



كلية العلوم
والتقنيات - مراكش

FACULTE DES SCIENCES
ET TECHNIQUES - MARRAKECH

UNIVERSITE CADI AYYAD
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
Département des Sciences de la Terre
Licence Eau et Environnement

Mémoire de fin d'études

Validation des produits satellitaires et de Réanalyses pluviométriques au bassin versant de Bouregreg à Aguibet Ezziar (Maroc)

Réalisée par:

EL KOUARATI DALAL

BELGASMI MAJIDA

Dirigées par :

Mohamed Elmehdi SAIDI

Soutenu le : 10 juin 2024

Devant la commission d'examen composée de

L'Encadrant : Pr. M. E. SAIDI FST Marrakech

L'Examineur : Pr. M. JAFFAL FST Marrakech

Année universitaire

2023-2024

Remerciements

Ce travail n'aurait pu être à bien sans l'aide et les encouragements qui nous ont prodigués de nombreuses personnes auxquelles nous voudrions exprimer nos sincères remerciements.

Je tiens en premier lieu à adresser ma reconnaissance et mes remerciements à mon directeur de mémoire, Monsieur Mohamed Elmehdi Saidi, pour son encadrement et sa disponibilité, ainsi que pour la richesse et la qualité de son enseignement.

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

Nous remercions également monsieur SAIDI Abdelatif pour son soutien et son encouragement.

A tous les enseignants de la filière « Eau et environnement » à la faculté des sciences et techniques.

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

Sommaire

Remerciements	2
Sommaire	3
Liste des tableaux	7
Tables des abréviations	7
INTRODUCTION	8
Chapitre I : Généralités sur le bassin versant de Bouregreg à Aguibet Ezziar .	9
I Situation géographique	9
II Caractéristiques de bassin versant de Bouregreg à Aguibet Ezziar	11
1. <i>Cadre géomorphologique</i>	11
2. <i>Contexte climatique</i>	12
3. <i>Contexte hydrologique</i>	12
4. <i>Contexte géologique</i>	13
Chapitre II : Estimation des précipitationsPar satellite	14
I Les systèmes d’observation au sol	15
II Les systèmes d’observation depuis l’espace	15
1. <i>Principe d’estimation des précipitations par satellite</i>	16
2. <i>CHIRPS</i>	16
III Les modèles de prévision numérique du temps	17
1. <i>ERA5</i>	17
2. <i>ERA5 Land</i>	18
3. <i>TerraClimate</i>	18
Chapitre III : Méthodologie	19
I Présentation des données utilisées	19
II Indices statistiques d’évaluation	19
Chapitre IV : Résultats de traitement	22
I Résultat final du traitement avecle produit CHIRPS	22
1. <i>CHIRPS à AguibetEzziar</i> :.....	23
2. <i>CHIRPS à Lala Chafia</i> :.....	24
3. <i>CHIRPS à TSALAT</i> :	26

II Résultats du traitement avec le produit ERA5.....	29
1. ERA5 PT à AguibetEzziar :	30
2. ERA5 à Lala Chafia :	31
3. ERA5 PT àTsalat:.....	32
III Résultats du traitement avec le produit ERA5 LAND.....	35
1. ERA5 LAND àAguibetEzziar :	36
2. ERA5 LAND à Lala Chafia :.....	37
3. ERA5 LAND à Tsalat :	38
IV Résultats du traitement avec le produit TerraClimate.....	41
1. TerraClimate à Aguibet Ezziar :	41
2. Terra Climate à Lala Chafia.....	43
3. Terra Climate àTsalat	44
A l'échelle mensuelle :	44
V Comparaison des résultats d'évaluation des produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate	47
1. Coefficient de corrélation.....	47
- à l'échelle mensuelle :	47
2. RMSE (Erreur quadratique moyenne)	49
3. BIAIS (%) :	51
CONCLUSION	52
Bibliographie et Webographie	53

Tables des figures

<i>Figure 1: Situation Géographique et Réseau Hydrographique de Bassin versant de Bouregreg à Aguibet Ezziar.</i>	10
<i>Figure 2: Carte des tranches d'altitudes de Bouregreg à Aguibet Ezziar</i>	11
<i>Figure 3: Carte des pentes de Bouregreg à Aguibet Ezziar</i>	13
<i>Figure 4: Systèmes d'estimation de la précipitation</i>	15
<i>Figure 5: Le système opérationnel mondial d'observation par satellites</i>	16
<i>Figure 6: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de CHIRPS à l'échelle mensuelle (1981-2019)</i>	23
<i>Figure 7: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de CHIRPS à l'échelle annuelle (1981-2019)</i>	24
<i>Figure 8: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de CHIRPS à l'échelle mensuelle (1981-2019)</i>	25
<i>Figure 9: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de CHIRPS à l'échelle annuelle (1981-2019)</i>	25
<i>Figure 10: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de CHIRPS à l'échelle mensuelle (1981-2019)</i>	26
<i>Figure 11: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de CHIRPS à l'échelle annuelle (1981-2019)</i>	27
<i>Figure 12: Corrélation entre les données observées et les données CHIRPS pour la station Aguibet Ezziar, Lala Chafia, Tsalat, selon les deux échelles</i>	28
<i>Figure 14: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1981-2019)</i>	30
<i>Figure 15: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de ERA5 à l'échelle annuelle (1981-2019)</i>	31
<i>Figure 16: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1981-2019)</i>	31
<i>Figure 17: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de ERA5 à l'échelle annuelle (1981-2019)</i>	32
<i>Figure 18: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1981-2019)</i>	32
<i>Figure 19: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de ERA5 à l'échelle annuelle (1981-2019)</i>	33
<i>Figure 20: Corrélation entre les données observées et les données ERA5 pour la station Aguibet Ezziar, Lala Chafia, Tsalat, selon les deux échelles</i>	34
<i>Figure 21: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de ERA5 LAND à l'échelle mensuelle (1981-2019)</i>	36
<i>Figure 22: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de ERA5 LAND à l'échelle annuelle (1981-2019)</i>	37

<i>Figure 23: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de ERA5 LAND à l'échelle mensuelle (1981-2019).</i>	37
<i>Figure 24: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de ERA5 LAND à l'échelle annuelle (1981-2019).</i>	38
<i>Figure 25: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de ERA5 LAND à l'échelle mensuelle (1981-2019).</i>	38
<i>Figure 26: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de ERA5 LAND à l'échelle annuelle (1981-2019).</i>	39
<i>Figure 27: Corrélation entre les données observées et les données ERA5 LAND pour la station Aguibet Ezziar, Lala Chafia, Tsalat, selon les deux échelles.</i>	40
<i>Figure 28: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1981-2019).</i>	42
<i>Figure 29: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1981-2019).</i>	42
<i>Figure 30: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1981-2019).</i>	43
<i>Figure 31: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1981-2019).</i>	44
<i>Figure 32: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1981-2019).</i>	45
<i>Figure 33: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1981-2019).</i>	45
<i>Figure 34: Corrélation entre les données observées et les données TerraClimate pour la station Aguibet Ezziar, Lala Chafia, Tsalat, selon les deux échelles.</i>	46
<i>Figure 35: Comparaison de Coefficient de corrélation entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate à l'échelle mensuelle</i>	47
<i>Figure 36: Comparaison de Coefficient de corrélation entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate à l'échelle annuelle</i>	48
<i>Figure 37: Comparaison de RMSE entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et Terra Climate à l'échelle mensuelle</i>	49
<i>Figure 38: Comparaison de RMSE entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate à l'échelle annuelle</i>	50
<i>Figure 39: Comparaison de biais entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et Terra Climate à l'échelle mensuelle et annuelle</i>	51

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Stations pluviométriques.....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 2 : Les indicateurs statistiques utilisés.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 3 : Résultats du traitement des données avec CHIRPS.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 4 : Résultats du traitement des données avec ERA5.....</i>	<i>29</i>
<i>Tableau 5 : Résultats du traitement des données avec ERA5 LAND</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 6 : Résultats du traitement des données avec TerraClimate</i>	<i>41</i>

Tables des abréviations

IR:Infra-rouges

CHIRPS: Climat Hazards center Infrared Précipitation with Station data

MBA :Mohammed ben Abdallah

r: coefficient de corrélation

RMSE : Erreur quadratique moyenne

ME :erreur moyenne

MAE :erreur absolue moyenne

INTRODUCTION

Les précipitations sont un élément crucial de la météorologie et de l'hydrologie, mais leur mesure précise est complexe, notamment en raison de leur variabilité spatio-temporelle importante. L'installation et la maintenance des instruments de mesure, ainsi que la couverture limitée de certaines régions, rendent difficile l'utilisation exclusive des réseaux de pluviomètres. De même, la télédétection par radar météorologique s'avère problématique à des échelles synoptiques, car elle nécessiterait un nombre important de radars, engendrant des coûts opérationnels considérables.

Face à ces défis, l'estimation des précipitations par satellite a gagné un intérêt croissant ces dernières années. Les données satellitaires, avec leur excellente couverture spatiale et leur fréquence d'acquisition élevée, offrent un complément précieux aux méthodes classiques. Elles permettent d'estimer les précipitations cumulées, particulièrement dans les zones dépourvues de moyens conventionnels tels que les pluviomètres ou les radars.

Diverses méthodes d'estimation des précipitations par satellite ont été développées. Les premières utilisaient des observations dans l'infrarouge et le visible, tandis que des méthodes plus récentes exploitent les données hyperfréquences (micro-ondes). Chaque type de donnée satellitaire présente des avantages et des inconvénients en fonction de sa résolution spatiale et de sa fréquence temporelle. Pour l'estimation des précipitations, la fréquence temporelle des images infrarouges (IR), fournies par des satellites géostationnaires toutes les heures ou les demi-heures, est un atout majeur. Cependant, l'information IR est indirecte, puisqu'elle dérive de la température des nuages et donc de leur couverture.

La communauté scientifique internationale a mené plusieurs exercices d'inter-comparaison pour évaluer la performance de ces algorithmes, notamment dans le cadre du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) et du réseau WETNET de distribution des données MO (SSM/I). Malgré ces efforts, il n'a pas été possible d'identifier un algorithme unique optimal. Les résultats varient considérablement selon la région, la période et l'échelle spatio-temporelle analysée. En général, les méthodes IR fournissent de meilleures estimations pour les cumuls mensuels de précipitations, tandis que les méthodes MO offrent une meilleure corrélation entre les estimations et les observations des taux de pluie instantanés.

Les exercices de comparaison soulignent l'intérêt de développer des méthodes combinant la résolution temporelle des données IR et l'information instantanée des images MO. Cette approche permettrait d'améliorer l'estimation des précipitations cumulées à différentes échelles spatio-temporelles.

L'estimation des précipitations par satellite offre une solution prometteuse pour pallier les limitations des méthodes classiques. Diverses techniques basées sur les données infrarouges et micro-ondes ont été développées, avec des performances variables selon les conditions. La combinaison des données IR et MO apparaît comme une voie de recherche prometteuse pour améliorer l'estimation des précipitations à différentes échelles.

Notre étude vise à valider l'estimation des précipitations par satellite dans le bassin versant de Bouregreg. Pour ce faire, nous comparerons les données satellitaires (CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND, TerraClimate) avec les mesures des stations pluviométriques. Cette validation permettra d'identifier le produit satellitaire le plus précis pour l'étude des précipitations dans cette région

Chapitre I : Généralités sur le bassin versant de Bouregreg à Aguibet Ezziar

I Situation géographique

Le Bouregreg est l'un des principaux fleuves du Maroc l'altitude de 1 627 mètres au niveau du lebel Mtourz-gane et de Grou, et se jette dans l'océan Atlantique à l'embouchure séparant les villes de Salé au nord et Rabat au sud, après avoir cheminé vers le littoral atlantique à travers la Meseta (Beaudet, 1969). Son bassin versant est limité au nord-est par le bassin de Sebou, au sud par celui de l'Oum Er Rbia, au sud-ouest par les bassins des oueds côtiers (oued Cherrat, oued N'Fifikh, et oued Malleh), et s'ouvre vers l'ouest sur l'océan Atlantique. Le réseau hydrographique du bassin s'articule autour de deux principales rivières, l'oued Bouregreg et l'oued Grou, qui drainent respectivement une superficie de 4000 km² et de 3600 km². En plus de ces deux cours d'eau majeurs, se rajoutent l'oued Korifla de 1900 km² et l'oued Akrech de 150 km², deux affluents de l'oued Grou. L'oued Bouregreg correspond à la partie nord-est du bassin. Son chenal suit une direction globale rectiligne orientée SE-NW et s'étend sur une longueur de 240 Km. Il prend naissance dans le massif du Moyen Atlas à une altitude de 1627 m environ, (Beaudet 1969). Les 23 derniers kilomètres de cours inférieur du Bouregreg constituent un estuaire. On débit moyen s'élève à 23 m³/s mais peut atteindre 1 500 m³/s en période de crue. Il reçoit, le long de son parcours près de Ras Ennouala à 25 km de l'océan atlantique, l'oued Grou et, à 18 km de l'aval de sa confluence l'oued Akrech caractérisé par un régime variable et un débit très faible.

Depuis 1974, le cours de la rivière de Bouregreg a été modifié par le Barrage de Sidi Mohammed ben Abdallah. A 18 km de l'embouchure, le barrage constitue le principal dispositif existant en matière de mobilisation des eaux de surface du bassin. Il est alimenté par les oueds: Bouregreg, Grou et Korifla. Il assure l'alimentation en eau potable de toute la région de Rabat, de Salé et de Casablanca. Le barrage est d'une hauteur de 97,5m. Depuis sa création, sa capacité en eau était de 446 millions de m³, mais, après les travaux de surélévation du barrage en 2006, celle-ci est passée à 1025 millions de m³. Cette surélévation a également permis de porter la hauteur du barrage de 97,5 à 105 m (d'après le site du ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement). Comme tous les barrages situés en Afrique du nord, le barrage MBA connaît d'énormes problèmes d'envasement qui sont estimés de l'ordre de 2,5 Mm³/an, ce qui correspond à une dégradation spécifique annuelle de 370t/km²/an (Lahlou, 1986). Le bassin contient également sept ban-âges collinaires : Aird, Ait Lamrabtia, Bouknadel, Mahrouk et N'khila à El Khémisset Ain Tour toute, et Tskrame à Khénifra.

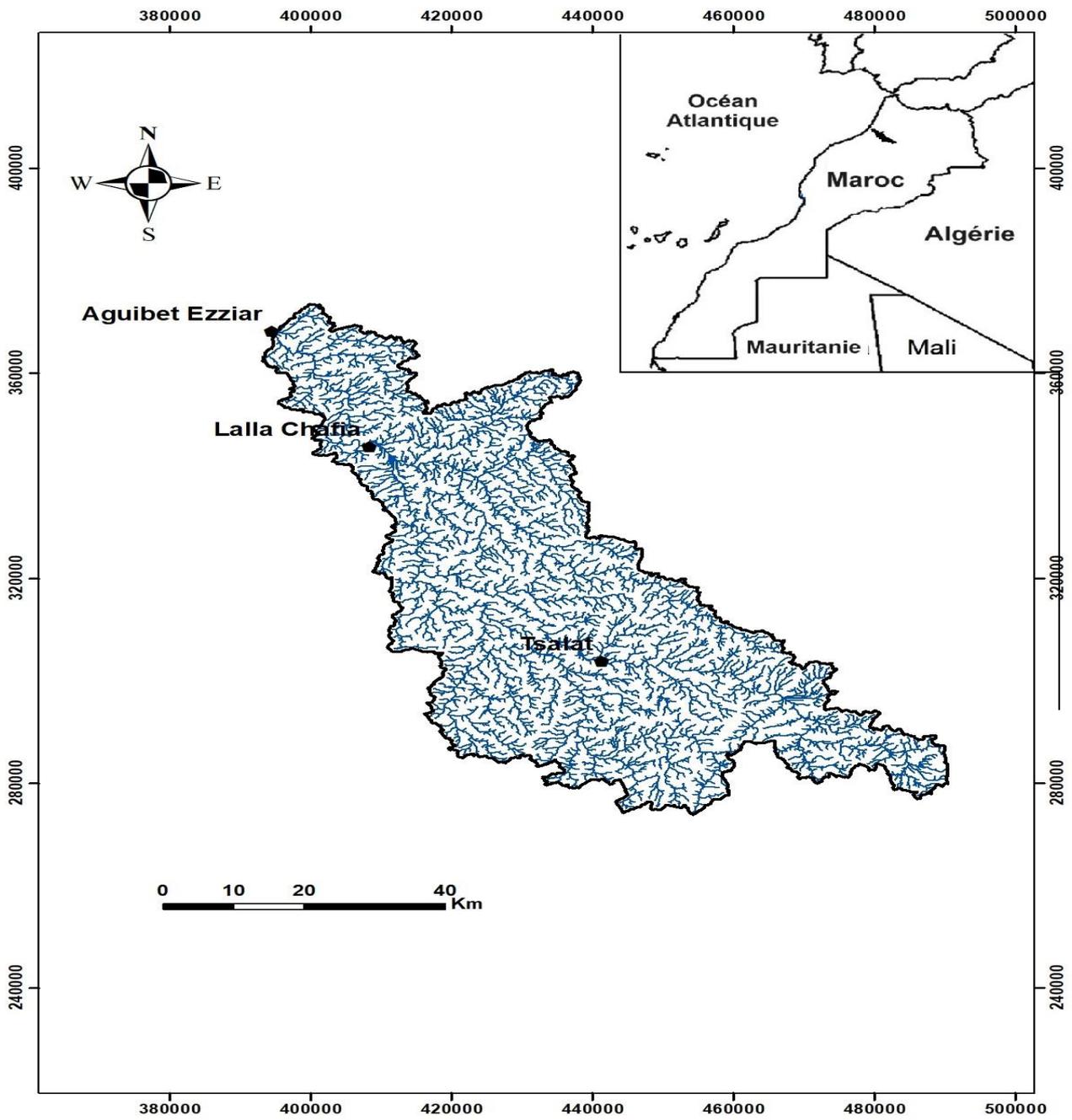


Figure 1: Situation Géographique et Réseau Hydrographique de Bassin versant de Bouregreg à Aguibet Ezziar.

II Caractéristiques de bassin versant de Bouregreg à Aguibet Ezziar

1. Cadre géomorphologique

Sur le plan géomorphologique, le bassin du Bouregreg est composé de deux parties distinctes:

- la zone de montagne à topographie haute, ondulée et à vocation pastorale, qui s'étend sur le haut Bouregreg .
- la région des plateaux des Zaires sous forme de plaines sillonnées par de profondes vallées.

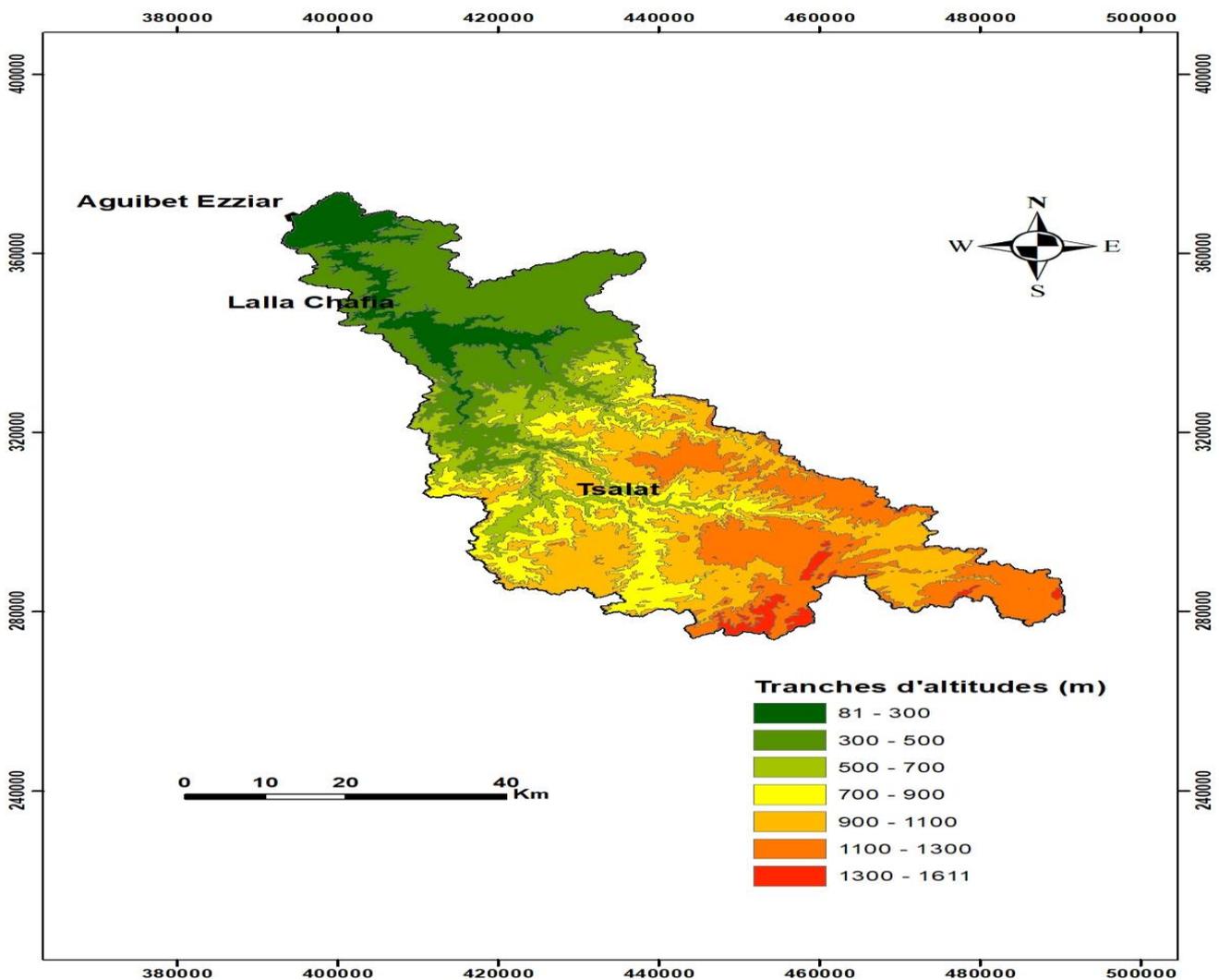


Figure 2: Carte des tranches d'altitudes de Bouregreg à Aguibet Ezziar

2. Contexte climatique

La géographie du bassin se caractérise par trois composantes principales, ayant marqué de leur empreinte le climat : l'altitude, l'extension de la latitude et l'ouverture sur la façade atlantique. L'effet de l'altitude se manifeste au Nord-est où le haut Bouregreg culmine à 1627 m au droit de JbelMtourzgane, par des précipitations fréquentes et intenses, comparativement aux plaines. L'extension de la latitude génère un Nord-est assez tempéré et un Sud-ouest semi-aride, alors que les côtes atlantiques assurent à leur voisinage, plus d'humidification une modération des températures. D'autre part, le climat de la région est influencé par la circulation de deux masses d'air :

- L'air continental venant du Sahara, sec et chaud.
- L'air humide et instable provenant de l'anticyclone des Açores, de direction sud-ouest.

