



كلية العلوم
والتقنيات - مراكش

FACULTE DES SCIENCES
ET TECHNIQUES - MARRAKECH

Département des Sciences de la Terre

Licence en Sciences et Techniques

Eau & Environnement

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

**Évaluation Spatio-Temporelle des Produits Satellitaires et
des Réanalyses de Température au Maroc. Le cas des
stations Marrakech, Oukaimden, Safi, Essaouira et Dakhla**

Réalisé par : **MELLAHI Rida & ABOURY M'hamed**

Encadrés par : Mr. Mohamed Elmehdi SAIDI

Soutenu le : 10 / 06 / 2024

Devant le Jury composé de :

Mr. Mohamed Elmehdi SAIDI.

Mr. Jalal MOUSTADRAF

Année Universitaire : 2023-2024

D é d i c a c e

À nos pères, mères, sœurs et frères,

À tous nos plus proches amis,

À tous ceux qui ont une grande importance pour nous et qui nous aiment
infiniment fort,

À tous ceux qui sont pour nous une inspiration,

Et une aide constante, qu'ils trouvent dans ce travail une reconnaissance
de leurs efforts et de leur dévouement.

Remerciements

Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance à tous ceux qui ont contribué au succès de notre projet de fin d'études et qui nous ont soutenus tout au long de la rédaction de ce mémoire.

En premier lieu, nous tenons à remercier chaleureusement Monsieur **Mohamed Elmehdi SAIDI**, professeur d'hydrologie à l'**Université Cadi Ayyad**, Faculté des Sciences et Techniques, pour sa patience, sa disponibilité et ses conseils avisés, qui ont été essentiels pour nourrir notre réflexion.

Nos remerciements vont également à Monsieur **Jalal MOUSTADRAF**, membre du jury pour le temps et l'attention qu'il a accordés à l'évaluation de notre travail.

Nous sommes profondément reconnaissants envers toutes les personnes qui nous ont aidés dans la rédaction de ce mémoire. Nous sommes également reconnaissants envers nos parents pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants.

Enfin, un grand merci à nos professeurs de la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, surtout les professeurs de géologie, qui nous ont tout appris durant notre formation. Nous espérons que ce travail sera à la hauteur de leurs attentes.

Merci à tous.

Sommaire

| | |
|--|----|
| D é d i c a c e | 2 |
| Remerciements | 3 |
| Sommaire | 4 |
| Tables des figures : | 7 |
| Tables des tableaux : | 12 |
| Tables des abréviations : | 13 |
| INTRODUCTION..... | 14 |
| PARTIE I : Mesure de la température | 15 |
| I- Les systèmes d'observation de températures : | 15 |
| 1) Les observations météorologiques au sol : | 15 |
| 2) Les observations météorologiques spatiale : | 16 |
| a- Les caractéristiques des orbites GEO et LEO : | 17 |
| b- Le principe produit satellitaire disponible pour l'estimation des températures : | 18 |
| 3) - Les principaux produits des réanalyses les températures : | 19 |
| a- Fifth Generation of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis (ERA5):..... | 19 |
| b- TerraClimate Data : | 20 |
| c- Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2):..... | 21 |
| Partie II : Matériels et méthodes | 23 |
| I- Les zones d'études : | 23 |
| 1) Contexte géographique, géologique et climatique : | 23 |
| II- Données utilisées : | 27 |
| 1) Réseau d'observation au sol : | 27 |
| 2) Produits satellitaires et réanalyses de température : | 28 |

| | | |
|--|---|----|
| a- | Produits utilisés : | 28 |
| b- | Téléchargement des données satellitaires et des réanalyses des températures : .. | 29 |
| 3) | Traitement des données et critères statistiques d'évaluation : | 29 |
| Partie III : Résultats d'évaluation des produits | | 32 |
| I- | Evaluation du produit CHIRTS : | 32 |
| 1) | La température minimale : | 32 |
| a- | Corrélation, RMSE et Biais entre les Températures min observées et estimées par CHIRTS : | 32 |
| b- | Variation des données observées de chaque station et les données de CHIRTS à différentes échelles temporelles : | 36 |
| 2) | Température maximale : | 41 |
| a- | Corrélation, RMSE et Biais entre Températures max Observées et estimées par CHIRTS : | 41 |
| b- | Variation des données observées de chaque station et les données de CHIRTS à diffèrent l'échelle temporelle : | 46 |
| II- | Evaluation du produit ERA-5 : | 52 |
| 1) | La température minimale : | 52 |
| a- | Corrélation, RMSE et Biais entre Températures min Observées et estimées par ERA-5 : | 52 |
| b- | Variation des données observées de chaque station et les données de ERA-5 à diffèrent l'échelle temporelle : | 56 |
| 2) | Température maximale : | 62 |
| a- | Corrélation, RMSE et Biais entre Températures max observées et estimées par ERA-5 : | 62 |
| b- | Variation des données observées de chaque station et les données de ERA-5 à diffèrent l'échelle temporelle : | 66 |
| III- | Résultats du traitement avec le produit TerraClimate : | 72 |
| 1) | La température minimale : | 72 |

| | | |
|-------------|---|----|
| a- | Corrélation, RMSE et Biais entre Températures min observées et estimées par TerraClimate : | 72 |
| b- | Variation des données observées de chaque station et les données de TerraClimate à différent l'échelle temporelle : | 76 |
| 2) | Température maximale : | 80 |
| a- | Corrélation, RMSE et Biais entre températures max observées et estimées par TerraClimate : | 80 |
| b- | Variation des données observées de chaque station et les données de TerraClimate à différentes échelles temporelles : | 84 |
| Partie IV : | Discussion..... | 89 |
| | Conclusion..... | 92 |
| | Bibliographie et Webographie..... | 93 |

Tables des figures :

| | |
|---|----|
| Figure 1: le système d'observation de température au sol | 16 |
| Figure 2: le système mondial d'observation par les satellites | 17 |
| Figure 3: Variation de température en (°C) estimé par le produit ERA5, le Janvier 2016..... | 20 |
| Figure 4 : Variation de température en (°C) estimé par le produit TerraClimate, l'août 2015.. | 21 |
| Figure 5 : Carte géographique représente les quatre provinces | 26 |
| Figure 6: Carte géographique représente la province d'Oued Eddahab (DAKHLA) | 27 |
| Figure 7: répartition des stations des mesure au sol qui études. | 28 |
| Figure 8: Corrélation entre les données observées et les données CHIRTS pour les cinq stations selon les trois échelles au niveau de Tmin | 35 |
| Figure 9: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle journalière (1988-2009)..... | 36 |
| Figure 10: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1988-2009)..... | 36 |
| Figure 11: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1988-2009) | 37 |
| Figure 12: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle journalière (1983-2016)..... | 37 |
| Figure 13: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1983-2016)..... | 38 |
| Figure 14: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1983-2016) | 38 |
| Figure 15: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle journalière (2009-2015)..... | 38 |
| Figure 16: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (2009-2015)..... | 39 |
| Figure 17: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle annuelle (2009-2015) | 39 |
| Figure 18: Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle journalière (1998-2016)..... | 39 |
| Figure 19: Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Figure 20:Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1998-2016) | 40 |
| Figure 21:Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle journalière (1998-2016) | 40 |
| Figure 22:Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 41 |
| Figure 23:Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1998-2016) | 41 |
| Figure 24:Corrélation entre les données observées et les données CHIRTS pour les cinq stations selon les trois échelles au niveau de Tmax. | 45 |
| Figure 25 : Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle journalière (1988-2009)..... | 46 |
| Figure 26:Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1988-2009) | 46 |
| Figure 27:Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1988-2009)..... | 47 |
| Figure 28:Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle journalière (1983-2016)..... | 47 |
| Figure 29:Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1983-2016)..... | 48 |
| Figure 30:Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1983-2016) | 48 |
| Figure 31:Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle journalière (2009-2015)..... | 49 |
| Figure 32:Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (2009-2015)..... | 49 |
| Figure 33:Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle annuelle (2009-2015) | 49 |
| Figure 34:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle journalière (1998-2016)..... | 50 |
| Figure 35:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 50 |
| Figure 36:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1998-2016) | 50 |

| | |
|--|----|
| Figure 37:Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle journalière (1998-2016) | 51 |
| Figure 38:Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 51 |
| Figure 39:Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1998-2016) | 52 |
| Figure 40:Corrélation entre les données observées et les données ERA-5 pour les cinq stations selon les trois échelles au niveau de Tmin. | 55 |
| Figure 41:Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle journalière (1988-2009) | 56 |
| Figure 42:Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1988-2009) | 56 |
| Figure 43:Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1988-2009) | 57 |
| Figure 44:Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle journalière (1983-2016) | 57 |
| Figure 45:Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1983-2016). | 58 |
| Figure 46:Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1983-2016) | 58 |
| Figure 47:Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle journalier (2009-2015). | 59 |
| Figure 48:Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (2009-2015)..... | 59 |
| Figure 49:Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (2009-2015). | 59 |
| Figure 50:Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle journalière (1998-2016) | 60 |
| Figure 51:Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1998-2016) | 60 |
| Figure 52:Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1998-2016). | 61 |
| Figure 53:Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de ERA-5 à l'échelle journalier (1998-2016). | 61 |

| | |
|---|----|
| Figure 54:Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 61 |
| Figure 55:Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1998-2016). | 62 |
| Figure 56::Corrélation entre les données observées et les données ERA-5 pour les cinq stations selon les trois échelles au niveau de Tmax. | 65 |
| Figure 57:Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle journalière (1988-2009)..... | 66 |
| Figure 58:Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1988-2009)..... | 66 |
| Figure 59:Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1988-2009). | 67 |
| Figure 60:Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle journalière (1983-2016). | 67 |
| Figure 61:Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1983-2016). | 68 |
| Figure 62:Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1983-2016). | 68 |
| Figure 63:Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle journalier (2009-2015). | 69 |
| Figure 64:Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (2009-2015). | 69 |
| Figure 65:Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (2009-2015). | 69 |
| Figure 66:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle journalière (1998-2016). | 70 |
| Figure 67:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1998-2016). | 70 |
| Figure 68:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1998-2016). | 70 |
| Figure 69:Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de ERA-5 à l'échelle journalière (1998-2016). | 71 |
| Figure 70:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1998-2016). | 71 |

| | |
|--|----|
| Figure 71:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1998-2016). | 72 |
| Figure 72:Corrélation entre les données observées et les données TerraClimate pour les cinq stations selon les deux échelles au niveau de Tmin. | 75 |
| Figure 73:Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1988-2009)..... | 76 |
| Figure 74:Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1988-2009). | 76 |
| Figure 75:Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1983-2016)..... | 77 |
| Figure 76:Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1983-2016). | 77 |
| Figure 77:Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (2009-2015)..... | 78 |
| Figure 78:Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de TerraClimate à l'échelle annuelle (2009-2015). | 78 |
| Figure 79:Variation des températures minimales observées de la station et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 78 |
| Figure 80:Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1998-2016). | 79 |
| Figure 81:Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 79 |
| Figure 82:Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 80 |
| Figure 83:Corrélation entre les données observées et les données TerraClimate pour les cinq stations selon les deux échelles au niveau de Tmax..... | 83 |
| Figure 84:Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1988-2009)..... | 84 |
| Figure 85:Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1988-2009)..... | 84 |
| Figure 86:Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1983-2016)..... | 85 |
| Figure 87:Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1983-2016). | 85 |

| | |
|--|----|
| Figure 88:Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (2009-2015)..... | 86 |
| Figure 89:Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de TerraClimate à l'échelle annuelle (2009-2015). | 86 |
| Figure 90:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 87 |
| Figure 91:Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1998-2016). | 87 |
| Figure 92:Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016)..... | 87 |
| Figure 93:Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1998-2016). | 88 |

