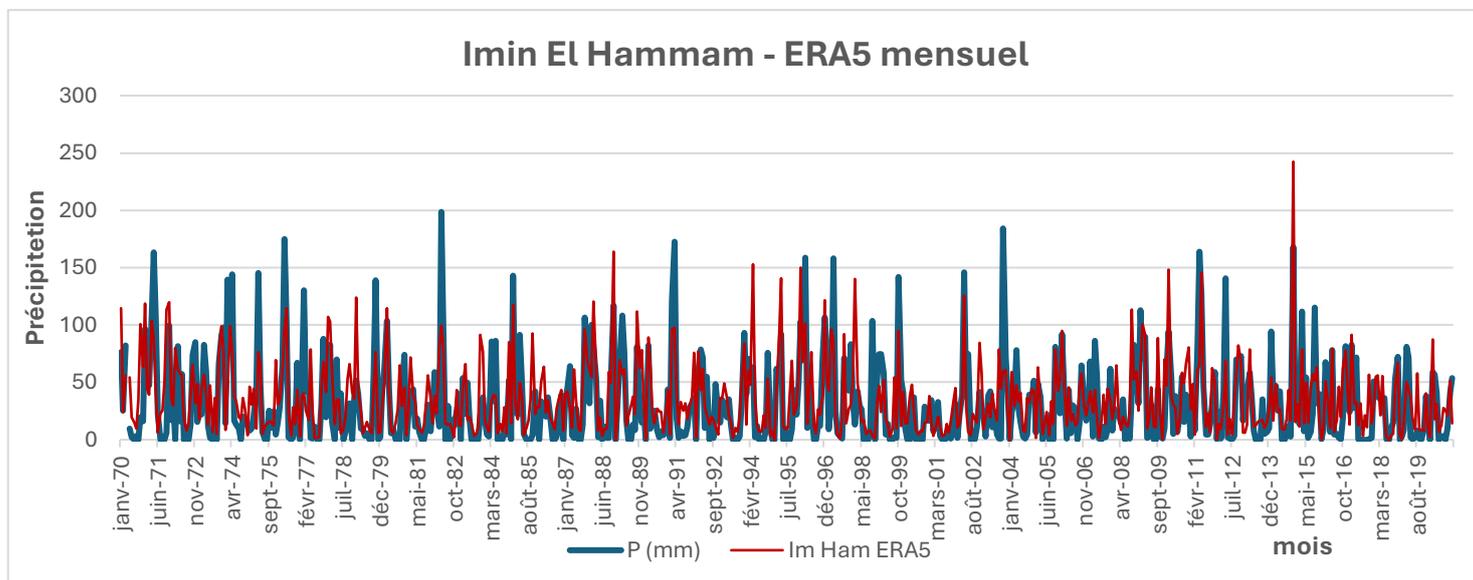


Figure 13: Variation des données observées de la station IMIN EL HAMMAM et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)

Au fil des années (figure 15), on observe une tendance générale à la surestimation des précipitations, atteignant un maximum de $300,9\text{mm/an}$ pendant l'année 1970/1971.

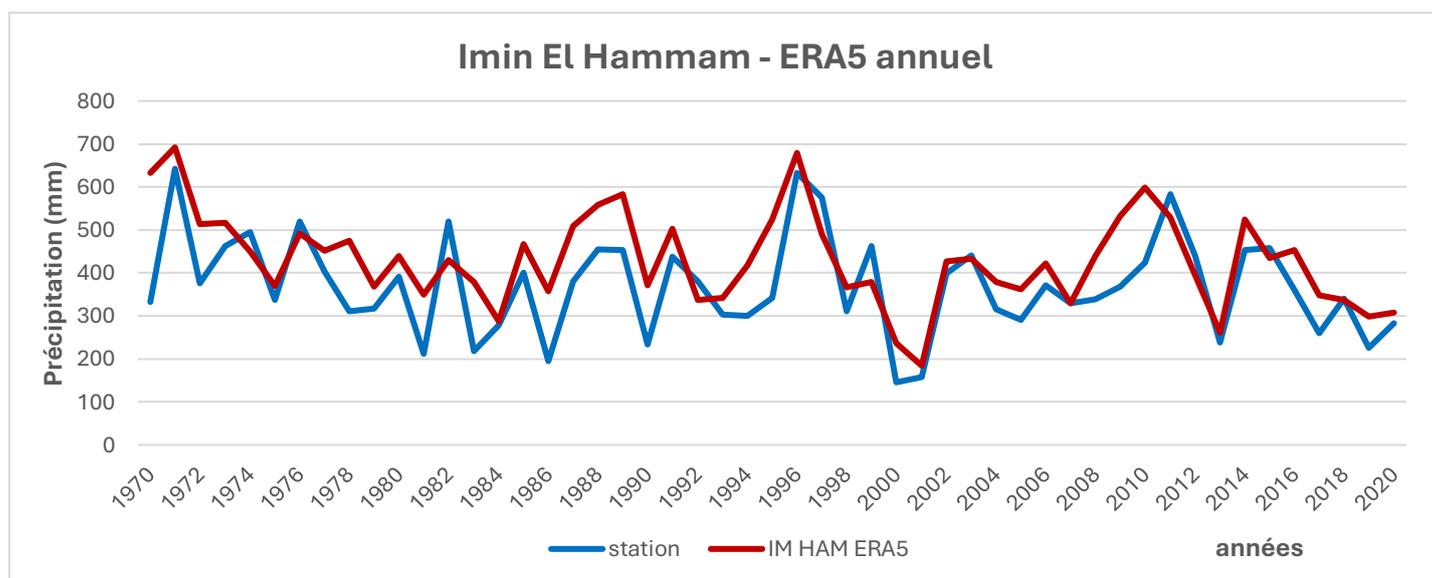


Figure 14: Variation des données observées de la station IMIN EL HAMMAM et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)

❖ Sidi Rahal (690 m)

Le coefficient de détermination (R^2) de 0,5071 indique que le modèle linéaire explique environ 50,71% de la variation des données chaque mois, ce qui suggère une corrélation modérée entre les variables. On note également que le coefficient de détermination pour la corrélation annuelle est de 0,58, légèrement plus élevé. En d'autres termes, lorsque les données sont regroupées par année plutôt que par mois, le modèle linéaire explique une plus grande proportion de la variance totale (58 %), ce qui suggère une corrélation plus forte sur une base annuelle.

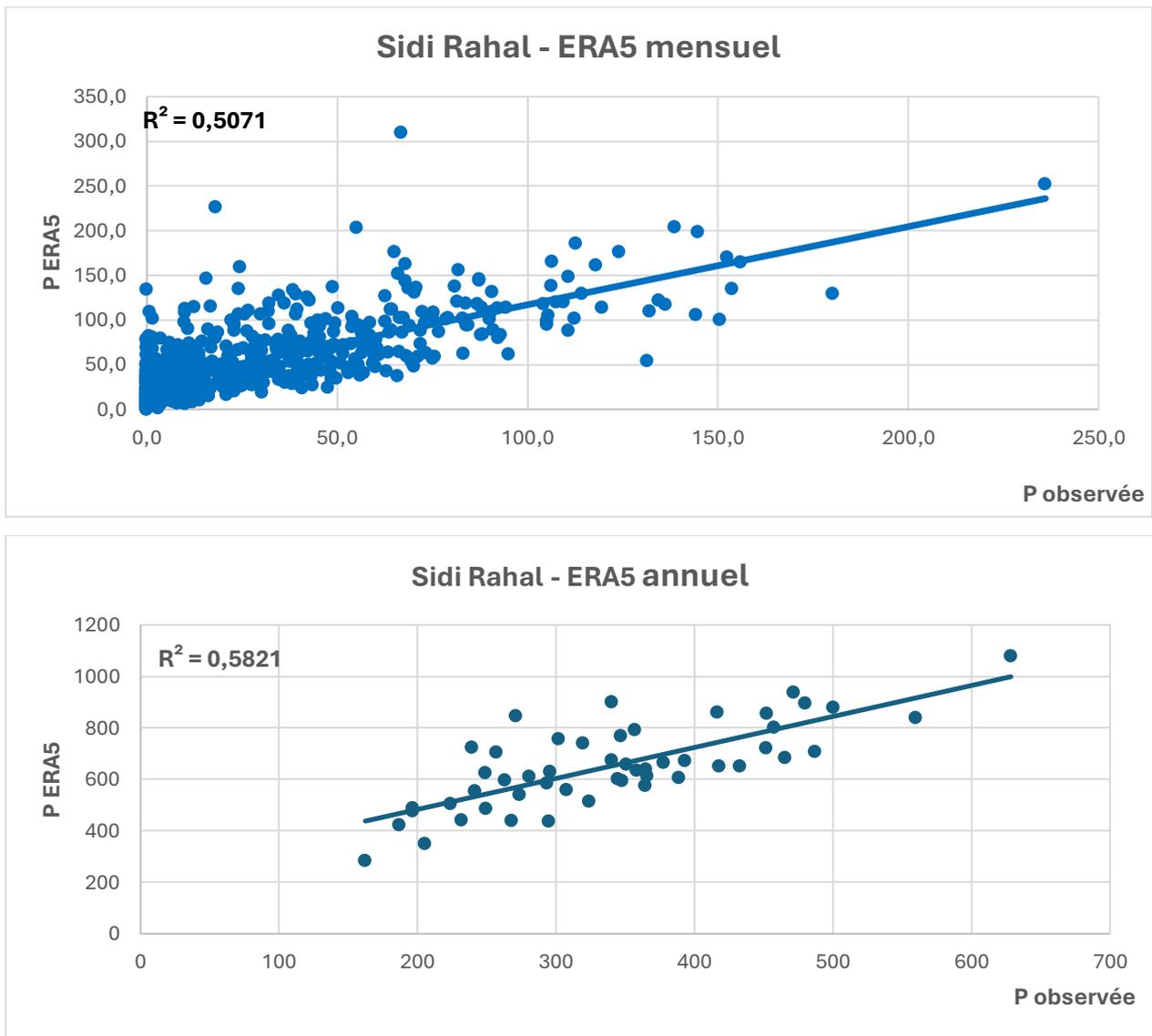


Figure 15: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station SIDI RAHAL

Sur une base mensuelle, Les tendances générales des deux séries de données montrent une bonne correspondance, avec des périodes de précipitations élevées et basses apparaissant simultanément. Cependant, ERA5 semble surestimer les faibles précipitations (inférieures à 20 mm/mois) et sous-estimer les fortes précipitations (supérieures à 100 mm/mois). Les différences entre les données ERA5 et les observations sont moins prononcées pour les précipitations moyennes (20 à 40 mm/mois). Les pics importants dans les précipitations observées, notamment en 1981, 1989, 2013 et 2016, sont souvent plus élevés que les réanalyses d'ERA5, avec un écart pouvant atteindre 242,6 mm/mois.

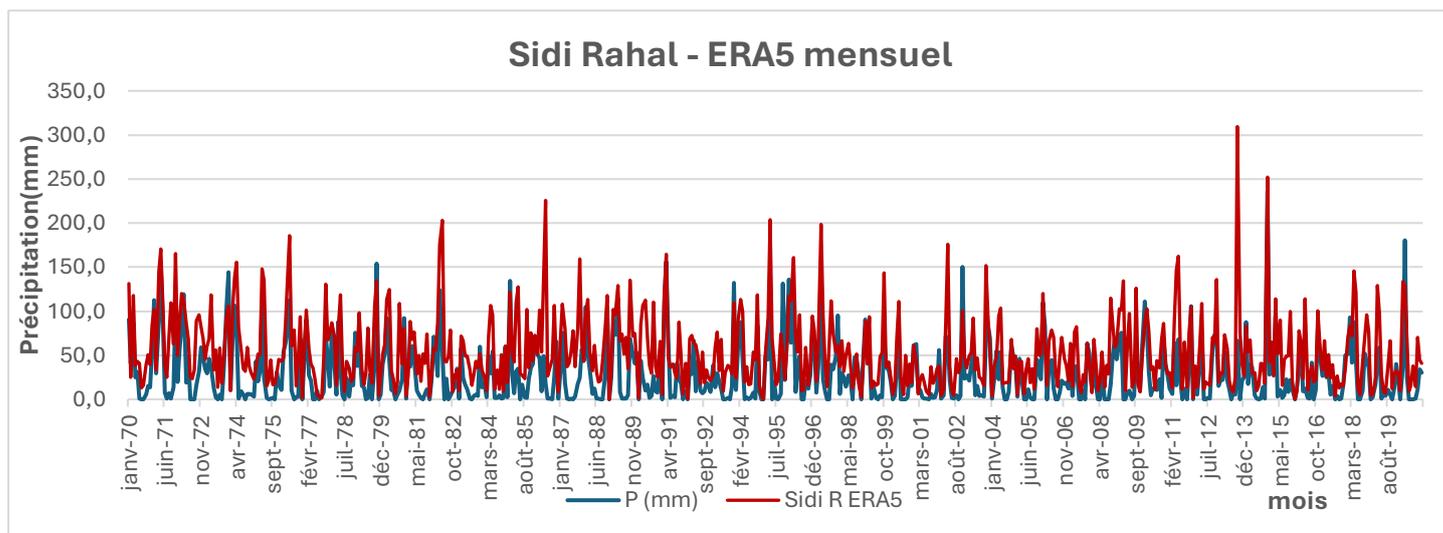


Figure 16: Variation des données observées de la station SIDI RAHAL et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)

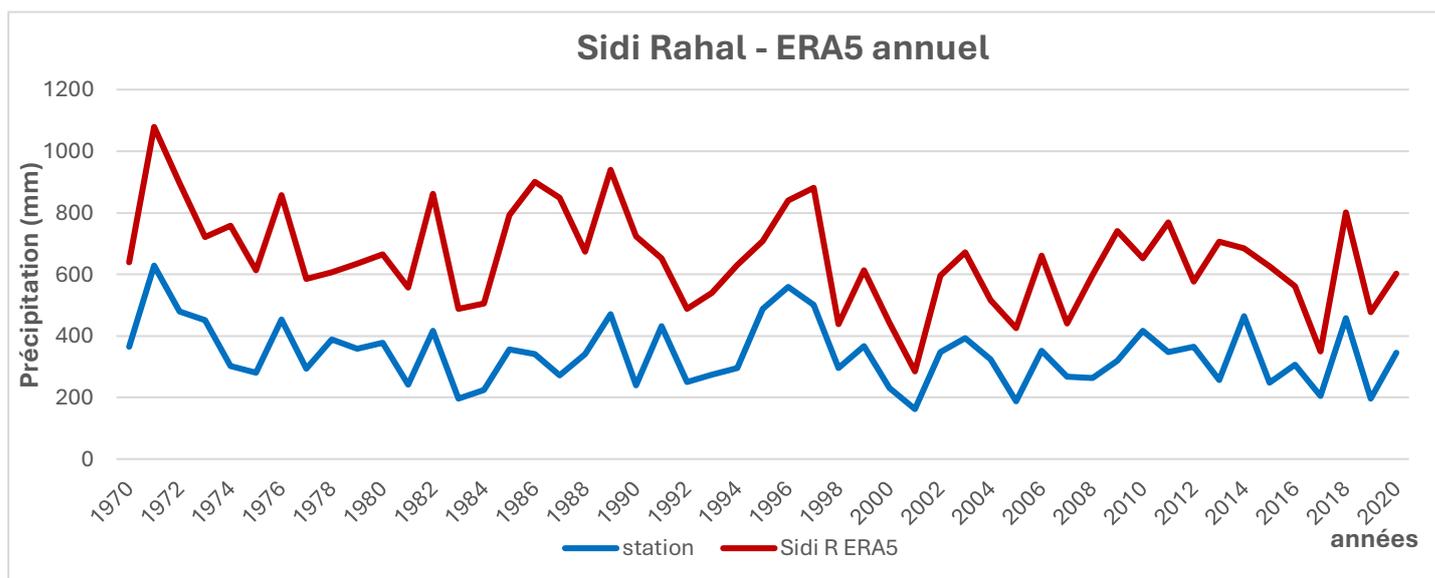


Figure 17: Variation des données observées de la station SIDI RAHAL et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)

On constate une corrélation générale entre les précipitations observées et celles estimées par ERA5, bien que des différences persistent : les faibles précipitations sont surestimées et les fortes sont sous-estimées. À l'échelle annuelle, ERA5 surestime les précipitations observées en moyenne de 312,16 mm/an.

❖ Lalla Takerkoust (614m)

Les données pluviométriques observées et celles du produit présentent une bonne corrélation pour les échelles mensuelle et annuelle, respectivement de 0,51 et 0,50. En ce qui concerne ERA5, il a tendance à surestimer les précipitations de manière générale, avec une différence moyenne de 19 mm par mois et de 226,45 mm par an.

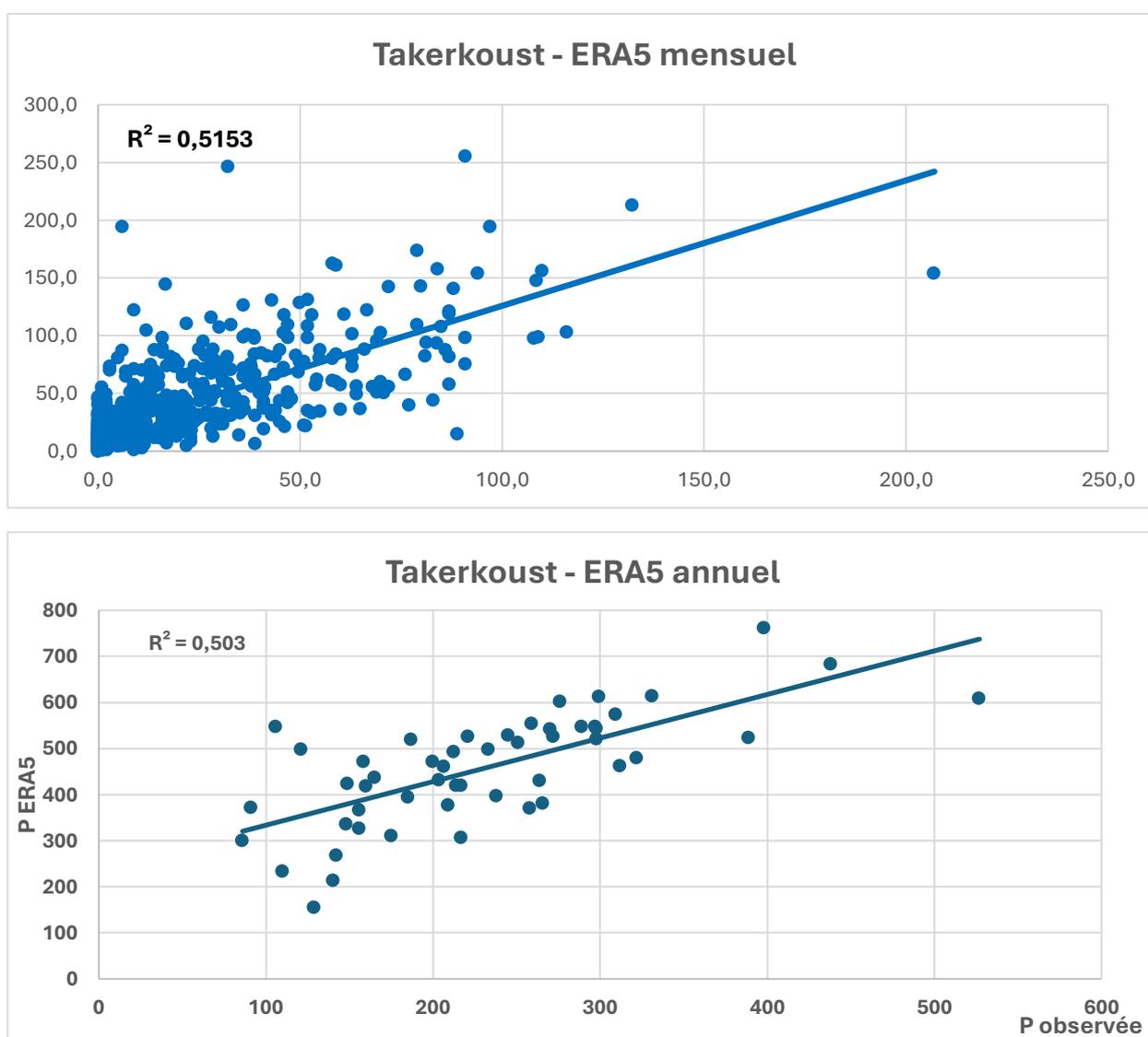


Figure 18: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station TAKERKOUST