3. Contexte hydrologique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Il représente une des caractéristiques les plus importantes d'un bassin versant. Son évolution est contrôlée par quatre facteurs principaux :

La géologie: par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. Le réseau de drainage n'est habituellement pas le même dans une région où prédominent les roches sédimentaires, par comparaison à un substratum cristallin. La structure de la roche, sa forme, la densité des failles et les plissements agissent sur le comportement du réseau de drainage;

Le climat: le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.

La pente du terrain (figure3) : détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

L'action anthropique : le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

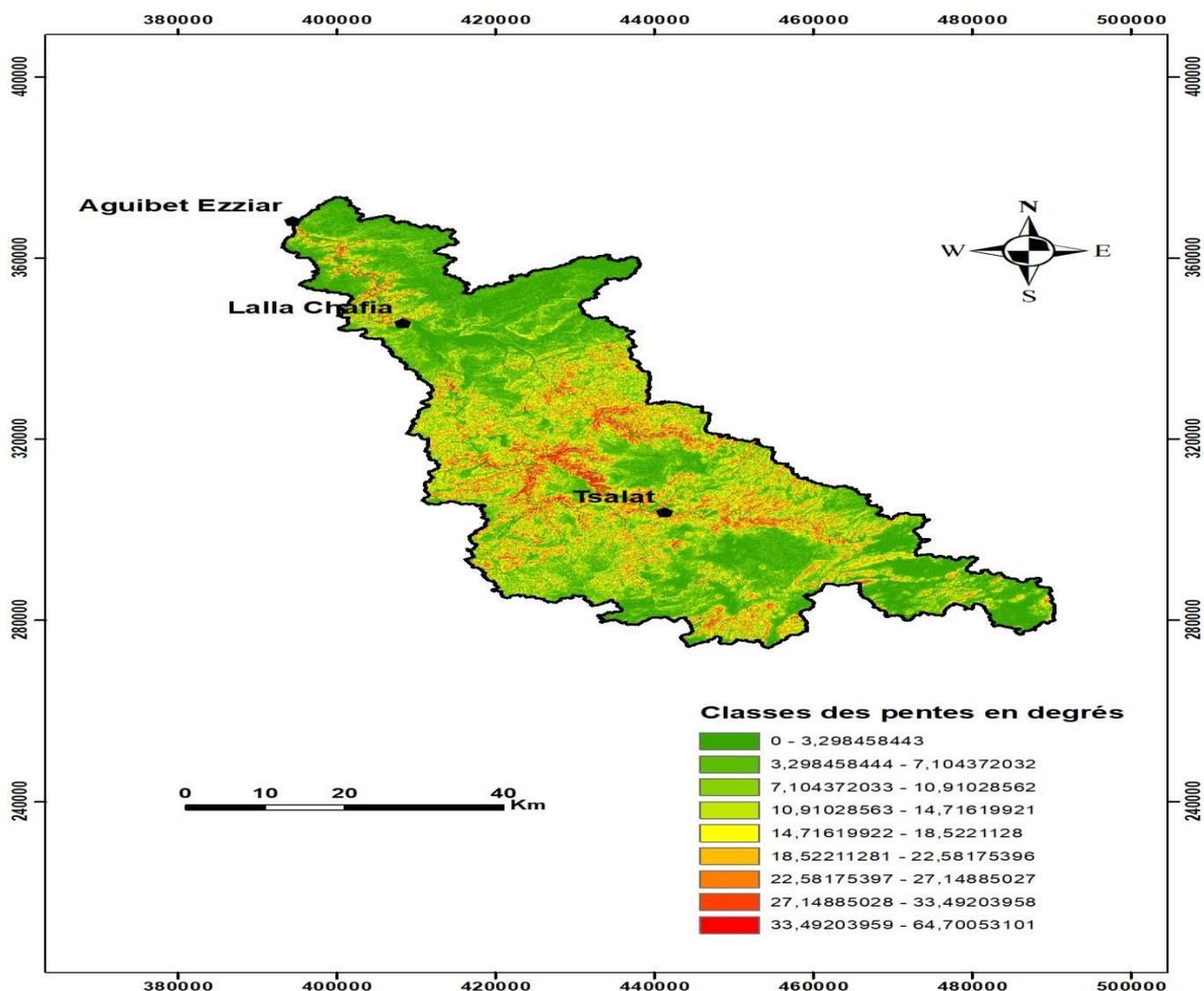


Figure 3: Carte des pentes de Bouregreg à Aguibet Ezziar

4. Contexte géologique

La connaissance de la géologie d'un bassin versant s'avère importante pour cerner l'influence des caractéristiques physiographiques. La géologie du substratum influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface. Dans ce dernier cas, les principales caractéristiques géologiques à considérer sont la lithologie et la structure tectonique du substratum. Le bassin versant du Bouregreg appartient dans son ensemble au massif central marocain. Ce dernier est le plus septentrional et le plus important des bombements du socle hercynien du Maroc atlantique. Le bassin versant du Bouregreg occupe dans sa globalité environ 90% du massif central marocain et il y couvre plusieurs structures géologiques. Ainsi de l'amont vers l'aval du bassin, on distingue :

L'anticlinorium de Kasba Tadla-Azrou : Il constitue la partie haute du bassin versant de Bouregreg. Il s'agit en fait d'une véritable mosaïque d'anticlinaux faillés d'inégale ampleur où affleurent des roches s'étageant du Précambrien au Dévonien et entre lesquels s'étalent les dépressions discordantes et synclinales du Carbonifère (Termier, 1936 ; Bouabdelli, 1989). Les assises continentales du Permien de Khénifra recouvrent en discordance angulaire la partie centre orientale de cet ensemble complexe.

Le synclinorium de Fourhal : C'est une gouttière synclinale qui, du Nord de Boujad au Causse d'Agourai, expose à l'érosion les grès et les schistes viséens, namuriens et westphaliens (Tahiri, 1991). Son flanc oriental est percé par l'intrusion granitique de Ment.

L'anticlinorium Khouribga-Oulmès : Il forme le centre du bassin versant du Bouregreg. Orienté NE-SW Ouest, il porte en hauteur les couches surtout schisteuses et quartzitiques de l'ordovicien et du Silurien, sur lesquelles se plaquent quelques écharpes détritiques et/ou carbonatées du Carbonifère (Piqué, 1979 ; Chakiri, 1991 ; Tahiri, 1991). Plusieurs massifs de granitoïdes s'y mettent en place ; on peut citer celui de Zaër, d'Oulmès et de MoulayBou Azza.

Le synclinorium de Khémisset-Rommani : une épaisse masse synclinale essentiellement constituée par des assises schisto-gréseuses du Carbonifère inférieur (Tournaisien et Viséen) et des argilites et basaltes du Trias. L'ensemble est parfois érodé au passage d'anticlinaux où affleurent les formations du Dévonien (Chakiri, 1991 ; Zahraoui, 1991).

L'anticlinorium de Rabat-Tiflet: C'est une remarquable structure orientée Est-Ouest, où un granite cataclasé et des roches métamorphiques calédoniens affleurent à la faveur d'accidents (Piqué, 1979 ; El Hassani, 1990).

Chapitre II : Estimation des précipitations Par satellite

Les précipitations sont un paramètre météorologique et hydrologique important, mais elles sont difficiles à mesurer, surtout à cause de leur grande variabilité spatio-temporelle. Il existe plusieurs instruments, capteurs et méthodes qui déterminent les quantités de pluies tombées. Parmi ceux-ci on trouve notamment les pluviomètres (mesures directes au sol), les capteurs embarqués dans les satellites (mesures indirectes), les produits de réanalyses (estimation à l'aide des modèles de prévision numérique combinés avec les observations).

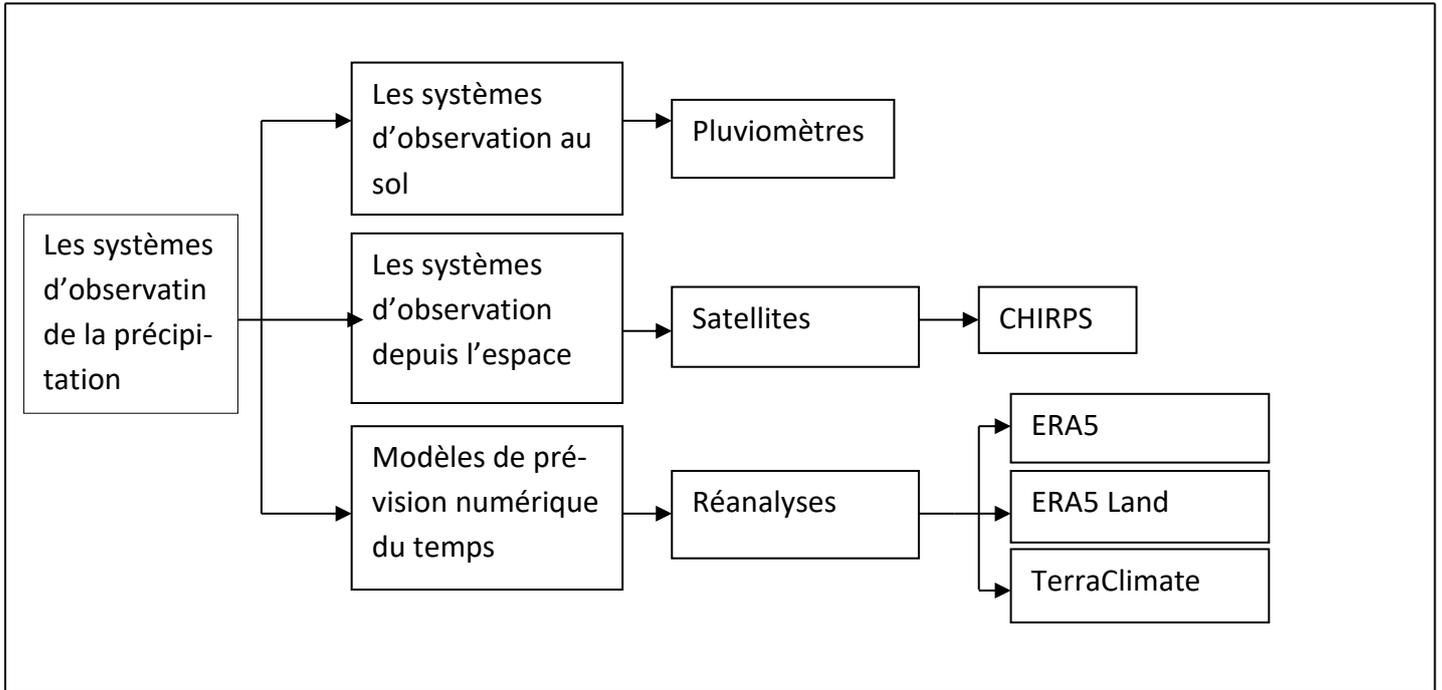


Figure 4: Systèmes d'estimation de la précipitation

I Les systèmes d'observation au sol

Les systèmes d'observation au sol de la pluie sont conçus pour mesurer et surveiller les précipitations. Ils utilisent généralement des capteurs spéciaux, tels que des pluviomètres ou des radars météorologiques, pour collecter des données sur la quantité et l'intensité des précipitations sur une zone donnée. Ces données sont essentielles pour la prévision météorologique, la gestion des ressources en eau et la surveillance des risques d'inondation.

Les pluviomètres peuvent rencontrer plusieurs difficultés lors de la mesure des précipitations. Cela peut inclure des erreurs de mesure dues à des obstructions comme la neige ou le vent, des éclaboussures d'eau, des évaporations rapides, et des erreurs de calibrage ou d'installation. De plus, la localisation du pluviomètre peut influencer les résultats, car certaines zones peuvent recevoir plus ou moins de précipitations que d'autres.

II Les systèmes d'observation depuis l'espace

Les satellites utilisent différentes techniques pour observer la précipitation depuis l'espace. Les satellites météorologiques équipés de radars et de radiomètres sont capables de détecter les précipitations sous forme de pluie, de neige ou de grêle. Ces instruments mesurent la quantité de précipitations, leur intensité et leur distribution spatiale, ce qui permet d'améliorer les prévisions météorologiques et de mieux comprendre les

phénomènes météorologiques extrêmes. En outre, les constellations de satellites fournissent une couverture mondiale, ce qui permet de surveiller les précipitations sur l'ensemble de la planète



Figure 5: Le système opérationnel mondial d'observation par satellites

1. Principe d'estimation des précipitations par satellite

Deux types principaux de mesures sont souvent utilisés : les mesures passives et les mesures actives.

Mesures passives : Ces méthodes utilisent des capteurs qui détectent les signaux émis naturellement par la pluie, tels que les émissions de micro-ondes ou les radiations infrarouges émises par les nuages. Ces capteurs sont généralement à bord de satellites météorologiques en orbite géostationnaire ou polaire.

Mesures actives : Ces méthodes impliquent l'émission d'un signal depuis le satellite vers la surface de la Terre et la mesure de la réponse réfléchie. Par exemple, le radar météorologique utilise des ondes radio pour détecter les précipitations et évaluer leur intensité et leur mouvement.

2. CHIRPS

CHIRPS (ClimateHazards Group InfraredPrecipitationwith Station data) permet d'intégrer les images des précipitations observées depuis l'espace au sein d'une base de données sur les précipitations collectées dans des stations localisées au sol à travers le monde. Les données CHIRPS peuvent être intégrées dans des modèles climatiques, avec d'autres données météorologiques et environnementales, afin de prévoir les conditions futures de l'agriculture et de la végétation. CHIRPS incorpore une imagerie de résolution par satellite de 5 km

avec les données des stations in-situ pour créer une série temporelle des précipitations pour l'analyse de tendance et de suivi de la sécheresse saisonnière.

III Les modèles de prévision numérique du temps

La réanalyse météorologique est une méthode météorologique destinée à réanalyser objectivement les données globales de surface et d'altitude prises sur une période s'étendant sur des décennies pour l'assimilation de données dans les modèles de prévision numérique du temps. Plusieurs centres à travers le monde font ce genre de réanalyse qui vise à uniformiser et corriger les données historiques afin de mieux pouvoir faire la prévision météorologique et l'étude de cas passés.

➤ *Méthode*

Pour produire une réanalyse, ces centres choisissent la version la plus récente de leur modèle de prévision météorologique ainsi que de leur algorithme d'assimilation des données. Ils déterminent ensuite une résolution horizontale et une résolution verticale uniformes qui sera utilisée lors de l'assimilation des données historiques pour toute la période revisitée. De nouvelles sources d'observations qui étaient disponibles mais qui n'étaient pas utilisées au moment de l'analyse antérieure peuvent même être intégrées pour améliorer la représentation du climat. Ce travail est généralement fait pour des périodes où les réseaux d'observations sont variés, denses et fiables sur plusieurs décennies.

➤ *Limites*

Bien que la réanalyse soit destinée à être le « meilleur » estimé des variables météorologiques, elle doit être utilisée en sachant ses biais et défauts. En effet, les instruments sont régulièrement changés et subissent une détérioration avec l'usage. Ainsi, les capteurs d'un satellite météorologique s'améliorent d'une génération à la suivante mais leurs systèmes se dégradent durant leur durée de vie.

De plus, les diverses réanalyses sont issues de modèles de prévisions différents qui n'utilisent pas les mêmes schémas d'assimilations, n'ont pas les mêmes résolutions et sélections d'observations. Les réanalyses utilisent aussi des variables pour lesquelles il n'existe pas d'observations directes ce qui présente potentiellement les plus grandes disparités car elles sont déterminées uniquement par le modèle de prévision. L'une des contraintes des modèles est également de ne pas conserver l'humidité (précipitations, évapotranspiration, Pour toutes ces raisons, il existe parfois des différences importantes entre les différentes bases de données de réanalyses, surtout dans les régions où les observations sont rares.

1. ERA5

ERA5 est la réanalyse atmosphérique du CEPMMT de cinquième génération du climat mondial couvrant la période allant de janvier 1940 à aujourd'hui. ERA5 est produit par le Service Copernicus sur le changement climatique (C3S) du CEPMMT.

ERA5 fournit des estimations horaires d'un grand nombre de variables climatiques atmosphériques, terrestres et océaniques. Les données couvrent la Terre sur une grille de 31 km et résolvent l'atmosphère en utilisant 137

niveaux depuis la surface jusqu'à une hauteur de 80 km. ERA5 comprend des informations sur les incertitudes pour toutes les variables à des résolutions spatiales et temporelles réduites.

2. ERA5 Land

ERA5-Land est un ensemble de données de réanalyse fournissant une vue cohérente de l'évolution des variables foncières sur plusieurs décennies à une résolution améliorée par rapport à ERA5. ERA5-Land a été produit en rejouant la composante terrestre de la réanalyse climatique ERA5 du CEPMMT. La réanalyse combine les données du modèle avec des observations du monde entier dans un ensemble de données globalement complet et cohérent utilisant les lois de la physique.

La réanalyse produit des données qui remontent plusieurs décennies en arrière, fournissant une description précise du climat du passé.

ERA5-Land offre une vision cohérente des cycles de l'eau et de l'énergie au niveau de la surface sur plusieurs décennies. Il contient un enregistrement détaillé à partir de 1950, avec une résolution temporelle d'une heure. La résolution spatiale native de l'ensemble de données de réanalyse ERA5-Land est de 9 km sur une grille gaussienne réduite (TCO1279). Les données du CDS ont été regroupées selon une grille lat-lon régulière de 0,1x0,1 degré.

Les données présentées ici sont un sous-ensemble post-traité de l'ensemble de données complet ERA5-Land. Les moyennes mensuelles ont été pré-calculées pour faciliter de nombreuses applications nécessitant un accès facile et rapide aux données, lorsque les champs sous-mensuels ne sont pas requis.

3. TerraClimate

TerraClimate est un ensemble de données sur le climat mensuel et le bilan hydrique climatique pour les surfaces terrestres mondiales de 1958 à 2019. Ces données fournissent des apports importants pour les études écologiques et hydrologiques à l'échelle mondiale qui nécessite une haute résolution spatiale et des données variables dans le temps. Toutes les données ont une résolution temporelle mensuelle et une résolution spatiale d'environ 4 km (1/24e degré). Les données couvrent la période 1958-2020. Nous prévoyons de mettre à jour ces données périodiquement (annuellement).

Chapitre III : Méthodologie

I Présentation des données utilisées

Les données utilisées dans ce travail sont des données mensuelles et annuelles pour la période de 1981 à 2019.

Ces données comprennent trois stations pluviométriques dispersées dans le bassin versant de bouregreg, dont une station est placée en piémont (Tsalat) et deux stations en plaine (lala chafia et Aguibet Ezziar)

Tableau 1: Stations pluviométriques

Stations	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Emplacement	Données utilisées	Données disponibles	Cours d'eau
AguibetAzziar	33.91	-6.54	81	Plaine	1981-2019	1976 - 2021	Bouregreg
Lala chafia	33.71	-6.39	193	Plaine	1981-2019	1971 - 2021	Bouregreg
Tsalat	33.35	-6.03	687	Piémont	1981-2019	1976 - 2021	Bouregreg

II Indices statistiques d'évaluation

Dans cette étude, nous avons réalisé une comparaison entre les données des trois stations météorologiques (AguibetEzziar, Lala Chafia et tsalat) dans le bassin du Bouregreg et le pixel correspondant à chaque produit satellitaire (CHIRPS, ERA5 Land, ERA5 et Teraclimate). Ceci à différentes altitudes et échelles spatio-temporelles (mensuelles et annuelles).

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

➤ **Coefficient de corrélation 'r' :**

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

➤ **Biais :**

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

➤ **ME (erreur moyenne) :**

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

➤ **MAE (erreur absolue moyenne) :**

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

➤ **RMSE (erreur quadratique moyenne) :**

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

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

Tableau 2 : Les indicateurs statistiques utilisés

Indices statistique	Formule	Colonne1	Valeur optimale
Coefficient de Corrélation	$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (Gi - \bar{G})(Si - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Gi - \bar{G})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (Si - \bar{S})^2}}$	Entre -1 et 1	1
Biais relatif	$Biais = \frac{\sum_{i=1}^N (Si - Gi)}{\sum_{i=1}^N Gi} \times 100$	$-\infty$ et $+\infty$	0
Erreur Moyenne absolue	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N Si - Gi }{\sum_{i=1}^N Gi}$	Entre 0 et $+\infty$	0
Erreur quadratique moyenne	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Si - Gi)^2}$	Entre 0 et $+\infty$	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 \bar{G} est la pluie moyenne observée.

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

Chapitre IV : Résultats de traitement

I Résultat final du traitement avec le produit CHIRPS

Tableau 3: Résultats du traitement des données avec CHIRPS

Stations	Altitude	Emplacement	Echelle	r	ME	MAE	RMSE	Biais (%)
AguibetEzziar	81	Plaine	Mensuelle	0,89	-0,17	12,94	21,18	-0,46
			Annuelle	0,87	-2,05	57,52	71,18	-0,46
Lala Chafia	193	Plaine	Mensuelle	0,90	3,98	12,10	17,48	13,07
			Annuelle	0,91	47,76	63,83	75,46	13,07
Tsalat	687	Piémont	Mensuelle	0,86	4,94	17,08	23,97	13,10
			Annuelle	0,85	59,30	91,99	114,31	13,10

Le tableau (2) présente les résultats du traitement des données observées de trois stations pluviométriques et les données simulées du produit CHIRPS, ces résultats montrent que :

- A l'échelle annuelle, les données observées sont bien corrélées avec les données estimées par CHIRPS avec un coefficient de **corrélacion r** qui atteint 0.91 dans la station Lala Chafia et 0.87 dans la station AguibetEzziar. Cependant, la valeur minimale de ce coefficient atteint une valeur de 0.85 dans la station Tsalat.

-A l'échelle mensuelle, les données observées sont bien estimées par le produit d'où la valeur maximale du coefficient de **corrélacion r** est 0.9 pour la station Lala Chafia. Tandis que la valeur de ce coefficient est d'environ 0.89 pour la station AguibetEzziar et 0.86 pour Tsalat.

Le paramètre RMSE présente des valeurs plus grandes dans les régions montagneuses par rapport à la plaine.

- A l'échelle annuelle, ce paramètre atteint 18.3 dans la station Tsalat , 12.08 à Lala chafia et 11.4 pour AguibetEzziar.

-A l'échelle mensuelle, cet indicateur présente moins d'erreurs que l'autre échelle qui varient entre [0.81-1.11mm/mois].

- Dans les deux échelles, la station AguibetEzziar est marquée par un biais proche à la valeur parfaite (0%) avec une valeur de -0.46% alors que les restes stations sont caractérisées par une valeur d'environ 13%.