Tables des tableaux :

| | |
|---|----|
| Tableau 1: produite satellitaire d'estime la température. | 19 |
| Tableau 2 : Produits des réanalyses des températures par satellite. | 22 |
| Tableau 3: stations des mesures aux sols : | 28 |
| Tableau 4: différents caractères des produits utilisés. | 29 |
| Tableau 5: les indicateurs statistiques utilisés | 31 |
| Tableau 6: Résultats de traitement des données avec CHIRTS au niveau de Tmin. | 33 |
| Tableau 7: Résultats de traitement des données avec CHIRTS au niveau de Tmax | 43 |
| Tableau 8:Résultats de traitement des données avec ERA-5 au niveau de Tmin..... | 53 |
| Tableau 9:Résultats de traitement des données avec ERA-5 au niveau de Tmax..... | 63 |
| Tableau 10:Résultats de traitement des données avec TerraClimate au niveau de Tmin. | 73 |
| Tableau 11:Résultats de traitement des données avec TerraClimate au niveau de Tmax. | 81 |
| Tableau 12: Résultats statistiques de la comparaison entre les températures minimales et maximales des produits maillés et celles des différentes stations à l'échelle journalière..... | 90 |
| Tableau 13: Résultats statistiques de la comparaison entre les températures minimales et maximales des produits maillés et celles des différentes stations à l'échelle mensuelle..... | 91 |
| Tableau 14:Résultats statistiques de la comparaison entre les températures minimales et maximales des produits maillés et celles des différentes stations à l'échelle annuelle..... | 91 |

Tables des abréviations :

°C : degré Celsius.

CHIRTS: Climate Hazards center InfraRed Temperature with Station data.

COSMIC-2 RO: Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate-2nd generation Radio Occultation.

DMN : Direction de la Météorologie Nationale.

ERA-5: Fifth Generation of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis.

GEO: Geostationary Equatorial Orbit.

GMAO: Global Modeling and Assimilation Office.

LEO: Low Earth Orbit.

MERRA-2: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2.

NASA : National Aeronautics and Space Administration.

Tmin : Température minimale.

Tmax : Température maximale.

INTRODUCTION

Les changements climatiques ont une influence sur notre planète Terre, parfois dépassant notre compréhension immédiate. Cependant, ces dernières décennies ont été marquées par une accélération de ces changements climatiques, ce qui soulève des questions cruciales sur leur nature, leur origine, ainsi que leurs impacts à court et à long terme sur notre environnement et nos modes de vie.

Selon les auteurs, depuis 1970, la température terrestre a connu des élévations évaluées à $0,8 \pm 0,2$ °C, révélant des disparités significatives entre les hémisphères et les continents, influencées par un ensemble de facteurs naturels. Cette réalité, qualifiée de défi majeur pour le XXI^e siècle par de nombreux experts, prévoit une augmentation constante de la température moyenne dans les décennies à venir, mettant à l'épreuve notre capacité d'adaptation individuelle et collective (CHAPRON, 2010).

Dans ce contexte, la température, qui représente des mesures étendues de l'agitation thermique de l'air ou de la surface terrestre dans une région donnée à un moment donné, est influencée par plusieurs facteurs tels que l'altitude, la latitude, la longitude, les vents, les courants océaniques, la proximité des masses d'eau et les phénomènes météorologiques. La mesure exacte de cette température a par conséquent une grande importance. Elle est actuellement mesurée à la fois par des stations au sol, par des satellites, et par des modèles mathématiques, notamment les réanalyses.

Notre sujet a pour objectif d'évaluer des produits de mesure de températures par satellite ou par réanalyses en utilisant des indices statistiques. Ceci au niveau de cinq stations dispersées sur le territoire marocain, appartenant à des milieux climatiques différents. Nous évaluerons les produits CHIRTS (Climate Hazard Group InfraRed Temperature with Station data), ERA-5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis version 5) et TerraClimate.

Le travail sera organisé de façon à évaluer les températures minimales et maximales des trois produits au niveau des stations de Safi, Essaouira, Marrakech, Oukaimeden et Dakhla, à trois échelles de temps : journalière, mensuelle et annuelle pour CHIRTS et ERA-5, et aux échelles mensuelle et annuelle pour TerraClimate.

PARTIE I : Mesure de la température

I- Les systèmes d'observation de températures :

La température, paramètre physique fondamental, est mesurée par divers capteurs. Ces capteurs peuvent être au sol, tels que les stations thermométriques, ou situés en orbite, comme les satellites utilisant la technique de télédétection. Parmi les produits utilisés pour cette mesure, on compte CHIRTS et d'autres produits de réanalyse, comme TerraClimate et ERA-5. Leur objectif est d'évaluer les mesures à distance par rapport aux données recueillies par les stations.

1) Les observations météorologiques au sol :

En général, les observations météorologiques au sol constituent la méthode de détection de l'atmosphère la plus ancienne et la plus primitive. Elles permettent de réaliser des mesures visuelles et automatiques. La quantité de données disponibles de cette manière ne représente qu'une petite fraction de toutes les observations utilisées dans les modèles de prévision numérique. Cependant, elles contiennent la "vérité" de la Terre et traitent des dimensions physiques qui sont souvent directement ressenties par les hommes et leurs structures. Les premières mesures concernaient la température de l'air, la pression atmosphérique et les précipitations. Les capteurs inventés il y a des siècles sont toujours utilisés, même si certains ont été abandonnés, comme le baromètre à mercure, le thermomètre à mercure et à alcool, ainsi que la collection de pluviomètres.

Les conditions de mesure la température par les stations au sol :

Pour mesurer la température à une hauteur de 1,25 mètre et à 2 mètres (2 mètres au Maroc), on parle de température de l'air au sol. Cette mesure est toujours effectuée dans un abri météorologique dont le but est de protéger le thermomètre du rayonnement solaire, du rayonnement thermique de la terre et du ciel, ainsi que des éventuelles précipitations. Cet abri doit être situé dans une zone ouverte avec un sol naturel de la région. Idéalement, l'abri devrait avoir une température proche de celle de l'air. D'une part, il doit protéger contre la sensibilité aux radiations, et d'autre part, il doit permettre une circulation d'air libre. (<https://www.encyclopedie-environnement.org/air/observations-meteo-au-sol/>, 2018).

Le réseau d'observation se compose d'un réseau de base principal (le réseau synoptique) et d'un réseau de soutien auxiliaire (le réseau climatologique). Le réseau synoptique se distingue

du réseau climatologique par sa gestion directe par la DMN (Direction de la Météorologie Nationale), aussi bien en termes de ressources humaines que financières, ainsi que par le nombre d'instruments de mesure et la fréquence des mesures. Le réseau synoptique comprend 44 stations, parmi lesquelles :

- 5 équipées de radars, 5 équipées de stations automatiques, 4 font la mesure en altitude, 5 effectuent des mesures maritimes, 12 des mesures radiométriques, 2 dotées des moyens de mesure de pollution de fond, et une pour la mesure d'ozone (KHATRI, 2003).



Figure 1: le système d'observation de température au sol (<https://vigilance.marocmeteo.ma/?q=fr/meteo/metier/observation>, s.d.).

2) Les observations météorologiques spatiale :

Dans un système d'observation spatiale, le satellite est la plate-forme des instruments d'observation. Il a la capacité d'observer, de collecter et de retransmettre des données provenant de stations de mesure situées au sol, en mer et dans les airs. Aujourd'hui, la surveillance de l'atmosphère est assurée par quelques dizaines de satellites américains, russes, etc., placés soit en orbite terrestre basse (LEO), soit en orbite géostationnaire équatoriale (GEO). Ces satellites portent des instruments sensibles à la fois aux rayonnements solaires (infrarouge) et thermiques (infrarouge, micro-ondes).

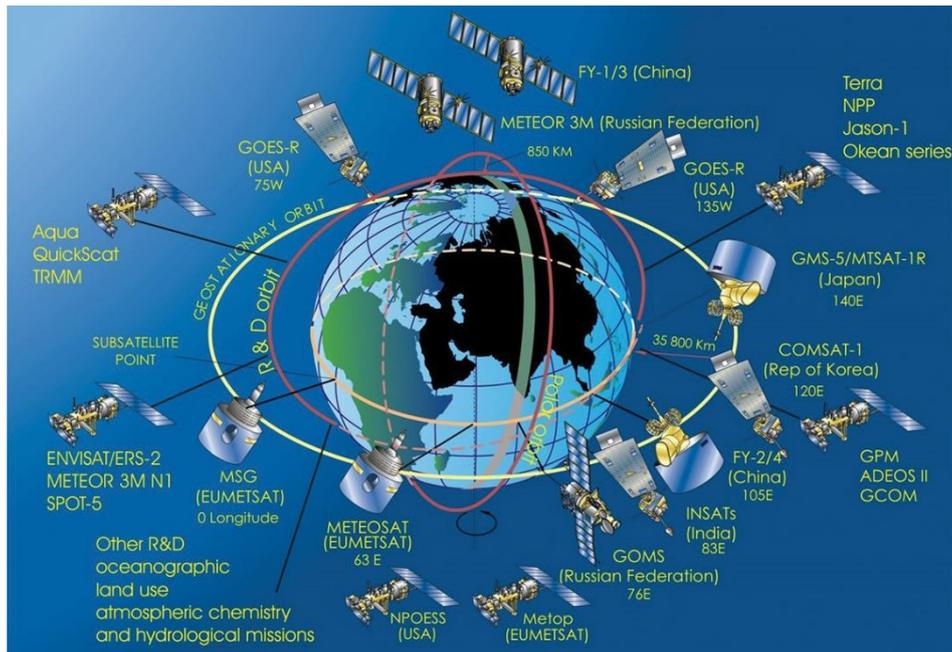


Figure 2: le système mondial d'observation par les satellites (RATIER, 2019).

a- Les caractéristiques des orbites GEO et LEO :

L'observation satellitaire de la Terre s'intéresse particulièrement à deux types d'orbites : l'orbite géostationnaire et l'orbite terrestre basse. Chacune de ces orbites nécessite une résolution d'observation spatio-temporelle distincte.