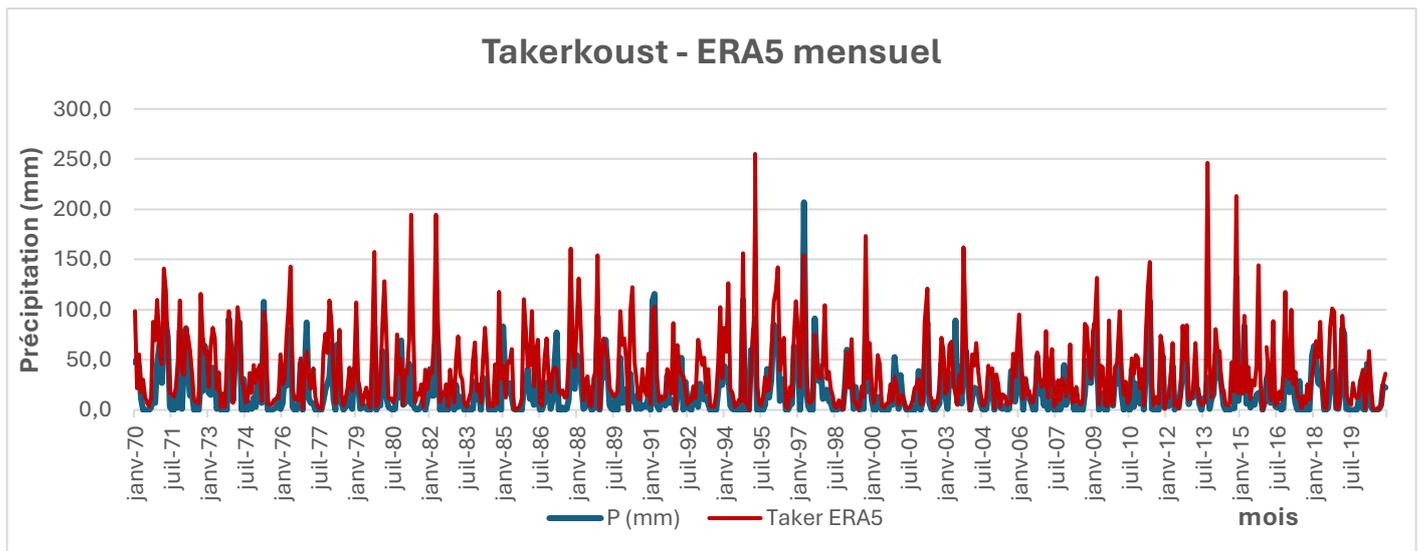


Figure 19: Variation des données observées de la station TAKERKOUST et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)

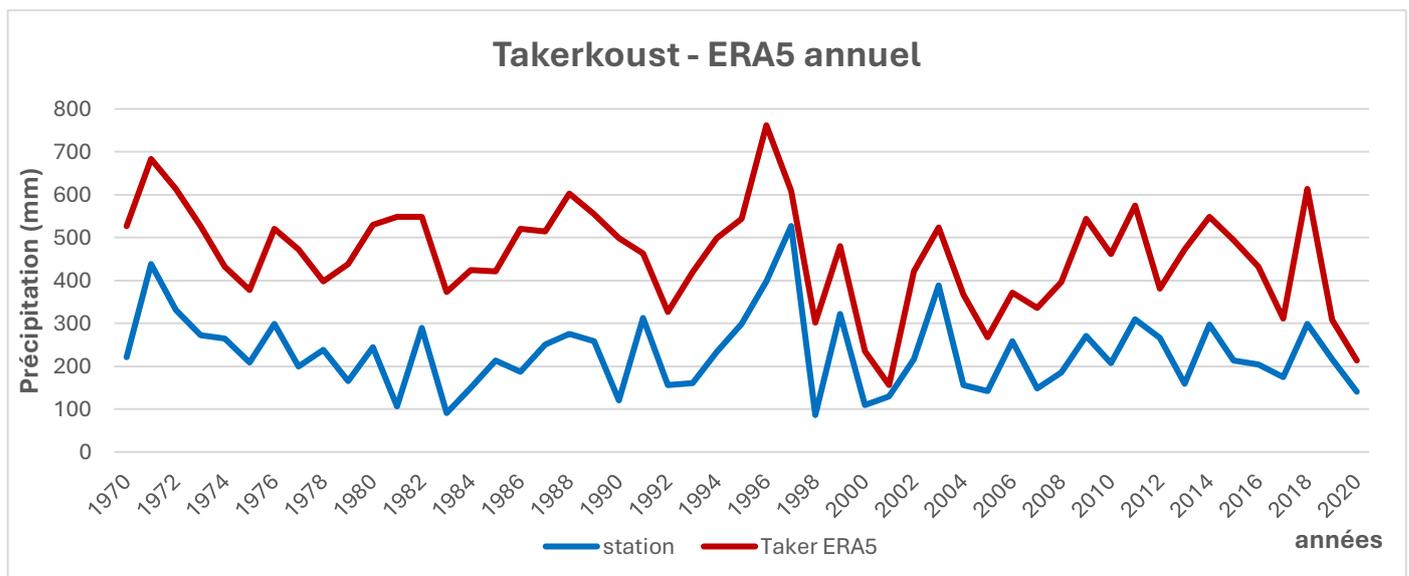


Figure 20: Variation des données observées de la station TAKERKOUST et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)

On peut donc conclure que, en moyenne montagne, il y a une corrélation modérée entre les précipitations observées et celles réanalysées par le produit ERA5, avec un coefficient de détermination minimal de 0,45 et un maximum de 0,58. De plus, cette corrélation est plus forte à l'échelle mensuelle, ce qui suggère que les tendances sont plus cohérentes et mieux expliquées sur une période de temps moins longue. Cependant, il convient de noter que le produit a tendance à sous-

estimer les précipitations dans notre station la plus élevée, AGHBALOU (1070m), et à surestimer les précipitations pour les autres stations, en particulier Lalla Takerkoust et Sidi Rahal.

b. ERA5 en plaine:

❖ **Marrakech (460 m)**

La corrélation entre les deux ensembles de données dans Marrakech est plus forte, notamment à l'échelle mensuelle, où 63% de la variation des précipitations observées s'explique par le produit.

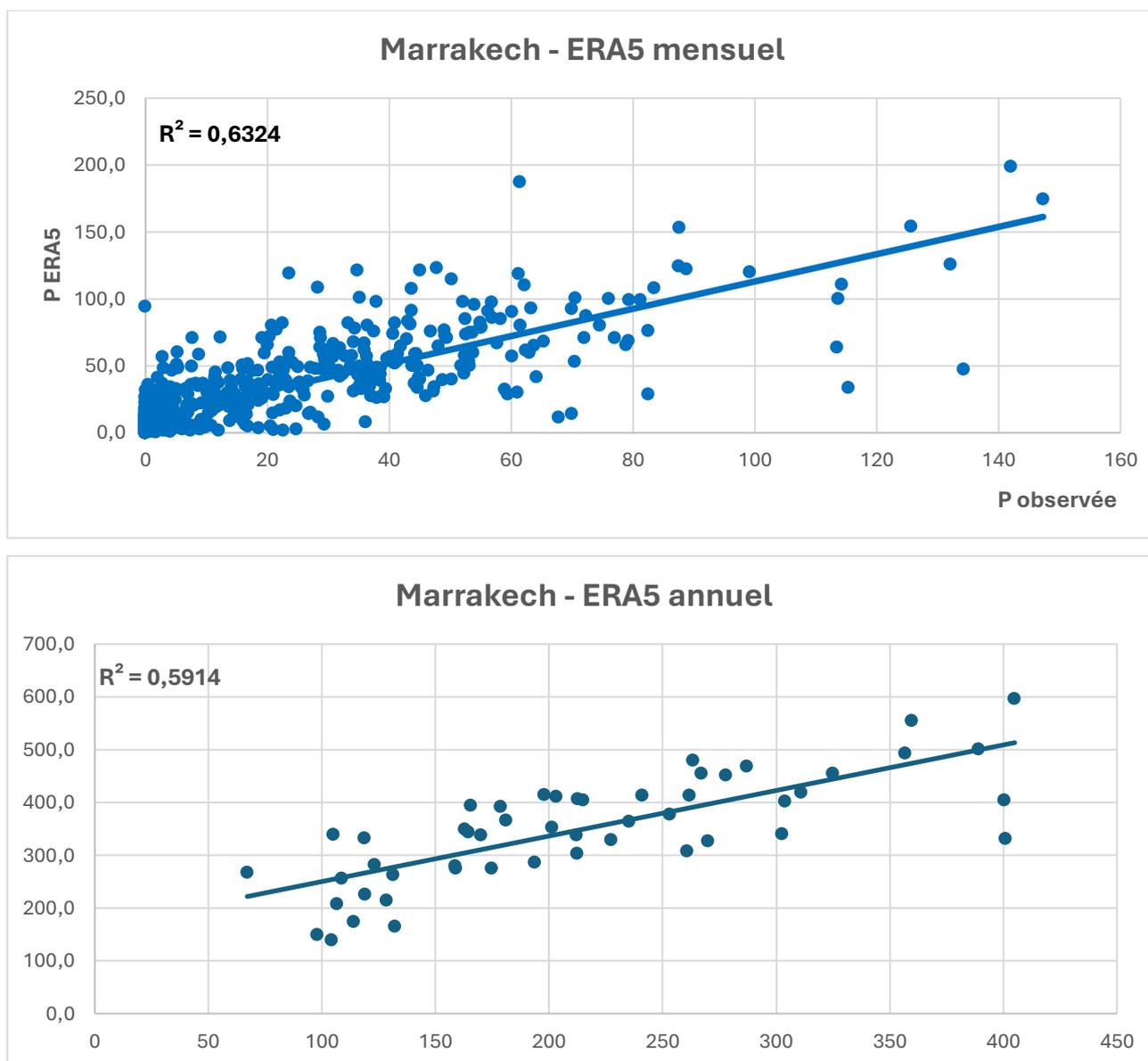


Figure 21: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station MARRAKECH

Les résultats mensuels dans cette station présentent que le produit a une tendance moyenne à surestimer les événements pluviaux avec un erreur maximale de 174.5 mm/mois.

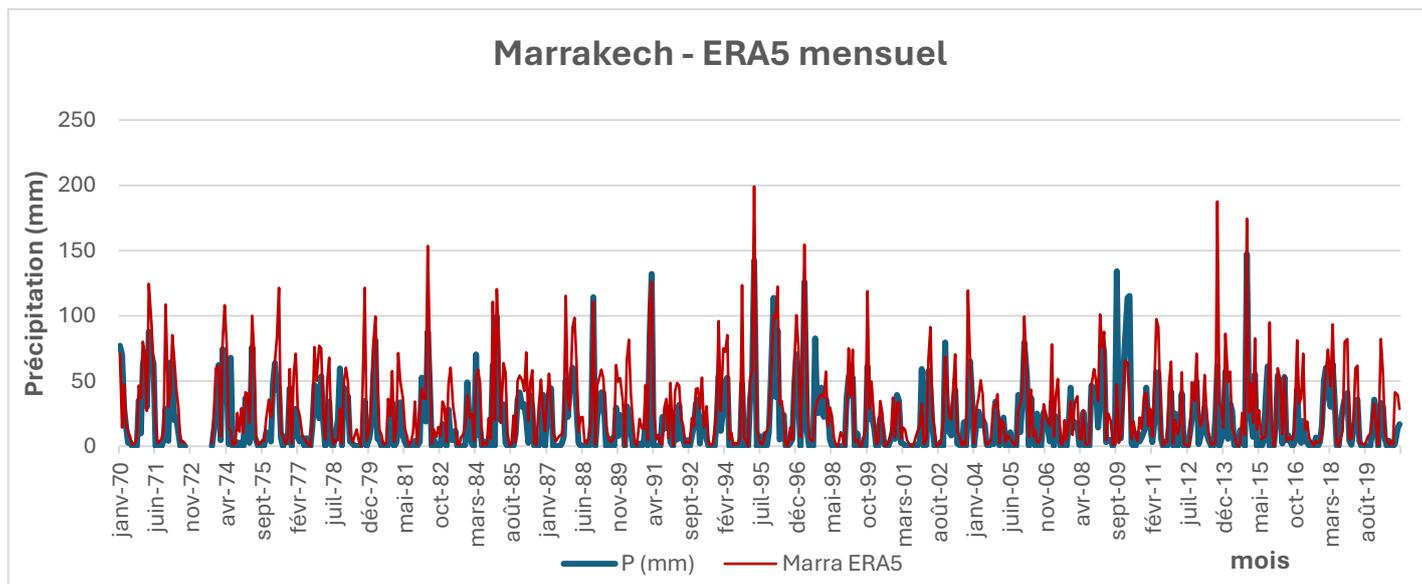


Figure 22: Variation des données observées de la station MARRAKECH et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)

Sur une base annuelle, ERA5 a tendance à surestimer les précipitations de manière générale, atteignant un maximum de 235,03 mm par an en 1989/1990. Cependant, il y a une exception pour la période 2009/2010 où l'on observe une sous-estimation.

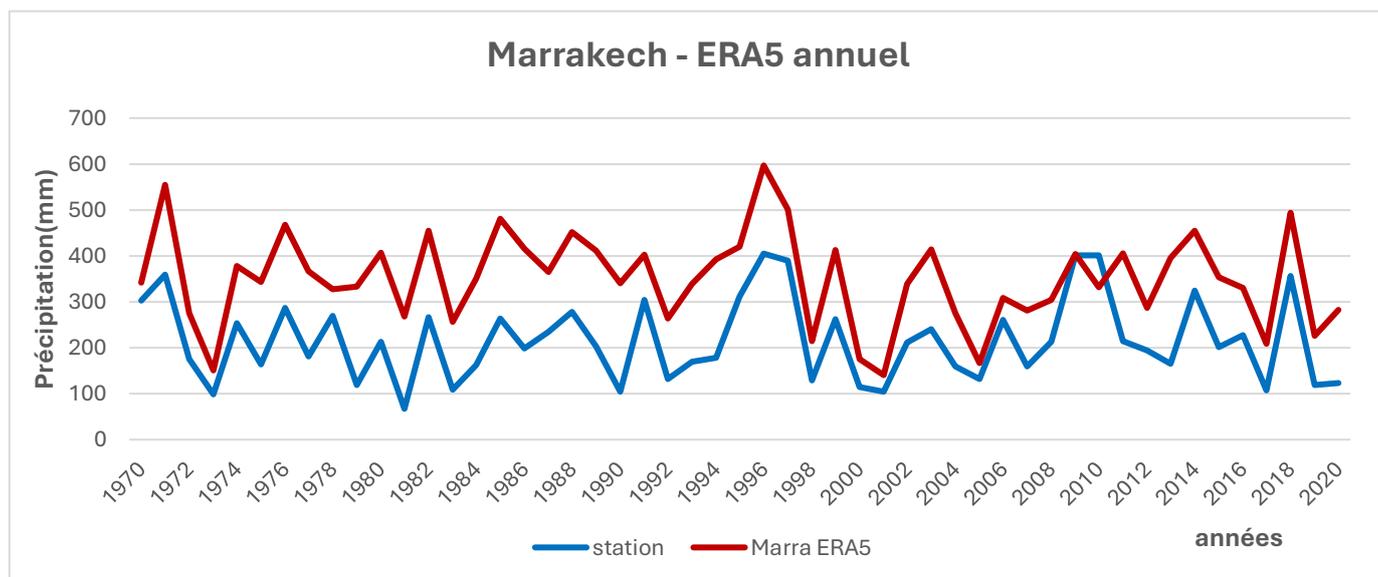


Figure 23: Variation des données observées de la station MARRAKECH et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)

❖ Chichaoua (340 m)

Les observations mensuelles des précipitations et les données réanalysées par ERA5 à la station de Chichaoua montrent une forte corrélation positive, représentant 75,33 % de la variation des précipitations étudiées. Ces résultats suggèrent que les données ERA5 s'alignent généralement sur les observations locales, même s'il y a parfois des disparités, en particulier pour les précipitations intenses. Cependant, les graphiques annuels montrent une corrélation moins significative, ne représentant que 45,77 % de la variance expliquée par les observations annuelles, ce qui suggère une précision moindre dans les cumuls annuels ERA5.

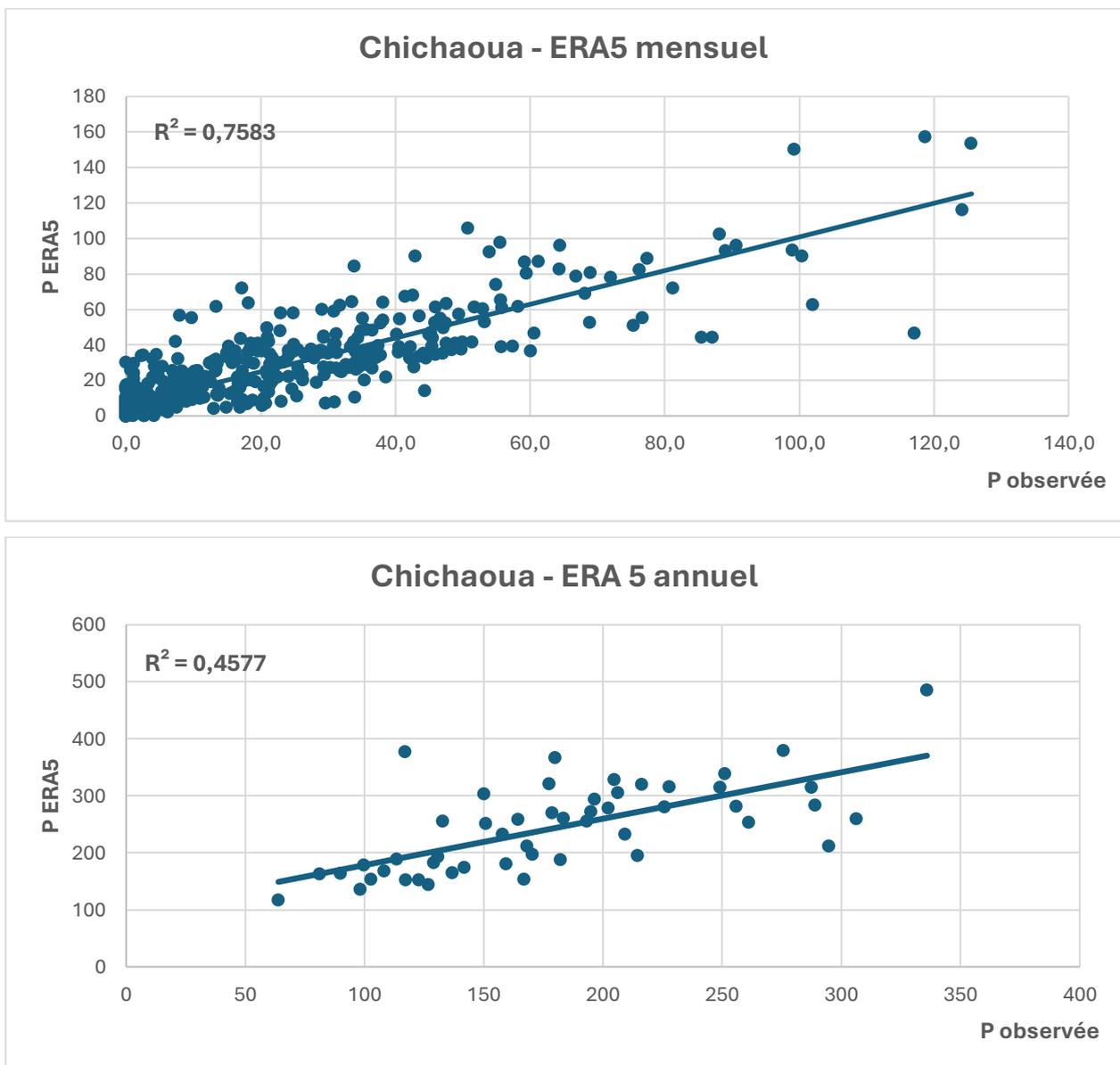


Figure 24: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station CHICHAOUA

Les deux courbes montrent des tendances similaires, ce qui suggère que les réanalyses ERA5 reproduisent efficacement les variations mensuelles des précipitations observées. La correspondance est satisfaisante pour les fortes précipitations, bien qu'il y ait quelques différences remarquables dans les années 70 et lors de certains événements des années 80 et 90. Les précipitations faibles à modérées sont également bien corrélées, bien que des divergences occasionnelles attribuables à des variations locales subsistent. Il y a des cas de surestimations et de sous-estimations, mais elles ne semblent pas être systématiques.

Annuellement (figure 26), les évènements pluviaux sont surestimés par le produit d'un écart faible de 63.46mm/an en moyenne.