1. CHIRPS à AguibetEzziar :

À l'échelle mensuelle, la figure 6 montre la performance du produit de 1981 à 2019, représentant une légère sous- estimation de tous les événements pluvieux. En outre, une surestimation est remarquable pour les précipitations d'une hauteur comprise entre 50 mm et 300 mm.

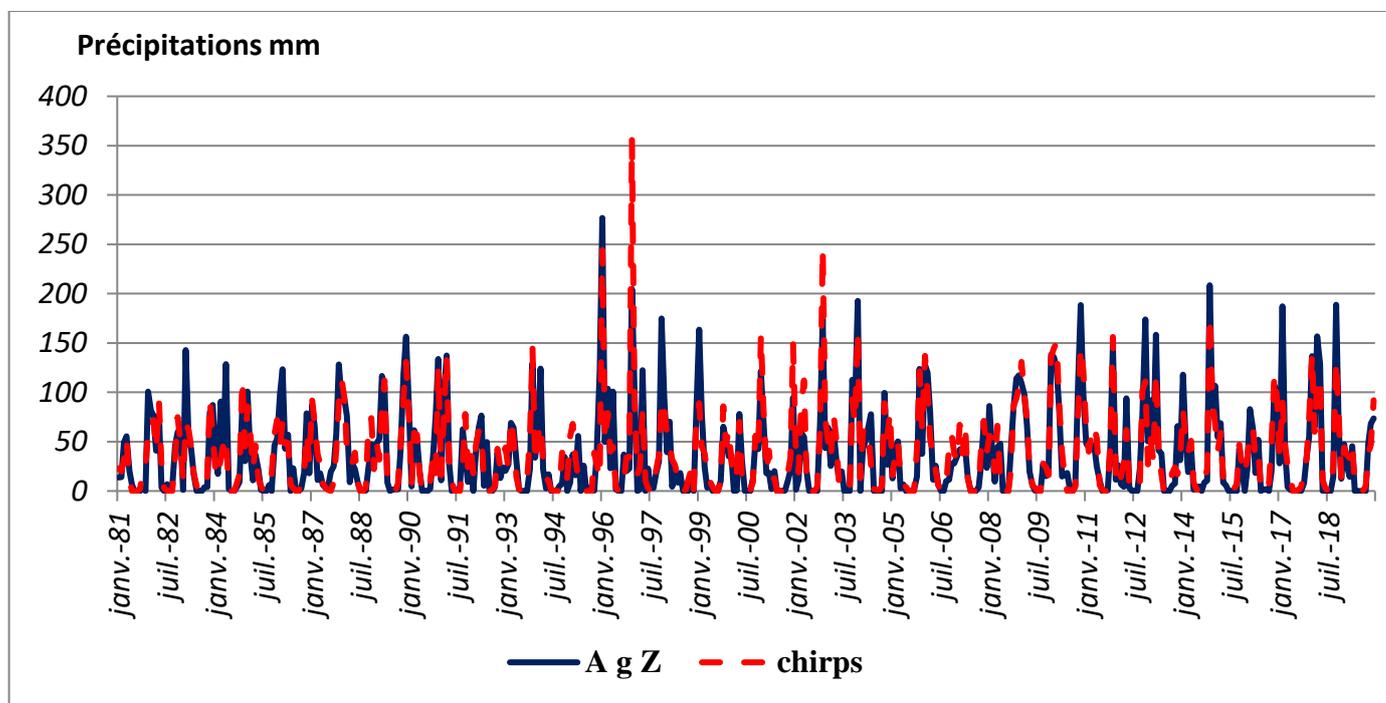


Figure 6: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de CHIRPS à l'échelle mensuelle (1981-2019)

A l'échelle annuelle, la figure 7 montre que Les précipitations sont marquées par une sous-estimation légère avec un biais égale -0.46%.

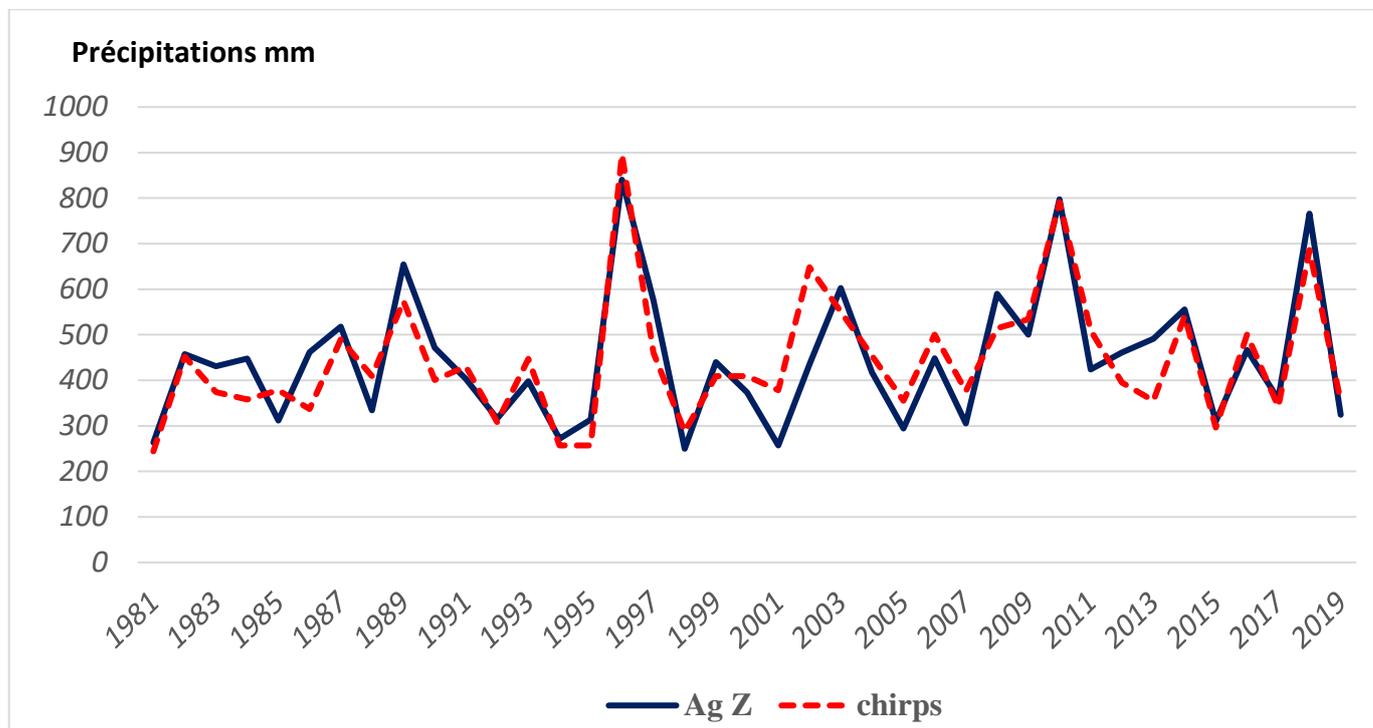


Figure 7: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de CHIRPS à l'échelle annuelle (1981-2019)

2. CHIRPS à Lala Chafia :

Les variations mensuelles (figure 8) révèlent une tendance de surestimation de tous les événements pluviaux à l'exception de la période s'étendant de janvier 1981 à janvier 1990 qui était représenté par une légère sous-estimation.

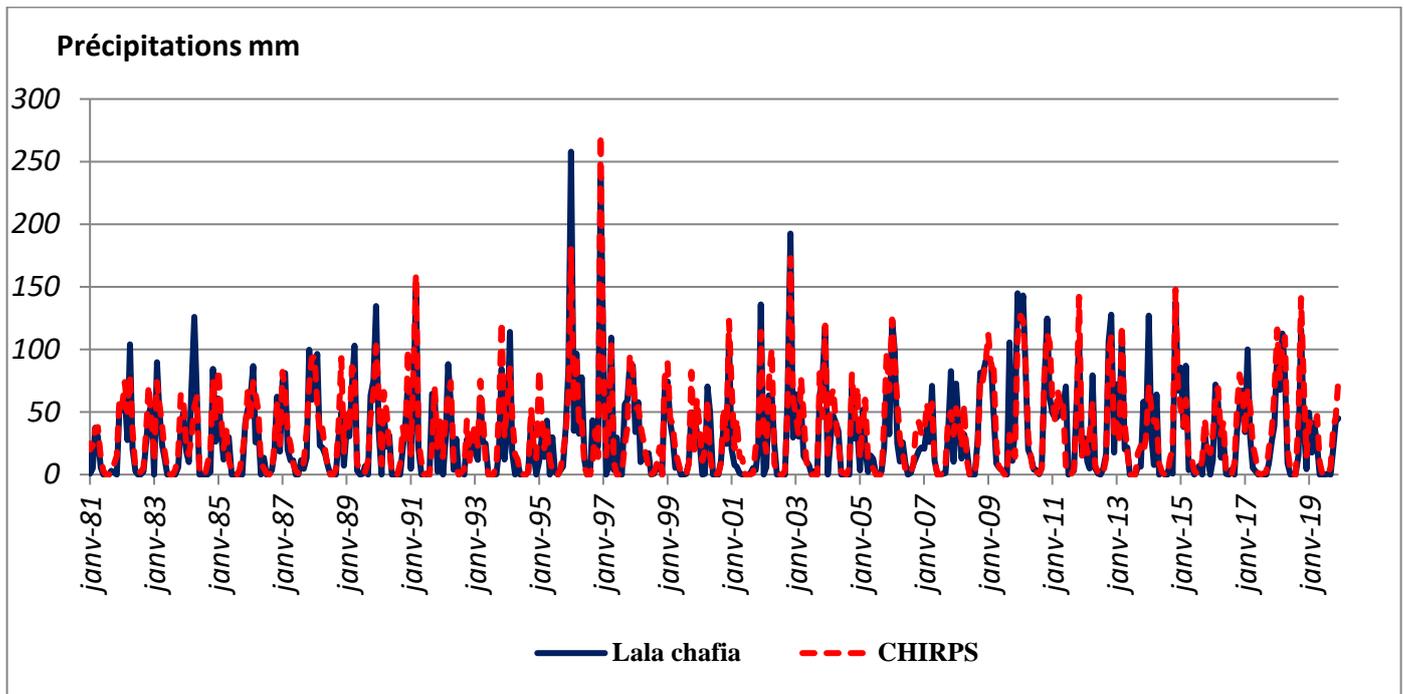


Figure 8: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de CHIRPS à l'échelle mensuelle (1981-2019)

Annuellement (figure 9), le produit démontre une surestimation des tous les évènements pluviaux d'un biais de 13.07 % Sauf que les précipitations durant l'année 1989/1996 sont marquées par une sous-estimation légère.

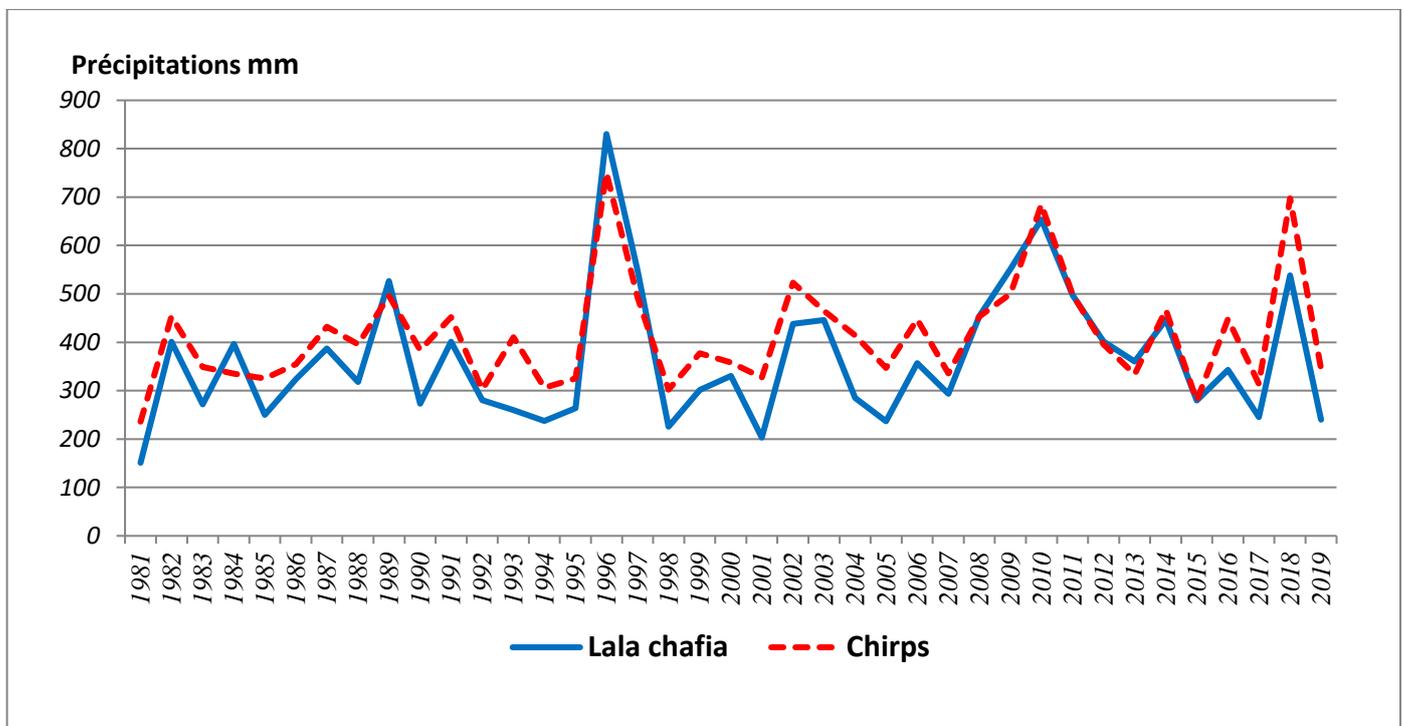


Figure 9: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de CHIRPS à l'échelle annuelle (1981-2019)

3. CHIRPS à TSALAT :

À l'échelle mensuelle (figure 10), le produit tend à surestimer tous les événements pluviaux, sauf que dans les périodes des hautes précipitations ou on remarquent une sous-estimation.

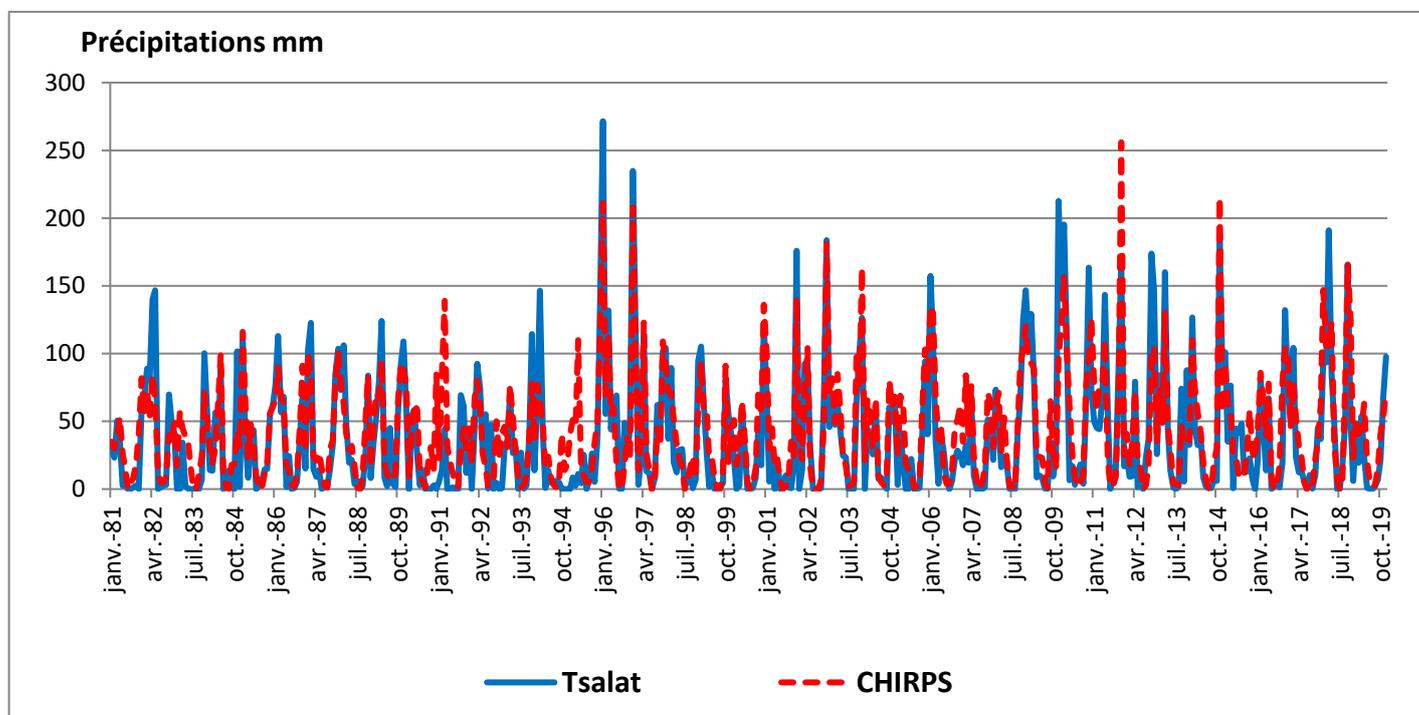


Figure 10: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de CHIRPS à l'échelle mensuelle (1981-2019).

Sur une base annuelle (figure 11), le produit montre une surestimation générale de tous les événements pluvieux avec un biais de 13.10 %, à l'exception de quelle que années (1982/1989/1996/2009/2012) qui sont marquées par une sous-estimation.

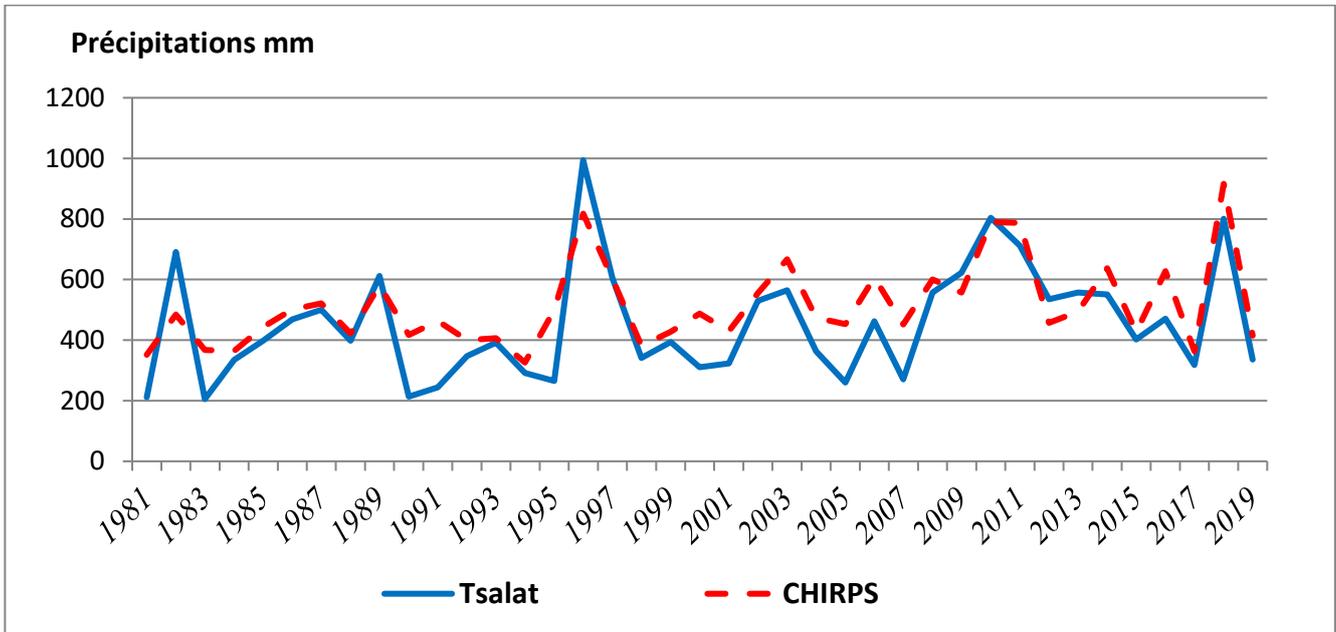


Figure 11: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de CHIRPS à l'échelle annuelle (1981-2019).

La performance du produit CHIRPS dans les trois stations est illustrée par les droites de régression (figure 12) qui démontrent que le produit est influencé par le facteur d'altitude.