- Les satellites météorologiques en orbite basse (LEO) :

La plupart des satellites en orbite basse terrestre (LEO) se trouvent entre 800 et 900 km d'altitude, dans une orbite quasi polaire et héliosynchrone, où le plan de l'orbite suit le mouvement apparent du soleil autour de la Terre. Ils ont environ 1 km de résolution et une inclinaison d'environ 99°

(https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/slide_captions.html?utm_source=textcortex&utm_medium=zenochat, s.d.). Les satellites LEO se déplacent relativement rapidement par rapport à la rotation de la Terre. Chaque satellite LEO ne peut donc couvrir qu'une petite partie de la surface de la Terre à la fois. Contrairement aux satellites en orbite géostationnaire, les satellites LEO ne sont pas contraints par la direction de leur orbite. Ils peuvent circuler du nord au sud le long des pôles, suivre l'équateur terrestre ou adopter des trajectoires diagonales qui modifient constamment leur zone de couverture relative. Environ 64 % des satellites sont envoyés dans cette orbite. Ces satellites sont utilisés pour une grande variété de missions, y compris l'observation de la Terre, les communications, la surveillance météorologique et la recherche scientifique (<https://metiers-du-spatial.com/missions/>, s.d.).

- Les satellites géostationnaire (GOE) :

Les satellites géostationnaires se trouvent dans une orbite circulaire autour de la Terre, à une altitude d'environ 35 800 km au-dessus de l'équateur. Un satellite à cette position tourne dans la même direction et avec la même période de rotation que notre planète, apparaissant ainsi fixe par rapport à la surface terrestre. C'est une définition presque parfaite, car en réalité, les satellites géostationnaires peuvent dévier de plus ou moins $0,1^\circ$ en longitude comme en latitude. L'orbite géostationnaire est parfois décrite comme un anneau de 150 km de large (orienté nord-sud) et de 30 km d'épaisseur (en altitude). Les satellites en orbite géostationnaire couvrent à tout moment environ 40 % de la surface de la Terre (Roth, 1992). Ils présentent donc un grand intérêt pour diverses activités spatiales telles que les télécommunications, la météorologie et la télédétection des ressources terrestres et marines.

b- Le principe produit satellitaire disponible pour l'estimation des températures :

Climate Hazards center InfraRed Temperature with Station data 'CHIRTS':

L'ensemble de données à haute résolution ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$) a été développé pour fournir des températures quotidiennes maximales et minimales sur une large bande allant de 60°S à 70°N . Les données quotidiennes de CHIRTS sont fondées sur l'ensemble des données Tmax du Climate Hazards Center InfraRed Temperature with Stations (CHIRTSma). Ce système utilise les températures d'émission d'infrarouges détectées par télédétection de la surface terrestre, ainsi qu'un réseau global dense d'environ 15 000 stations in situ de l'Université de Berkeley. Grâce à ces observations, des estimations précises et fiables de la température moyenne mensuelle maximale de l'air peut être effectuées à une résolution de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$. CHIRTSmax est un produit spécifiquement dédié au calcul des températures maximales de l'air, car il est difficile de différencier les températures minimales des températures froides observées par les satellites au sommet des nuages. Les valeurs de Tmax sont obtenues par le filtrage des nuages, ce qui isole le signal thermique infrarouge provenant de la surface terrestre, correspondant ainsi très bien aux températures maximales mensuelles de l'air observées à 2 mètres dans les stations météorologiques. Face aux exigences de modélisation scientifique et aux applications en santé, en agriculture et en écologie, nécessitant souvent une résolution temporelle plus précise, un produit CHIRTS quotidien (CHIRTS-daily) a été créé à partir des champs quotidiens de Tmax et Tmin de la version 5 de la réanalyse du Centre

européen pour les prévisions météorologiques à moyenne échelle. (Andrew Verdin, et al, 2020) (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirtsdaily>, s.d.).

Tableau 1: *produite satellitaire d'estime la température.*

| Produit | Développeur | Résolution spatiale | Résolution temporelle | Couverture | Couverture Disponibilité |
|---------|----------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------|--------------------------|
| CHIRTS | the Climate Hazards Center (CHC) | 0.05° x 0.05° | Journalière | 60°S – 70°N | 1983 à 2016 |

3) - Les principaux produits des réanalyses les températures :

Les réanalyses météorologiques sont des ensembles de données climatiques qui fournissent une reconstruction cohérente de l'histoire du temps et de l'espace des variables atmosphériques telles que la température, la pression, le vent et l'humidité. Elles sont produites en assimilant des observations météorologiques historiques dans des modèles numériques de prévision météorologique. Les réanalyses permettent de générer des séries temporelles homogènes et cohérentes sur de longues périodes, offrant ainsi une base fiable pour l'étude du climat passé, la validation des modèles climatiques et la compréhension des phénomènes météorologiques à grande échelle (Bénédicte BAQUÉ, et al).

a- Fifth Generation of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis (ERA5):

ERA5 est la dernière réanalyse climatique produite par le ECMWF (the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), fournissant des données horaires sur de nombreux paramètres atmosphériques, de surface des terres et de l'état de la mer, ainsi que des estimations de l'incertitude.

Les données ERA5 sont disponibles dans le Climate Data Store sur des grilles régulières de latitude et de longitude à une résolution de 0,25 ° x 0,25 ° ; environ 25 x25 km, avec des paramètres atmosphériques sur 37 niveaux de pression. ERA5 comprend des informations sur les incertitudes pour toutes les variables à des résolutions spatiales et temporelles réduites.

ERA5 est disponible à partir de 1940 et continue d'être étendu dans le temps, avec des mises à jour quotidiennes disponibles avec 5 jours de retard sur le temps réel.

Les données de la version initiale, c'est-à-dire les données n'ayant pas plus de trois mois de retard sur le temps réel, sont appelées ERA5T. Les produits de la réanalyse sont accessibles au public via le Climate Data Store

(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>, s.d.).

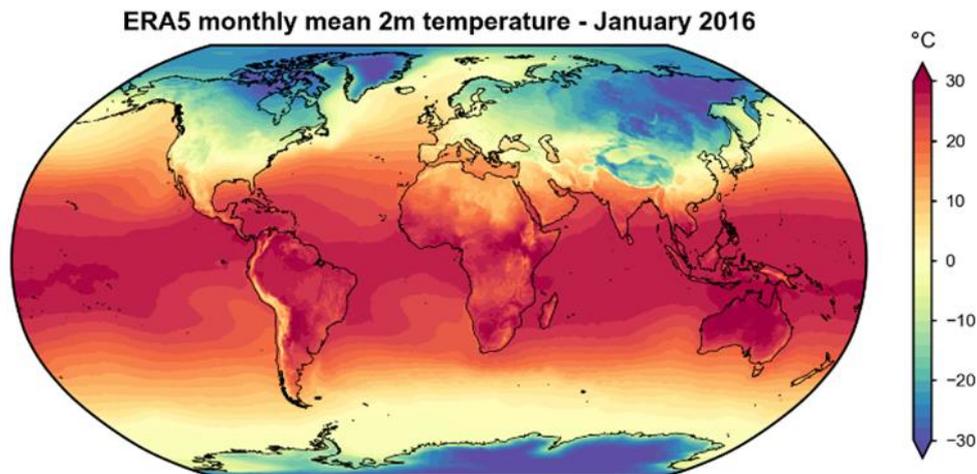


Figure 3: Variation de température en (°C) estimé par le produit ERA5, le Janvier 2016. (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>, s.d.).

b- TerraClimate Data :

Nous présentons TerraClimate, un ensemble de données sur le climat mensuel et le bilan hydrique climatique à haute résolution spatiale ($1/24^\circ$, ~ 4 km) pour les surfaces terrestres mondiales de 1958 à aujourd'hui. TerraClimate développé par des scientifiques de l'Université de l'Idaho, a été présenté en détail par Abatzoglou. TerraClimate utilise une interpolation assistée par le climat, combinant des normales climatologiques à haute résolution spatiale de l'ensemble de données WorldClim, avec de données à résolution plus grossière variant dans le temps (c'est-à-dire mensuelles) provenant d'autres sources pour produire un ensemble de données mensuel sur les précipitations, les températures maximales et minimales, la vitesse du vent et la pression de vapeur, et le rayonnement solaire. TerraClimate produit en outre des ensembles de données mensuels sur le bilan des eaux de surface à l'aide d'un modèle de bilan hydrique qui intègre l'évapotranspiration de référence, les précipitations, la température et la capacité en eau du sol extractible par les plantes interpolées. Ces données fournissent des apports importants pour les études écologiques et hydrologiques à l'échelle mondiale qui nécessitent une haute résolution spatiale et de données climatiques et de bilan hydrique

variables dans le temps. Nous avons validé les aspects spatiotemporels de TerraClimate en utilisant la température annuelle, les précipitations et l'évapotranspiration de référence calculée à partir de données de la station, ainsi que le ruissellement annuel provenant des jauges de débit. Les ensembles de données TerraClimate ont montré une amélioration notable de l'erreur absolue moyenne globale et un réalisme spatial accru par rapport aux ensembles de données maillées à résolution plus grossière (John T. et al, 2018) (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>, s.d.).