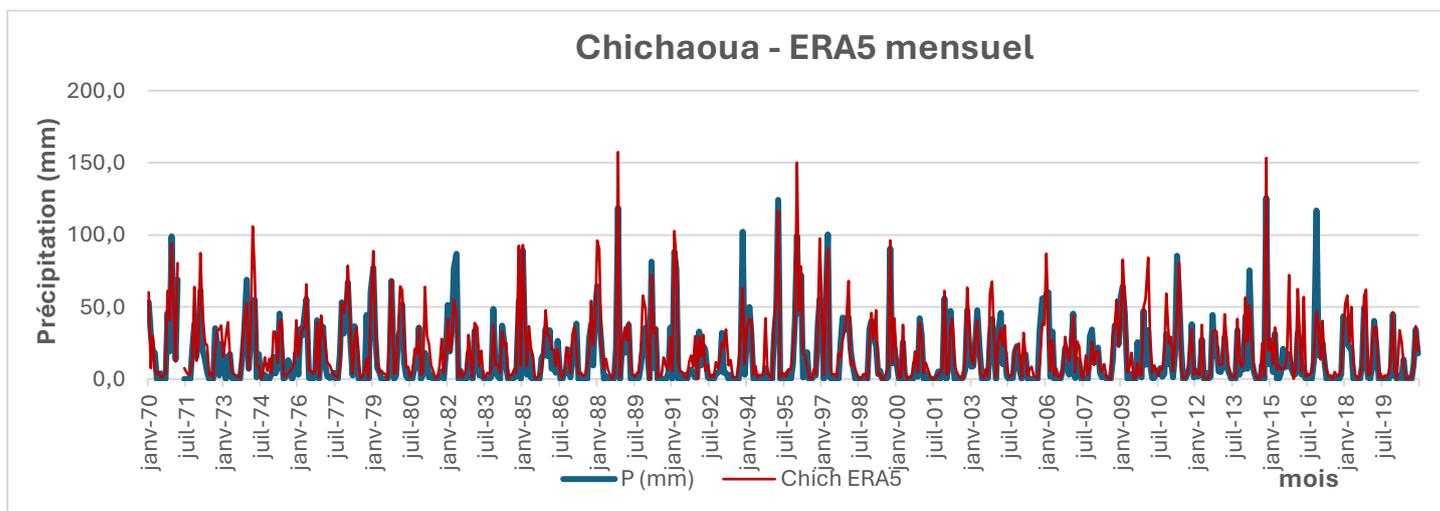


Figure 26: Variation des données observées de la station CHICHAOUA et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)

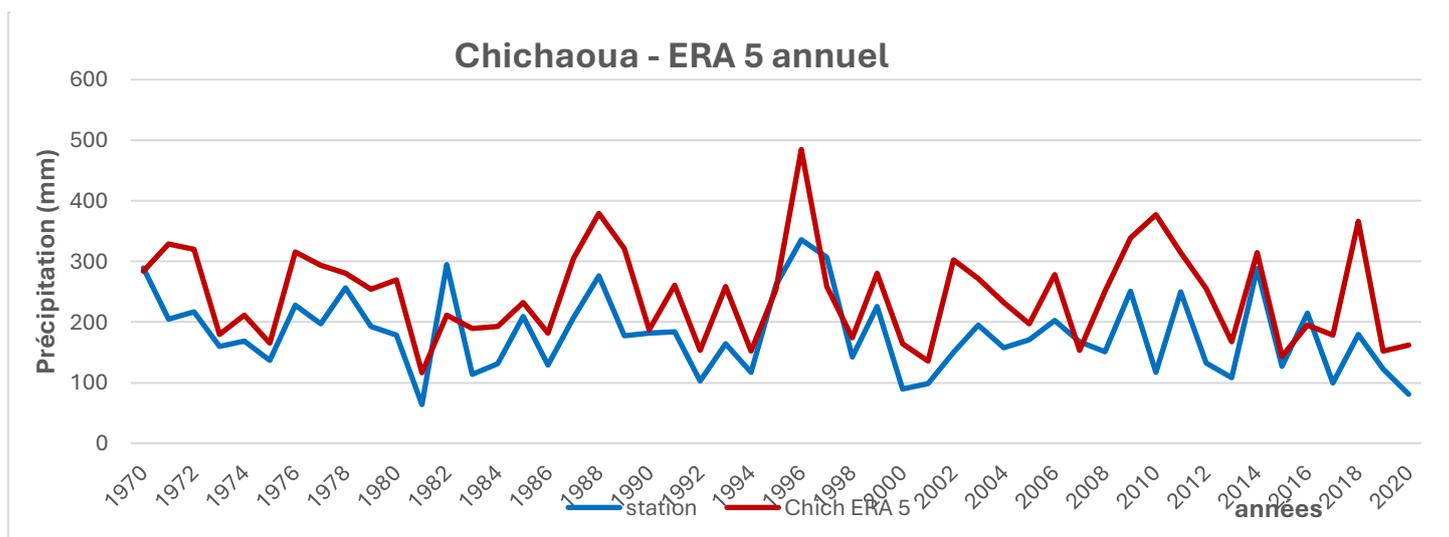


Figure 25: Variation des données observées de la station CHICHAOUA et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2002)

❖ **Abadla (263 m)**

La validation du produit ERA5 à la station montre une forte corrélation entre les deux séries de données pluviales, avec un coefficient de détermination R^2 atteignant 0.85 à l'échelle mensuelle et 0.57 à l'échelle annuelle. De plus, il y a une tendance de surestimation, pouvant atteindre un maximum de 44.7 mm/mois et de 175.8 mm/an. (Figure28,29,30)

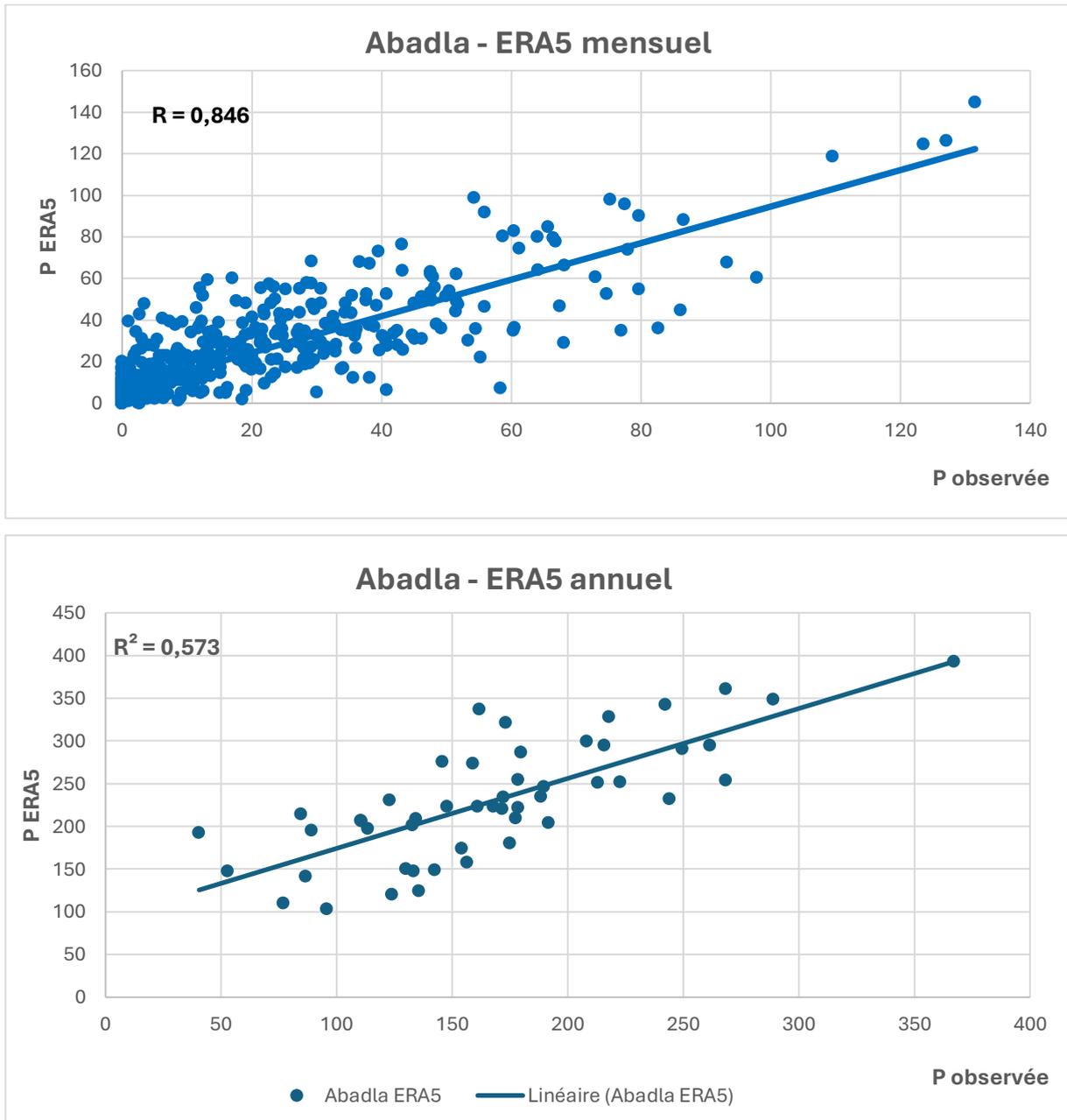


Figure 27: Corrélation mensuelle et annuelle entre la pluie observée et celle réanalysée par ERA5 pour la station ABADLA

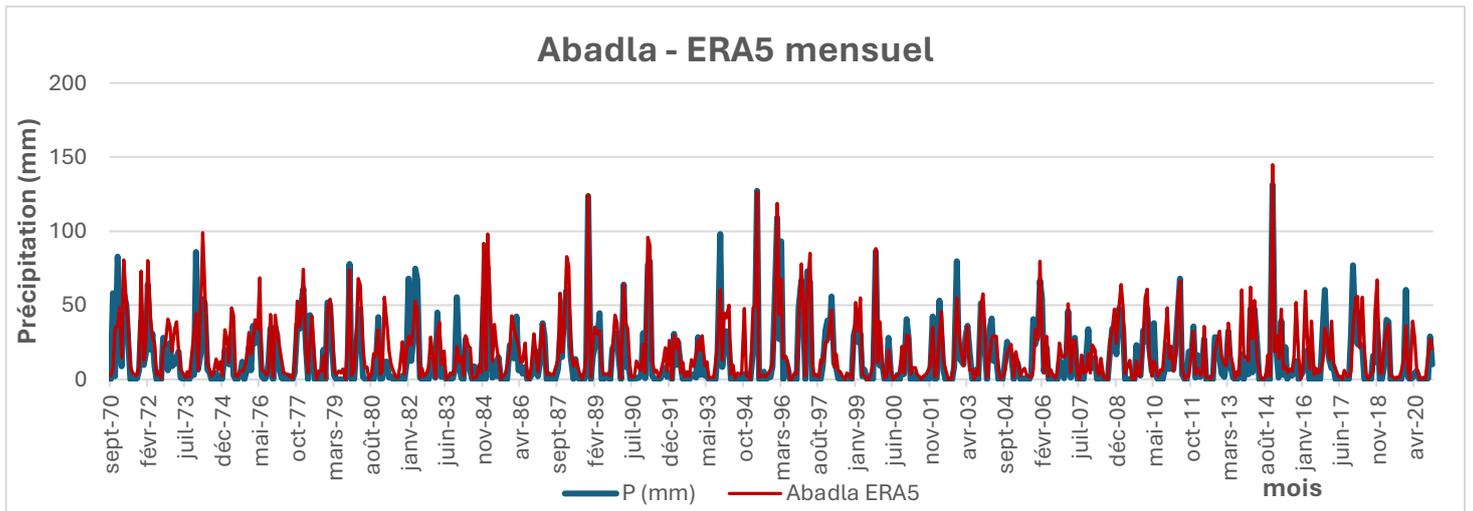


Figure 29: Variation des données observées de la station ABADLA et des données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1970-2020)

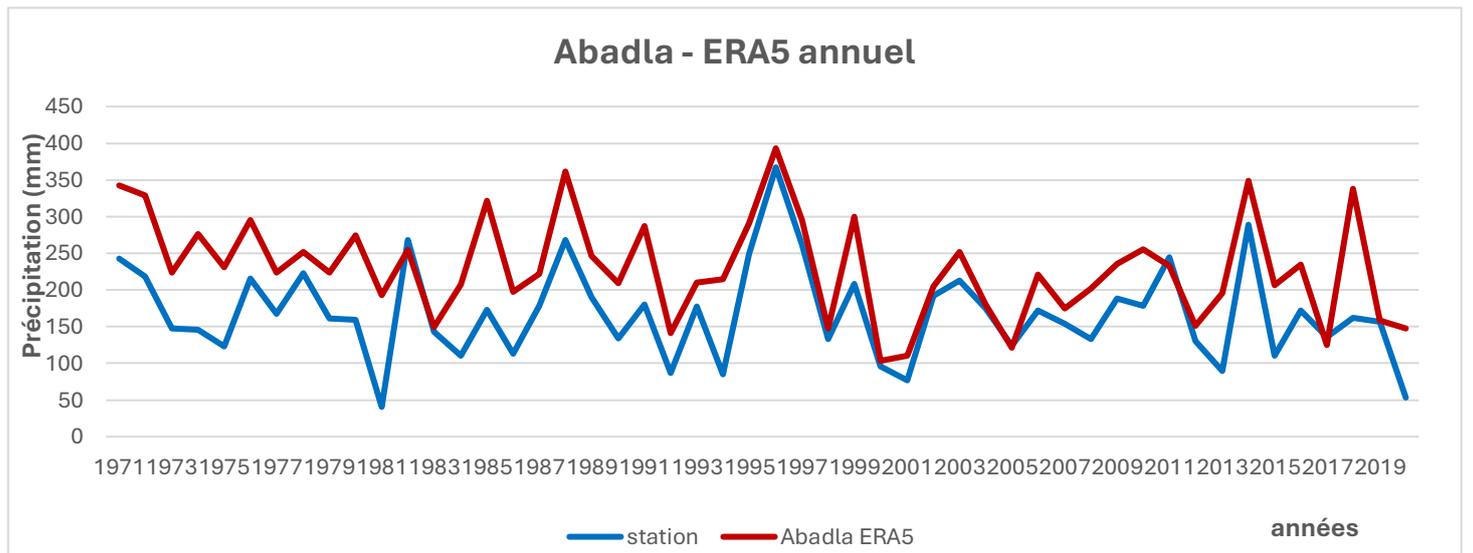


Figure 28: Variation des données observées de la station ABADLA et des données de ERA5 à l'échelle annuelle (1970-2020)

On constate que la corrélation entre les données observées et celles obtenues à partir de la réanalyse ERA5 s'améliore davantage en plaine et devient plus forte sur une base mensuelle. Cela suggère que les tendances observées sont plus cohérentes et mieux expliquées à une échelle temporelle moins large, et que le produit a tendance à surestimer la plupart des événements pluvieux dans cette région. En moyenne montagne, on observe une tendance inverse : le produit sous-estime tous les événements pluvieux, à l'exception des précipitations de faible intensité qui sont surestimées. En basse montagne, ERA5 montre une surestimation des précipitations de moyenne et faible intensité, ainsi qu'une sous-estimation des précipitations de forte intensité.

2. Résultats du traitement avec le produit TerraClimate

Les données du produit TerraClimate sont comparées aux données observées pour la période de 1970 à 2020, à deux échelles de temps : mensuelle et annuelle dans le bassin de Tensift (huit stations : Aghbalou, Abadla, Imin El hammam, Tahnaout, Takerkoust, Sidi Rahal, Marrakech et Chichaoua), en utilisant des statistiques métriques (CC, ME, MAE, Biais et RMSE). Cela permet d'évaluer le produit et d'avoir une idée du degré de corrélation entre les deux en interprétant les résultats obtenus.

❖ Le coefficient de corrélation CC :

À l'échelle annuelle, les données observées sont bien corrélées avec les données estimées par TerraClimate, avec un coefficient de corrélation *CC* qui atteint 0,75 pour les stations de Marrakech et Abadla. De plus, les valeurs des coefficients de corrélation sont proches les unes des autres : 0,71 pour la station d'Imin El hammam, 0,70 pour la station de Sidi Rahal, et 0,69 pour les stations d'Aghbalou, Takerkoust et Tahnaout. Enfin, la station de Chichaoua atteint un coefficient de 0,68.

À l'échelle mensuelle, les données observées sont bien estimées par le produit, d'où une valeur maximale du coefficient de corrélation *CC* de 0,81 pour les stations d'Abadla, Chichaoua et Marrakech. Les autres valeurs, comprises entre 0,80 et 0,70, sont les suivantes : 0,77 pour la station de Takerkoust, 0,76 pour la station d'Imin El hammam, 0,75 pour la station de Sidi Rahal, et 0,73 pour les stations d'Aghbalou et Tahnaout.

❖ Les erreurs ME et MAE et RMSE :

Les erreurs annuelles sont importantes, avec un RMSE allant de 11,02 mm à Marrakech jusqu'à 21,02 mm à Imin El hammam, un MAE allant de 64,20 mm à Marrakech jusqu'à 125,48 mm à Imin El hammam, et un ME allant de -12,02 mm à Aghbalou à 109,14 mm à Imin El hammam. En revanche, les erreurs annuelles sont faibles, avec un RMSE compris entre 0,63 mm et 1,43 mm, un MAE compris entre 9,53 mm et 23,02 mm, et un ME compris entre -1 mm et 9,09 mm

❖ Le BIAIS :

Les valeurs du Biais relatif varient entre -2,33% et 34,02%. Le produit surestime les précipitations observées pour 7 stations, tandis qu'il sous-estime celles de la seule station restante, Aghbalou.

Tableau 9: Résultats de traitement des données avec le produit TerraClimate

Station	Altitude (m)	Emplacement	Echelle	CC	ME (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)	BIAIS (%)
Aghbalou	1070	Montagne	Mensuelle	0,73	-1,00	23,01	35,41	-2,28
			Annuelle	0,69	-12,02	92,01	122,84	
Tahnaout	1064	Montagne	Mensuelle	0,73	7,28	19,61	30,55	23,73
			Annuelle	0,69	87,41	110,03	133,12	
Emin EL hammam	772	Montagne	Mensuelle	0,76	9,09	19,21	30,65	29,44
			Annuelle	0,71	109,14	125,48	150,10	
Sidi Rahal	690	Montagne	Mensuelle	0,75	2,24	15,27	24,19	7,89
			Annuelle	0,70	26,89	70,34	84,61	
Lalla Takerkoust	614	Montagne	Mensuelle	0,77	7,86	13,43	21,03	40,74
			Annuelle	0,69	94,29	104,82	120,01	
Marrakech	460	Plaine	Mensuelle	0,81	4,22	10,23	16,38	22,95
			Annuelle	0,75	49,58	64,20	78,73	
Chichaoua	340	Plaine	Mensuelle	0,81	5,29	9,53	15,62	35,16
			Annuelle	0,68	63,47	70,48	85,72	
Abadla	263	Plaine	Mensuelle	0,81	7,30	10,02	16,24	52,25
			Annuelle	0,75	87,95	90,05	102,52	

a. TerraClimate en moyen montagne

❖ **Aghbalou (1070m)**

À l'échelle mensuelle et annuelle, la figure 31 montrent une bonne estimation des données observées par TerraClimate, avec des coefficients de corrélation CC de 0,73 et 0,69 respectivement.

Ces résultats indiquent la précision de TerraClimate pour les données climatiques de la station d'Aghbalou sur ces deux périodes.

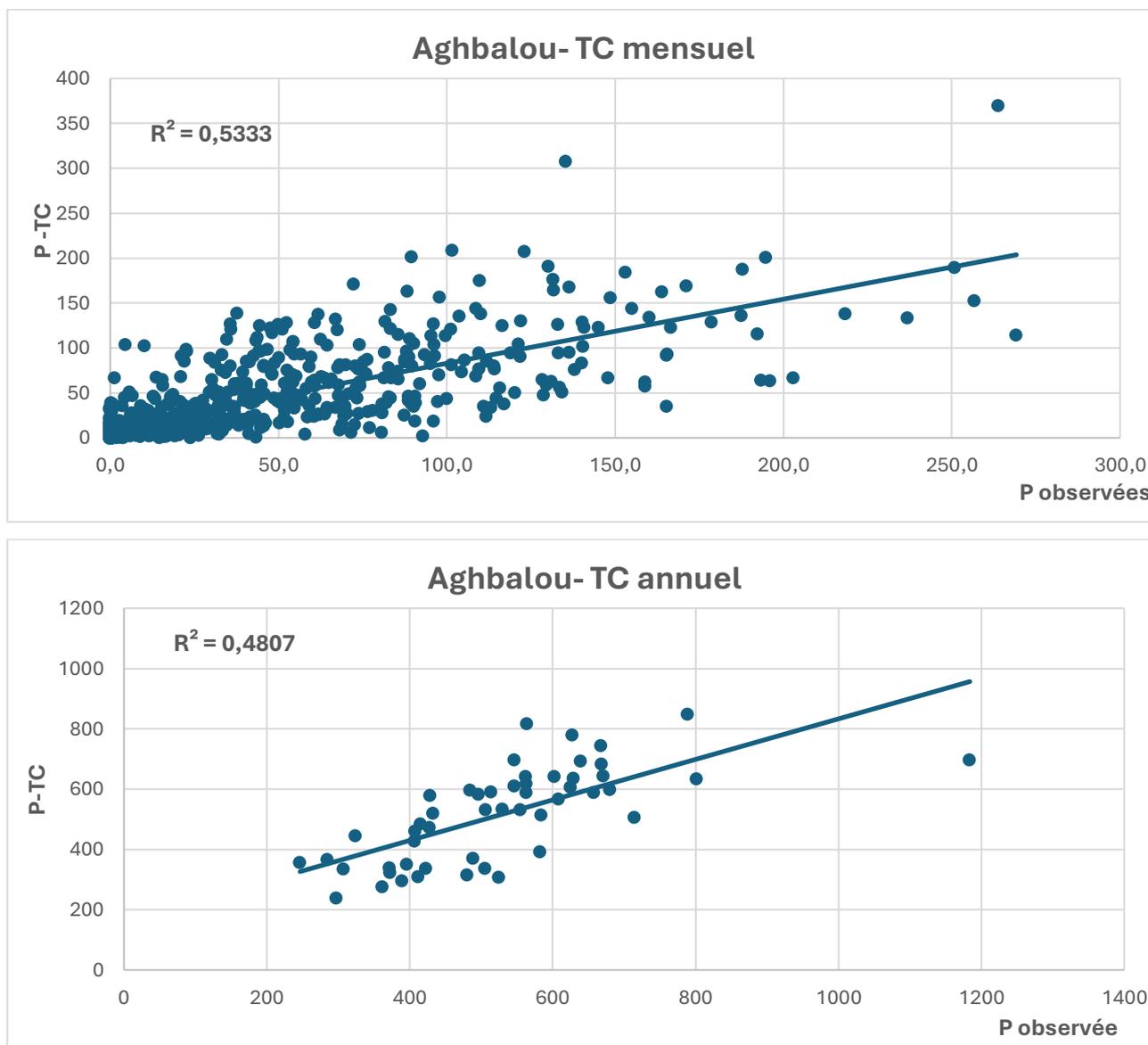


Figure 30: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station AGHBALOU

La performance du produit TerraClimate en montagne (Cas de la station Aghbalou) à l'échelle mensuelle entre 1970-2020 est représentée dans la figure par une sous-estimation moyenne.