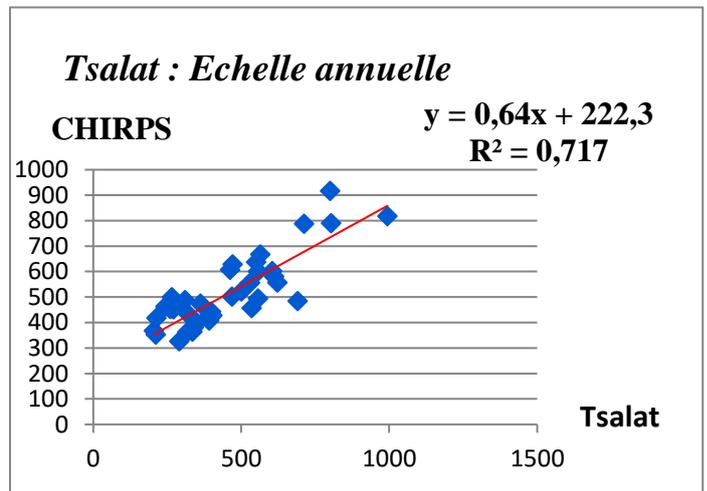
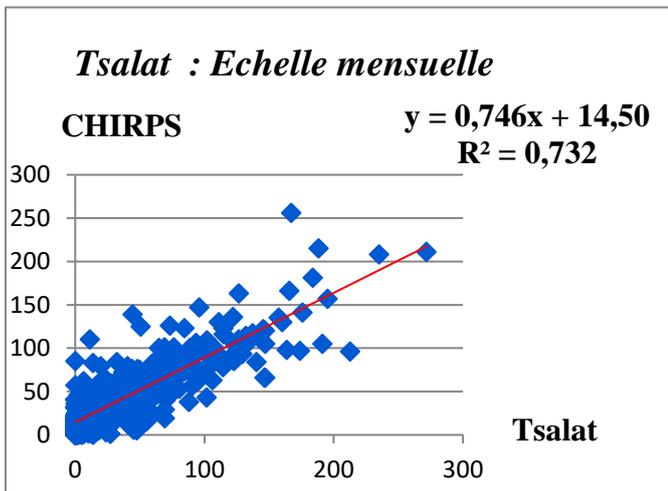
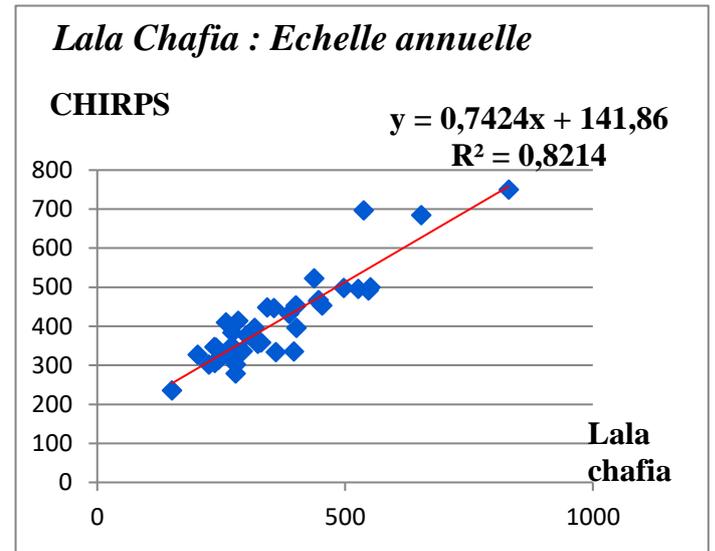
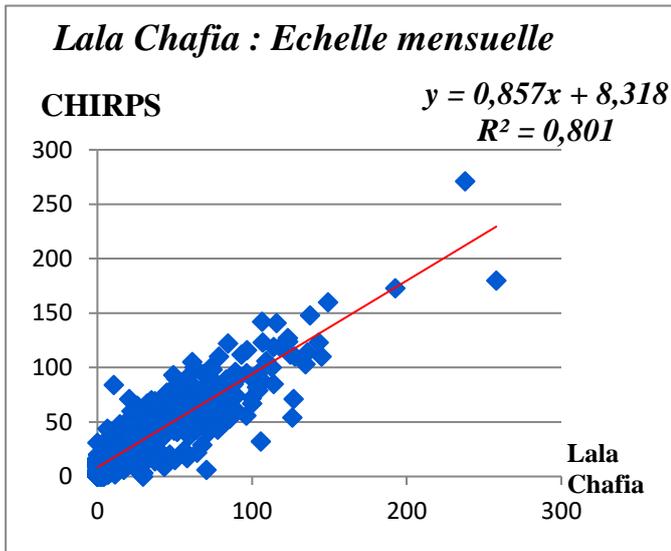
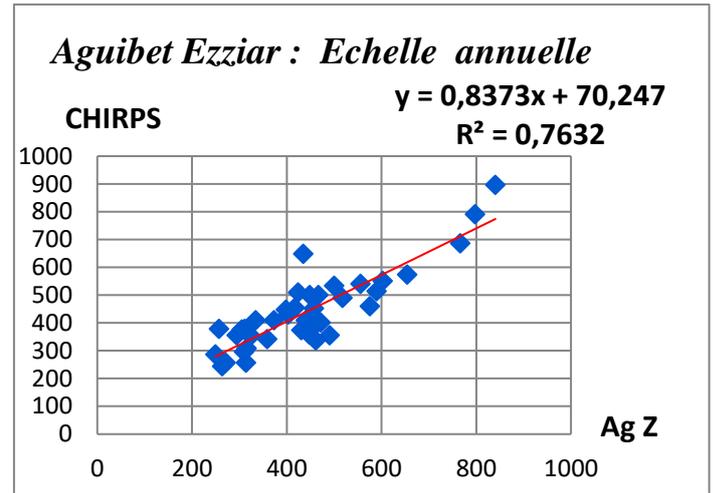
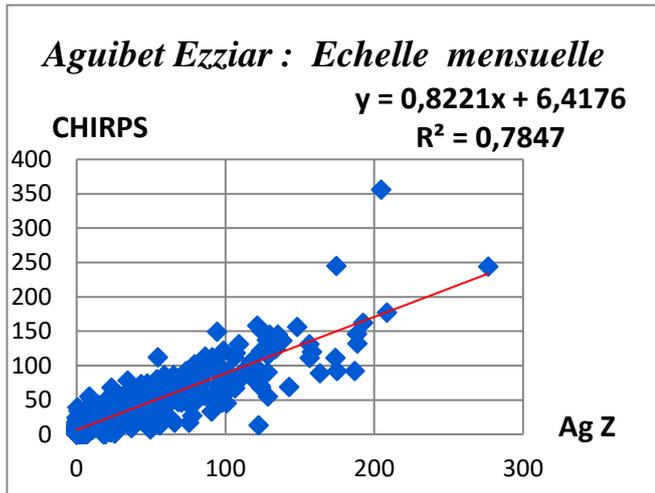


Figure 12: Corrélation entre les données observées et les données CHIRPS pour la station Aguibet Ezziar, Lala Chafia, Tsalat, selon les deux échelles

II Résultats du traitement avec le produit ERA5

Tableau 4: Résultats du traitement des données avec ERA5

Stations	Altitude	Emplacement	Echelle	r	ME	MAE	RMSE	BIAIS %
AguibetEzziar	81	Plaine	Mensuelle	0,91	1,17	11,57	18,35	3,17
			Annuelle	0,90	14,13	52,83	63,77	3,17
Lala chafia	193	Plaine	Mensuelle	0,82	4,47	13,12	21,11	14,69
			Annuelle	0,86	51,35	111,91	134,52	14,69
Tsalat	687	Piémont	Mensuelle	0,88	7,87	15,81	22,44	20,86
			Annuelle	0,86	94,47	107,99	132	20,86

Le tableau (4) présente les résultats du traitement des données observées de 3 stations pluviométriques et les données simulées du produit ERA5, ces résultats montrent que

- A l'échelle annuelle, les données observées sont bien corrélées avec les données estimées par ERA5 avec un coefficient de **corrélacion r** qui atteint 0.90 dans la station AguibetEzziar. Cependant, la valeur minimale de ce coefficient atteint une valeur de 0.86 dans les deux stations Tsalat et Lala Chafia

-A l'échelle mensuelle, les données observées sont bien estimées par le produit d'où la valeur maximale du coefficient de **corrélacion r** est 0.91 pour la station AguibetAzziar Tandis que la valeur de ce coefficient est d'environ 0.88 pour Tsalat et 0.82 pour Lala Chafia.

Le paramètre RMSE présente des valeurs plus grandes dans les régions montagneuses par rapport à la plaine.

- A l'échelle annuelle, ce paramètre atteint 21.54 dans la station Lala Chafia, 21.13 à Tsalat et 10.21 pour AguibetEzziar.

-A l'échelle mensuelle, cet indicateur présente moins d'erreurs que l'autre échelle qui varient entre [0.84-1.03 mm/mois].

- Dans les deux échelles, la station AguibetEzziarest marquée par un biais proche à la valeur parfaite (0%) avec une valeur de 3.17 % qui va être augmenter dans les autres stations (Tsalat 20.86%, Lala Chafia 14.69 %).

1. ERA5 PT à AguibetEzziar :

Mensuellement (figure13), les précipitations intenses ($P > 100\text{mm/mois}$) sont sous-estimées par le produit ERA5 PT. En revanche, les pluies légères ($P < 100\text{mm/mois}$) sont surestimées.

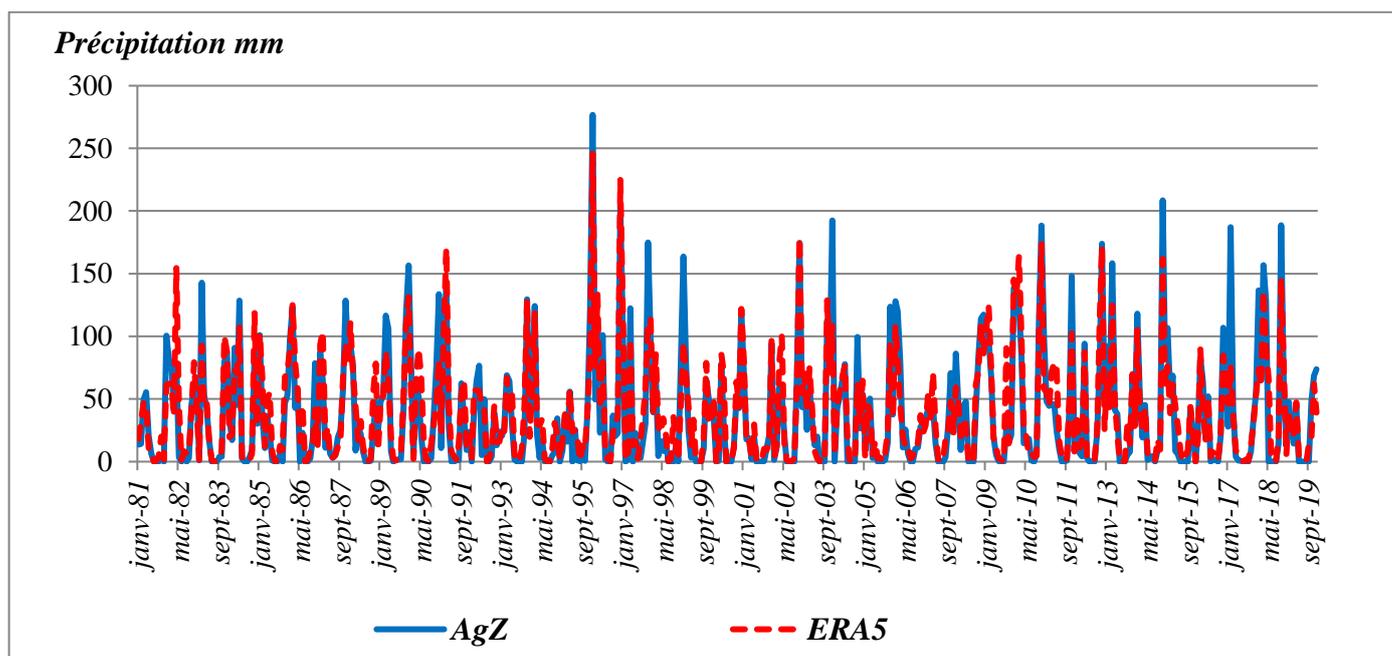


Figure 13: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1981-2019).

Sur la base annuelle (figure 14), le produit ERA5 montre une tendance à surestimer tous les événements pluviaux avec un biais de 3.17 %, à l'exception de quelle que années qui sont marquées par une sous-estimation.

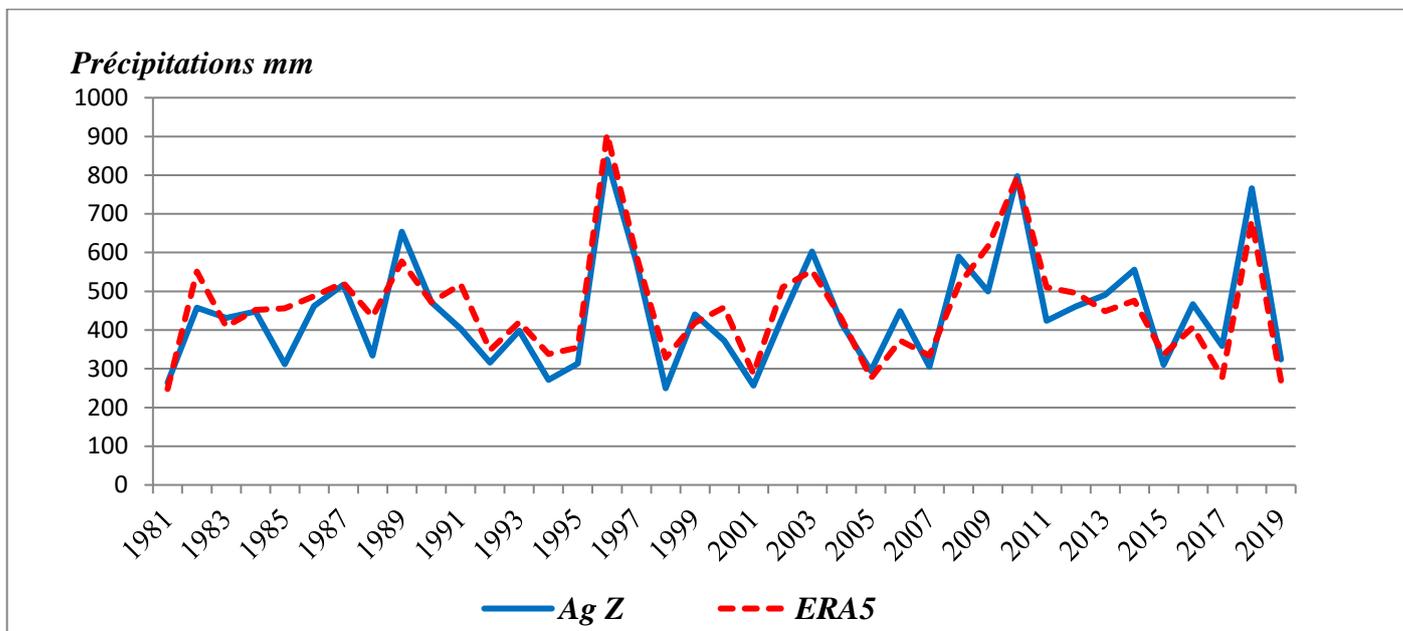


Figure 14: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de ERA5 à l'échelle annuelle (1981-2019)

2. ERA5 à Lala Chafia :

À l'échelle mensuelle (figure 15), le produit tend à surestimer tous les événements pluvieux, sauf que dans les périodes des hautes précipitations ($P > 100\text{mm/mois}$) ou on remarque une sous-estimation

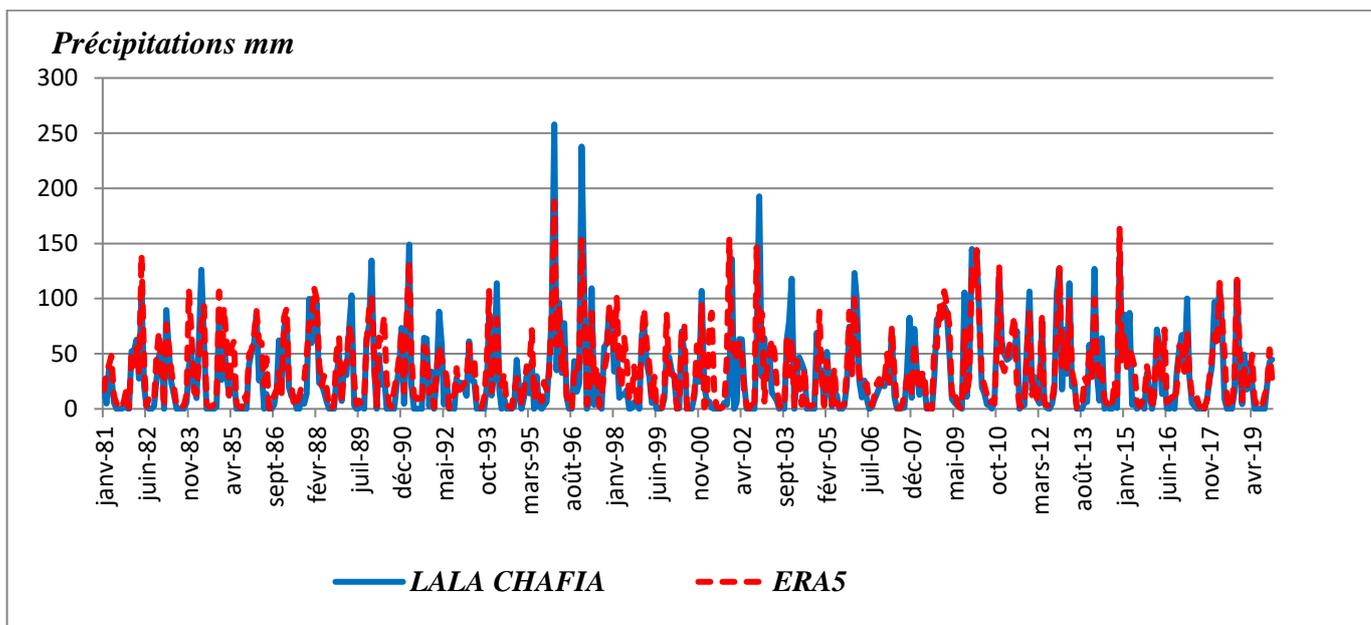


Figure 15: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1981-2019).

Annuellement (figure 16), le produit démontre une surestimation des tous les évènements pluviaux d'un biais de 13.07 % Sauf que les précipitations durant l'année 1989/1996 sont marquées par une sous-estimation légère.

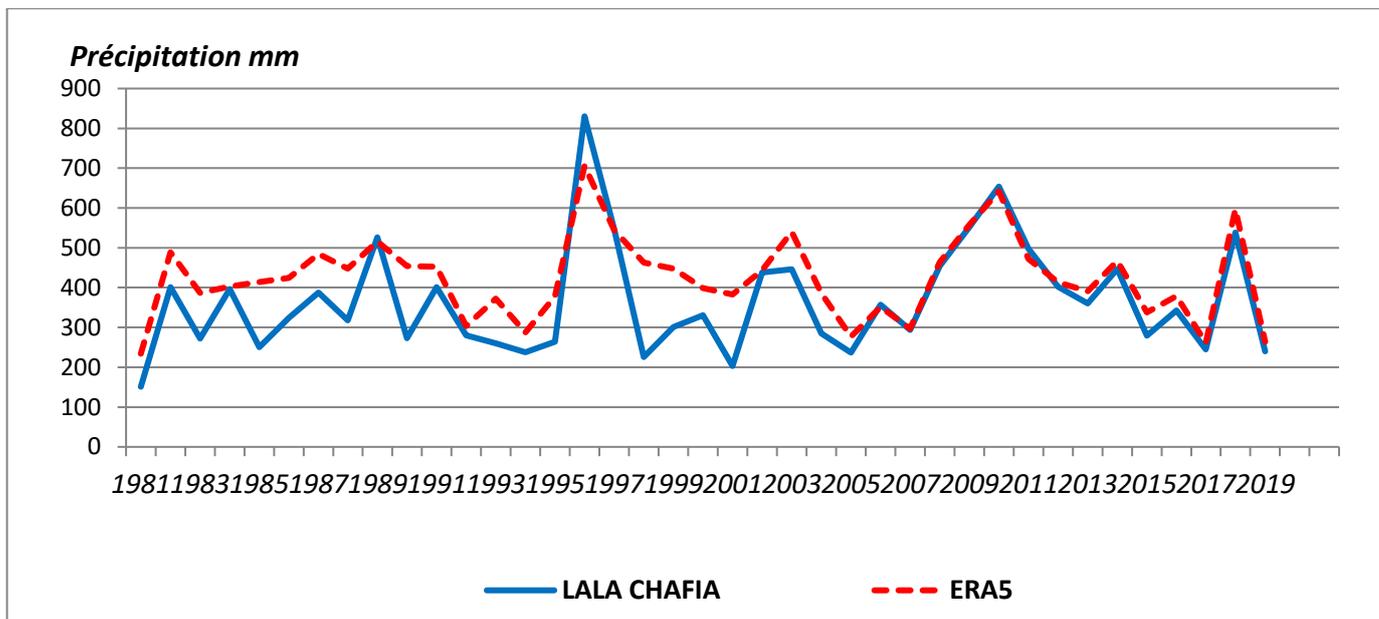


Figure 16: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de ERA5 à l'échelle annuelle (1981-2019)

3. ERA5 PT àTsalat:

A l'échelle mensuelle (figure 17), les faibles pluies sont surestimées moyennement ($P < 100\text{mm/mois}$). Cependant, les évènements pluvieux de hauteurs comprises entre 100 mm et 270 mm ont été sous-estimés par ce produit.

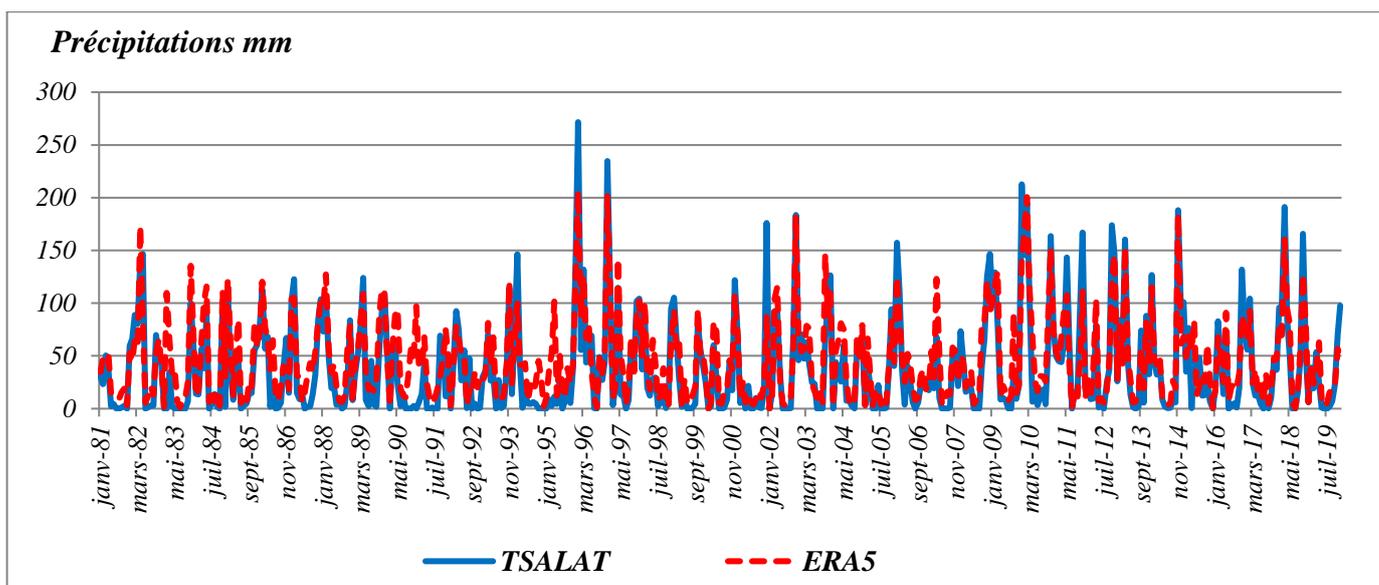


Figure 17: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de ERA5 à l'échelle mensuelle (1981-2019).

Les résultats annuels dans cette station présentent que le produit a une tendance moyenne à surestimer les événements pluviaux avec un biais de 20.86 %, en excluant les trois années suivantes : 1982, 1996, 2001 qui montrent une légère sous-estimation.