Monthly Mean High Temperature, Aug 2015

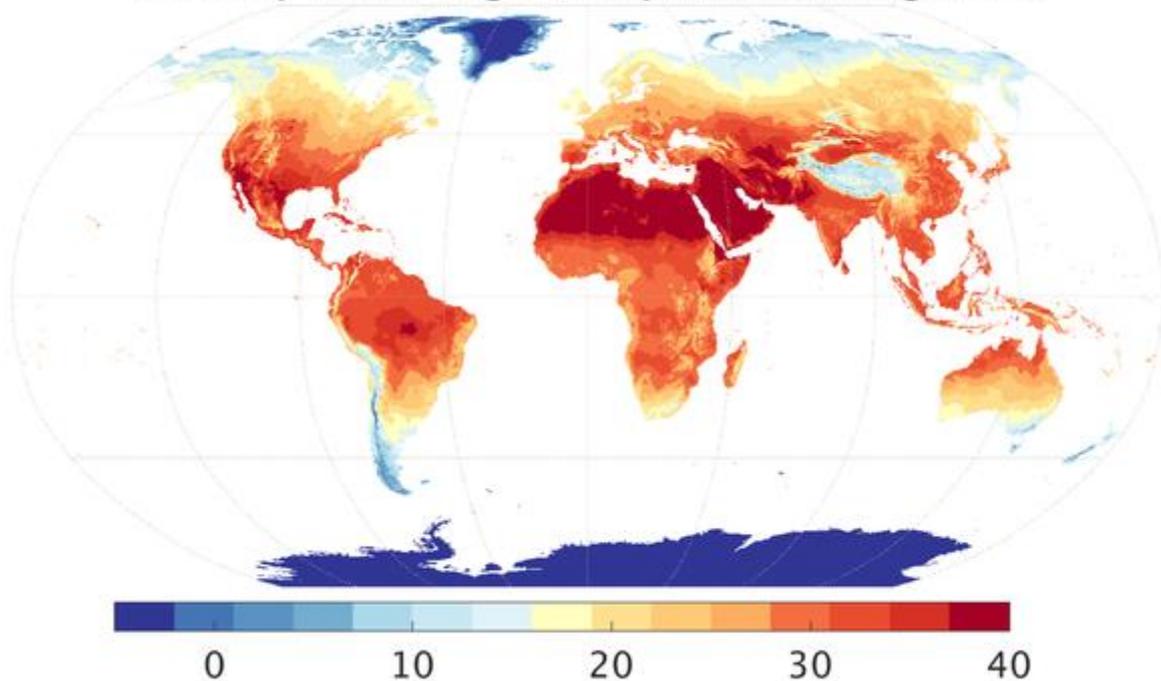


Figure 4 : Variation de température en (°C) estimé par le produit TerraClimate, l'août 2015 (<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>, s.d.).

c- Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2):

La réanalyse MERRA-2 a été réalisée par le Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) Il s'agit d'une réanalyse intermédiaire avec quelques mises à jour importantes, mais de nombreux aspects fondamentaux du système MERRA-2, tels que l'algorithme d'analyse variationnelle et la gestion des observations, ont été inchangés depuis MERRA. MERRA-2 a une résolution temporelle de trois heures, une résolution horizontale d'environ 50 km (0,5° x 0,625°) et une résolution verticale de 72 niveaux depuis la surface jusqu'à 10 Pa. Au cours de l'étude, les

sondages COSMIC-2 RO n'avaient pas été assimilés opérationnellement dans MERRA-2 (Benjamin R. et al, 2021).

Tableau 2 : Produits des réanalyses des températures par satellite.

| Produits | Développeur | Résolution spatiale | Résolution temporelle | Couverture | Couverture Disponibilité |
|--------------|--|---------------------|-----------------------|------------|--------------------------|
| ERA-5 | ECMWF | 0,25 ° x 0,25° | Horaire | Mondiale | 1940 à aujourd'hui |
| TerraClimate | Scientifiques de l'Université de l'Idaho | 0,04° x 0,04 ° | Mensuel | Mondiale | 1958 à aujourd'hui |
| MERRA-2 | GMAO de NASA | 0,5° x 0,625° | 3heures | Mondiale | 1980 à aujourd'hui |

Partie II : Matériels et méthodes

I- Les zones d'études :

1) Contexte géographique, géologique et climatique :

▪ Province d'Essaouira :

La province d'Essaouira, créée en 1975, fait partie de la région Marrakech Safi, Située sur le versant occidental du Haut Atlas. Elle est limitée par :

- la province de Safi au Nord ;
- la province de Chichaoua à l'Est ;
- les provinces d'Agadir et Taroudant au Sud ;
- l'Océan Atlantique à l'Ouest.

La province d'Essaouira s'insère entre les coordonnées suivantes : 31°30'47''N - 9°48'11'' W.

D'un point de vue géologique, la région présente une grande diversité. À l'Ouest, on trouve principalement des dunes récentes, des grès dunaires et des calcaires coquilliers. Le centre est caractérisé par des formations calcaires et marno-calcaires du Cénomaniens et du Turonien. Au Nord et au Sud, on trouve des marnes du Crétacé inférieur, des marnes et marno-calcaires du secondaire et tertiaire, ainsi que des calcaires du Jurassique et des formations rouges du Permo-trias. Cette variété de strates donne également lieu à une grande variété de formes topographiques, telles que des dépressions, des plateaux, des reliefs en cuesta et des vallées (M. Bahir, et al, 2000) (Salah Ouhamdouch, et al, 2017) .

▪ Province de Safi :

La province de Safi s'étend sur une superficie de 3433 km. Elle est délimitée au Nord par la province de Sidi Bennour, à l'Est par celle de Youssoufia, aux Sud par la province d'Essaouira et à l'ouest par la côte atlantique.

La province de Safi s'insère entre les coordonnées suivantes : 32°30' N - 9°22'W

La région examinée se situe dans la zone de la meseta, qui est reconnue pour sa couverture alpine tabulaire bien formées sur un socle primaire pénéplané. Les formations

géologiques qui se trouvent dans cette zone s'étendent de l'ère jurassique à quaternaire et sont de nature lithologique très variée.

La région de Safi est principalement composée de roches sédimentaires. Ces roches se sont formées au fil du temps par l'accumulation de sédiments marins et terrestres. Les montagnes de l'Atlas à l'est de la région présentent une variété de roches, notamment des roches métamorphiques et magmatiques, résultant de l'activité tectonique qui a façonné la région au fil des millions d'années. En bord de mer, on peut trouver des falaises calcaires et d'autres formations rocheuses côtières, dues à l'érosion marine (Boualla, 2016).

- Climatologie du milieu littoral semi-aride (Safi -Essaouira) :

Les deux provinces semi-arides sont baignées d'un climat doux et ensoleillé, avec un été chaud et sec allant de mai à novembre, et un hiver humide et tempéré de novembre à avril. La variété du climat est due à la proximité de l'océan Atlantique et à la hauteur des montagnes. Les précipitations sont caractérisées par deux saisons : une saison pluvieuse en automne et en hiver, suivie d'une longue période peu pluvieuse allant d'avril à octobre. En moyenne, les précipitations annuelles atteignent environ 300 mm (Salah Ouhamdouch, et al, 2017).

▪ **Province de Marrakech :**

Marrakech est située au centre-sud du Maroc, avec une latitude d'environ 31°38'N et une longitude d'environ 8°00'W, dans la région de Marrakech-Safi. La ville se trouve dans une vaste plaine fertile appelée la Plaine de Haouz, située entre les contreforts méridionaux du Haut Atlas au sud et les collines de Jbilet au nord. Elle est traversée par la vallée de l'Oued Tensift.

Géologiquement, Marrakech est située dans une plaine vaste appelée la Plaine de Haouz, qui s'étend du piedmont du Haut Atlas au sud jusqu'à la vallée de Tensift à l'ouest, et est bordée par les collines de Jbilet au nord. Cette plaine est composée de dépôts sédimentaires provenant des montagnes du Haut Atlas, transportés par les cours d'eau torrentiels et composés de galets, de graviers et de limon (Alain Piqué, et al, 1994).

- Climatologie du milieu de plaine aride :

Marrakech possède un climat subtropical semi-désertique qui se caractérise par des hivers doux et des étés torrides. Les températures moyennes oscillent entre 19°C en janvier et 37°C en juillet. Les mois les plus arrosés sont février, mars et janvier, tandis que juillet et août sont

plutôt secs. Tout au long de l'année, il y a très peu de précipitations, avec une moyenne annuelle de seulement 4 mm de pluie. Les mois les plus agréables pour découvrir Marrakech sont ceux allant de novembre à février (<https://fr.climate-data.org/afrique/maroc-181/>, s.d.).

▪ **La région d'Oukaïmeden :**

L'emplacement d'Oukaïmeden se trouve dans le centre du Haut Atlas marocain, à une distance d'environ 75 km vers le sud de Marrakech. Le massif d'Oukaïmeden est très élevé et peut atteindre une altitude allant jusqu'à 3273 mètres au sommet de Toubkal. Cette zone de montagne est célèbre pour sa station de ski, qui est considérée comme la plus haute du continent africain.

D'un point de vue géologique, la région d'Oukaïmeden appartient au domaine structural de la zone axiale du Haut-Atlas de Marrakech, plus précisément à sa bordure septentrionale. Cette bordure est limitée par l'accident nord-atlasique, qui domine de manière abrupte la zone sub-atlasique et le Haouz de Marrakech. Sur le plan tectonique, cette bordure est complexe en raison du faisceau de plis et accidents du N'fis, qui coupent le substratum principalement granitique du Précambrien II ainsi que sa couverture sédimentaire secondaire (Weisrock, 2013).

- Climatologie du milieu de haute montagne :

Le climat de la région montagneuse du Haut Atlas est marqué par des saisons très distinctes. Pendant l'automne et l'hiver, les masses d'air venant de l'Atlantique nord-ouest influencent le temps, tandis que les masses d'air venant du Sahara du sud dominant le climat à la fin du printemps et en été. Les précipitations moyennes annuelles à Oukaïmeden étaient de 540 mm/an entre 1982 et 1994, avec des mois plus pluvieux de janvier à avril et une période sèche typique (Wadi Badri, et al, 1994).

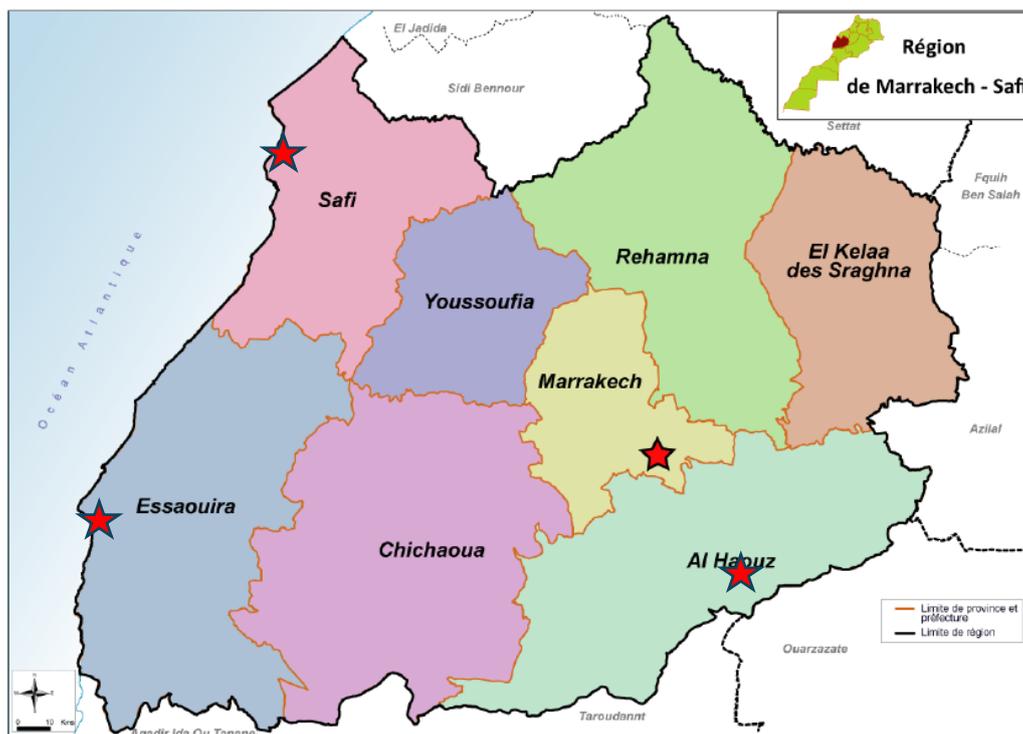


Figure 5 : Carte géographique représente les quatre provinces (<https://www.equipement.gov.ma/Carte-Region/RegionMarrakech/Presentation-de-la-region/Monographie/Pages/Monographie-de-la-region.aspx>, s.d.).