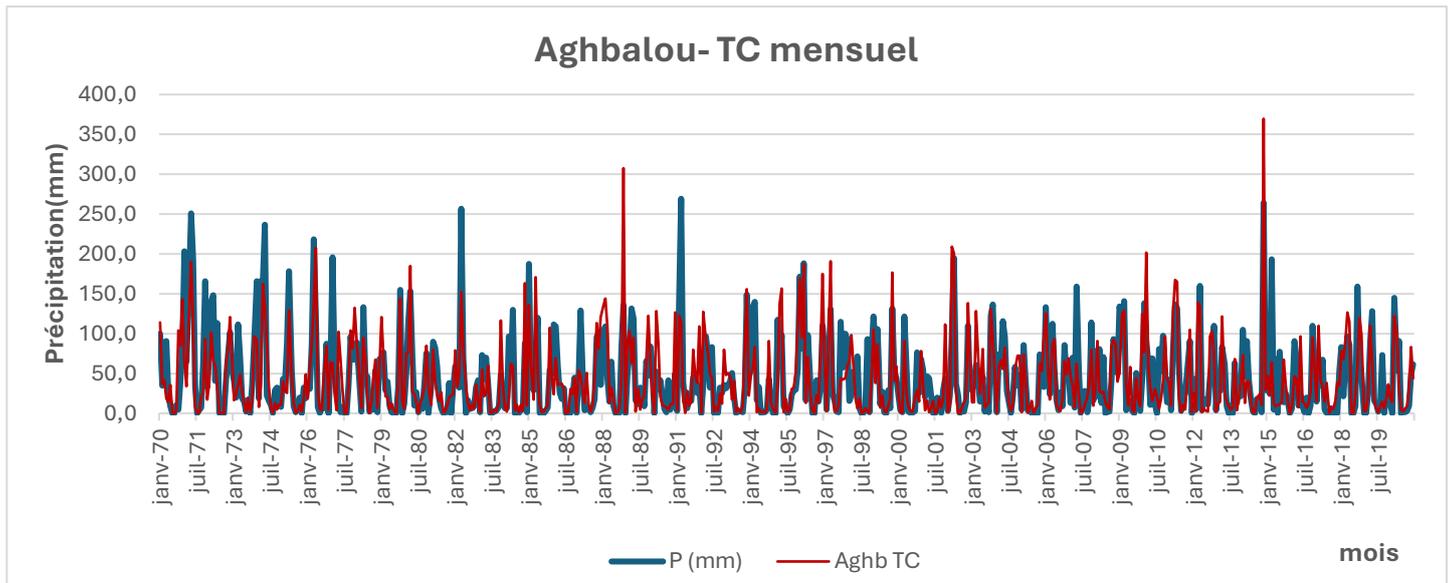


Figure 31: Variation des données observées de la station AGHBALOU et celles de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)

La performance du produit TerraClimate en montagne (Cas de la station Aghbalou) à l'échelle annuelle entre 1970-2020 est représentée dans la figure par sous-estimation dans les années suivantes 1971, 1972, 1973, 1974, 1975 ... mais généralement on observe une petite surestimation dans les années 1986\1990

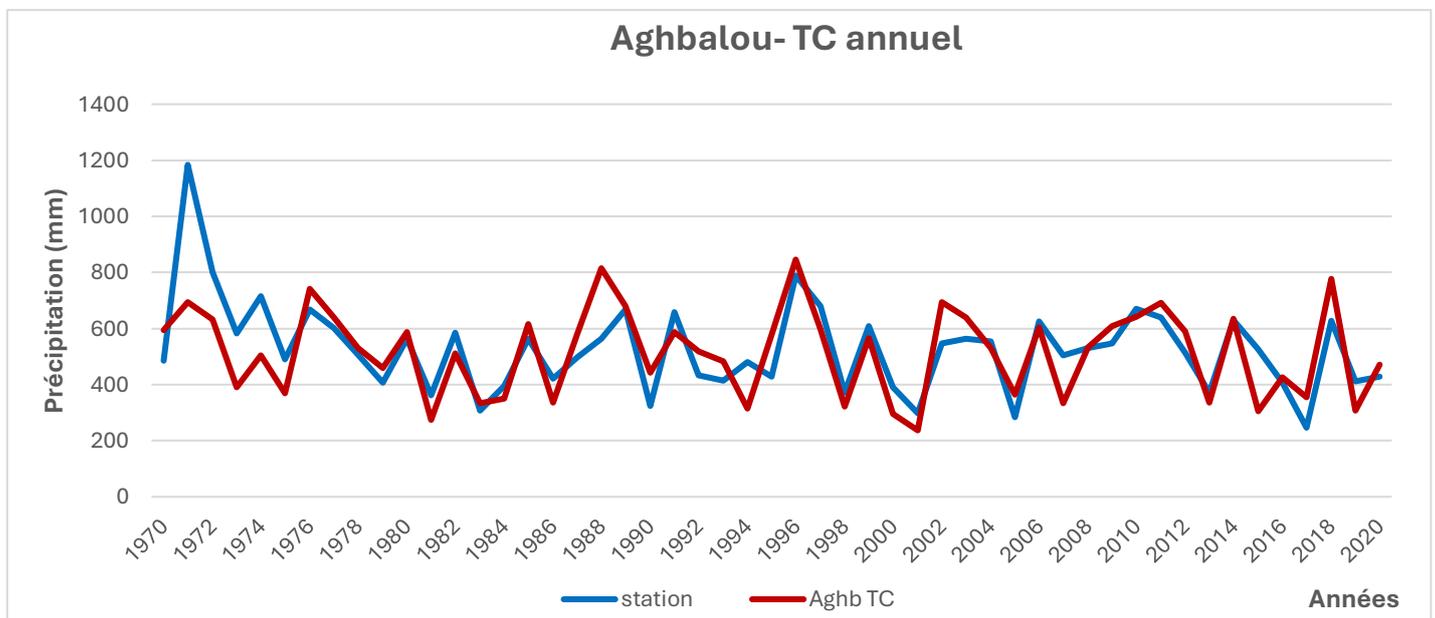


Figure 32: Variation des données de la station AGHBALOU et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)

❖ Tahnaout (1064m)

Le graphique ci-dessous illustre la relation entre les précipitations observées et celles estimées par le modèle TerraClimate à la station Tahnaout, à la fois mensuellement et annuellement avec un même coefficient de corrélation significatif atteignant 0,72.

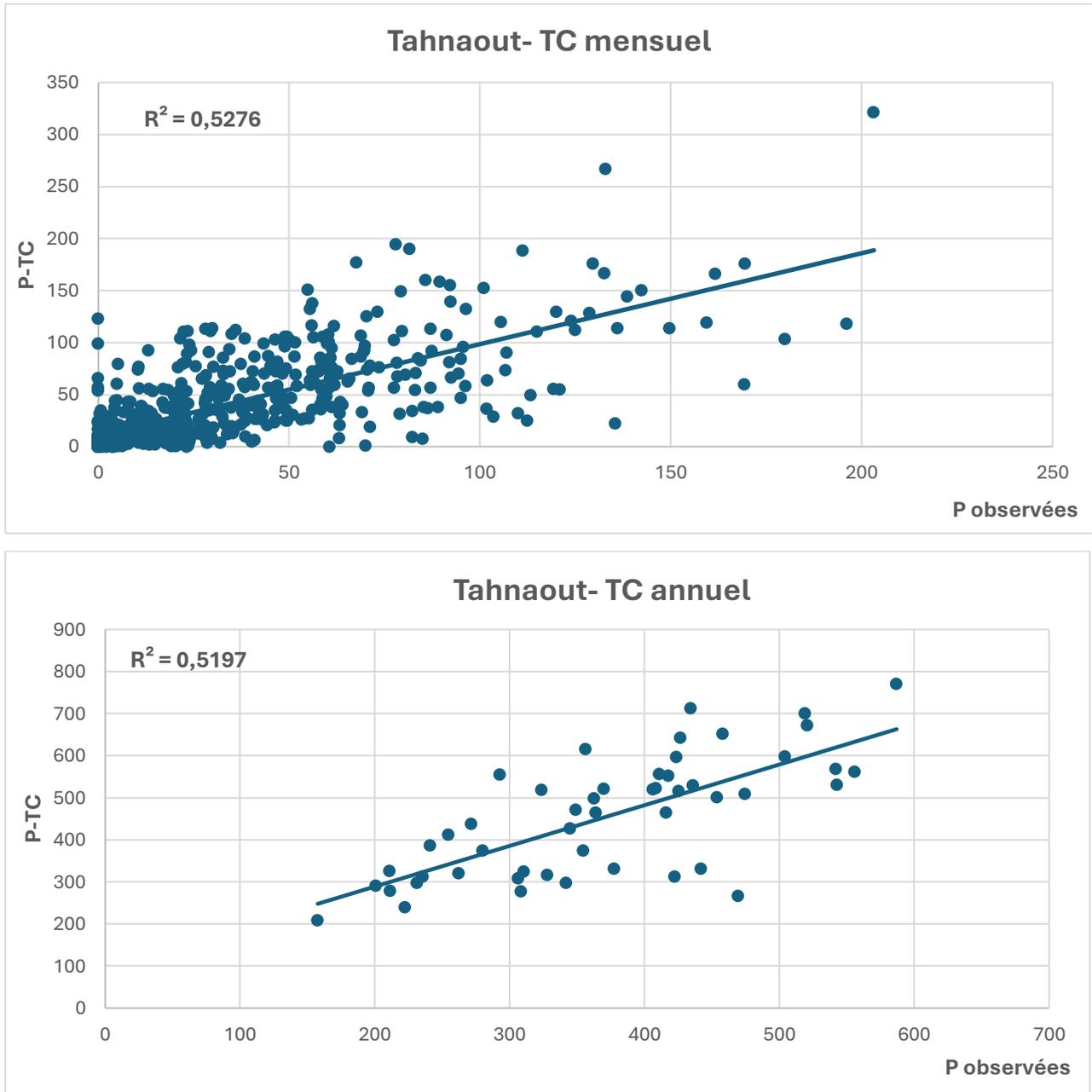


Figure 33: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station TAHNAOUT

L'analyse des précipitations mensuel (figure35) révèle une sous-estimation des événements de pluie de hauteurs supérieure à 100 mm, tandis que les précipitations de hauteur supérieure à 10 mm sont surestimées.

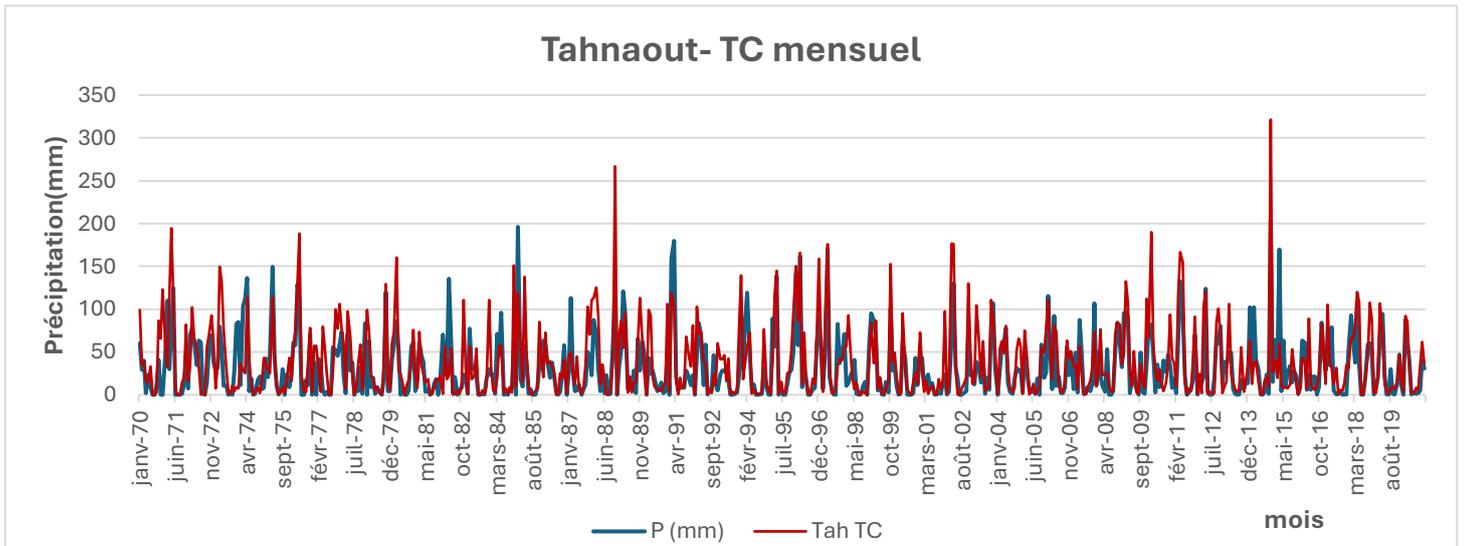


Figure 34: Variation des données de la station TAHNAOUT et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)

Annuellement (figure 36), le produit démontre une surestimation des tous les évènements pluviaux d'une différence d'environ 50-300mm. Mais les précipitations durant l'année 1974/1976 et 2015 sont marquées par une sous-estimation.

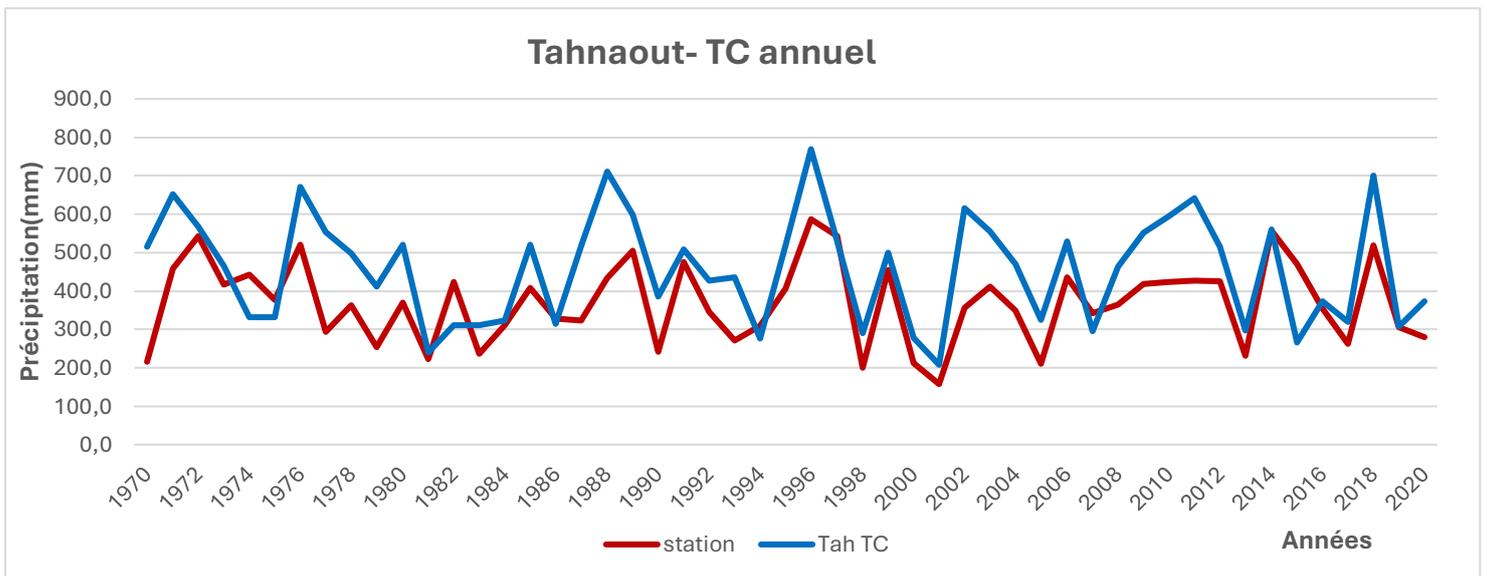


Figure 35: Variation des données observées de la station TAHNAOUT et des données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)

❖ Imin El hammam (752m)

Le graphique montre la relation entre les précipitations observées et celles estimées par le produit TerraClimate à la station Imin El hammam, analysées mensuellement et annuellement. Les coefficients

de corrélation sont de 0,75 pour les données mensuelles et de 0,71 pour les données annuelles, indiquant une forte concordance entre les deux séries de données.

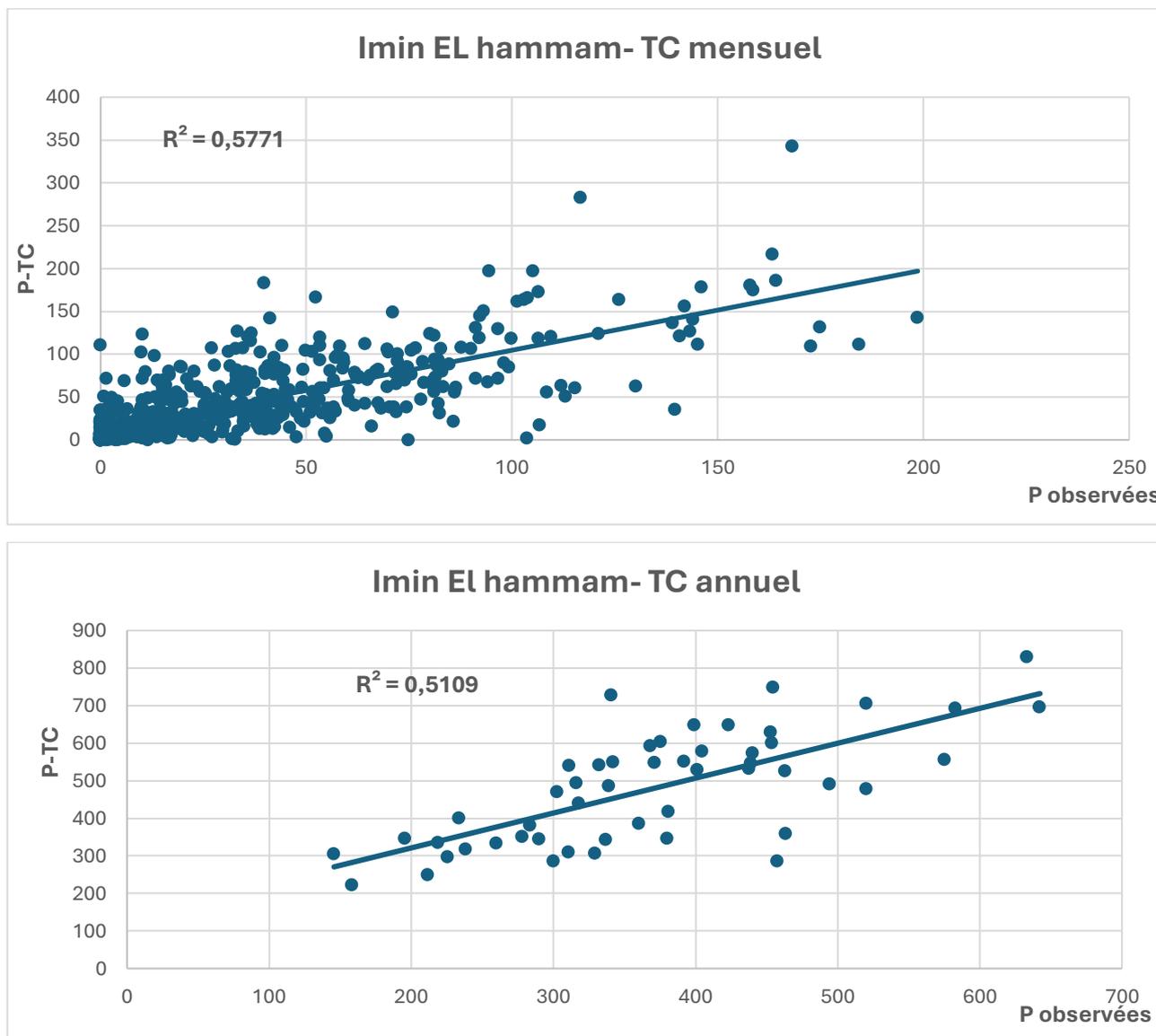


Figure 36: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station IMIN EL HAMMAM

Mensuellement (figure38), presque toutes les précipitations sont surestimées par le produit TerraClimate. Cette surestimation est absente durant les années 1973, 1982, 1994, 2004, et 2015.