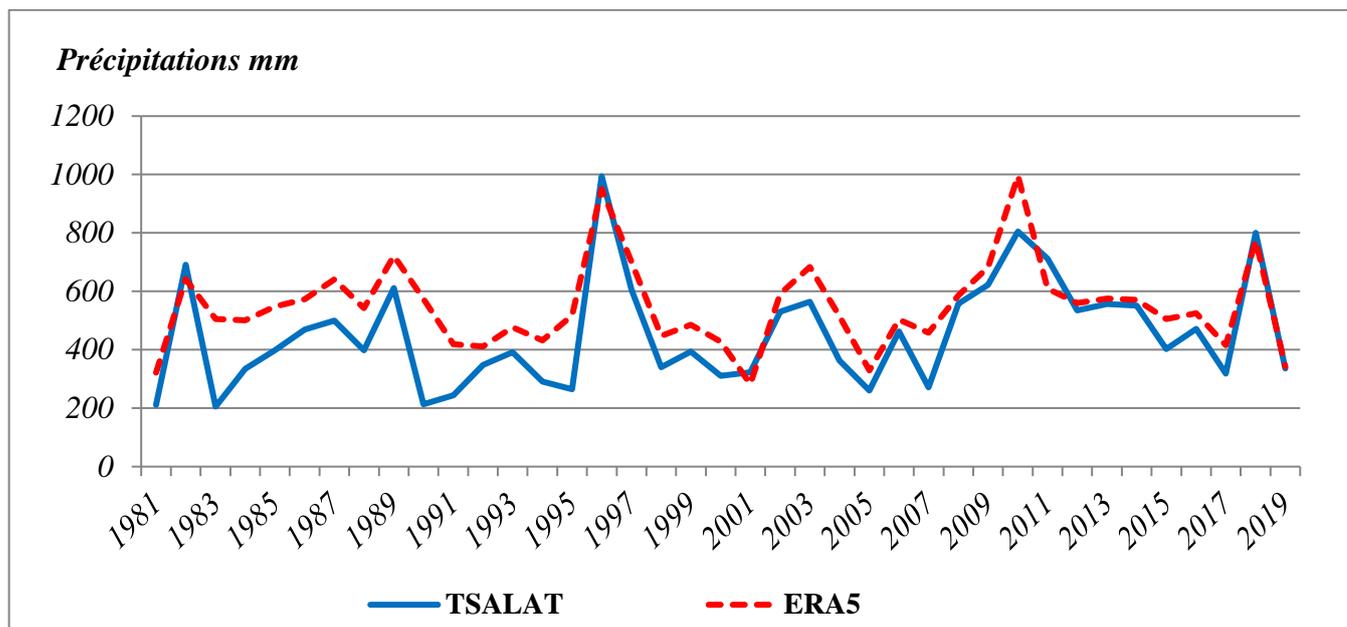


Figure 18: Variation des données observées de la station Tsalatet les données de ERA5 l'échelle annuelle (1981-2019).

La performance du produit ERA5 dans les trois stations est illustrée par les droites de régression (figure 19) qui démontrent que le produit est influencé par le facteur d'altitude.

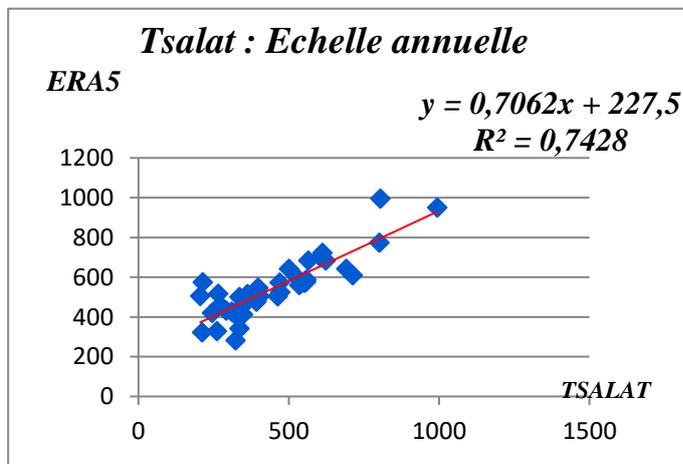
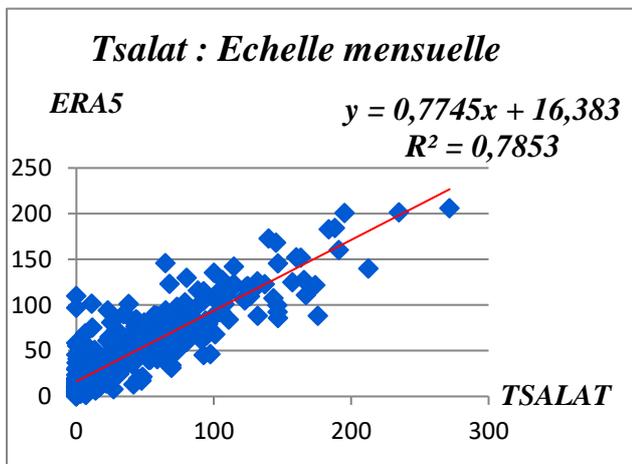
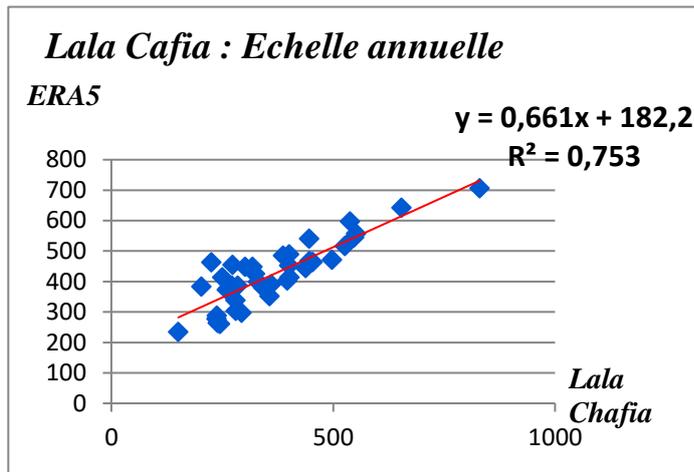
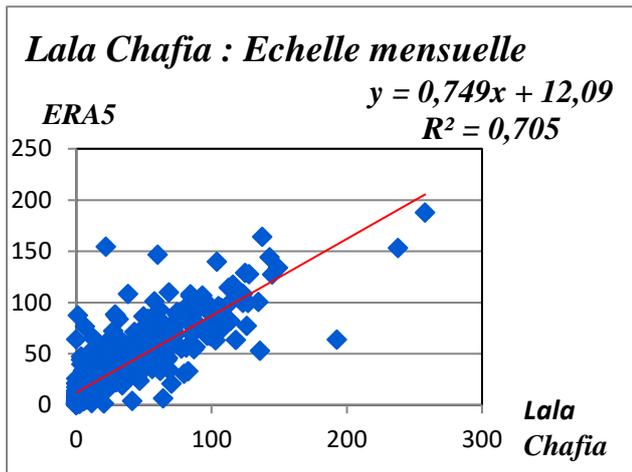
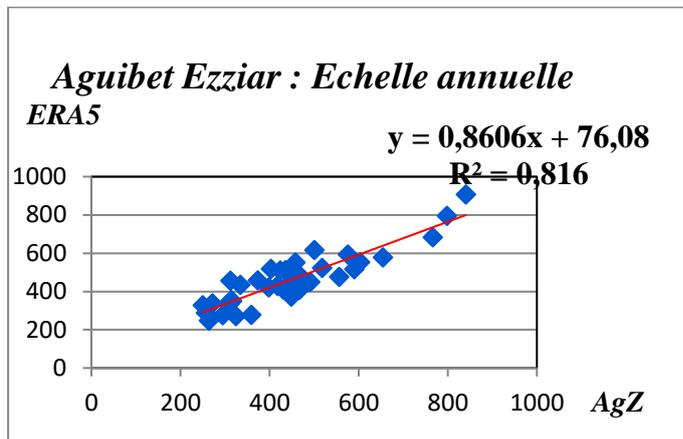
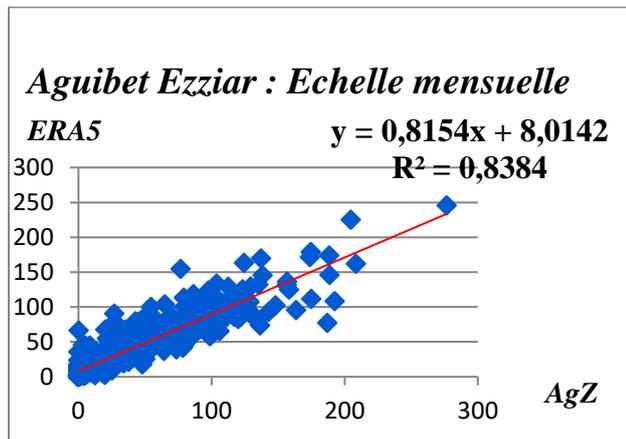


Figure 19: Corrélation entre les données observées et les données ERA5 pour la station Aguibet Ezziar, Lala Chafia, Tsalat, selon les deux échelles.

III Résultats du traitement avec le produit ERA5 LAND

Tableau 3: Résultats du traitement des données avec ERA5 LAND

stations	Altitude	Emplacement	Echelle	r	ME	MAE	RMSE	Biais (%)
AguibetEzziar	81	Plaine	Mensuelle	0,92	0,99	11,25	17,60	2,67
			Annuelle	0,91	11,87	50,90	60,96	2,67
Lala Chafia	193	Plaine	Mensuelle	0,92	5,75	11,13	16,09	18,90
			Annuelle	0,93	69,05	71,33	85,28	18,90
Tsalat	687	Piémont	Mensuelle	0,88	11,90	17,56	25,08	31,54
			Annuelle	0,85	142,83	145,31	171,36	31,54

Le tableau (5) présente les résultats du traitement des données observées de 3 stations pluviométriques et les données simulées du produit ERA5 LAND, ces résultats montrent que

- A l'échelle annuelle, les données observées sont bien corrélées avec les données estimées par ERA5 LAND avec un coefficient de **corrélacion r** qui atteint 0.93à Lala Chafia, 0.91 pour AguibetEzziar et 0.85 à Tsalat.

A l'échelle mensuelle, les données observées sont bien estimées par le produit d'où la valeur maximale du coefficient de **corrélacion r** est 0.92 pour les deux stations suivantes ;AguibetAzziar et Lala Chafia .Tandis que la valeur du ce coefficient est d'environ 0.85 pourTsalat.

Le paramètre RMSE présente des valeurs plus grandes dans les régions montagneuses par apport à la plaine.

- A l'échelle annuelle, ce paramètre atteint 27.44 dans la stationTsalat, 13.66 pour Lala Chafia et 9.76 à AguibetEzziar.

-A l'échelle mensuelle, cet indicateur présente moins d'erreurs que l'autre échelle qui varient entre [0.74-1.16mm/mois].

- Dans les deux échelles, la station AguibetEzziar est marquée par **un biais** proche à la valeur parfaite (0%) avec une valeur de 2.67 % qui va être augmenter du la plaine vers le piémont dans les deux autres stations (Tsalat 31.54 %, Lala Chafia 18.90 %).

1. ERA5 LAND à AguibetEzziar :

Le produit ERA5 LAND surestime mensuellement (figure20) les précipitations légères ($P < 100\text{mm/mois}$) et sous-estime les précipitations moyennes et intenses ($P > 100\text{mm/mois}$)

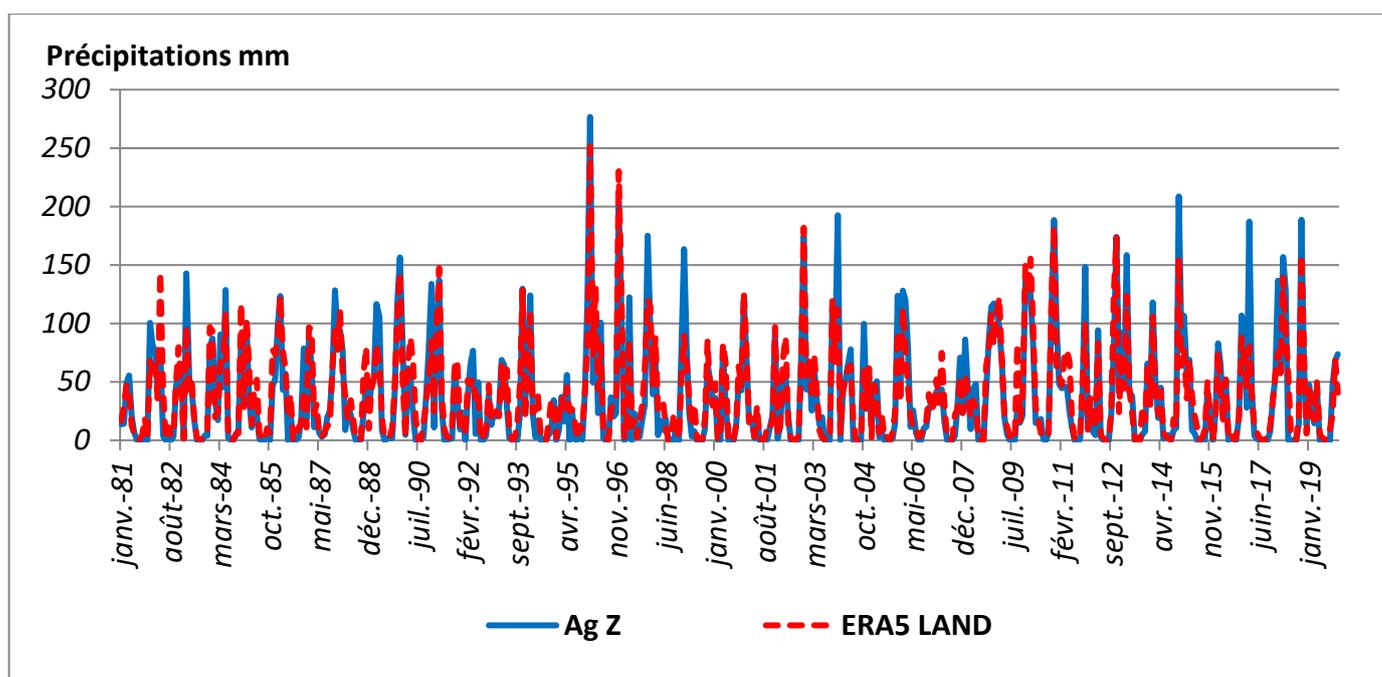


Figure 20: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de ERA5 LAND à l'échelle mensuelle (1981-2019).

Au fil des années (figure 21), une tendance à la surestimation générale des précipitations est observée d'un biais égal 2.67 %.

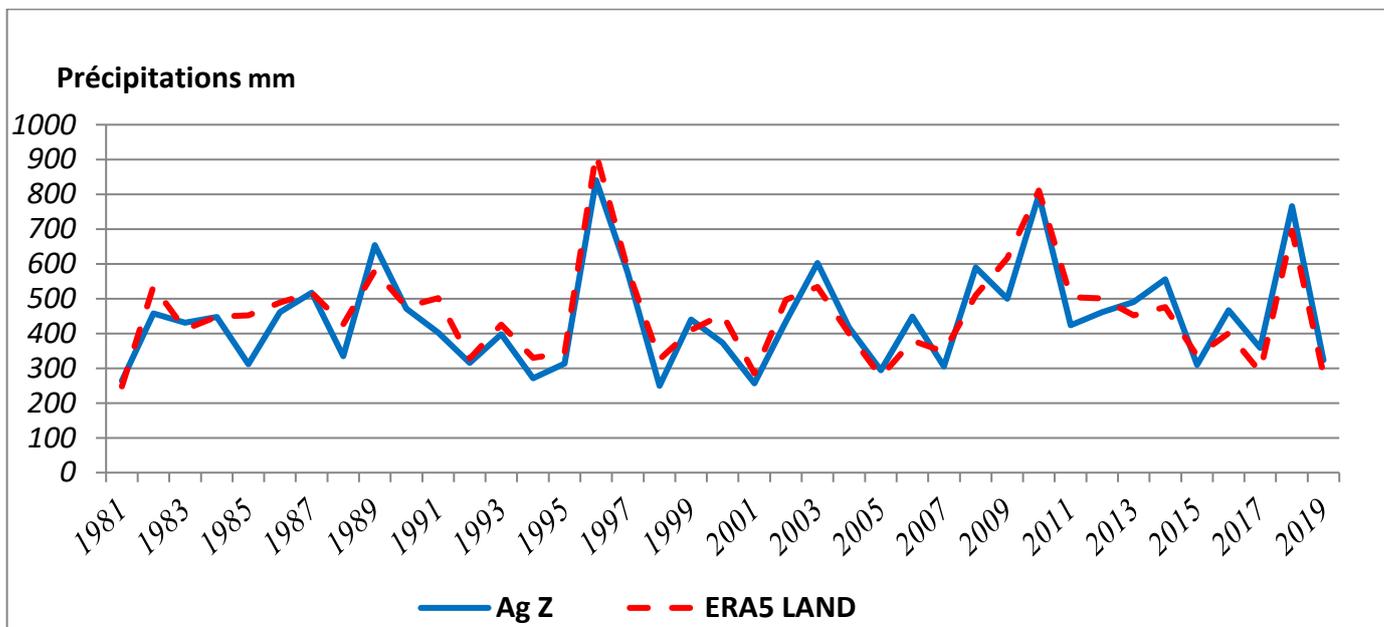


Figure 21: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de ERA5 LAND à l'échelle annuelle (1981-2019).

2. ERA5 LAND à Lala Chafia :

La performance de ce produit est représentée par une surestimation moyenne dans les deux échelles, mensuelle et annuelle avec un biais de 18.90 %.

A l'échelle mensuelle :

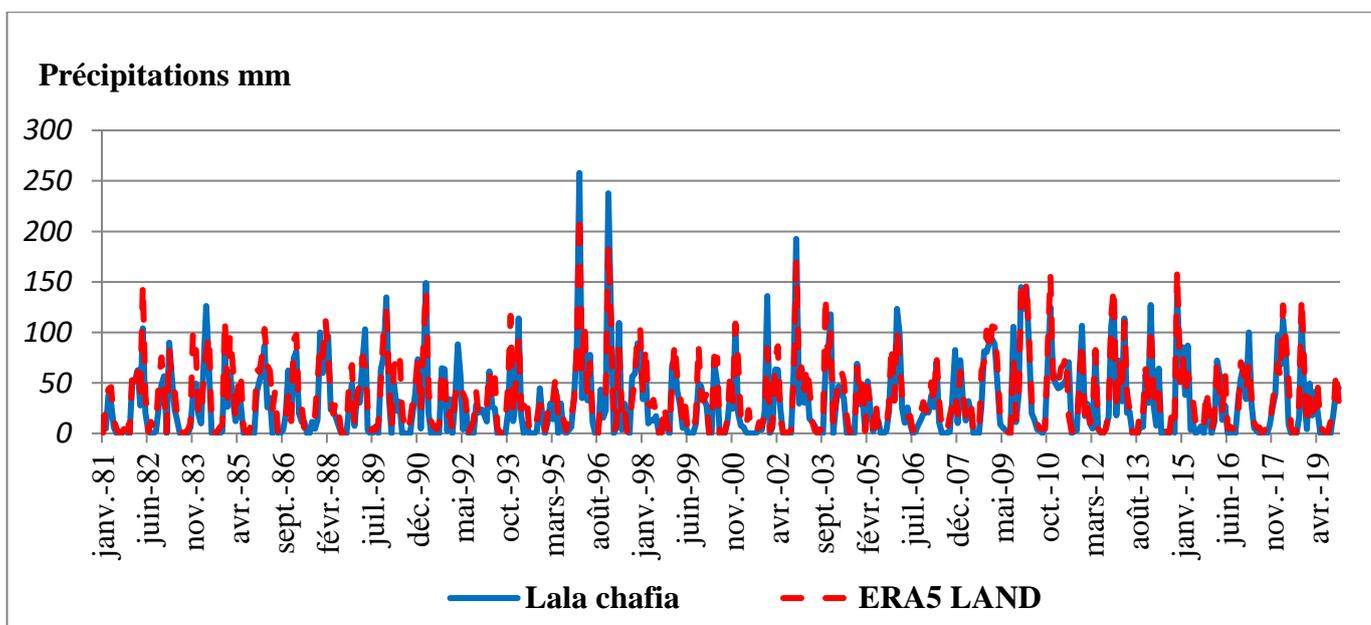


Figure 22: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de ERA5 LAND à l'échelle mensuelle (1981-2019).

A L'échelle annuelle :

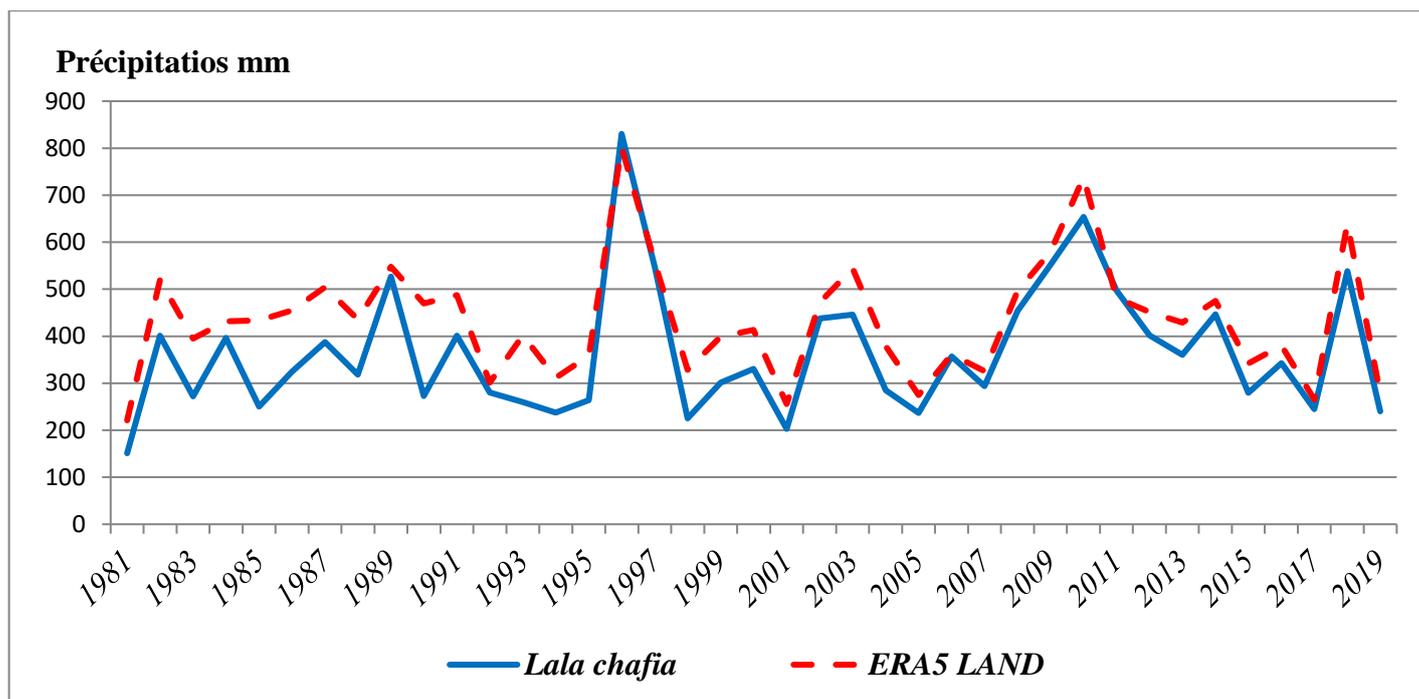


Figure 23: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de ERA5 LAND à l'échelle annuelle (1981-2019).