▪ **Province de Dakhla :**

Dakhla est une ville saharienne située dans le sud du Maroc, à une latitude de 23,56 et une longitude de -15,90, placée le long d'une large bande côtière atlantique qui forme la lagune de Dakhla, une étendue d'eau peu profonde et riche en biodiversité, dans la région de Dakhla-Oued Ed-Dahab.

L'extrême sud saharien du Maroc repose sur des terrains cristallins précambriens. Les reliefs légèrement plus accentués bordent le Reguibat, caractérisés par des cuestas orientées est-ouest, constituées de couches sédimentaires paléozoïques avec un pendage très faible vers le nord. Au-delà de ces reliefs appalachiens du Zemmour se trouve la plaine atlantique de Tarfaya, Laâyoune, Boujdour et Dakhla, constituée de séries paléozoïques plissées à l'ouest (Alain Piqué, et al, 1994).

- Climatologie du milieu saharien océanique :

Le climat de Dakhla est aride, avec très peu de précipitations toute l'année. La température moyenne annuelle est de 20,7°C, soit 69,3°F. En moyenne, il pleut 28 mm par an à Dakhla. Étant donné la proximité de la ville avec l'équateur, les étés sont souvent chauds et difficiles à prévoir. Pour profiter au maximum de votre visite, il est recommandé de venir entre les mois

de mars et novembre. La période la plus sèche est le mois de mai, avec une moyenne de 0 mm de pluie, tandis que le mois de janvier est le plus pluvieux, avec une moyenne de 5 mm (<https://fr.climate-data.org/afrique/maroc-181/>, s.d.).

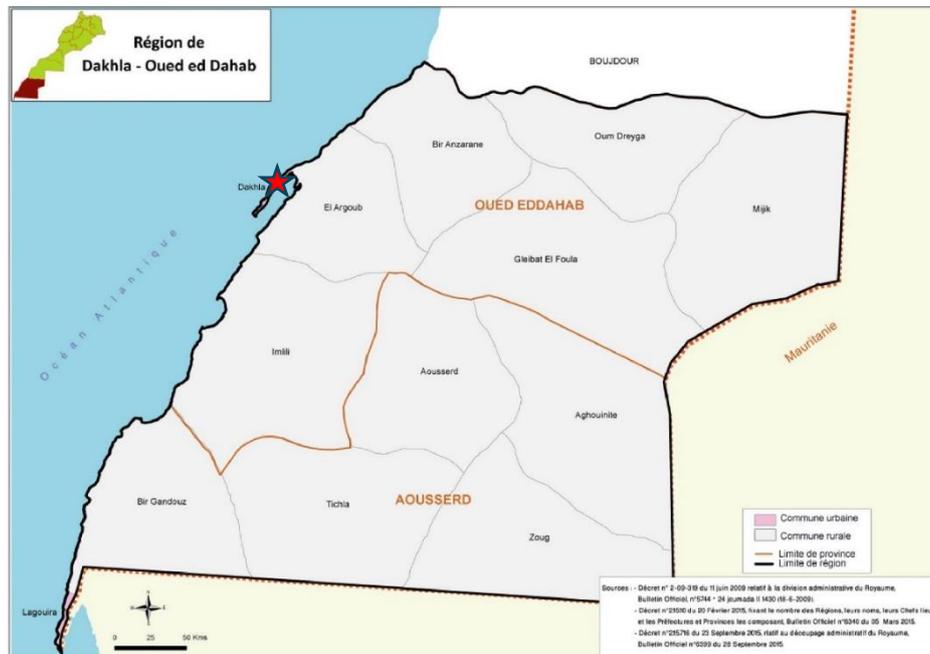


Figure 6: Carte géographique représente la province d'Oued Eddahab (DAKHLA) (<https://gifex.com/fr/fichier/carte-de-dakhla-oued-ed-dahab/>, s.d.)

II- Données utilisées :

1) Réseau d'observation au sol :

Les données des stations d'étude de Marrakech, Oukaimden, Safi, Essaouira et Dakhla sont disponibles quotidiennement, mensuellement et annuellement pour les périodes respectives de 1983-2016, 1988-2009, 1998-2016, 1998-2016 et 2009-2015.

Ces stations sont situées dans des endroits différents : Marrakech dans la plaine d'El Haouz, Oukaimden en haute montagne, Dakhla dans un environnement océanique saharien, et Essaouira et Safi dans des environnements semi-arides côtiers.

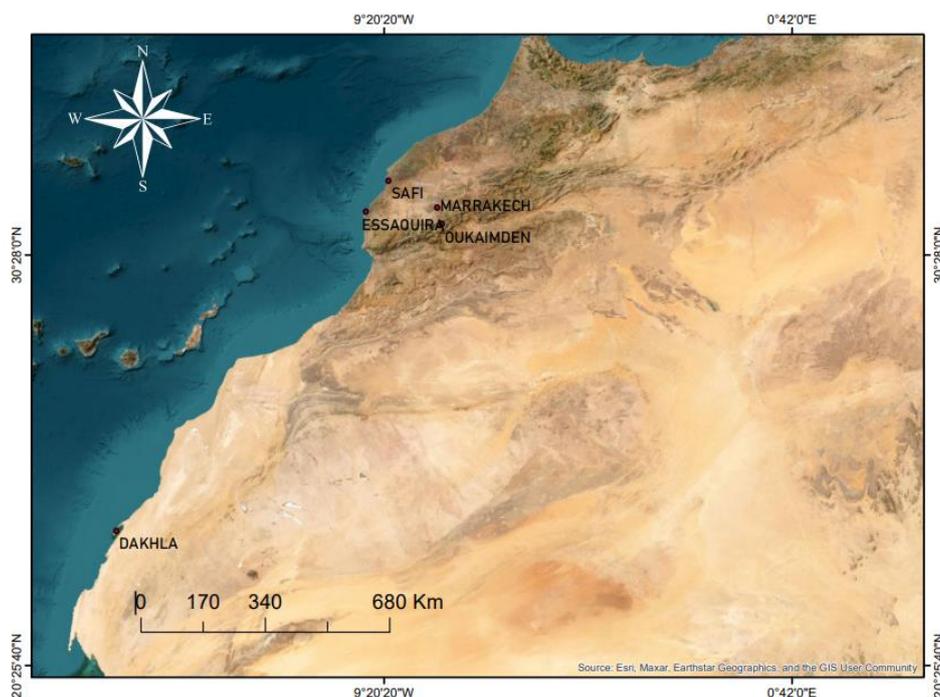


Figure 7: répartition des stations des mesure au sol qui études.

Tableau 3: stations des mesures aux sols :

| Stations | Latitude | Longitude | Altitude | Milieu | Donnée enregistré |
|------------|----------|-----------|----------|----------------------------|-------------------|
| Marrakech | 31,62 | -8,03 | 468 m | Milieu de plaine aride | 1983-2016 |
| Ouakaimden | 31,22 | -7,92 | 2726 m | Milieu de haute montagne | 1988-2009 |
| Safi | 32,28 | -9,23 | 52 m | Milieu littoral semi-aride | 1998-2016 |
| Essaouira | 31,52 | -9,78 | 15 m | Milieu littoral semi-aride | 1998-2016 |
| Dakhla | 23,72 | -15,93 | 7m | Milieu saharien océanique | 2009-2015 |

2) Produits satellitaires et réanalyses de température :

a- Produits utilisés :

Dans cette analyse, on travaille dans différentes stations à l'aide de trois produits spatiaux (CHIRTS, ERA-5, TerraClimate) pour l'estimation de la température :

Tableau 4: différents caractères des produits utilisés.

| Produit | Type | Résolution spatiale | Résolution temporelle | Disponibilité des données |
|--------------|-----------|---------------------|-----------------------|---------------------------|
| CHIRTS | Satellite | 0.05° | Journalier | 1983 à 2016 |
| ERA-5 | Réanalyse | 0.25° | Horaire | 1940 à aujourd'hui |
| TerraClimate | Réanalyse | 0.04° | Mensuelle | 1958 à aujourd'hui |

b- Téléchargement des données satellitaires et des réanalyses des températures :

Les données des produits spatiaux sont facilement accessibles gratuitement à partir des sites web ci-dessous :

- **ERA-5** : <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>
- **TerraClimate** : <https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>
- **CHIRTS** : https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRTSdaily/v1.0/africa_netcdf_p05/

3) Traitement des données et critères statistiques d'évaluation :

Après avoir obtenu les données des cinq stations que nous avons choisies pour l'étude, les mesures des stations au sol, du satellite CHIRTS et des deux réanalyses ERA-5 et TerraClimate, nous avons effectué une comparaison entre ces données à l'échelle journalière, mensuelle et annuelle entre les cinq stations et les deux produits CHIRTS et ERA-5, ainsi qu'à l'échelle mensuelle et annuelle avec le produit TerraClimate.

Nous avons utilisé cinq indices statistiques couramment utilisés pour évaluer les produits spatiaux afin de comprendre la relation entre ces différents produits et les observations de stations météorologiques.

Coefficient de corrélation 'r' :

Le coefficient de corrélation est une mesure qui évalue la puissance de la liaison linéaire entre deux variables analysées. Il est désigné par la lettre « r » dans un rapport de corrélation.

Comment interpréter :

Le coefficient de corrélation est compris entre -1 et 1.

Plus le coefficient est proche de 1, plus la relation linéaire positive entre les variables est forte.

Plus le coefficient est proche de -1, plus la relation linéaire négative entre les variables est forte.