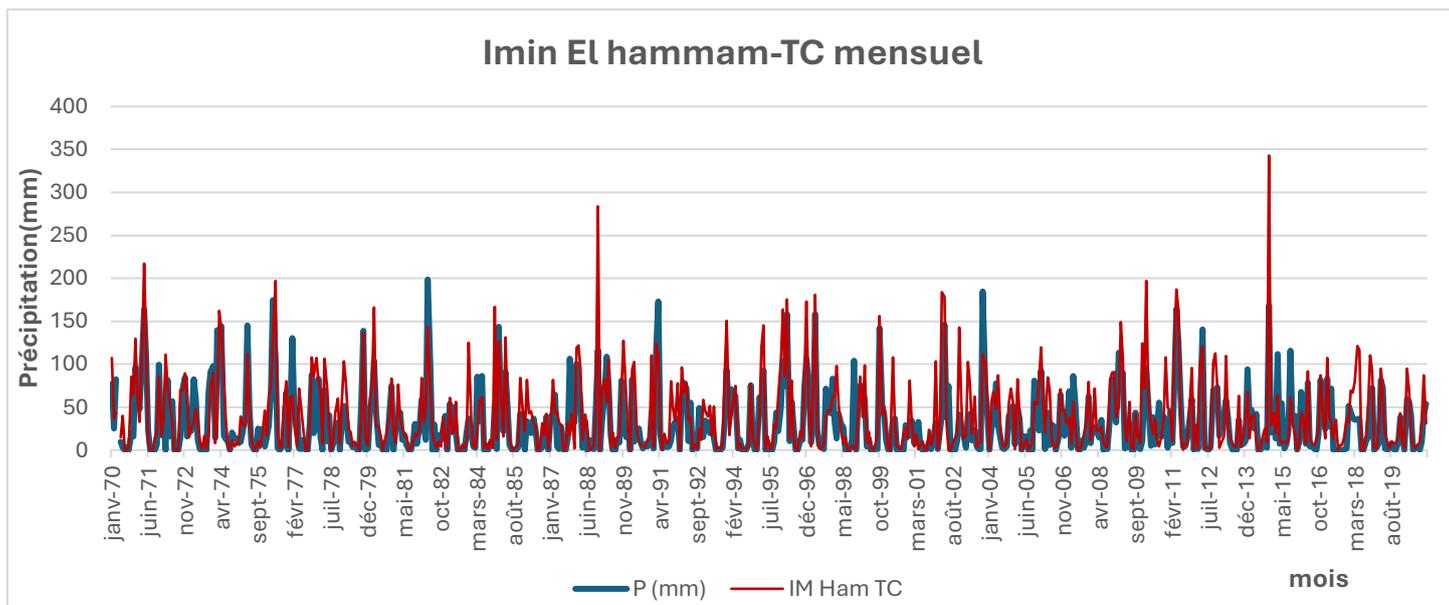


Figure 37: Variation des données observées de la station IMIN EL HAMMAM et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)

Les résultats annuels dans cette station présentent que le produit a une tendance à surestimer les événements pluvieux d'une différence jusqu'à 350mm. Cette surestimation est cependant absente durant la période 2007 et 2015 (Figure 39).

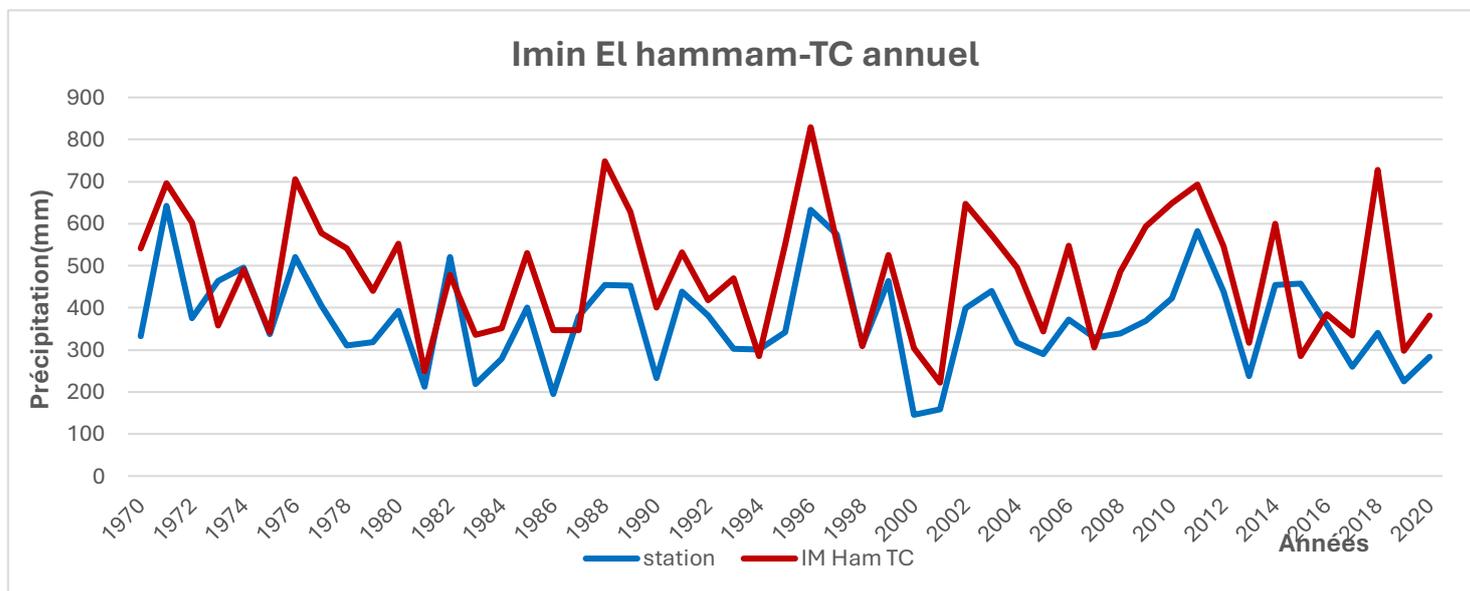


Figure 38: Variation des données observées de la station IMIN EL HAMMAM et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)

❖ Sidi Rahal (690m)

À l'échelle mensuelle et annuelle entre 1970 et 2020, les données observées sont bien estimées par le produit TerraClimate à la station Sidi Rahal, comme en témoignent les coefficients de corrélation r de 0,75 et 0,70 respectivement.

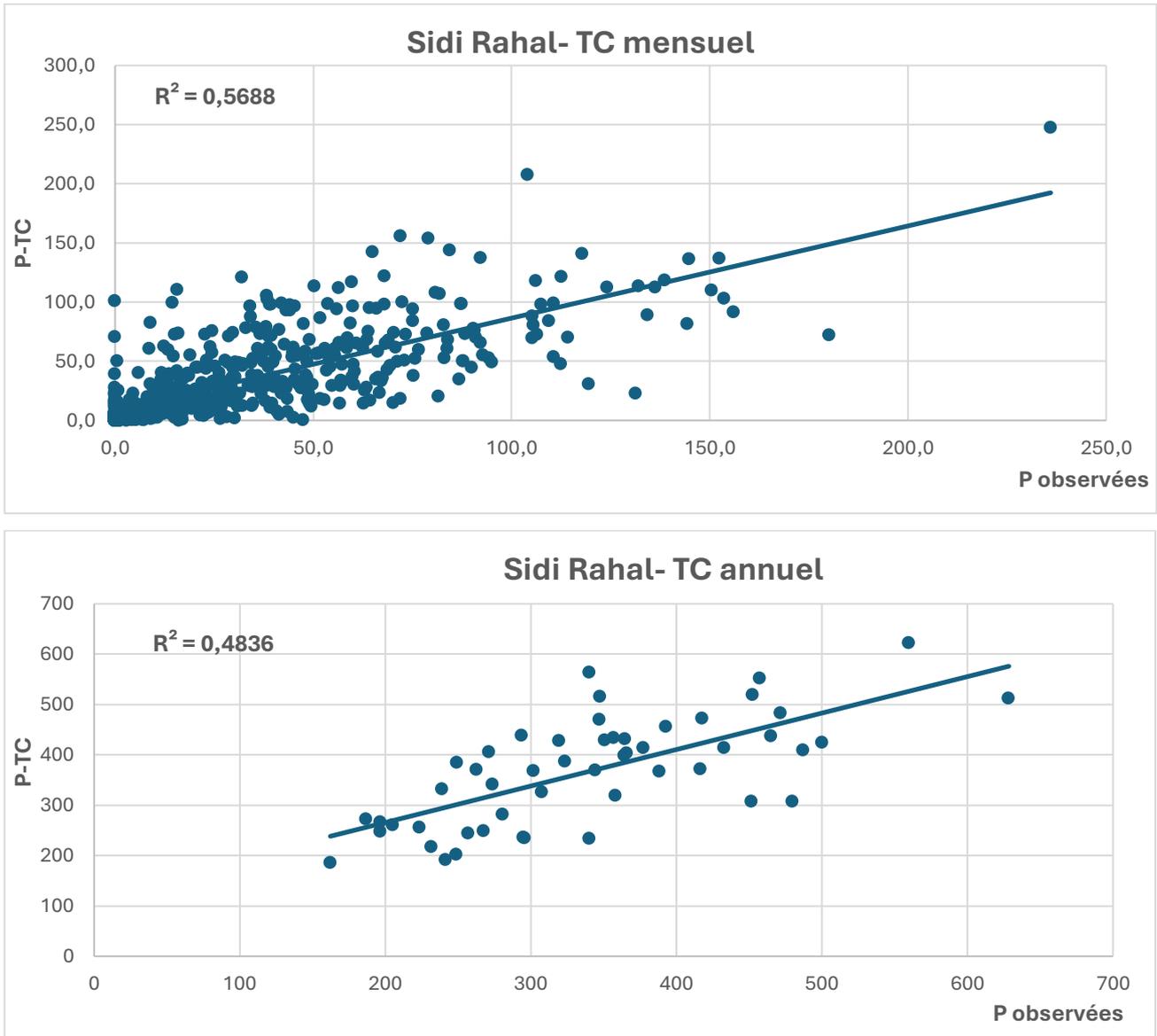


Figure 39: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station SIDI RAHAL

Les performances du produit TerraClimate à la station Sidi Rahal montrent une tendance à surestimer les précipitations pour les années 1988, 2000, 2002, 2009, 2014 et 2018, et à sous-estimer jusqu'à 70 mm à d'autres moments (cas d'année 1997).

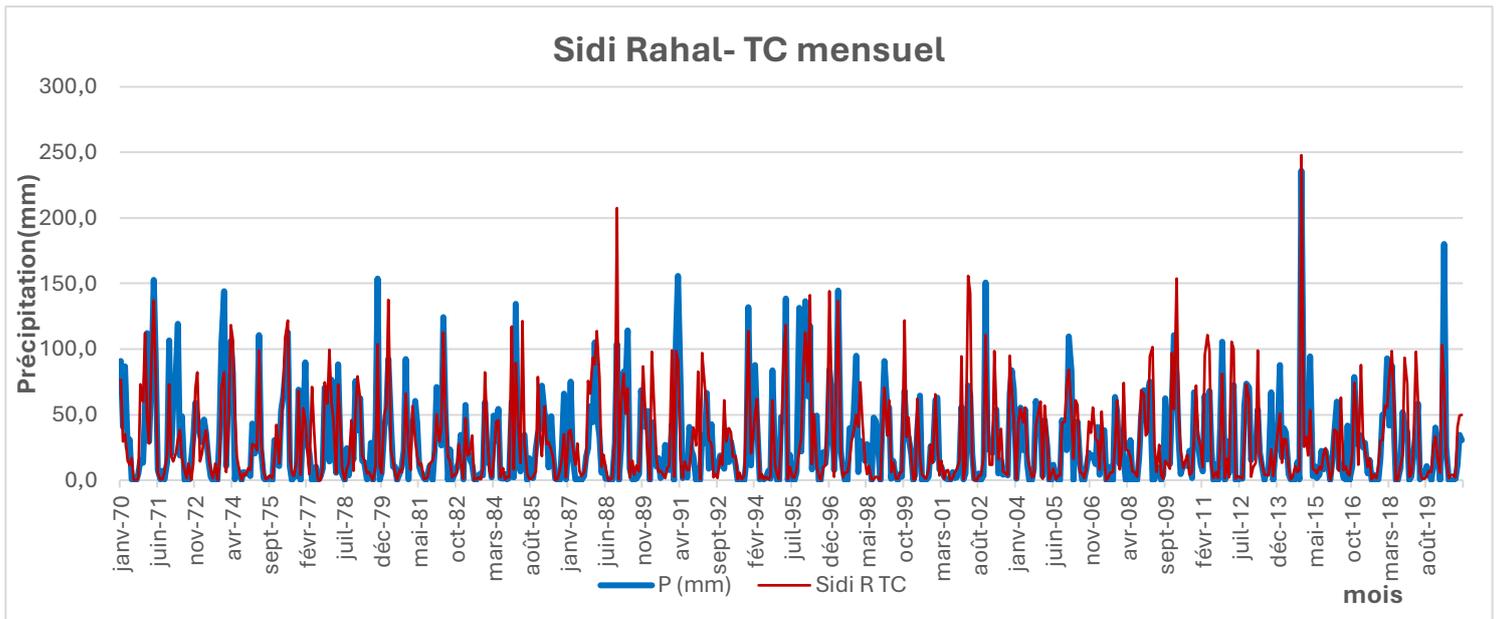


Figure 40: Variation des données observées de la station SIDI RAHAL et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)

D'après l'analyse des précipitations annuelles (figure42), il apparaît une sous-estimation des événements de pluie pour les années 1971\1973 et 1979, pouvant atteindre jusqu'à 150 mm Parallèlement, une surestimation est observée pour des années comme 2002, pouvant aller jusqu'à 150 mm.

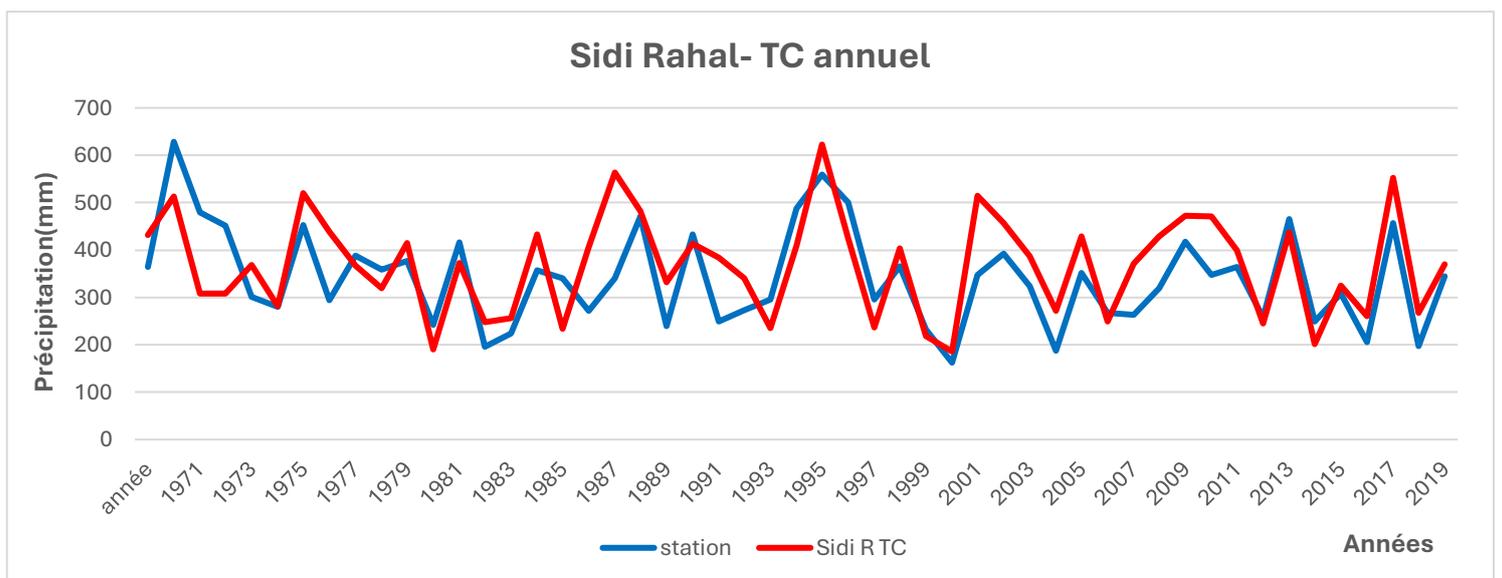


Figure 41: Variation des données observées de la station SIDI RAHAL et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)

❖ Lalla Takerkoust (614m)

Les figures qui détaillent les données mensuelles et annuelles entre 1970 et 2020 indiquent que les données observées à la station Lalla Takerkoust sont bien estimées par le produit TerraClimate. Cette observation est soutenue par des coefficients de corrélation (CC) de 0,77 pour l'échelle mensuelle et de 0,69 pour l'échelle annuelle.

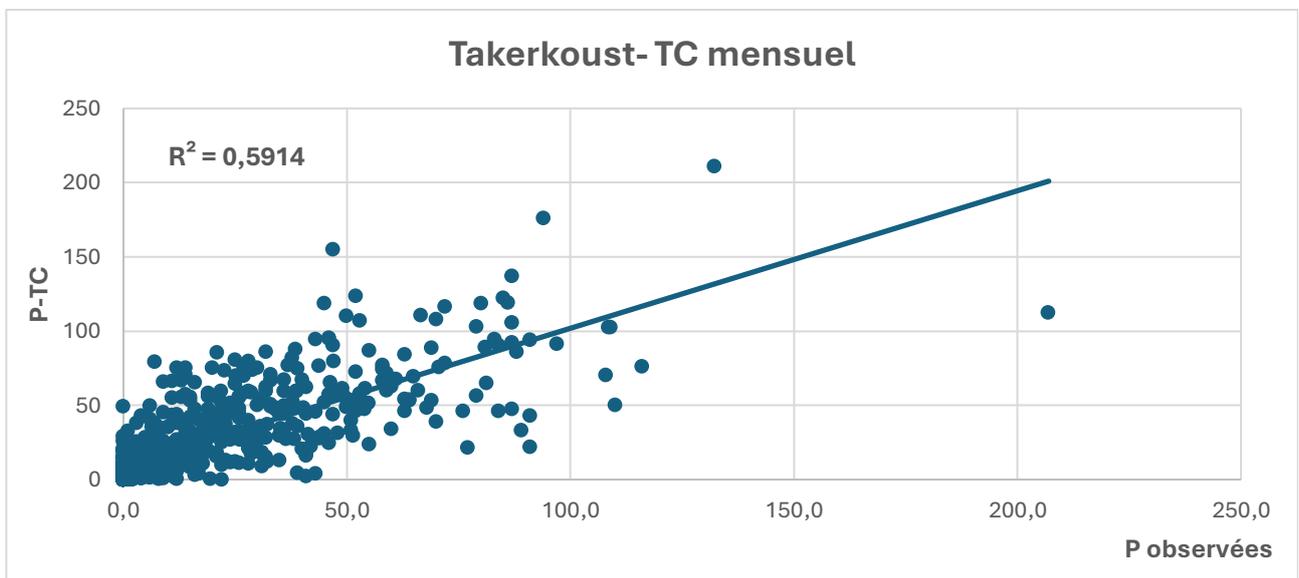
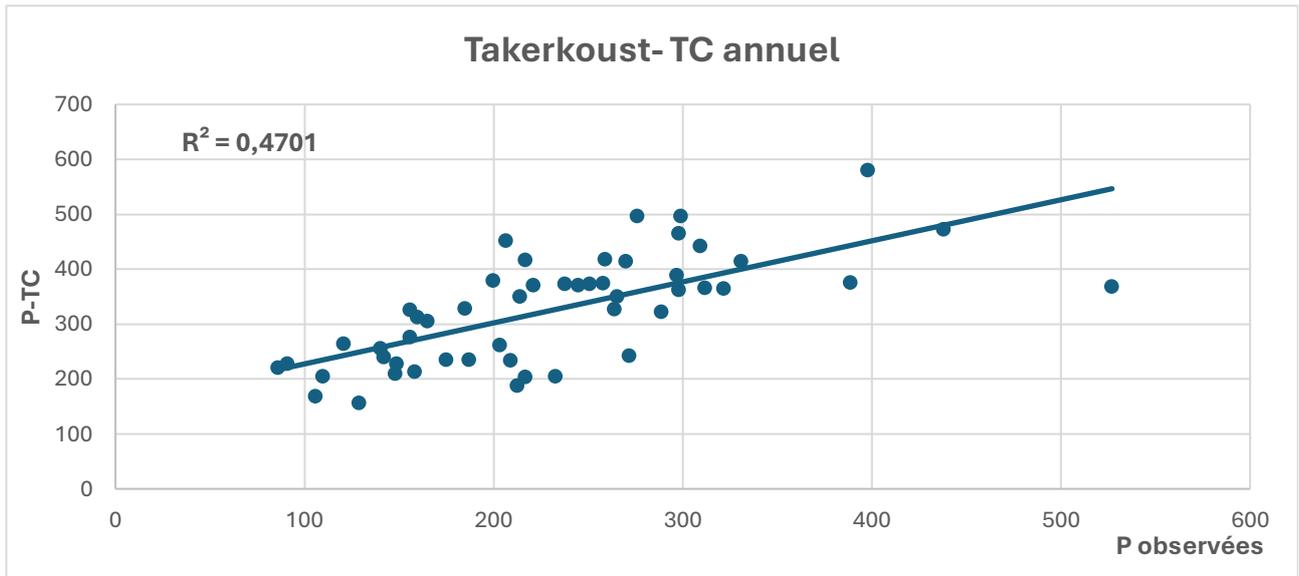


Figure 42: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station TAKERKOUST

À l'échelle mensuelle, le graphique présente les performances du produit TerraClimate de 1970 à 2020. On peut clairement observer une surestimation pour les années 1971, 1988 et 2010 atteignant parfois jusqu'à 200 mm. De plus, une sous-estimation notable est également visible pour les années 1975, 1977, 1987, 1994, 1997 et encore 2015, avec des écarts allant de 40 à 200 mm.