3. ERA5 LAND à Tsalat :

Les variations mensuelles et annuelles (figure 24 et 25) révèlent une tendance de surestimation pour les événements avec un biais d'une valeur de 31.54 %.

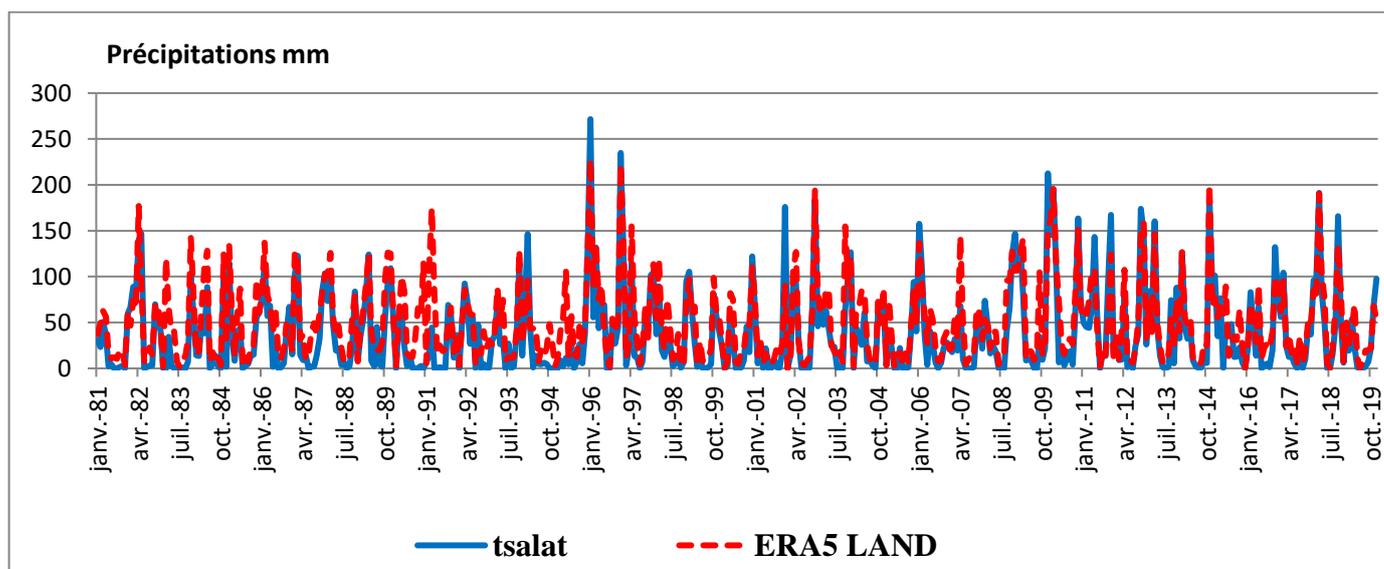


Figure 24: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de ERA5 LAND à l'échelle mensuelle (1981-2019).

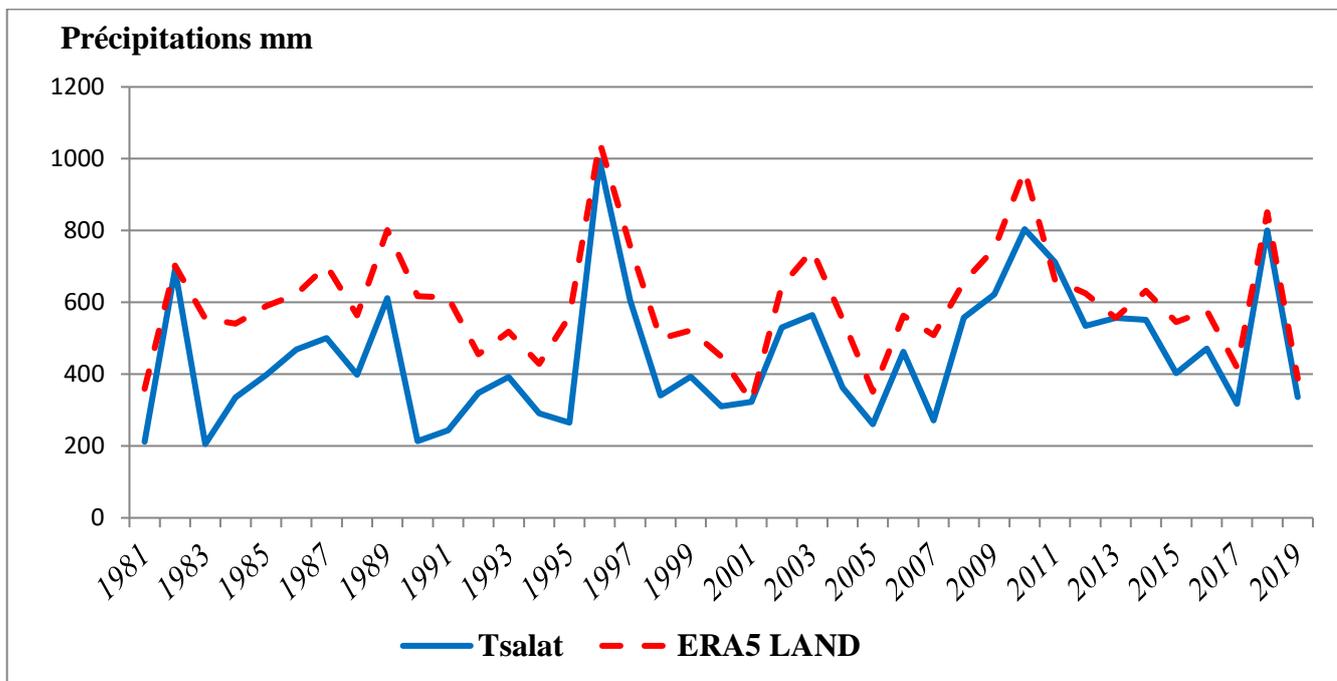


Figure 25: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de ERA5 LAND à l'échelle annuelle (1981-2019).

La performance du produit ERA5 LAND dans les trois stations est illustrée par les droites de régression (figure 26) qui démontrent que le produit est influencé par le facteur d'altitude.

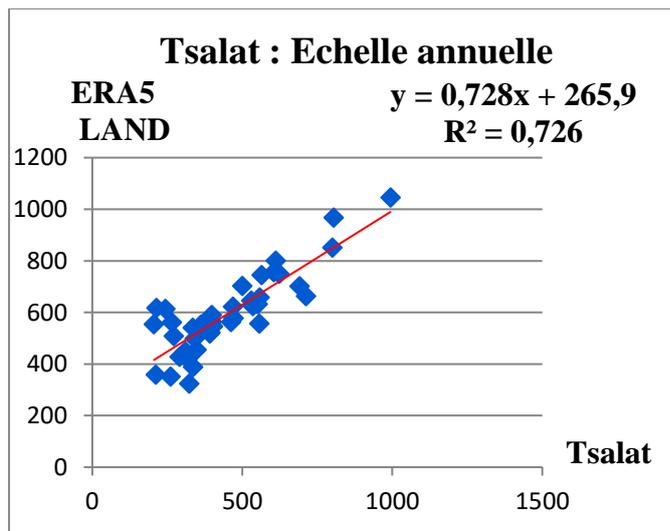
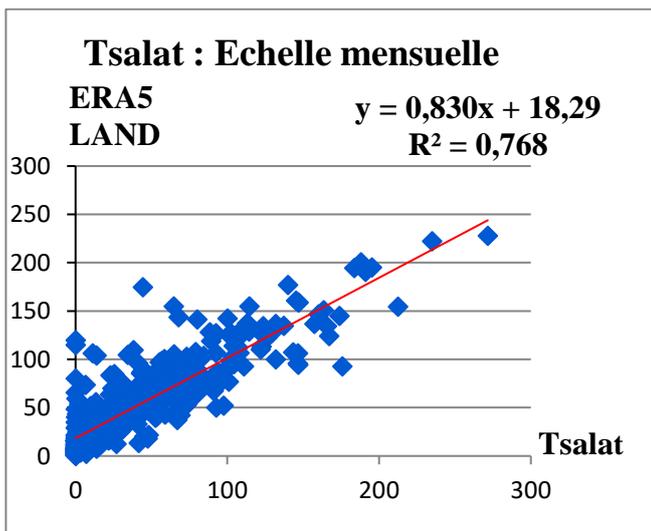
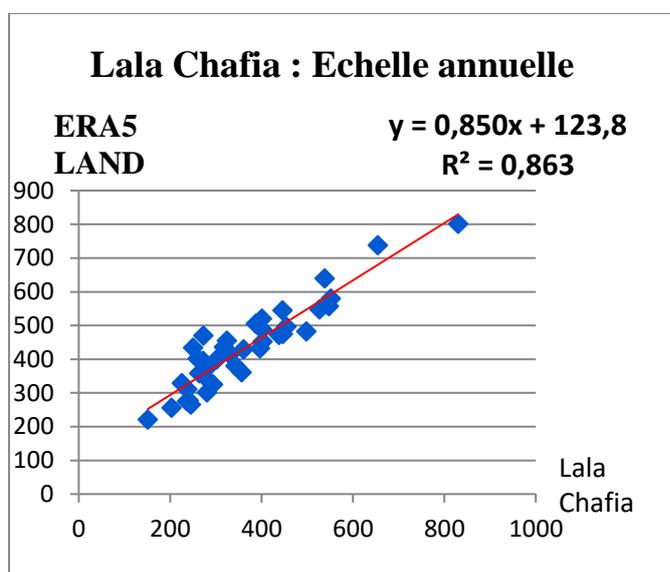
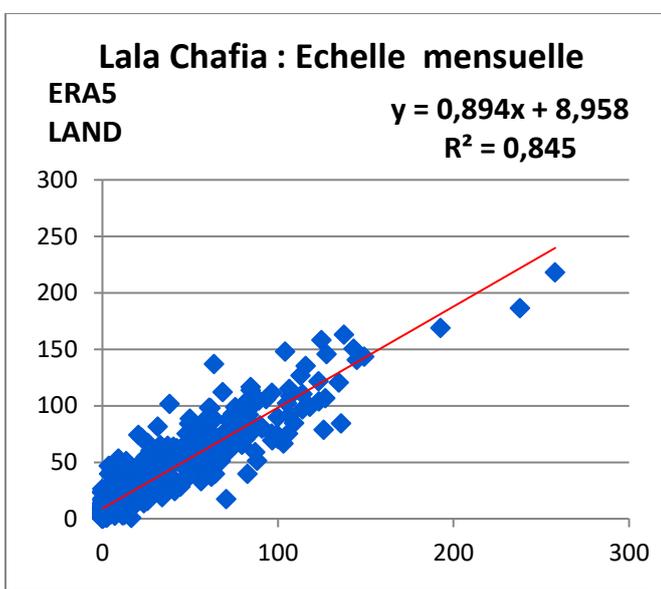
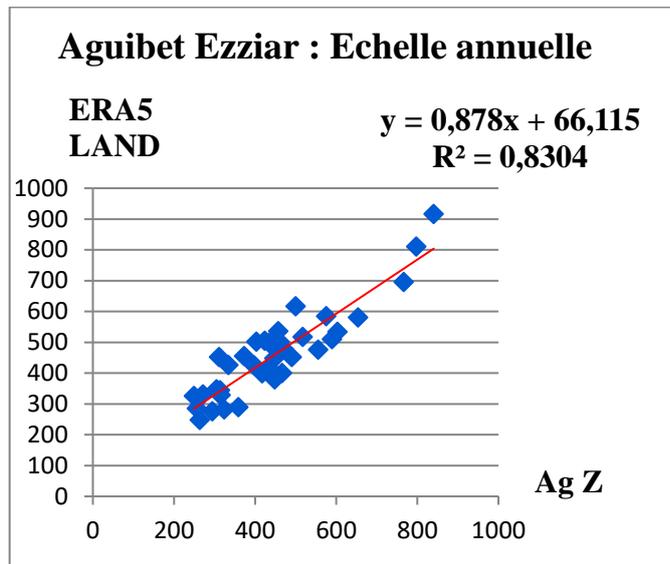
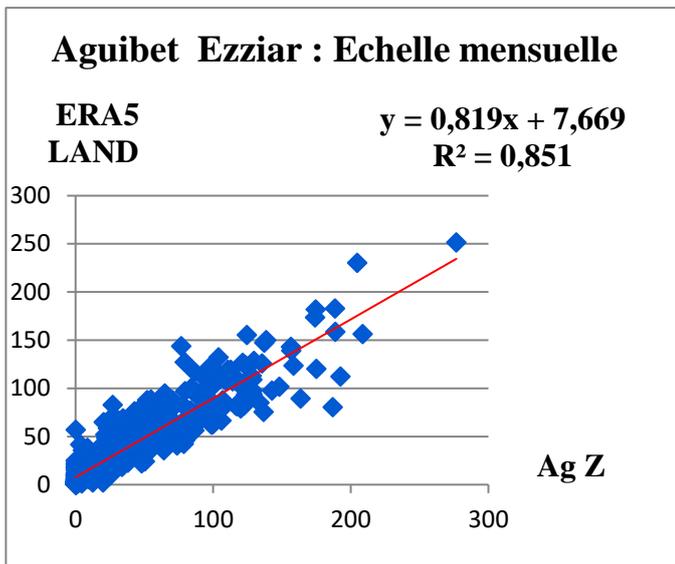


Figure 26: Corrélation entre les données observées et les données ERA5 LAND pour la station Aguibet Ezziar, Lala Chafia, Tsalat, selon les deux échelles.

IV Résultats du traitement avec le produit TerraClimate

Tableau 4: Résultats du traitement des données avec TerraClimate

Stations	Altitude	Emplacement	Echelle	r	ME	MAE	RMSE	BIAIS %
AguibetEzziar	81	Plaine	Mensuelle	0,92	2,86	10,81	18,61	7,72
			Annuelle	0,91	34,33	59,14	72,41	7,72
Lala chafia	193	Plaine	Mensuelle	0,91	5,82	11,54	18,81	19,12
			Annuelle	0,91	69,86	78,44	90,49	19,12
Tsalat	687	Piémont	Mensuelle	0,87	6,41	14,81	23,51	16,96
			Annuelle	0,88	76,8	92,14	114,07	16,96

Le tableau ci-dessus (tableau 6) présente les résultats de traitement des données observées des trois stations pluviométriques avec les données estimées par TerraClimate:

Annuellement et mensuellement, les données observées sont bien corrélées avec les données estimées par le produit avec un coefficient de **corrélation r** qui atteint une valeur maximale de 0.92 dans la station Aguibet Ezziar. Cependant, Tsalat enregistre le coefficient de corrélation minimal, avec une valeur mensuelle de 0,87 et une valeur annuelle de 0,88.

Le paramètre RMSE enregistre des valeurs moyennes à l'échelle annuelle surtout dans les zones montagneuses. Il est élevé dans les stations en haute altitude (la station Tsalat), et moins intense principalement en plaine (station Aguibet Ezziar et Lala Chafia).

Quant au biais indique une meilleure estimation dans les cas des stations Aguibet Ezziar avec une valeur qui ne dépasse pas 7% selon les deux échelles. Par contre il montre une surestimation moyenne de 19.12 % dans la station de Lala chafia et 16.96 % pour Tsalat.

1. TerraClimate à Aguibet Ezziar :

Les variations mensuelles et annuelles révèlent une tendance de surestimation légère de tous les événements pluviaux avec un biais de 7.72 % à l'exception de ces années suivent : 1984/1989/2014.

A l'échelle mensuelle :

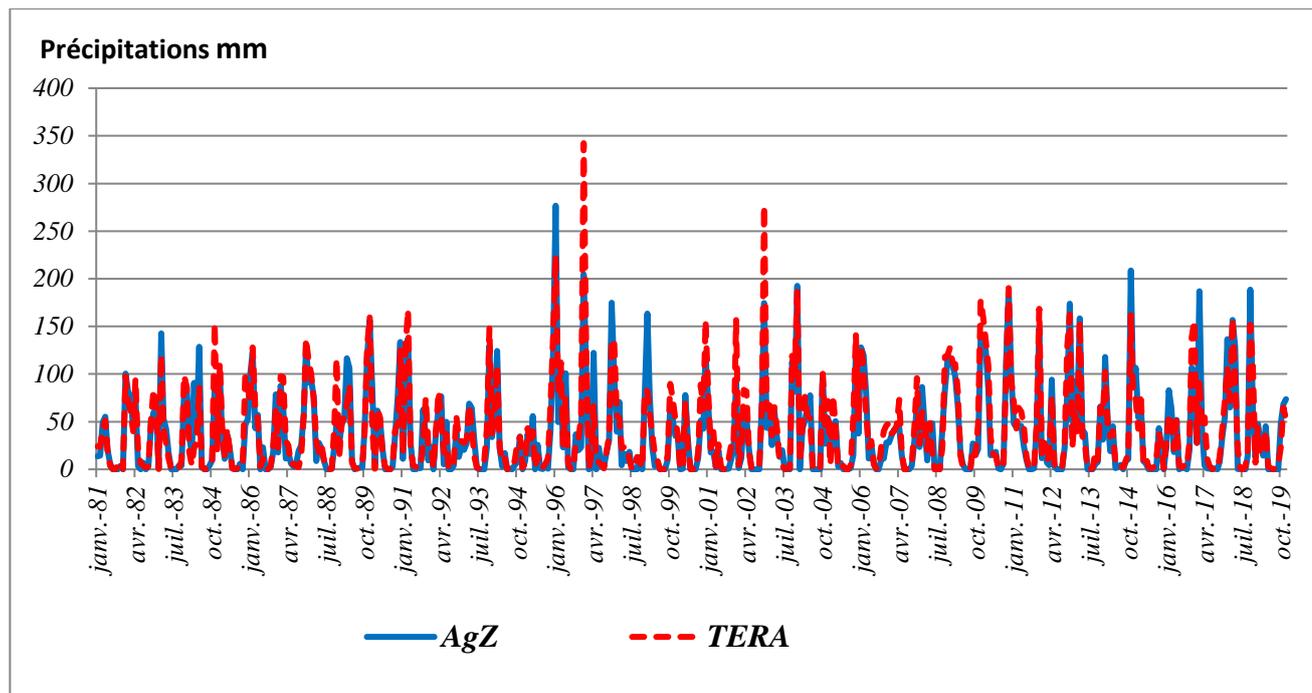


Figure 27: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1981-2019).

A l'échelle annuelle :

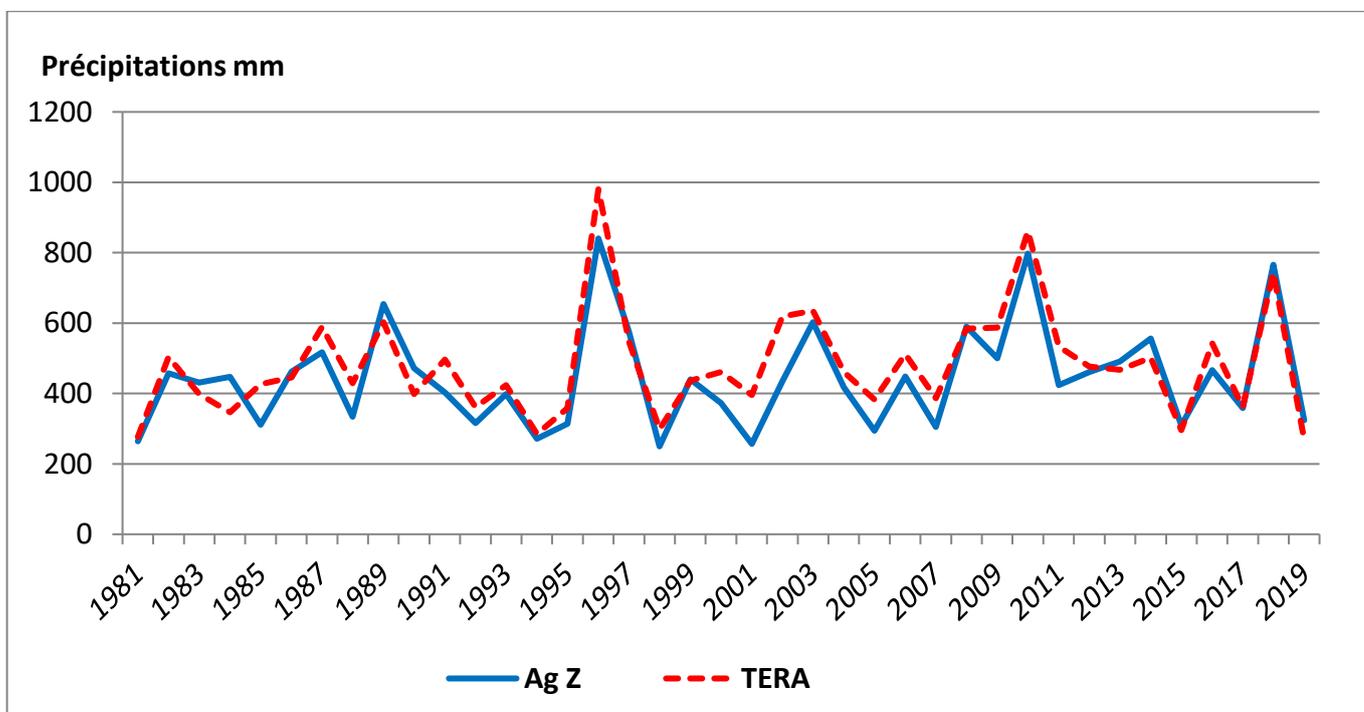


Figure 28: Variation des données observées de la station Aguibet Ezziar et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1981-2019).

2. Terra Climate à Lala Chafia

À l'échelle mensuelle, la figure 29 montre la performance du produit de 1981 à 2019, représentant une surestimation générale de tous les événements pluvieux pouvant atteindre 275mm pour $P > 150$ mm. En outre, une légère sous-estimation est remarquable pour les précipitations d'une hauteur $P < 150$ mm.