Plus le coefficient est proche de 0, plus la relation linéaire entre les variables est faible.

Biais :

Le biais est utilisé pour déterminer l'exactitude des prévisions et si le modèle a une tendance à surestimer ou sous-estimer les valeurs de la variable d'intérêt.

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.

ME (erreur moyenne) :

La mesure de la précision des estimations du modèle est exprimée par l'erreur moyenne ou l'erreur standard de la moyenne. Si la moyenne est de zéro, cela signifie que la moyenne de la température de station est similaire à celle des données spatiales. Si des valeurs négatives sont présentes, cela veut dire que le modèle sous-estime constamment les valeurs et produit spatiale est inférieurs à ceux qui mesuré au sol.

MAE (erreur absolue moyenne) :

La distinction entre le MAE et le biais réside uniquement dans l'ampleur des écarts entre les valeurs de mesure spatial et de station au sol. L'utilisation du MAE permet d'avoir une meilleure estimation de la précision de la prédiction. Toutefois, il est difficile de déterminer si le modèle a tendance à sous-estimer ou surestimer les prédictions.

RMSE (erreur quadratique moyenne) :

Un autre indicateur important est le RMSE. Il permet d'évaluer la dispersion ou la variabilité de la qualité des prédictions et est lié à la variance du modèle. Cependant, les valeurs de RMSE sont souvent difficiles à interpréter car il est difficile de déterminer si une valeur de variance est faible ou élevée. Pour remédier à cela, il est plus utile de normaliser le RMSE en

le présentant sous forme de pourcentage de la valeur moyenne des observations. Cela permet de donner un sens plus clair à cet indicateur.

Tableau 5: les indicateurs statistiques utilisés (Rachdane et al, 2022).

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

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

- Si est l'estimation des températures par produit.

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

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

Partie III : Résultats d'évaluation des produits

I- Evaluation du produit CHIRTS :

1) La température minimale :

Le tableau 6 ci-dessous présente les résultats du traitement des données observées de 5 stations météorologiques et les données simulées du produit CHIRTS à différentes échelles temporelles concernant la température minimale :

a- Corrélation, RMSE et Biais entre les Températures min observées et estimées par CHIRTS :

À propos de la corrélation entre les données des stations et les données du produit CHIRTS, on observe à l'échelle journalière une forte corrélation pour toutes les stations, variant entre 0,97 pour la station de Marrakech et 0,87 pour la station d'Essaouira.

À l'échelle mensuelle, les données observées et les données estimées par le produit CHIRTS sont bien corrélées, atteignant une valeur maximale de 0,99 à Marrakech et une valeur minimale de 0,92 à Essaouira.

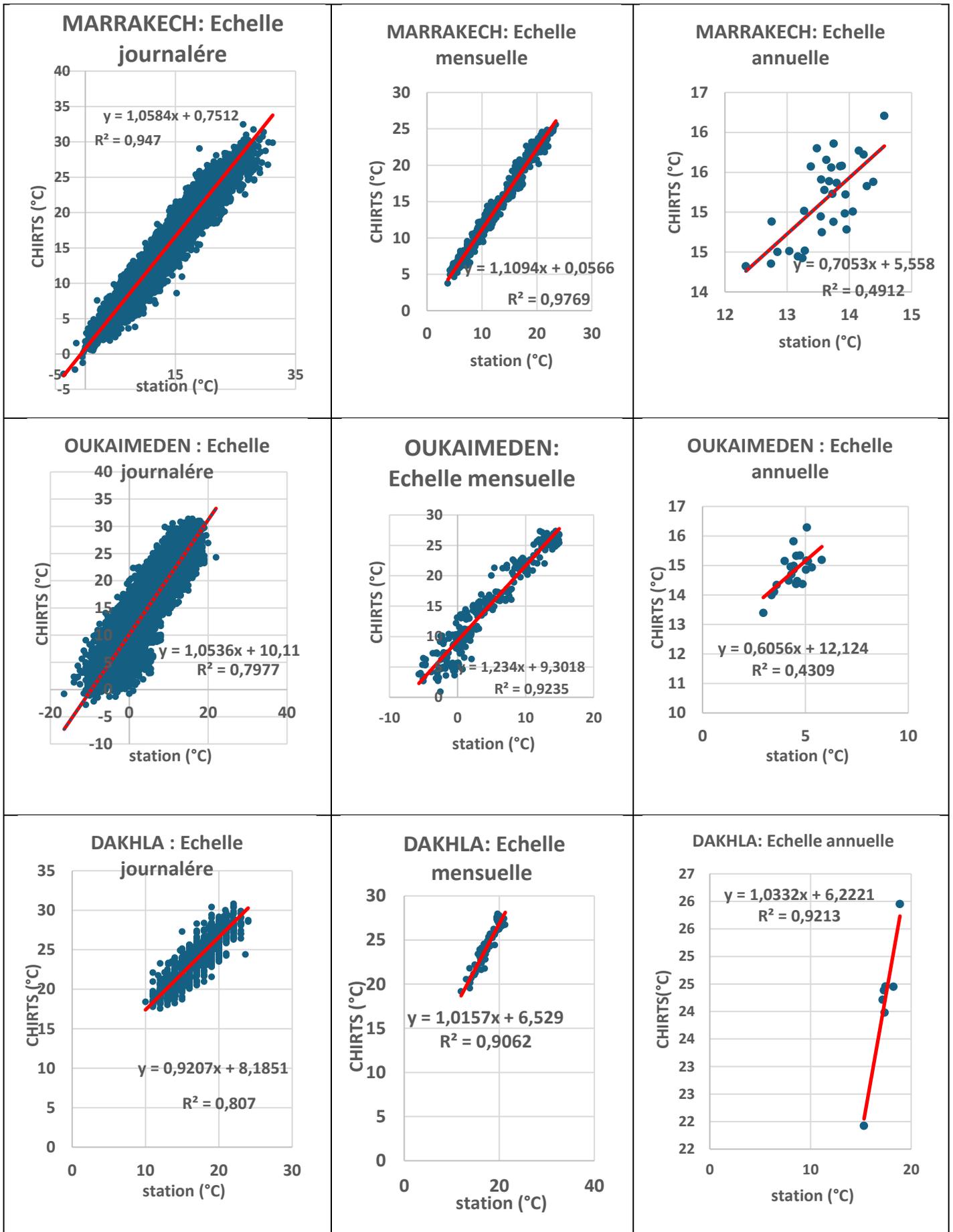
Annuellement, la corrélation varie entre les stations, avec une valeur faible de 0,35 à Safi et une valeur forte de 0,96 à Dakhla.

Le paramètre RMSE enregistre une erreur à l'échelle journalière avec une valeur maximale de 0,15 °C/j dans la région côtière (station de Dakhla), tandis que dans la zone de plaine (station de Marrakech), l'erreur est minimale à 0,02 °C/j. À l'échelle mensuelle, le RMSE présente une erreur maximale de 0,8 °C/mois dans la région de Dakhla et une erreur minimale de 0,09 °C/mois dans la plaine (station de Marrakech). De même, à l'échelle annuelle, cet indicateur présente des erreurs plus importantes que pour les autres échelles, variant de 0,27 °C/an pour la région de Dakhla à 2,57 °C/an pour Marrakech.

Aux trois échelles, toutes les stations affichent un biais élevé variant entre (11,33 % - 233,14 %), notamment la station d'Oukaimeden qui atteint 233,14 %.

Tableau 6: Résultats de traitement des données avec CHIRTS au niveau de Tmin.

| Station | Altitude (m) | Emplacement | Echelle | r | ME | MAE | RMSE | BIAIS % |
|------------|--------------|-------------------|-------------|------|-------|-------|------|---------|
| MARRAKECH | 468 | Plaine | Journalière | 0,97 | 1,50 | 1,72 | 0,02 | 11,37 |
| | | | Mensuelle | 0,99 | 1,50 | 1,54 | 0,09 | 11,36 |
| | | | Annuelle | 0,70 | 1,50 | 1,50 | 0,27 | 11,37 |
| OUKAIMEDEN | 2726 | Montagne | Journalière | 0,89 | 10,11 | 10,12 | 0,12 | 230,26 |
| | | | Mensuelle | 0,96 | 10,18 | 10,18 | 0,65 | 233,14 |
| | | | Annuelle | 0,66 | 10,36 | 10,36 | 2,21 | 232,23 |
| DAKHLA | 7 | Côtère saharienne | Journalière | 0,90 | 6,80 | 6,80 | 0,15 | 38,93 |
| | | | Mensuelle | 0,95 | 6,71 | 6,71 | 0,80 | 38,92 |
| | | | Annuelle | 0,96 | 6,80 | 6,80 | 2,57 | 39,10 |
| ESSAOUIRA | 15 | Côtère semi-aride | Journalière | 0,87 | 5,29 | 5,30 | 0,07 | 35,51 |
| | | | Mensuelle | 0,92 | 5,31 | 5,31 | 0,36 | 35,46 |
| | | | Annuelle | 0,47 | 5,34 | 5,34 | 1,23 | 35,51 |
| SAFI | 52 | Côtère semi-aride | Journalière | 0,93 | 5,85 | 5,85 | 0,07 | 41,11 |
| | | | Mensuelle | 0,96 | 5,86 | 5,86 | 0,40 | 41,22 |
| | | | Annuelle | 0,35 | 5,86 | 5,86 | 1,35 | 41,11 |