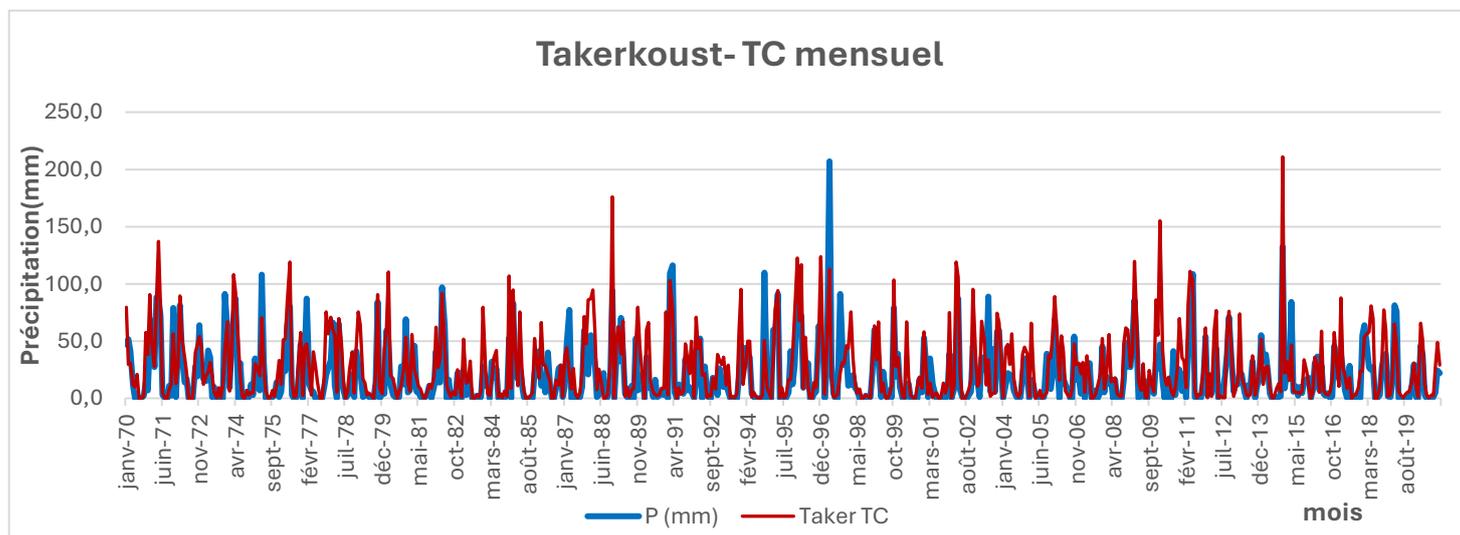


Figure 43: Variation des données observées de la station TAKERKOUST et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)

Annuellement (figure 45), le produit démontre une surestimation des tous les évènements pluviaux d'une différence d'environ 10-200mm qui peut aller jusqu'à 220. Sauf que les précipitations durant l'année 1973 et 2015 sont marquées par une sous-estimation légère.

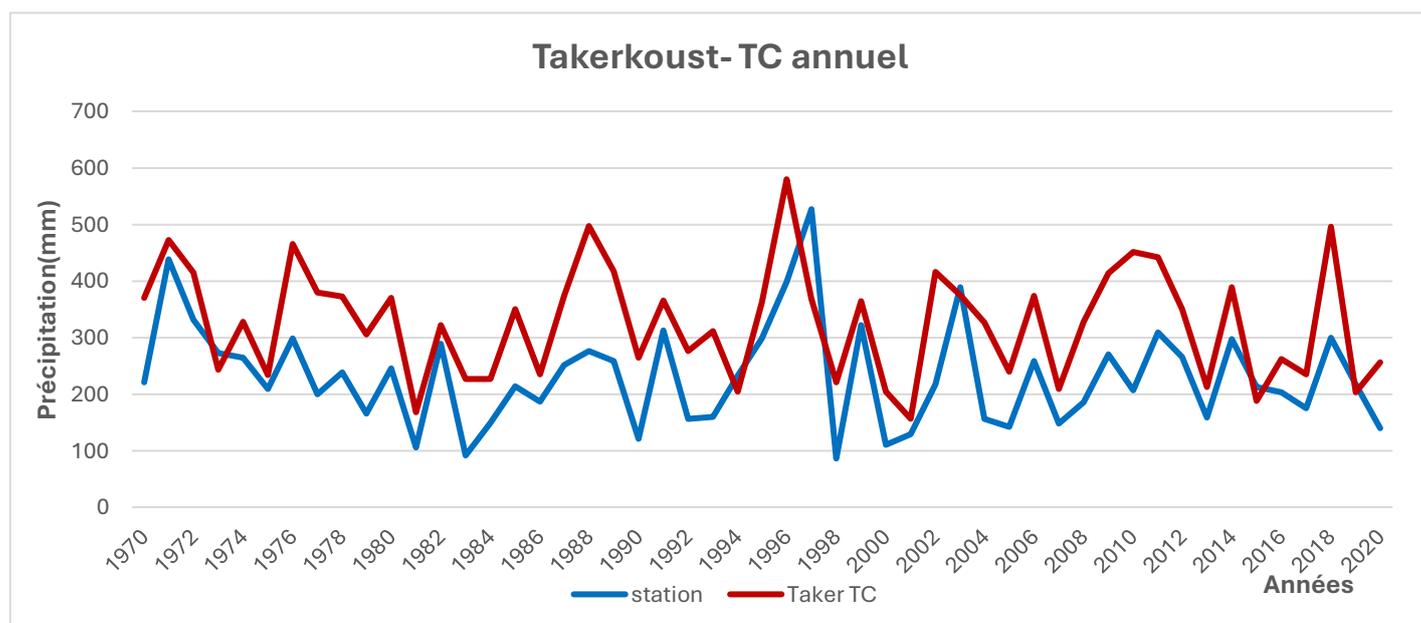


Figure 44: Variation des données observées de la station TAKERKOUST et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)

b. TerraClimate en plaine

❖ Marrakech (460m)

Les données observées à la station de Marrakech pour les années 1970 à 2020 ont été comparées aux estimations fournies par le produit TerraClimate. Les résultats montrent une corrélation significative entre les données observées et les estimations de TerraClimate, avec un coefficient de corrélation (CC) de 0,81 pour les données mensuelles et de 0,75 pour les données annuelles. Ces coefficients indiquent que TerraClimate fournit une estimation fiable des données climatiques de Marrakech à ces deux échelles temporelles.

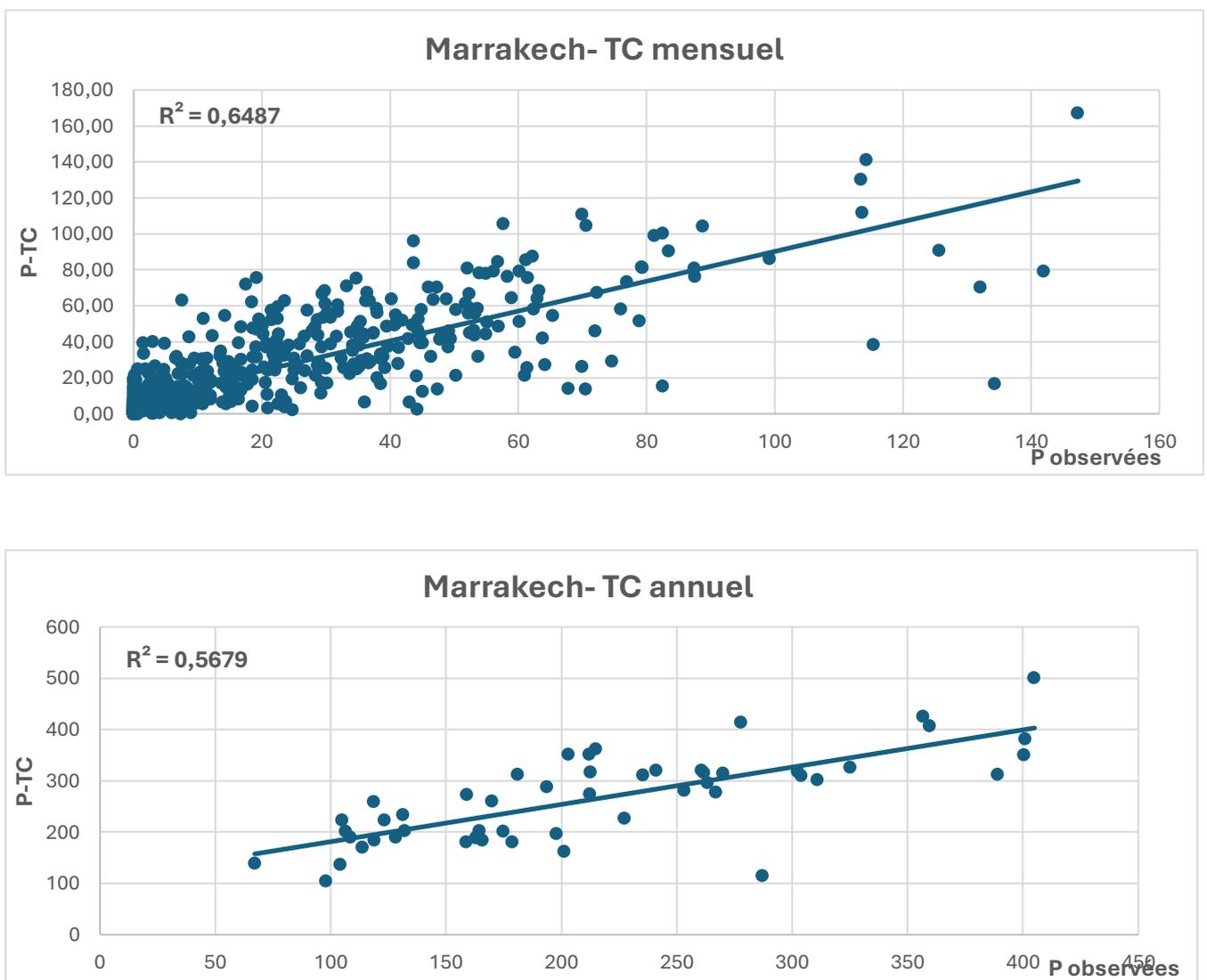


Figure 45: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station MARRAKECH

Sur une base mensuelle, TerraClimate a tendance à surestimer les précipitations de manière générale, avec une moyenne de 10 mm à 40 mm. Cependant, il y a des exceptions pour les périodes 1976, 1995, 1997, 2009 et 2015, où l'on observe une sous-estimation pouvant atteindre jusqu'à 50 mm.

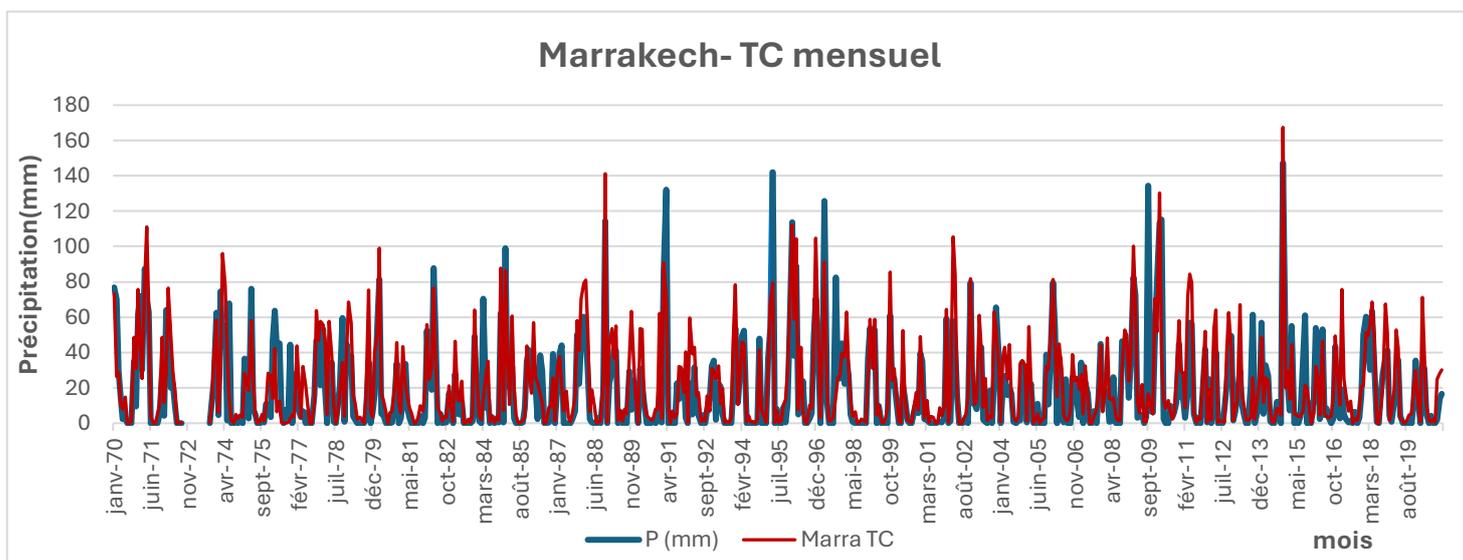


Figure 46: variation des données observées se la station MARRAKECH et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)

Sur une base annuelle, TerraClimate a tendance à surestimer les précipitations, atteignant parfois jusqu'à 90 mm, comme en 2012. Cependant, il y a des exceptions pour les périodes 1976 et 2009, où une sous-estimation allant jusqu'à 170 mm a été observée.

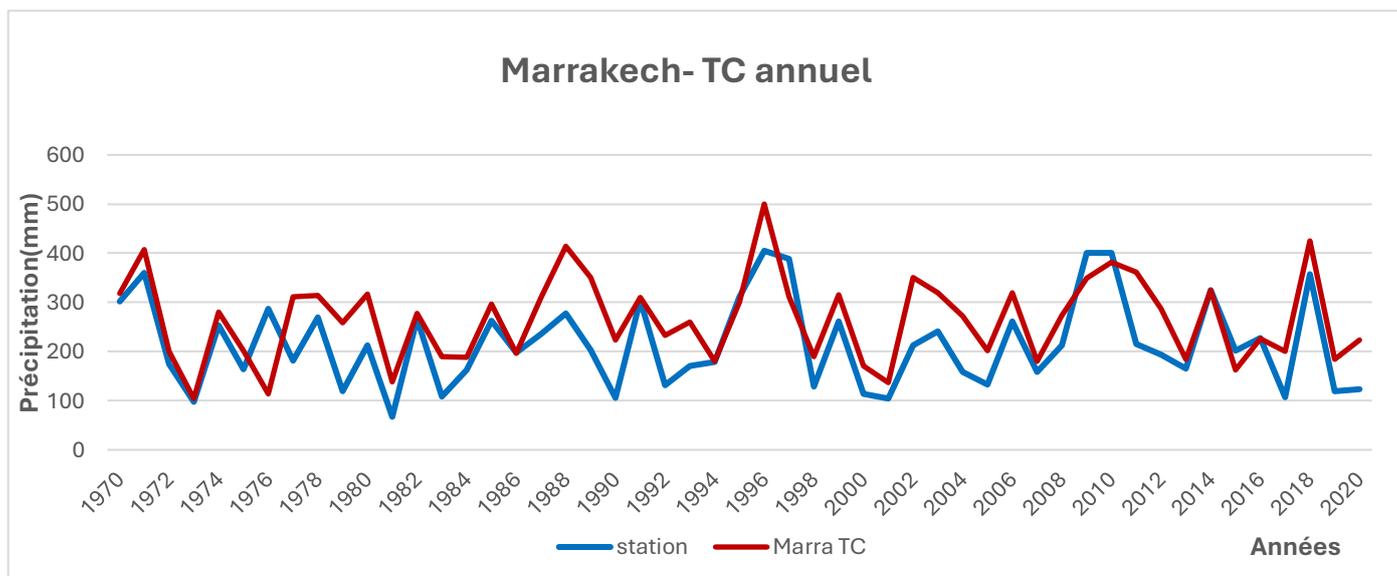


Figure 47 : Variation des données observées de la station MARRAKECH et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)

❖ Chichaoua (340m)

Il semble que les données observées à la station de Chichaoua pour les années 1970 à 2020 aient été comparées aux estimations fournies par le produit TerraClimate. Les résultats de cette comparaison révèlent une corrélation significative entre les données observées et les estimations de TerraClimate. En effet, un coefficient de corrélation (CC) de 0,81 a été obtenu pour les données mensuelles, et de 0,68 pour les données annuelles. Ces coefficients suggèrent que TerraClimate fournit une estimation précise des données climatiques de Chichaoua à ces deux échelles temporelles.

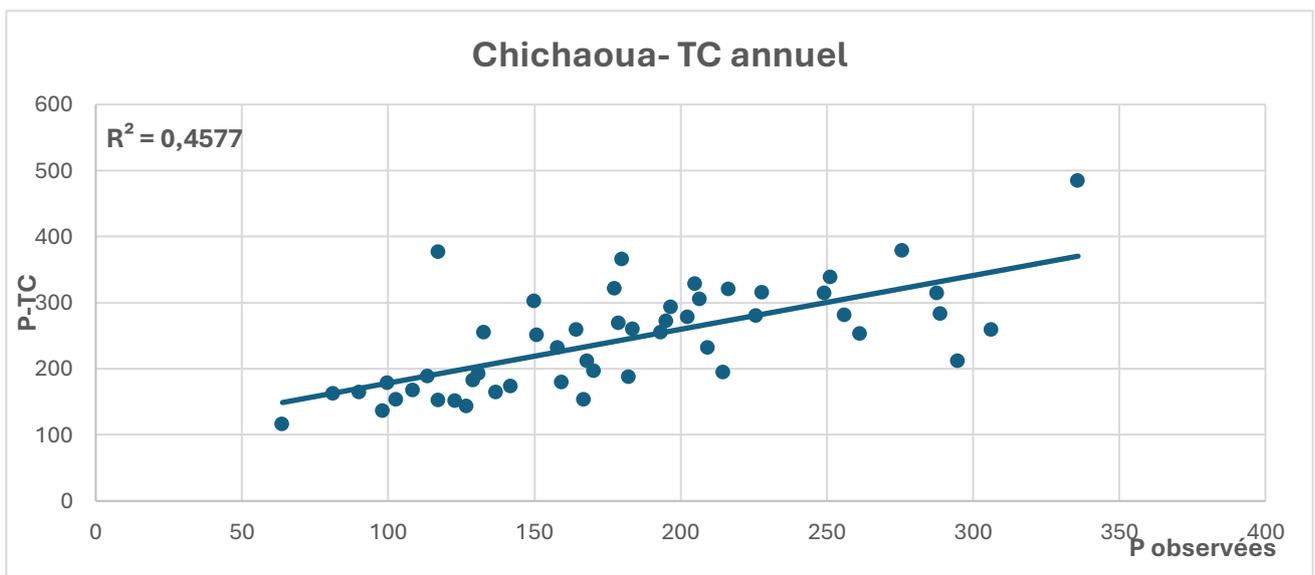
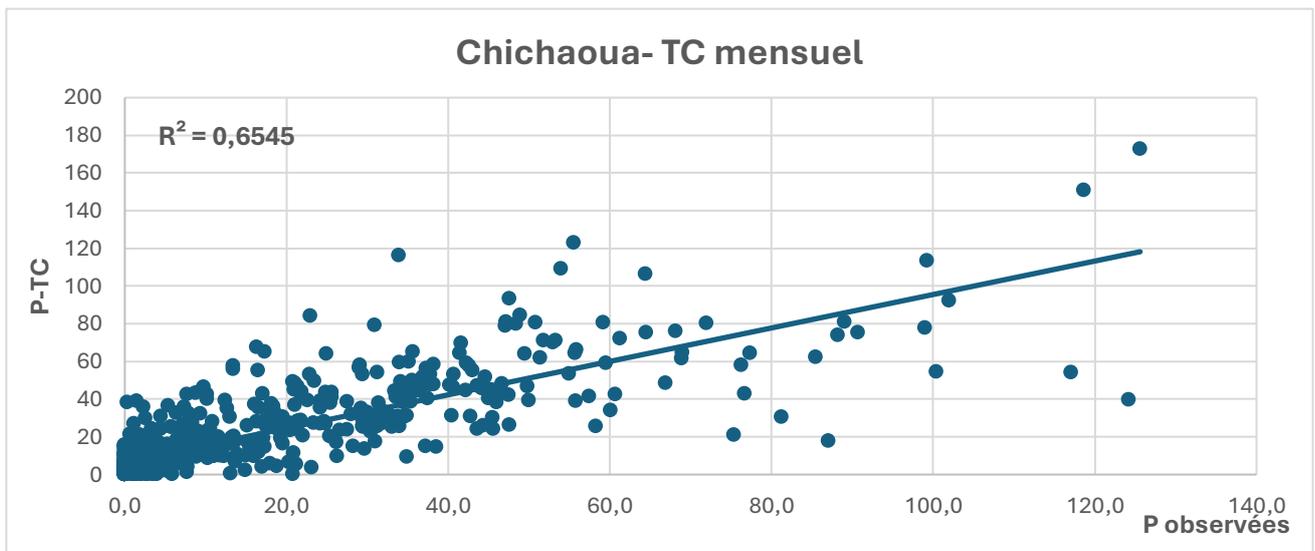


Figure 48: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station CHICHAOUA

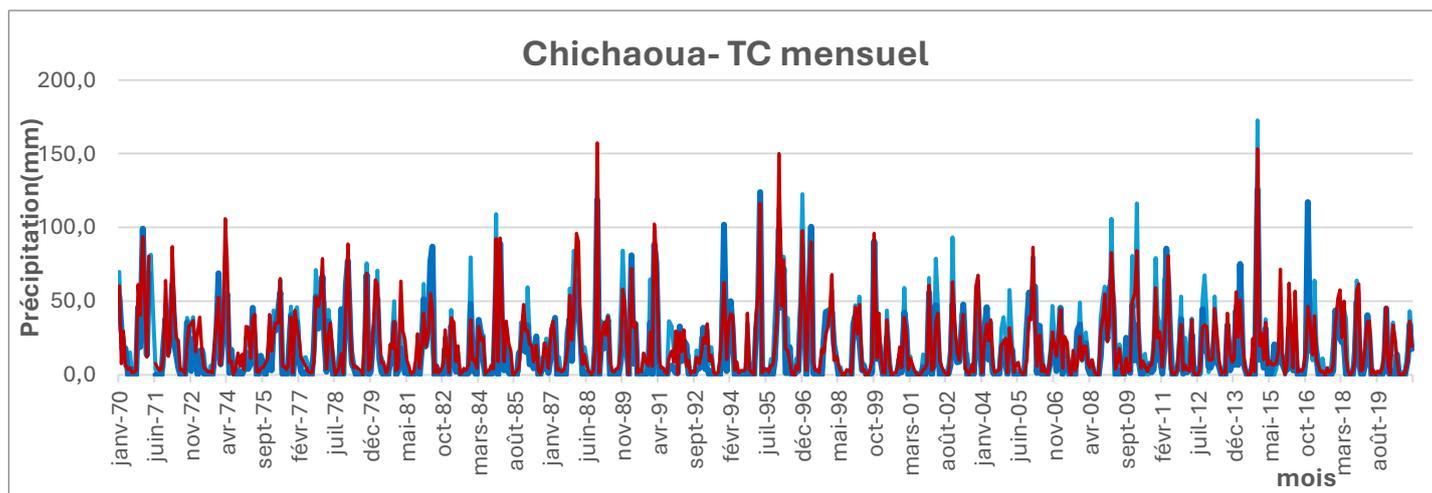


Figure 49: Variation des données observées de la station CHICHAOUA et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)

Les données montrent que TerraClimate a généralement une tendance à surestimer les précipitations mensuelles, avec une moyenne de 250 mm pour les années 1996 et 2010. Toutefois, il y a des cas particuliers pour les périodes 1982, 1995, 1997 et 2016, où l'on constate une sous-estimation allant jusqu'à 80 mm.