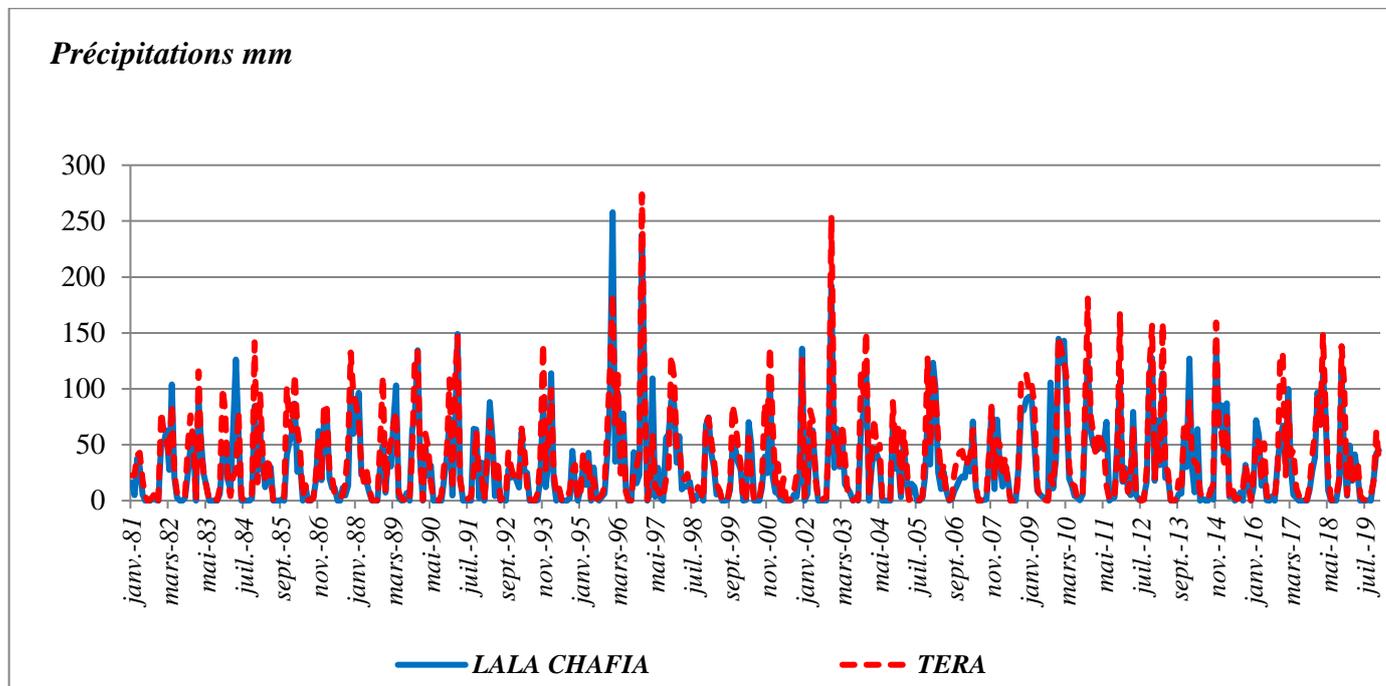


Figure 29: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1981-2019).

L'analyse des données annuelles de la station Lala Chafia (figure 30) révèle que le produit TerraClimate surestime les précipitations avec un biais égale 19.12 % en dehors de deux années (1984/2015) ou le produit est sous-estimeles événements pluviaux.

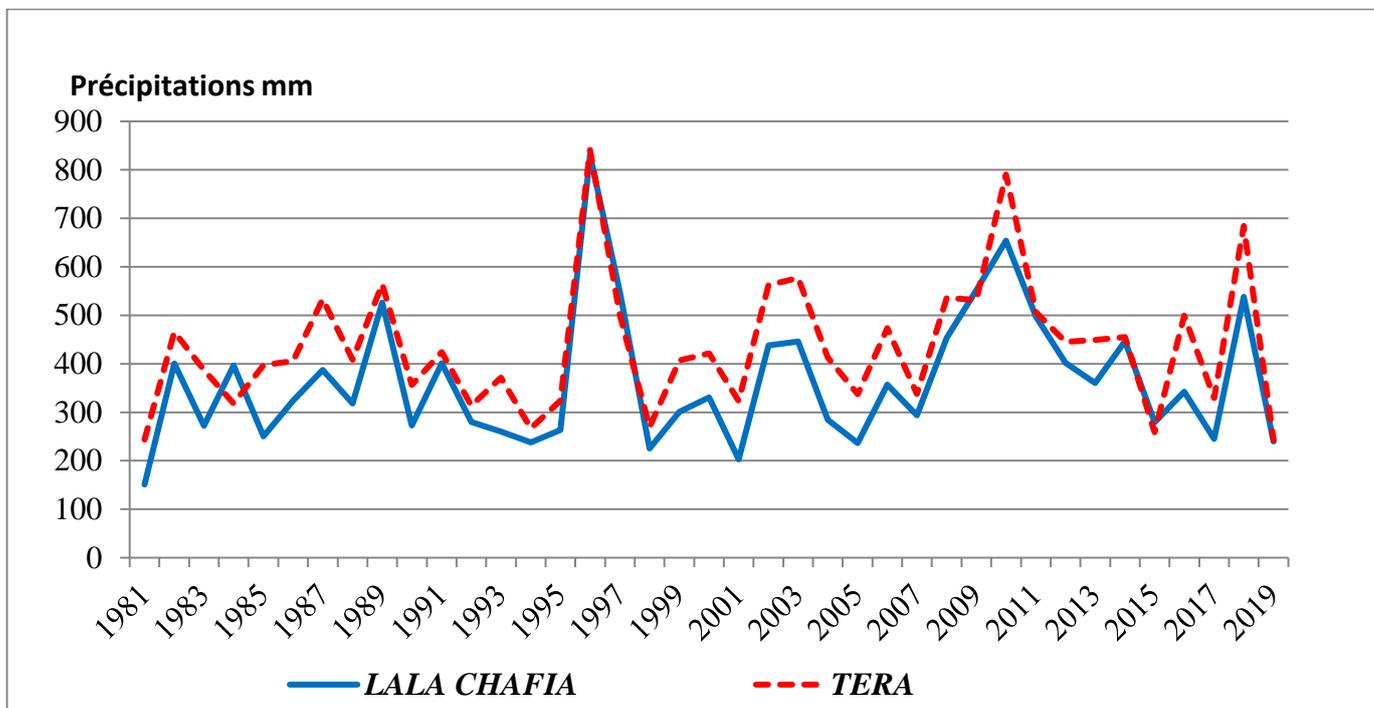


Figure 30: Variation des données observées de la station Lala Chafia et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1981-2019).

3. Terra Climate àTsalat

D'après ces constatations, La performance de TerraClimate en piémont (Tsalat) présente des surestimations des évènements pluvieux pour les deux échelles temporelles (annuelle et mensuelle) d'un biais égal à 16.96 % à l'exclusion de 1982 /1996 / 2010 ou le produit montre une sous-estimation.

A l'échelle mensuelle :

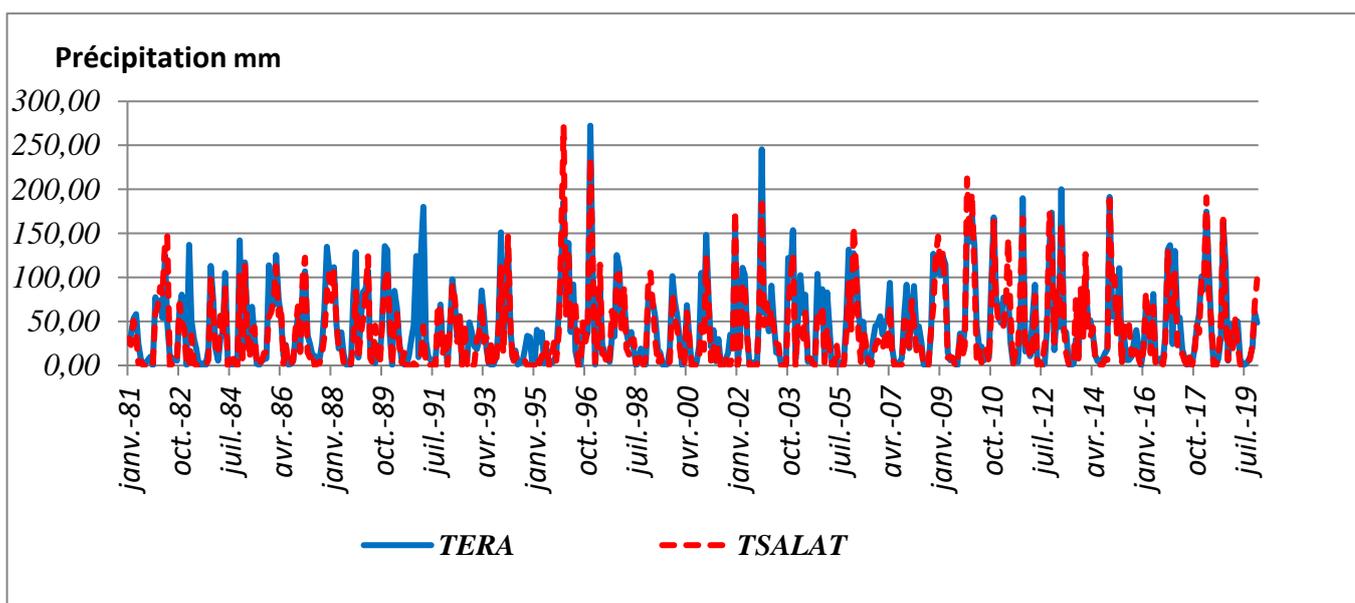


Figure 31: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1981-2019).

-A l'échelle annuelle

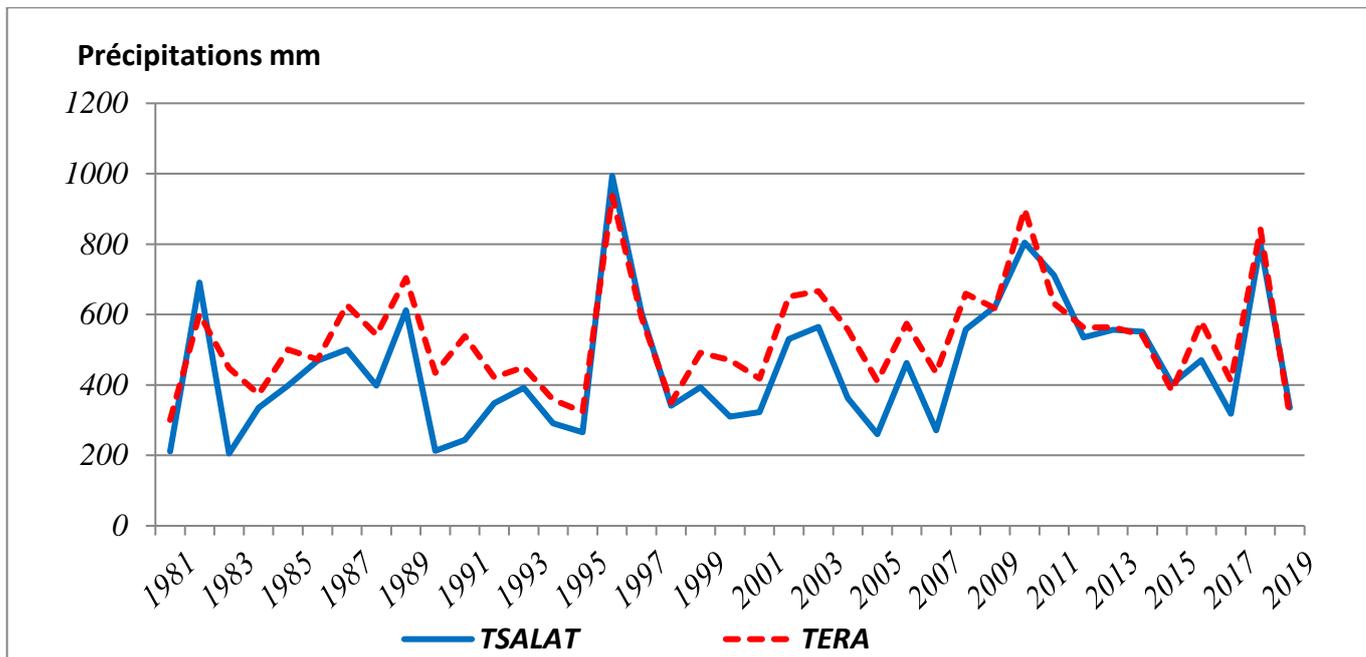


Figure 32: Variation des données observées de la station Tsalat et les données de TerraClimate à l'échelle annuelle (1981-2019).

La performance de TerraClimate dans les trois stations est illustrée par les droites de régression (figure 33) qui démontrent que le produit est influencé par le facteur d'altitude.

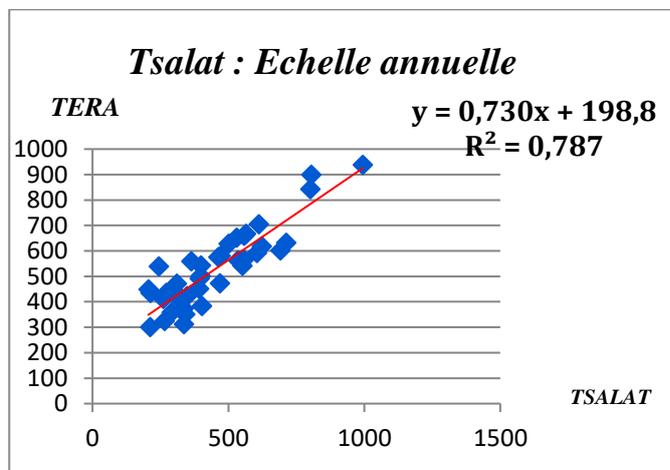
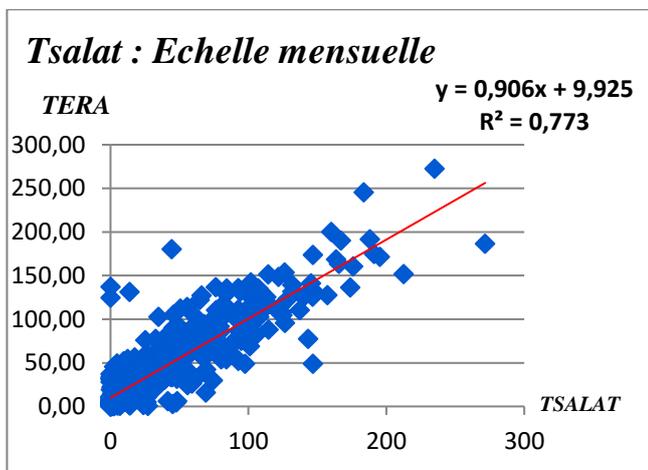
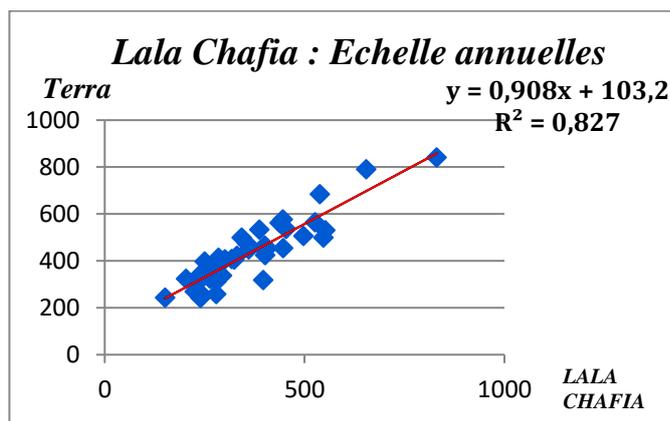
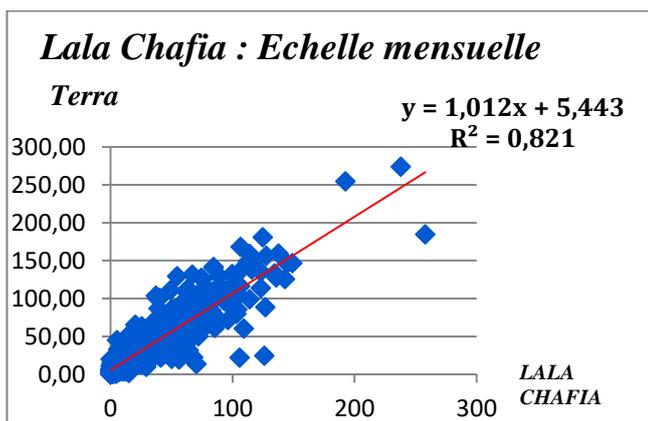
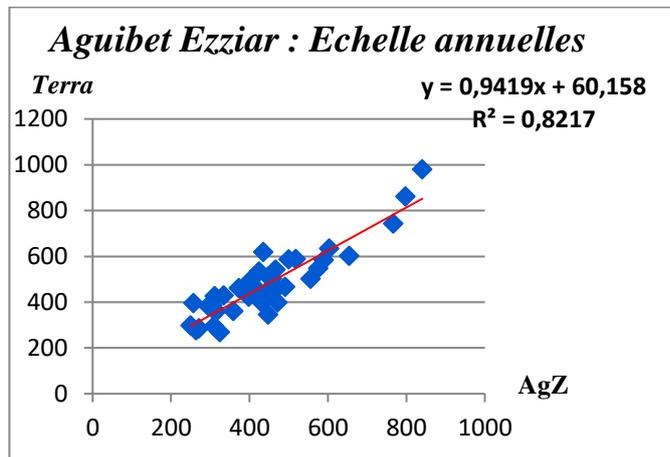
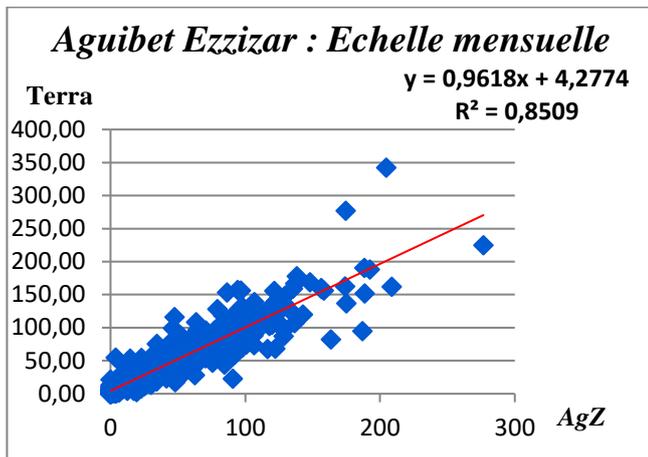


Figure 33: Corrélation entre les données observées et les données TerraClimate pour la station Aguibet Ezziar, Lala Chafia, Tsalat, selon les deux échelles.

V Comparaison des résultats d'évaluation des produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate

1. Coefficient de corrélation

- à l'échelle mensuelle :

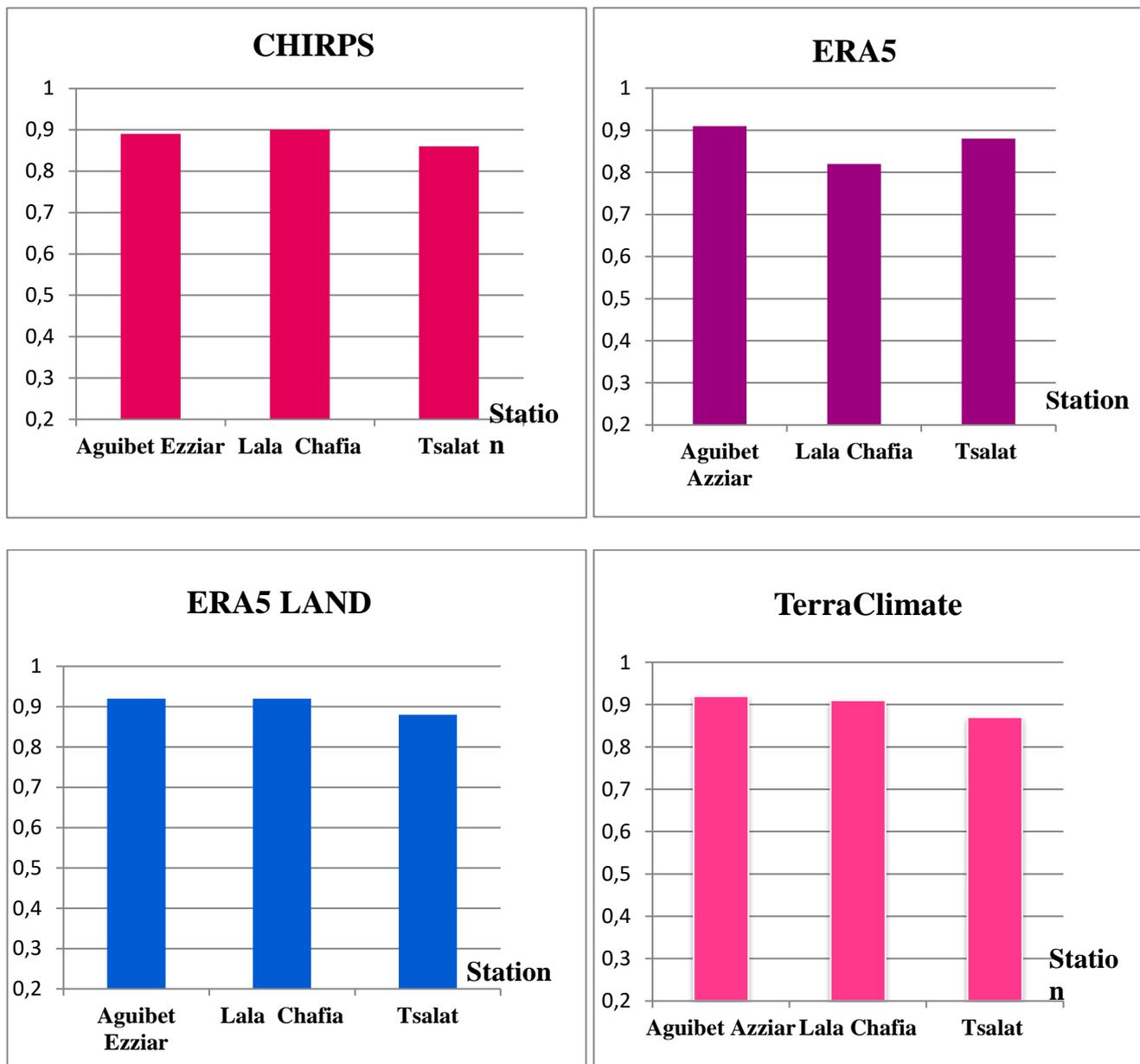


Figure 34: Comparaison de Coefficient de corrélation entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate à l'échelle mensuelle

Depuis 1981 à 2019 le Coefficient de corrélation (r) connu plusieurs variations dans les trois stations dans lequel :

-selon CHIRPS le coefficient r varie entre 0.86 et 0.90.

-d'après ERA5 le coefficient r est entre 0.82 et 0.91.

_d'après ERA5 LAND le coefficient r varie entre 0.88 et 0.92.

-selon le produit TerraClimate r est ente 0.87 et 0.92.