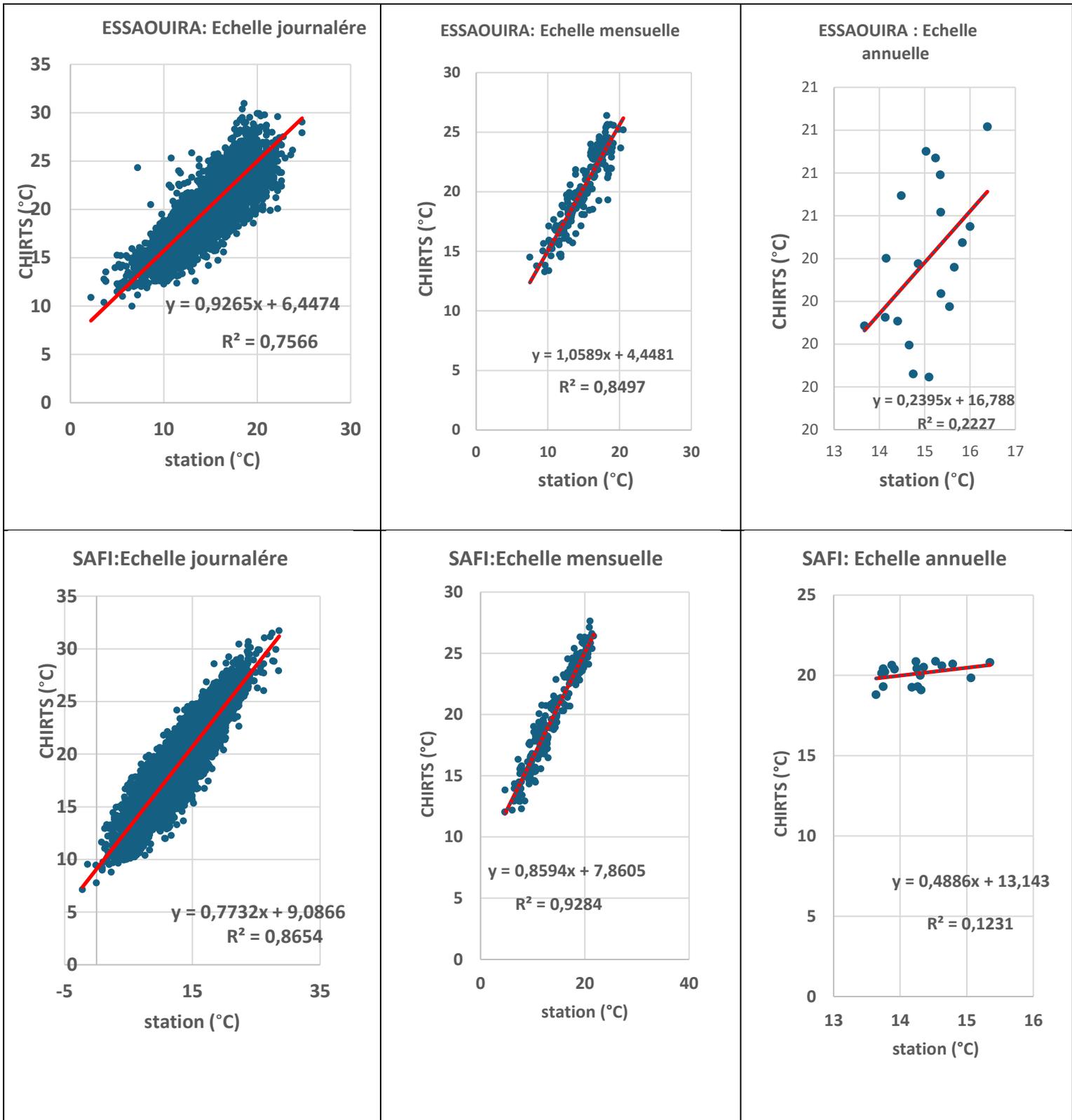


Figure 8: Corrélation entre les données observées et les données CHIRTS pour les cinq stations selon les trois échelles au niveau de Tmin

b- Variation des données observées de chaque station et les données de CHIRTS à différentes échelles temporelles :

Oukaimedain : La performance du produit CHIRTS en haute montagne, dans le cas de la station d'Oukaimeden, a été analysée à différentes échelles de temps entre 1988 et 2009. À l'échelle journalière, la figure montre une surestimation des températures minimales. Les températures estimées par CHIRTS varient entre $-2,79\text{ °C}$ et $31,34\text{ °C}$, tandis que les températures observées par la station varient entre $-16,5\text{ °C}$ et 22 °C . Cette surestimation est particulièrement marquée tout au long de l'année.

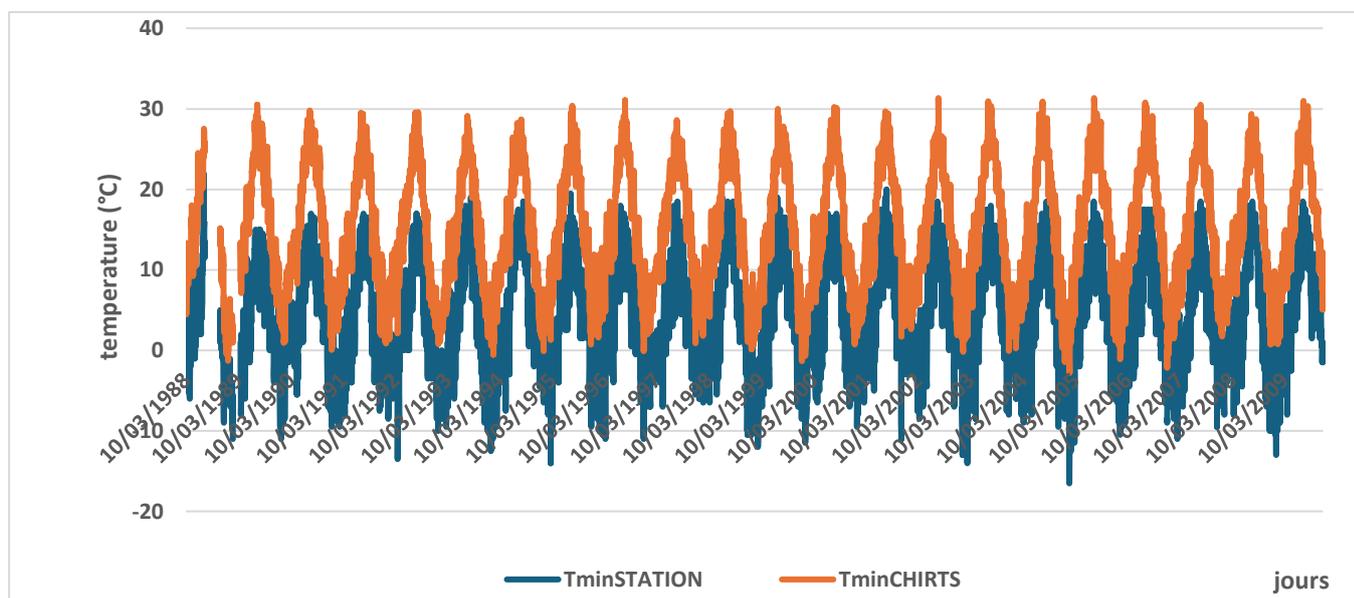


Figure 9: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle journalière (1988-2009)

À l'échelle mensuelle, la figure continue de montrer cette surestimation des températures minimales. Les températures estimées par CHIRTS varient entre $0,9\text{ °C}$ et $27,36\text{ °C}$, tandis que les températures observées par la station varient entre $-5,68\text{ °C}$ et $14,93\text{ °C}$. Cette surestimation est également présente tout au long de l'année.

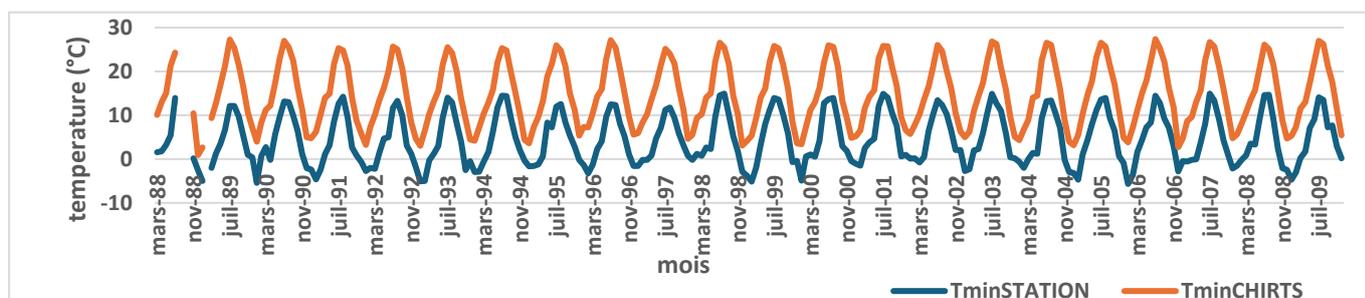


Figure 10: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1988-2009)

Enfin, à l'échelle annuelle, la figure indique également une surestimation des températures minimales. Les températures estimées par CHIRTS varient entre 13,39 °C et 16,28 °C, tandis que les températures observées par la station varient entre 2,95 °C et 5,80 °C.

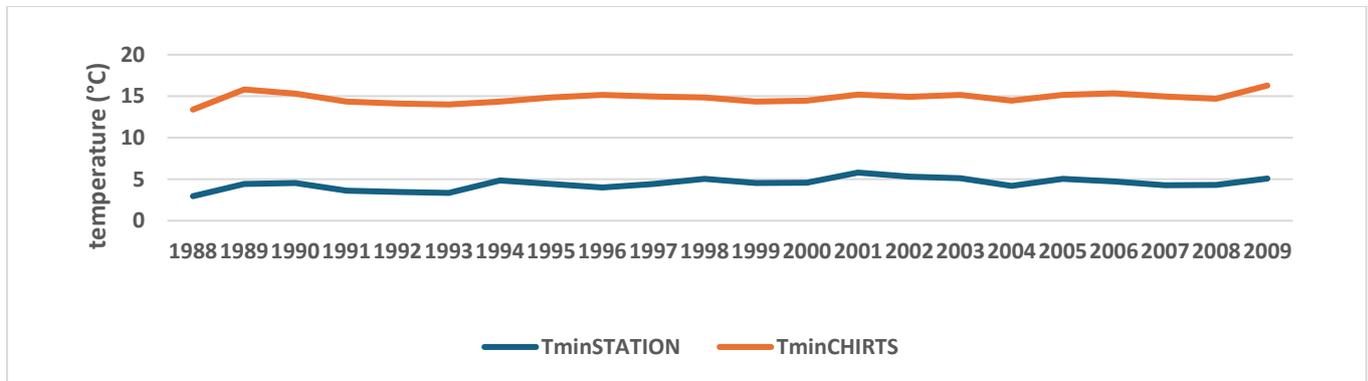


Figure 11: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIME DEN et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1988-2009)

- Marrakech** : La performance du produit CHIRTS en plaine, dans le cas de la station de Marrakech, est analysée à différentes échelles de temps entre 1983 et 2016. Les résultats journaliers (figure 12) montrent une légère surestimation des températures minimales. Les températures estimées par CHIRTS varient entre -2,85 °C et 32,45 °C, tandis que les températures observées par la station varient entre -3,6 °C et 31,2 °C.