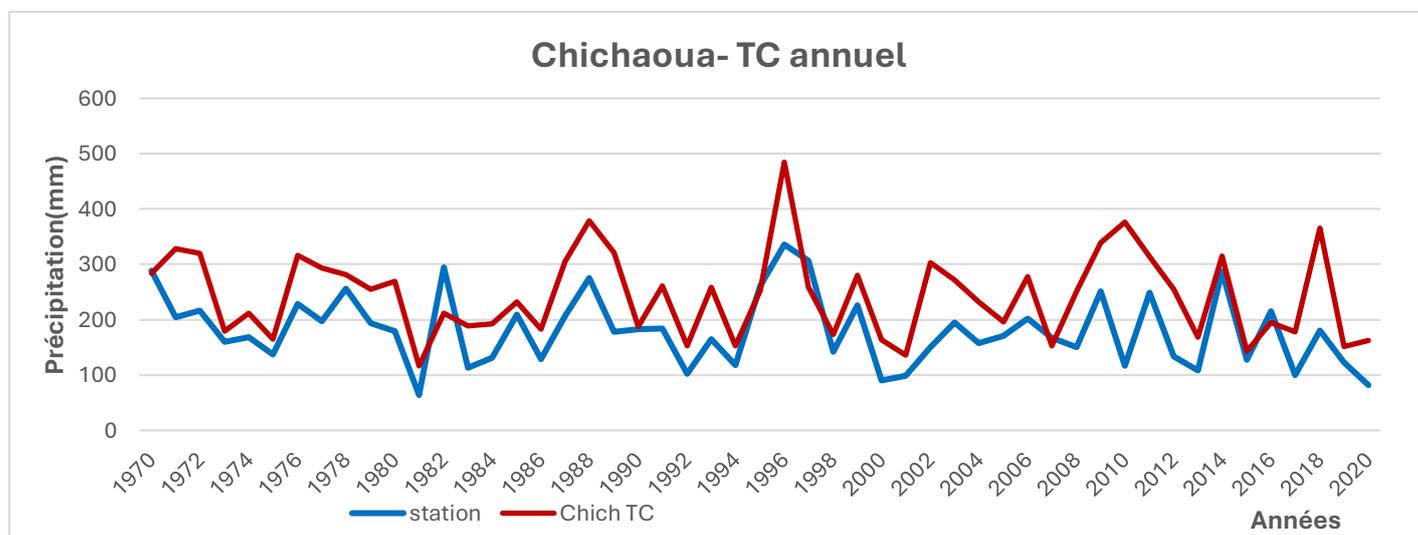


Figure 50: Variation des données observées de la station CHICHAOUA et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)

Chaque année, TerraClimate a généralement tendance à surestimer les précipitations, avec des valeurs pouvant aller jusqu'à 140 mm de plus que les mesures réelles (comme en 1996). Néanmoins, il existe des exceptions telles que la période de 1982, où une sous-estimation allant jusqu'à 83 mm a été observée.

❖ **Abadla (263m)**

Les données réelles recueillies à la station d'Abadla pour la période allant des années 1970 à 2020 ont été confrontées aux estimations fournies par le produit TerraClimate. Les résultats démontrent une corrélation significative entre les données observées et celles estimées par TerraClimate, avec un coefficient de corrélation (CC) de 0,81 pour les données mensuelles et de 0,75 pour les données annuelles.

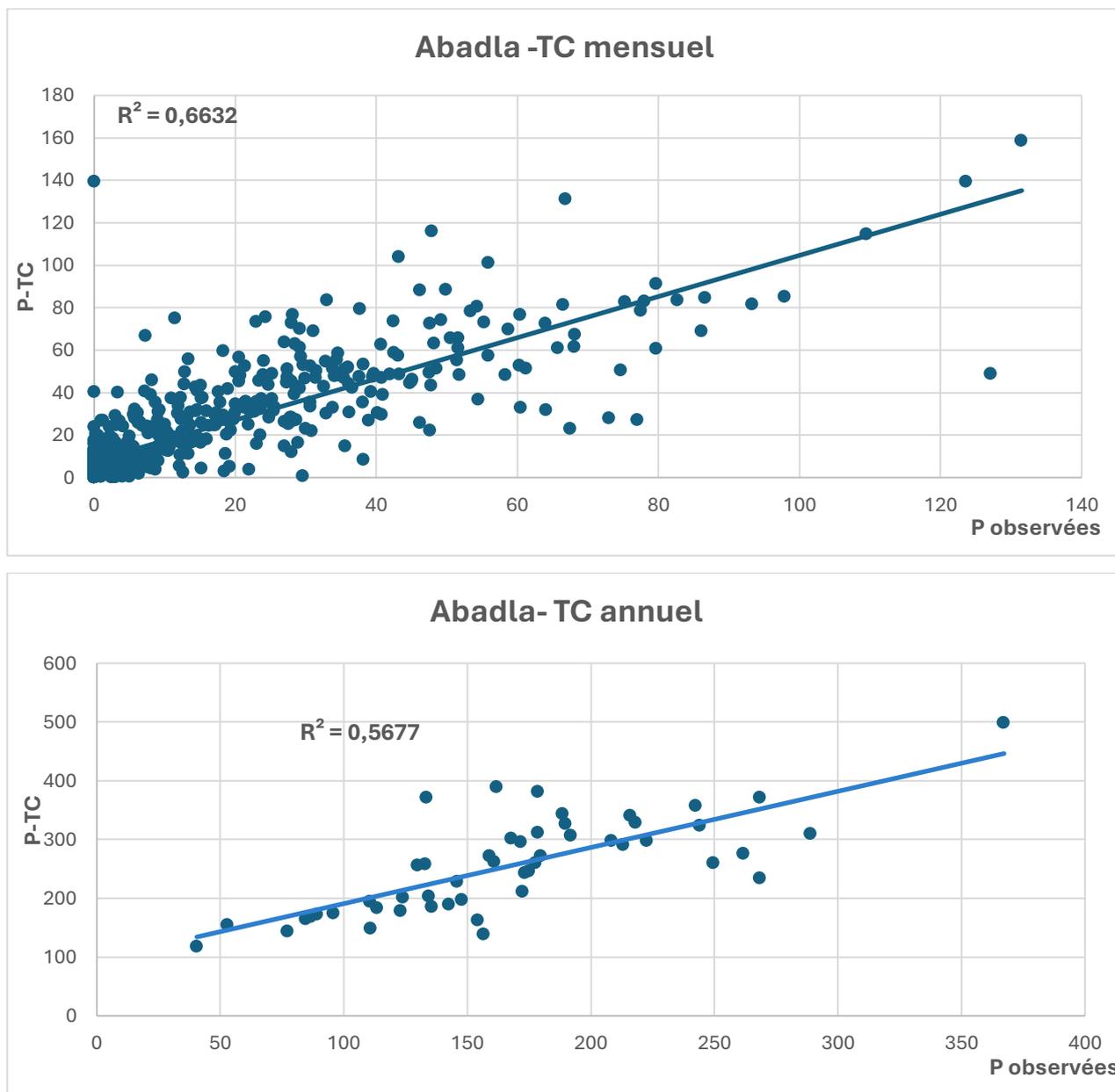


Figure 51: Corrélation entre la pluie observée et celle réanalysée par TerraClimate pour la station ABADLA

Les données révèlent que TerraClimate a habituellement une propension à surestimer les précipitations mensuelles, avec une moyenne de 90 mm pour l'année 1999. Cependant, il existe des exceptions notables, comme en 1982, où l'on observe une sous-estimation pouvant aller jusqu'à 34 mm

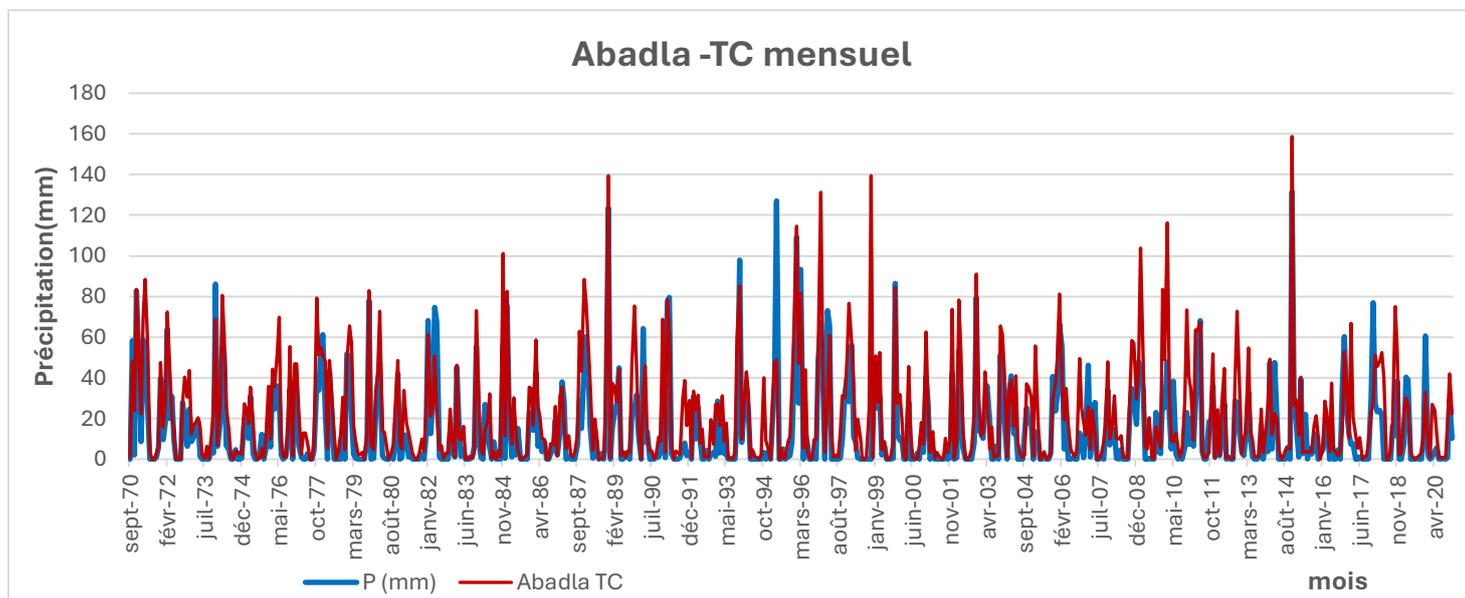


Figure 52: Variation des données observées de la station ABADLA et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1970-2020)

Annuellement, le produit montre une surestimation de tous les événements pluvieux, avec une différence d'environ 228 mm pour l'année 2018.

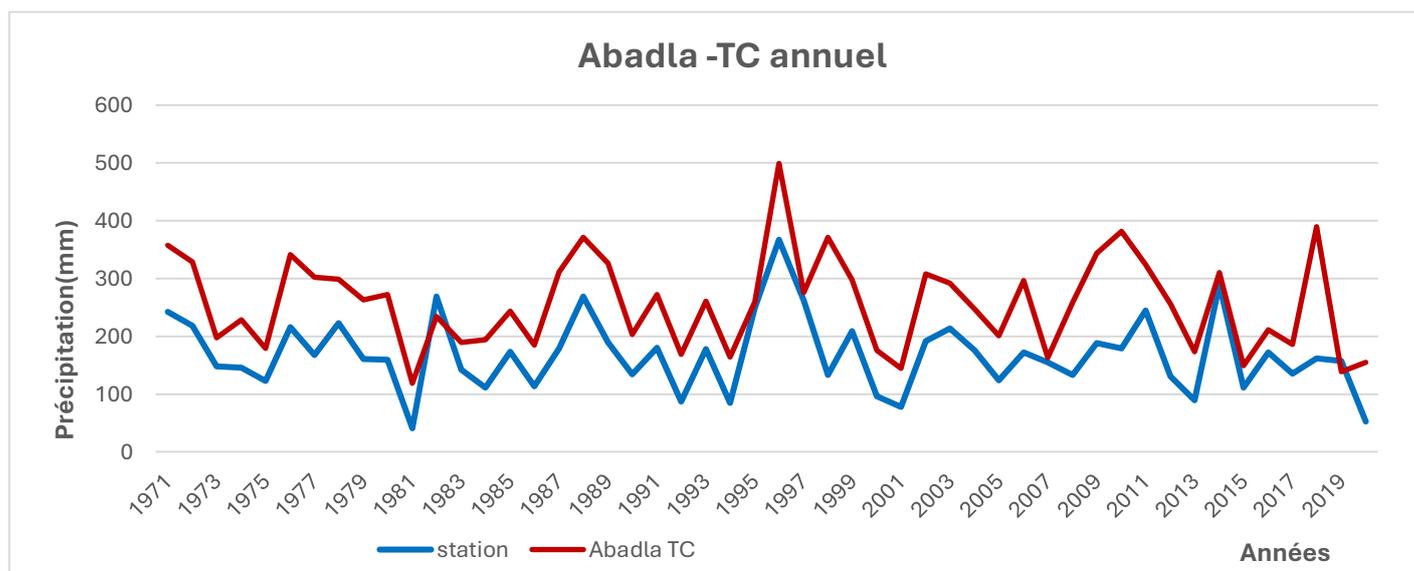


Figure 53: Variation des données de la station ABADLA et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1970-2020)

D'après ces constatations, TerraClimate démontre une précision supérieure en plaine, surtout à une échelle mensuelle. En revanche, en moyenne montagne, les précipitations sont généralement sous-estimées, sauf pour les faibles intensités. En basse montagne, les fortes précipitations sont sous-estimées tandis que les faibles à moyennes sont surestimées. Cette précision varie donc en fonction de la topographie et de la densité des stations de mesure : TerraClimate est plus fiable en plaine grâce à un terrain plus simple et une meilleure couverture des stations, mais dans les zones montagneuses, la précision diminue en raison de la complexité topographique et de la densité plus faible des stations de mesure.

II. Comparaison des résultats d'évaluation des deux produits ERA5 et TerraClimate :

1. L'évaluation quantitative des produits :

Les résultats du traitement des données à l'aide de différentes mesures statistiques (biais, RMSE et CC) dans la zone d'étude offrent une base de comparaison des performances de ces deux produits et permettent de discuter de leurs implications.

a. Le Biais:

Le produit TC présente une médiane de biais plus faible et moins variable que le modèle ERA5 (Figure 55). De plus, la plage des valeurs pour TC est également plus restreinte, ce qui indique une plus grande précision. En revanche, ERA5 présente une médiane de biais plus élevée avec une plage plus large, ce qui suggère une plus grande incertitude dans les prévisions.

b. L'Erreur quadratique moyen (RMSE) :

Le produit TC présente une médiane de RMSE plus faible et moins variable (environ 25 mm) comparé à ERA5 (environ 30 mm), indiquant des erreurs de prévision plus faibles pour TC. La plage des valeurs pour TC est plus restreinte, ce qui suggère des prévisions plus cohérentes et moins variables. En revanche, ERA5 montre une médiane de RMSE plus élevée et une plage plus large, indiquant une plus grande incertitude dans ses prévisions. En résumé, TC offre des prévisions de RMSE plus précises et moins variables par rapport à ERA5, qui présente une plus grande incertitude.

c. L'Erreur absolue moyen (MAE) :

Au fil des années, les différences deviennent de plus en plus prononcées. TC démontre une médiane d'erreur plus basse et une variabilité plus contenue, suggérant une fiabilité accrue pour les estimations à long terme. En revanche, ERA5 présente une médiane d'erreur beaucoup plus élevée et

une variabilité accrue, avec des valeurs extrêmes pouvant atteindre jusqu'à 300 mm Cela suggère une moindre fiabilité des prédictions annuelles.

Les deux ensembles présentent des erreurs faibles, mais TC se distingue par une médiane plus basse et une variabilité moindre. Cela indique une meilleure précision et une constance supérieure. Au fil des années, les différences deviennent de plus en plus prononcées. TC démontre une médiane d'erreur plus basse et une variabilité plus contenue, suggérant une fiabilité accrue pour les estimations à long terme. En revanche, ERA5 présente une médiane d'erreur beaucoup plus élevée et une variabilité accrue, avec des valeurs extrêmes pouvant atteindre jusqu'à 300 mm Cela suggère une moindre fiabilité des prédictions annuelles.

d. Le Coefficient de corrélation (CC) :

Mensuellement, ERA5 présente un coefficient de corrélation légèrement supérieur, ce qui indique une meilleure correspondance avec les valeurs observées. Cependant, cette amélioration de la corrélation s'accompagne d'une plus grande variabilité. À l'échelle annuelle, les différences entre les deux modèles sont minimales, bien que ERA5 conserve un léger avantage.