Les résultats de cette comparaison ont démontré que la grande valeur du coefficient de corrélation est marquée par lala chafia dans le produit satellitaire CHIRPS, cependant dans les trois autres produits la valeur maximale de ce dernier est marquée par AguibetEzziar

-L'échelle annuelle

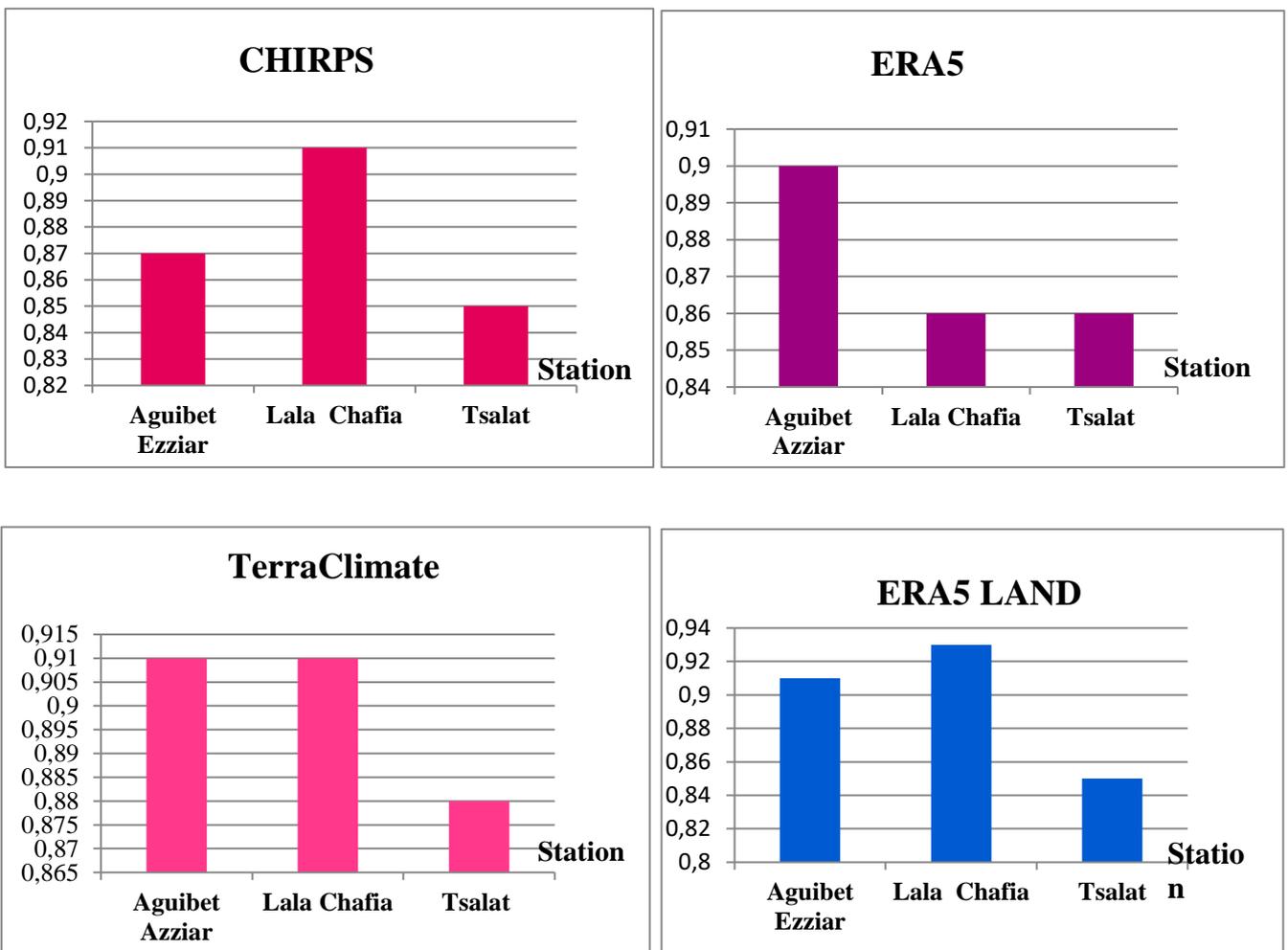


Figure 35: Comparaison de Coefficient de corrélation entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate à l'échelle annuelle

Depuis 1981 à 2019 le Coefficient de corrélation (r) connu plusieurs variations dans les trois stations dans lequel :

-selon CHIRPS le coefficient r varie entre 0.85et 0.91.

-d'après ERA5 le coefficient r est entre 0.86 et 0.90.

d'après ERA5 LAND le coefficient r varie entre 0.85 et 0.93.

-selon le produit TerraClimate est ente 0.88 et 0.91.

Les résultats de cette comparaison ont démontré que la grande valeur du coefficient de corrélation est marquée par lala chafia dans le produit satellitaire CHIRPS et dans ERA5 LAND. Tandis que, dans les deux autres produits la valeur maximale de r est marquée par AguibetEzziar (ERA5 et TerraClimate)

2. RMSE (Erreur quadratique moyenne)

- à l'échelle mensuelle :

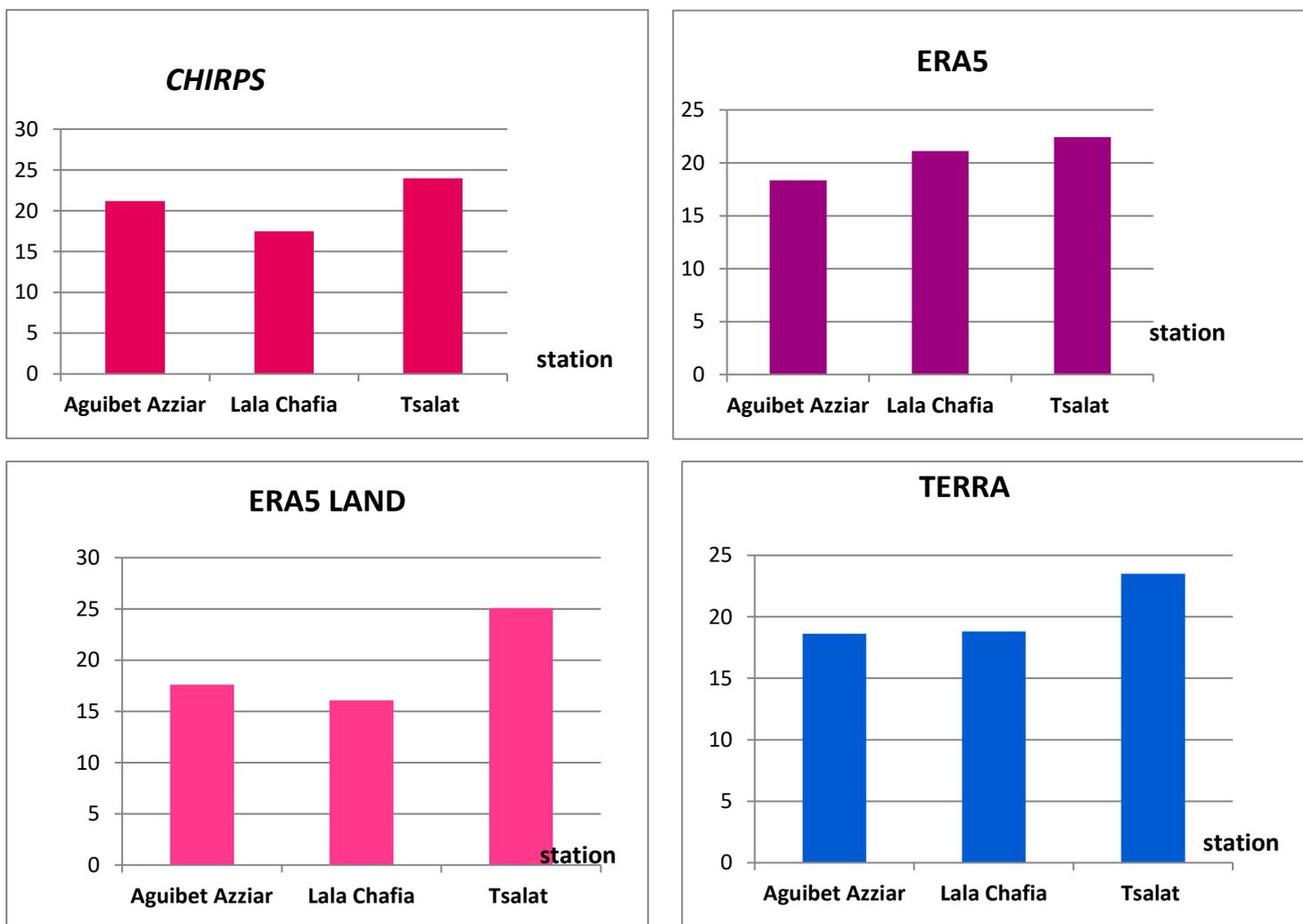


Figure 36: Comparaison de RMSE entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et Terra Climate à l'échelle mensuelle

Pendant la période 1981 à 2019 L'Erreur quadratique moyenne (RMSE) connu plusieurs variations dans les trois stations dans lequel :

La valeur maximale de cet indice est remarquée dans la station Tsalat d'après les quatre produits satellitaires avec une valeur atteinte 25,08 avec le produit ERA5 LAND, 22,44 avec ERA5, 23,97 avec CHIRPS et 23,51 dans le produit TerraClimate (figure36).

- à l'échelle annuelle :

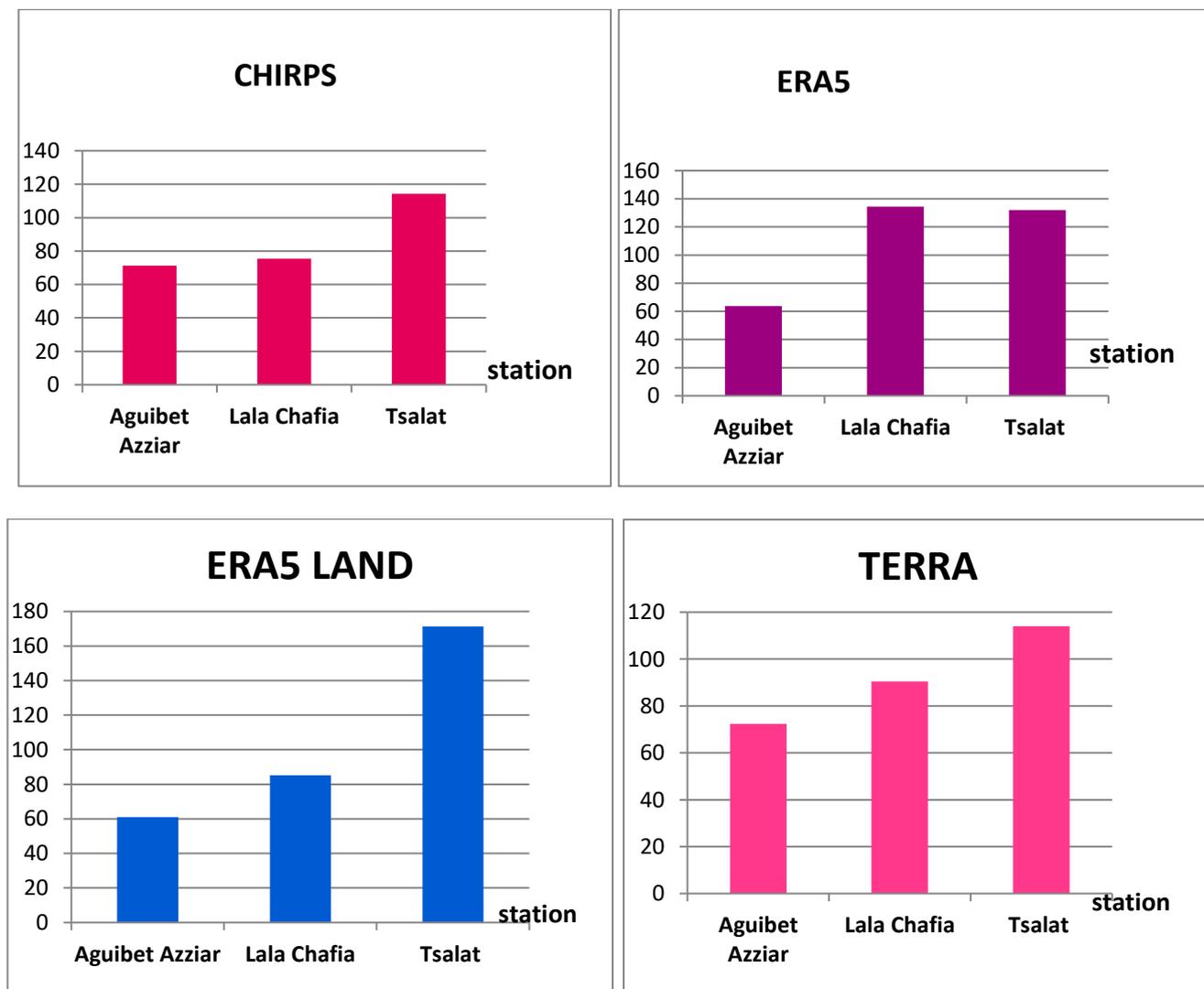


Figure 37: Comparaison de RMSE entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate à l'échelle annuelle

Pendant la période 1981 à 2019 l'Erreur quadratique moyenne (RMSE) connu plusieurs variations dans les trois stations dans lequel :

La valeur maximale de cet indice est remarquée dans la station Tsalat d'après ERA5 LAND avec la valeur 171,36 et TerraClimate ou ce dernier est d'environ 114,07, alors que d'après CHIRPS Tsalat est la station de plus grande valeur(114,31) et d'après ERA5 la valeur maximale du RMSE est d'environ 134,52 dans la station lala chafia.

3. BIAIS (%) :

Le Biais est la moyenne des différences obtenues entre les observations et les estimations, il est marqué d'après le produit satellitaire CHIRPS par une sous-estimation de -0.46 % à la station Aguibet Ezziar et par une légère surestimation de 12% dans lala chafia et tsalat. Cependant, Les trois stations étudiées sont présentées par une surestimation qui va être augmentée du l'aval vers l'amont selon les résultats du traitement avec les trois produits restent.

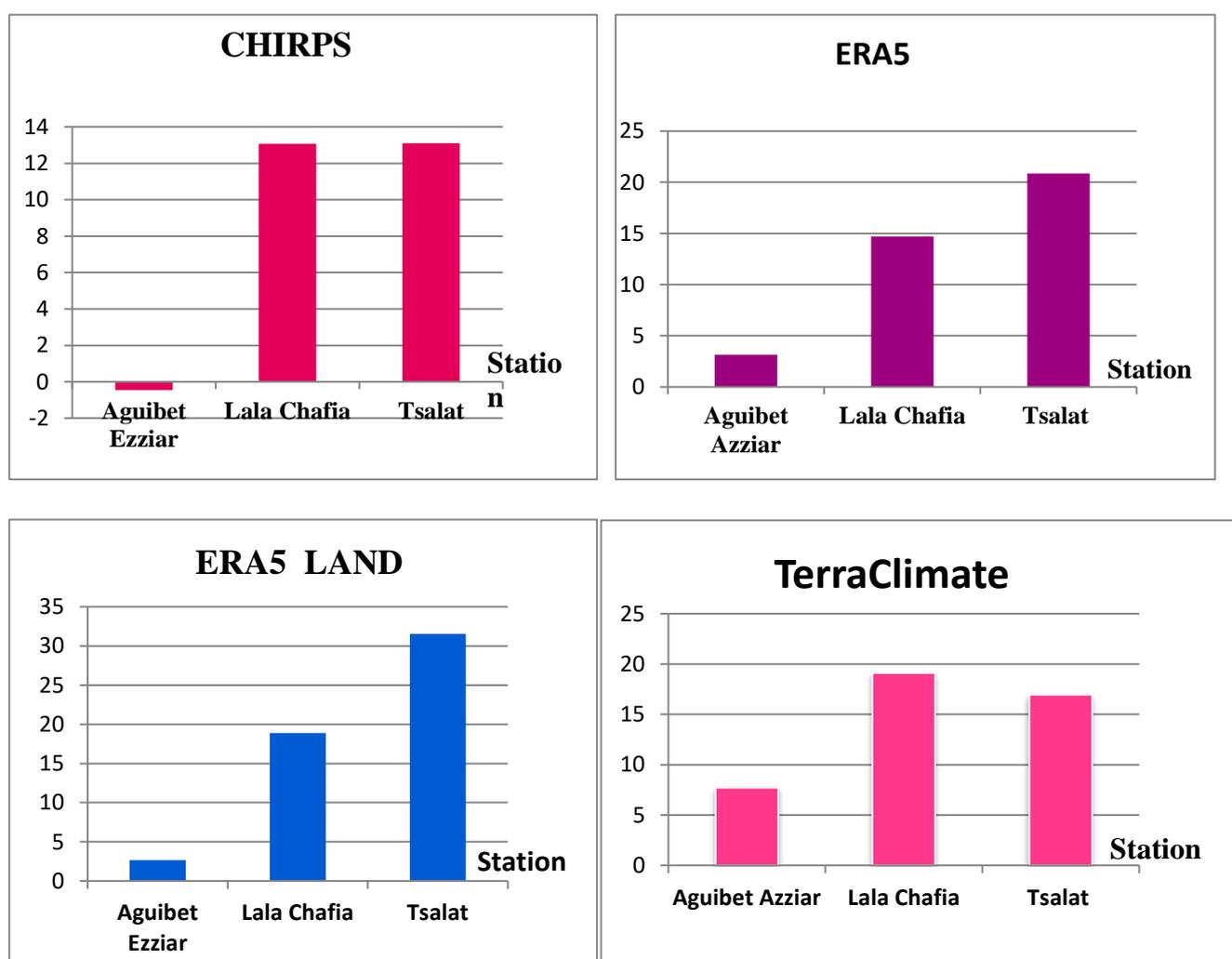


Figure 38: Comparaison de biais entre les quatre produits : CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et Terra Climate à l'échelle mensuelle et annuelle

CONCLUSION

Cette étude vise à valider quatre produits d'estimation des précipitations par satellite, CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate, dans le bassin de Bouregreg au Maroc. Ces produits ont été sélectionnés en fonction de leur résolution spatiale et temporelle, de leur couverture spatiale et de la disponibilité des données. La validation a été réalisée en comparant les données simulées des quatre produits avec les données in situ collectées sur trois stations météorologiques réparties dans le bassin de bouregreg entre 1981 et 2019. L'évaluation a été basée sur des tests statistiques (r , ME, MAE, Biais, RMSE).

L'analyse des résultats a révélé que les quatre produits présentent des performances variables en termes d'estimation des précipitations. En général, ERA5 LAND a obtenu de meilleurs scores que les autres produits. La performance des quatre produits est influencée par l'altitude des stations pluviométriques. CHIRPS, ERA5 et TerraClimate ont tendance à sous-estimer les précipitations intenses en piémont (Tsalat) surtout le produit ERA5 PT Pius qu'il capte les données sur une grande surface (31 km) et à surestimer les précipitations légères en plaine et zones côtières. ERA5 LAND a tendance à surestimer les précipitations en moyenne montagne et en plaine.

Les résultats de cette étude suggèrent que les produits CHIRPS, ERA5, ERA5 LAND et TerraClimate peuvent constituer des alternatives aux mesures au sol pour l'estimation des précipitations dans le bassin de Bouregreg, à condition de corriger leurs biais en fonction de l'altitude et du type de zone géographique.

Bibliographie et Webographie

Bounouira, H. Etude des qualités chimiques et géochimiques du bassin versant de Bouregreg. Géochimie. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2007. Français. Thèse de doctorat. P296.

Daoud, D. (2014). Apport de la bathymétrie dans le contrôle du volume d'eau des barrages Exemple du barrage ARICHA (Bassin de Bouregreg et de la Chaouia, Maroc). Mémoire de projet de fin d'étude faculté des sciences et techniques Marrakech.p73

DAOUAI, G., AMEGDOUL, I., AHSAINI, N. (2023). Validation des produits satellitaires d'estimation des précipitations au niveau de la zone d'action de l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift, Marrakech. Mémoire de projet de fin d'étude faculté des sciences et techniques Marrakech.p61.

A. LO1, H. GUEJJOU1, M. CHIKHAOU1, H. EZZINE1, 2, M. NAIMI1, Y. PEPIN. Suivi spatiotemporel de l'érosivité des pluies au Maroc à l'aide des données satellitaires libres. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. (2019) 7 (2): 363-370

Beudet, G. (1969) Le plateau central marocain et ses bordures: étude géomorphologique. Thèse de Lettres. Imprimerie française, Rabat

Lahlou, A. (1986) Etude actualisée de l'envasement des barrages au Maroc, Revue des Science de l'Eau, 6, 337- 356.

MAIA-BRESSON, A. (1996). Estimation des précipitations par satellite: analyse et application d'une méthode combinée infrarouge & microondes. Thèse de doctorat de l'université Paris VII.p264.

Rajae El Aoula, G. M. (2021). Évolution du régime hydrologique dans le bassin versant du Bouregreg, Maroc. PIAHS .384-163.

Bouabdelli M., 1989. Tectonique et sédimentation dans un bassin orogénique: le sillon viséen d'Azrou-Khénifra (Est du Massif hercynien central du Maroc). Thèse Doctorat es-Sciences, Strasbourg, 259p.

Chakiri S., 1991. Le Paléozoïque de la région de Tsili-Tiddas (Maroc central occidental), Stratigraphie, Sédimentologie et évolution structurale hercynienne. Thèse de 3ème Cycle, Univ. Rabat, 227p.

El Hassani A., 1990. La bordure nord de la chaîne hercynienne du Maroc, chaîne calidoniène des Shoul et plateforme nord-mésétienne. Thèse ès-Sciences, Université Louis Pasteur Strasbourg, 208p.

PIQUE, A. (1979): Evolution structurale d'un segment de la chaîne hercynienne: la Meseta marocaine nord occidentale. SCI. Géol. Mém, Strasbourg, 56, 243 p.

TERMIER, H. (1936): Etudes géologiques sur le Maroc central et le Moyen Atlas septentrional : tome II : les terrains post-paléozoïques Tome IV: Atlas des figures et des tableaux hors-texte Not. Mém. SnI'. Mille.' et Carte géol. Maroc. n U 33.

ZAHRAOUI, M. (1991):La plate-forme carbonatée dévonienne du Maroc occidental et sa dis location hercynienne. Thèse ès Sciences, Brest, 261 p.

<http://saidi.ma/memoires/daoudi-2014.pdf>

<https://images.app.goo.gl/vjdjGQHL3wHcimZU6>

https://wetransfer.com/downloads/5d3845bd109104d6cccbafde1b9ef2d720240503170931/1005661bad39b6f02e040006c0cbe53520240503170951/73927c?trk=TRN_TDL_01&utm_campaign=TRN_TDL_01&utm_medium=email&utm_source=sendgrid

<https://doi.org/10.3390/w14203336>