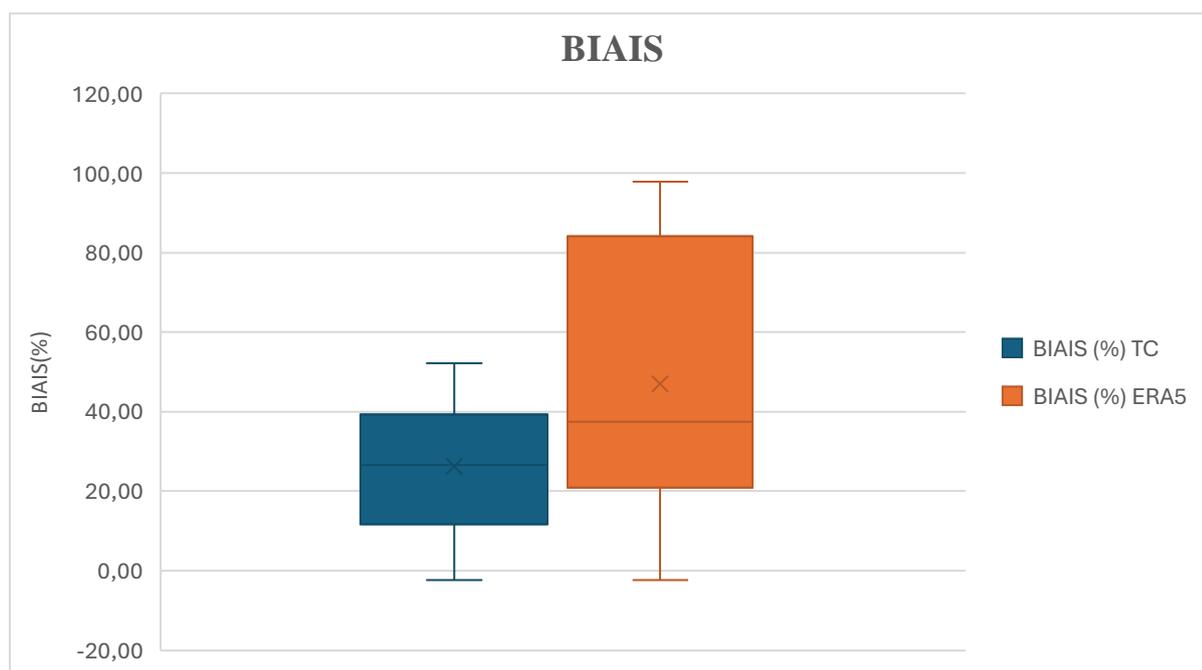


Figure 54: Comparaison entre les biais des deux produits ERA5 et TerraClimate

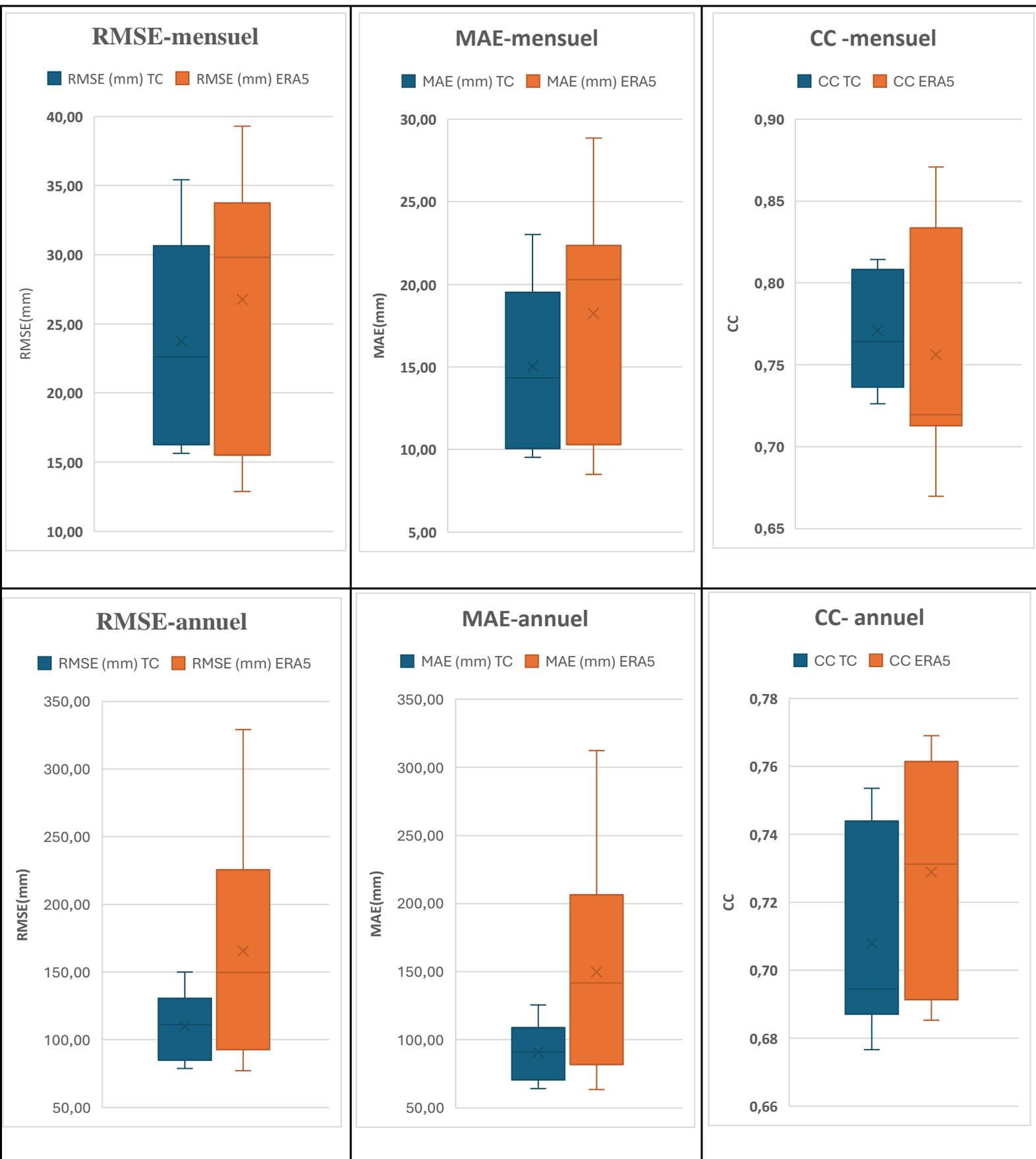


Figure 55: Comparaison des indicateurs statistiques des deux produits ERA5 et TerraClimate à l'échelle mensuelle et annuelle

2. Exemple d'évaluation comparative des deux produits :

La figure suivante illustrera une évaluation comparative des produits d'ERA5 et TerraClimate en plaine et en moyenne montagne pour montrer la performance de l'une par rapport à l'autre.

❖ En plaine :

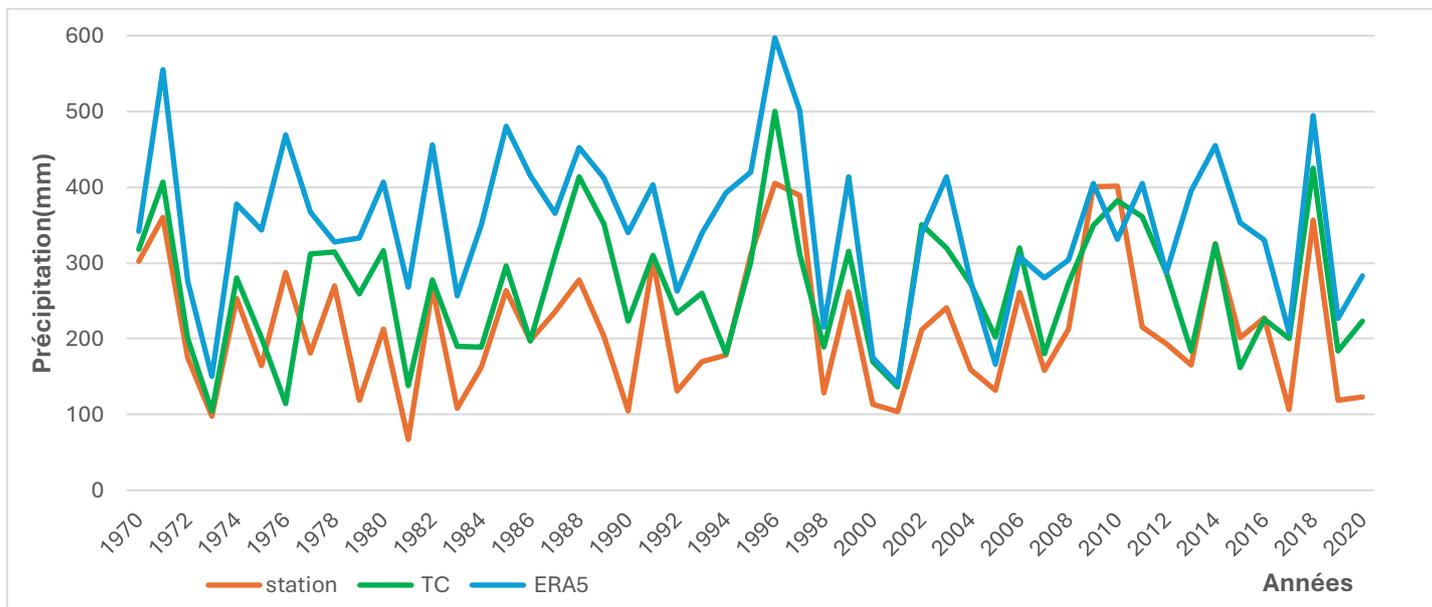


Figure 56: Comparaison entre les pluies observées et celle estimées par les deux produits de 1970 à 2020 sur la station MARRAKECH

❖ En moyenne montagne :

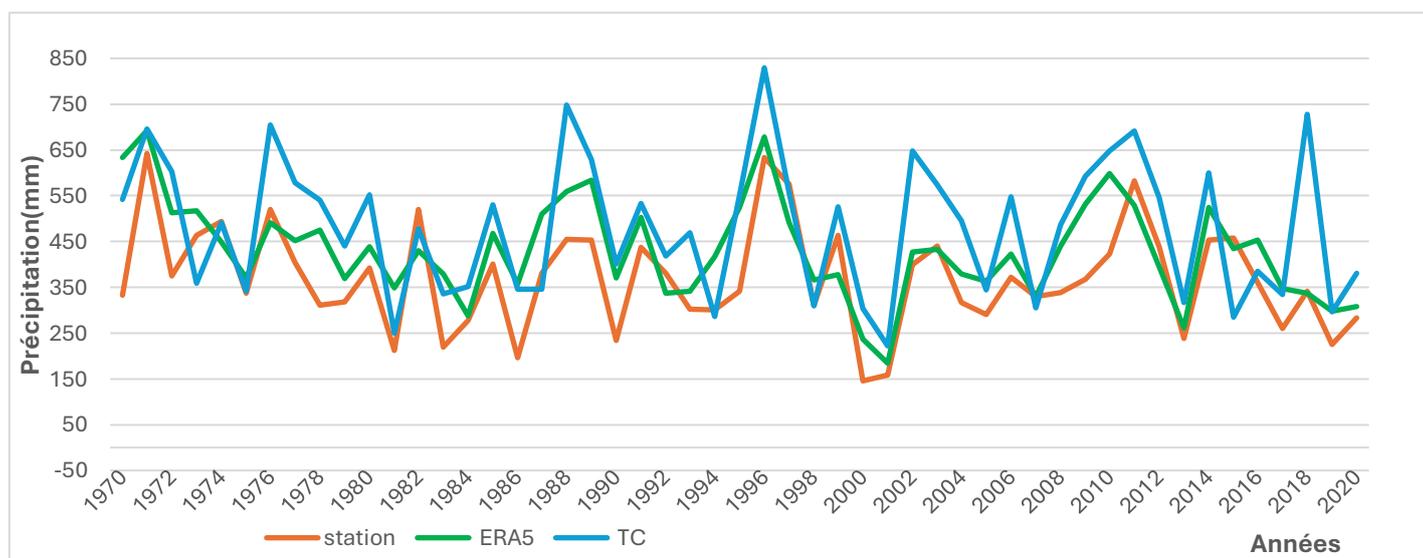


Figure 57: Comparaison entre les pluies observées et celle estimées par les deux produits de 1970 à 2020 sur la station IMIN EL HAMMAM

Les deux figures confirment en effet l'avantage de TerraClimate par rapport à ERA5 à estimer les hauteurs de précipitations.

III. Discussion:

Les résultats de cette comparaison ont démontré que le produit TC se distingue par une meilleure précision et stabilité en termes de biais et d'erreur quadratique moyenne. Cela se traduit par des prévisions plus cohérentes et moins erronées, ce qui est crucial pour des applications nécessitant des prédictions fiables sur le long terme. La performance supérieure en termes de biais et d'erreur quadratique moyenne indique que les valeurs prédites par TC sont plus proches des valeurs observées. En revanche, ERA5 présente un coefficient de corrélation légèrement supérieur mensuellement, suggérant une meilleure adéquation aux données observées à court terme. Cependant, cette meilleure corrélation ne compense pas entièrement les erreurs plus importantes en termes de biais et d'erreur quadratique moyenne. L'avantage de la corrélation pourrait être plus pertinent dans des scénarios où la forme de la distribution des données est plus critique que la précision absolue des valeurs prédites.

ERA5 montre également une plus grande variabilité dans toutes les mesures (biais, erreur quadratique moyenne et coefficient de corrélation), ce qui peut poser des défis en termes de fiabilité des prévisions. Cette variabilité pourrait rendre ERA5 moins prévisible et moins fiable pour des applications où la stabilité est essentielle. En revanche, la faible variabilité du modèle TC le rend plus fiable pour des prévisions cohérentes sur différentes périodes. Ainsi, pour des applications nécessitant des prévisions précises et stables, le modèle TC est clairement préférable en raison de son faible biais et de sa faible erreur quadratique moyenne. Cependant, pour des applications où la corrélation avec les données observées est primordiale, ERA5 pourrait offrir un léger avantage, bien que cela vienne avec une plus grande incertitude.

En conclusion, pour des applications nécessitant des prévisions précises et stables, le produit TerraClimate est recommandé. Pour des utilisations où la corrélation avec les données observées à court terme est cruciale, ERA5 pourrait être une alternative, malgré ses plus grandes incertitudes. Le choix du produit dépendra donc des priorités spécifiques de l'application, qu'il s'agisse de minimiser les erreurs de prévision ou de maximiser la correspondance avec les données observées.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude avait pour objectif la validation de deux produits de réanalyses pluviométriques, ERA5 et TerraClimate, sur le bassin versant de Tensift. En utilisant des mesures statistiques variées, nous avons comparé les données de ces produits avec les données in situ de 8 stations météorologiques pour évaluer leur précision et leur fiabilité. Les principaux résultats de cette étude sont résumés comme suit :

- L'évaluation statistique de ces deux produits (basée sur 5 indicateurs statistiques : CC, ME, MAE, Biais, RMSE) nous a permis de dire que les deux produits ont parfois des problèmes de réanalyse des précipitations avec des mauvais scores principalement indiqués par le RMSE.
- La comparaison des produits de précipitation avec les données des pluviomètres montre une surestimation des précipitations dans les stations à l'exception de la station Aghbalou. Cette surestimation est plus élevée pour le produit ERA5 qu'avec le produit de réanalyse TerraClimate.
- TC est plus adapté pour des prévisions précises et cohérentes à long terme. ERA5, bien que présentant un coefficient de corrélation mensuel légèrement supérieur, souffre de variabilités plus élevées et d'erreurs plus importantes.
- Les fluctuations accrues du ERA5 pourraient poser des difficultés pour garantir la fiabilité des prévisions pour certaines applications.

Les résultats de cette étude ont révélé que les produits de réanalyse des précipitations présentent des performances satisfaisantes sur le plan statistique. Ces sources de données sur les précipitations pourraient être utilisées dans des bassins versants non jaugés et dans des régions pauvres en données, telles que le Maroc. Elles offrent aux gestionnaires de ressources en eau et aux planificateurs environnementaux des outils précieux pour sélectionner les produits de réanalyse pluviométrique les mieux adaptés à leurs besoins spécifiques. Bien que ces produits puissent constituer une alternative viable aux mesures au sol, à condition de corriger les biais qu'ils présentent parfois en fonction des lieux et des moments.

RÉFÉRENCES

- [1] C. Jiang, E. J. R. Parteli, · Qian Xia, and Y. Shao, “Evaluation of precipitation reanalysis products for regional hydrological modelling in the Yellow River Basin,” *Theor Appl Climatol*, vol. 155, pp. 2605–2626, 2024, doi: 10.1007/s00704-023-04758-w.
- [2] G. R. C. Essou, “Potentiel des données de précipitation et température des réanalyses atmosphériques en modélisation hydrologique,” Aug. 2016.
- [3] J. T. Abatzoglou, S. Z. Dobrowski, S. A. Parks, and K. C. Hegewisch, “TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015,” *Sci Data*, vol. 5, Jan. 2018, doi: 10.1038/sdata.2017.191.
- [4] H. Hersbach *et al.*, “The ERA5 global reanalysis,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999–2049, Jul. 2020, doi: 10.1002/qj.3803.
- [5] I. Pocard, “Etude diagnostique de nouvelles données climatiques : les réanalyses : exemples d’application aux précipitations en Afrique tropicale | Theses.fr,” 2000.
- [6] “Rechercher sur le site | CEPMMT.” Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: https://www.ecmwf.int/search/site?search_api_fulltext=ERA5
- [7] R. Gelaro *et al.*, “The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2),” *J Clim*, vol. 30, no. 14, pp. 5419–5454, Jul. 2017, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- [8] Hamburg, “Evaluation of ERA5, ERA5-Land, and IMERG-F precipitation with a particular focus on elevation-dependent variations A comparative analysis using observations from Germany and Brazil,” 2019.
- [9] S. Kobayashi *et al.*, “The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics,” *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol. 93, no. 1, pp. 5–48, Mar. 2015, doi: 10.2151/jmsj.2015-001.
- [10] J. T. Abatzoglou, S. Z. Dobrowski, S. A. Parks, and K. C. Hegewisch, “TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015,” *Sci Data*, vol. 5, Jan. 2018, doi: 10.1038/sdata.2017.191.
- [11] H. Hersbach *et al.*, “The ERA5 global reanalysis,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999–2049, Jul. 2020, doi: 10.1002/QJ.3803.
- [12] “Qu’est-ce que l’ensemble de données de réanalyse ERA5 du service Copernicus sur le changement climatique et que peut-il faire pour vous | Copernic.” Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: <https://climate.copernicus.eu/what-copernicus-climate-change-services-era5-reanalysis-dataset-and-what-can-it-do-you>

- [13] M. Dumont *et al.*, “Assessing rainfall global products reliability for water resource management in a tropical volcanic mountainous catchment,” *J Hydrol Reg Stud*, vol. 40, p. 101037, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101037.
- [14] M. Hanchane, R. Kessabi, N. Y. Krakauer, A. Sadiki, J. El Kassoui, and I. Aboubi, “Performance Evaluation of TerraClimate Monthly Rainfall Data after Bias Correction in the Fes-Meknes Region (Morocco),” *Climate*, vol. 11, no. 6, p. 120, May 2023, doi: 10.3390/cli11060120.
- [15] “TerraClimate - Laboratoire de climatologie.” Accessed : May 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>
- [16] S. Rachidi, E. H. El Mazoudi, J. El Alami, M. Jadoud, and S. Er-Raki, “Assessment and Comparison of Satellite-Based Rainfall Products: Validation by Hydrological Modeling Using ANN in a Semi-Arid Zone,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 11, Jun. 2023, doi: 10.3390/w15111997.
- [17] A. Najmi *et al.*, “Evaluation of PERSIANN-CCS-CDR, ERA5, and SM2RAIN-ASCAT rainfall products for rainfall and drought assessment in a semi-arid watershed, Morocco,” 2023, doi: 10.2166/wcc.2023.461.
- [18] O. Bennani *et al.*, “Variability of surface water resources and extreme flows under climate change conditions in arid and mediterraneanMediterranean area: Case of Tensift watershed, Morocco,” *Article in Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, vol. 165, no. 4, pp. 165–174, 2016, [Online]. Available : <http://www.innspub.net>
- [19] Boudhar Abdelghani, “Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des oueds du haut atlas de Marrakech - Abdelghani Boudhar.” [19] Boudhar Abdelghani, “Memoire Online - Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des oueds du haut atlas de Marrakech - Abdelghani Boudhar.” Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: https://www.memoireonline.com/04/11/4383/m_Teledetection-du-manteau-neigeux-et-modelisation-de-la-contribution-des-eaux-de-fonte-des-neiges12.html/
- [20] Y. Hajhouji, “Modélisation hydrologique du bassin versant de l’oued Rheraya et sa contribution à la recharge de la nappe du Haouz (bassin du Tensift, Maroc).” [Online]. Available : <http://trema.ucam.ac.ma>
- [21] S. Haida, M. Snoussi, C. Latouche, and J.-L. Probst, “Géodynamique actuelle du bassin versant de l’Oued Tensift (Maroc) : érosion mécanique et bilan des transports solides fluviaux. / Present geodynamic of the Tensift drainage basin (Morocco) : mechanical erosion and fluvial transports of sediments,” *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, vol. 49, no. 1, pp. 7–23, 1996, doi : 10.3406/SGEOL.1996.1933.
- [22] P. Marthelot, “Paul Pascon, Le Haouz de Marrakech.” [Online]. Available : https://www.persee.fr/doc/ahess_0395-2649_1980_num_35_3_282670_t1_0823_0000_001
- [23] Hind Haddani, “Etude de fonctionnement hydrogéologique des bassins versants de Rhéraya, Ourika et Zat (Tensift-Marrakech, Maroc) : hydrochimie isotopique.” 2012.

- [24] SARAANE ASMAA and BENYAHY ROUKAYA, “Etude hydrologique du bassin versant du Tensift et recherche des solutions pour réduire les effets néfastes des crues extrêmes. Marrakech, (Maroc). - PDF Téléchargement Gratuit,” 2018. Accessed : May 30, 2024. [Online]. Available : https://docplayer.fr/139292319-Etude-hydrologique-du-bassin-versant-du-tensift-et-recherche-des-solutions-pour-reduire-les-effets-nefastes-des-crues-extremes-marrakech-maroc.html#google_vignette
- [25] “Comment valider un modèle de prédiction ? - Aspexit.” Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.aspexit.com/comment-valider-un-modele-de-prediction/>
- [26] L. Ait Dhmane *et al.*, “Spatiotemporal Assessment and Correction of Gridded Precipitation Products in North Western Morocco,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/atmos14081239.
- [27] S. Rachidi, E. H. El Mazoudi, J. El Alami, M. Jadoud, and S. Er-Raki, “Assessment and Comparison of Satellite-Based Rainfall Products: Validation by Hydrological Modeling Using ANN in a Semi-Arid Zone,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 11, Jun. 2023, doi: 10.3390/w15111997.