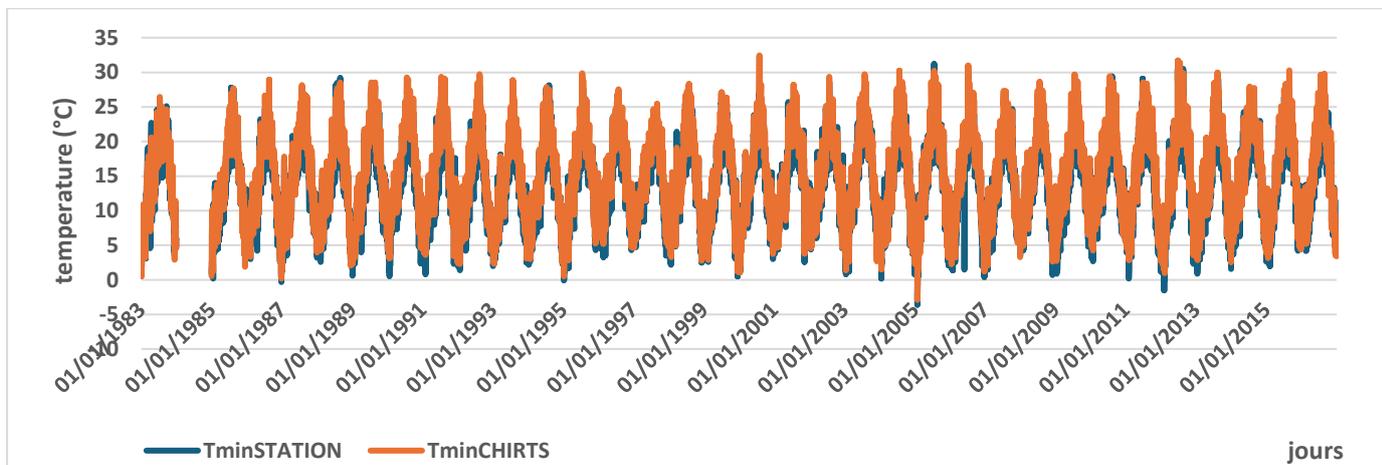


Figure 12: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle journalière (1983-2016)

Les variations mensuelles (voir figure 13) mettent en évidence une tendance à la surestimation pour les événements de faible intensité. Les températures estimées par CHIRTS varient entre 3,73 °C et 25,57 °C, tandis que les températures observées par la station varient entre 3,79 °C et 23,46 °C.

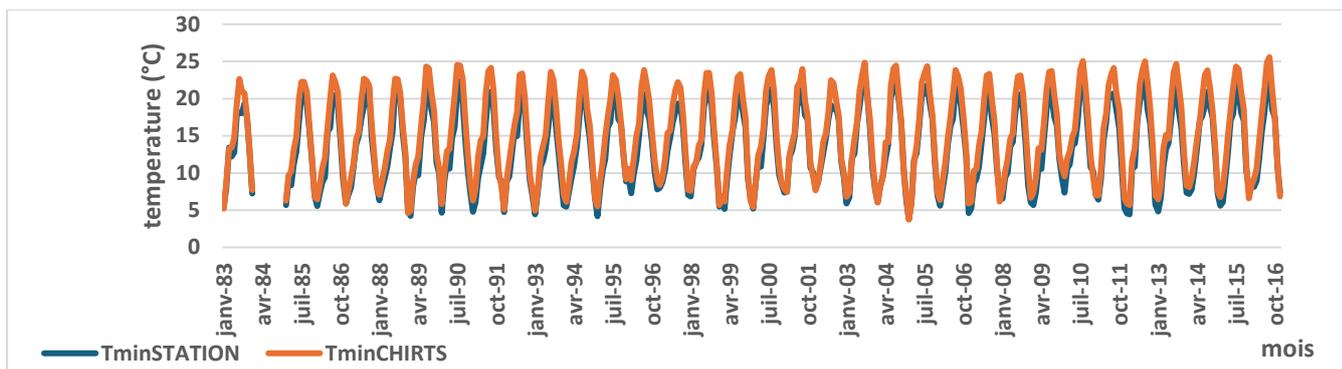


Figure 13: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1983-2016)

Annuellement (figure 14), le produit démontre une surestimation presque faible de tous les événements. Les températures estimées par CHIRTS varient entre 14,32 °C et 16,21 °C, tandis que les températures observées par la station varient entre 12,34 °C et 14,56 °C.

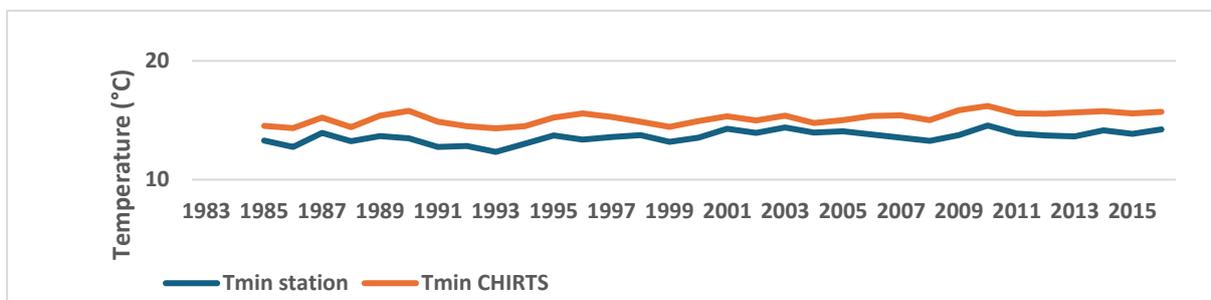


Figure 14: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1983-2016)

- Dakhla** : L'efficacité du produit CHIRTS en zone côtière, dans le cas de la station de DAKHLA, est analysée à différentes échelles de temps entre 2009 et 2015. L'évaluation du produit CHIRTS à la station montre également une tendance générale à surestimer les événements des températures minimales. À l'échelle journalière, les températures estimées par CHIRTS varient entre 17,5 °C et 30,5 °C, tandis que pour les relevés de la station, elles oscillent entre 10 °C et 24 °C. À l'échelle mensuelle, on observe que les températures estimées par CHIRTS varient entre 19,16 °C et 27,96 °C, alors que celles observées par la station varient entre 11,97 °C et 27,96 °C. À l'échelle annuelle, on observe une surestimation des températures avec des valeurs estimées

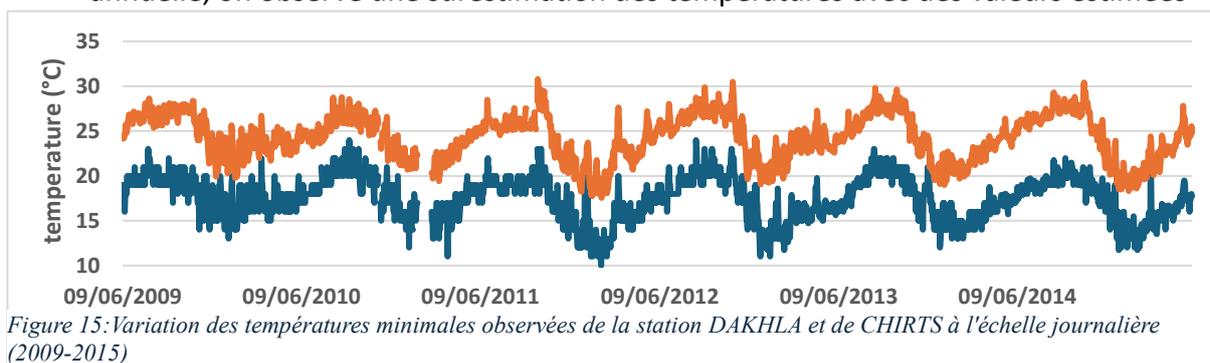


Figure 15: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle journalière (2009-2015)

par CHIRTS se situant entre 21,92 °C et 25,95 °C, tandis que les relevés de la station indiquent des températures variantes entre 15,32 °C et 18,88 °C.

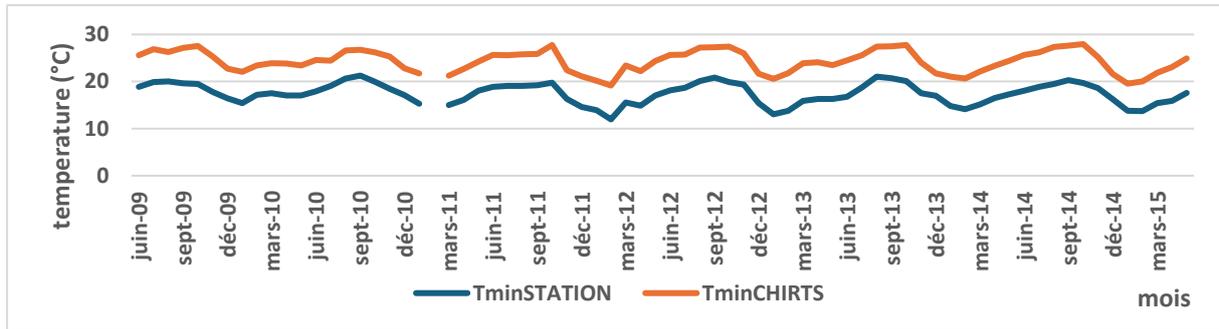


Figure 16: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (2009-2015)

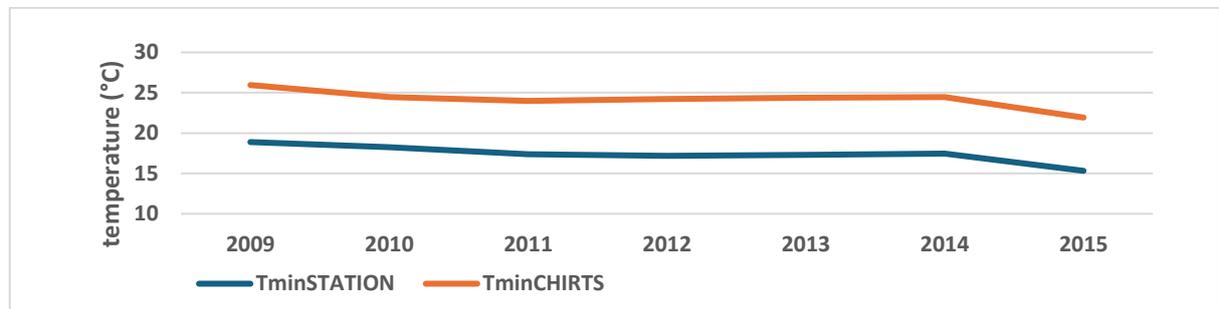


Figure 17: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle annuelle (2009-2015)

- ESSAOUIRA** : La performance du produit CHIRTS en zone côtière, dans le cas de la station d'Essaouira, est analysée à différentes échelles de temps entre 1998 et 2016. Nos résultats journaliers (voir figure 18) montrent une tendance à la surestimation des températures minimales par le produit, avec des estimations généralement variantes entre 9,97 °C et 30,94 °C, tandis que les relevés de la station se situent entre 1,2 °C et 24,8 °C.

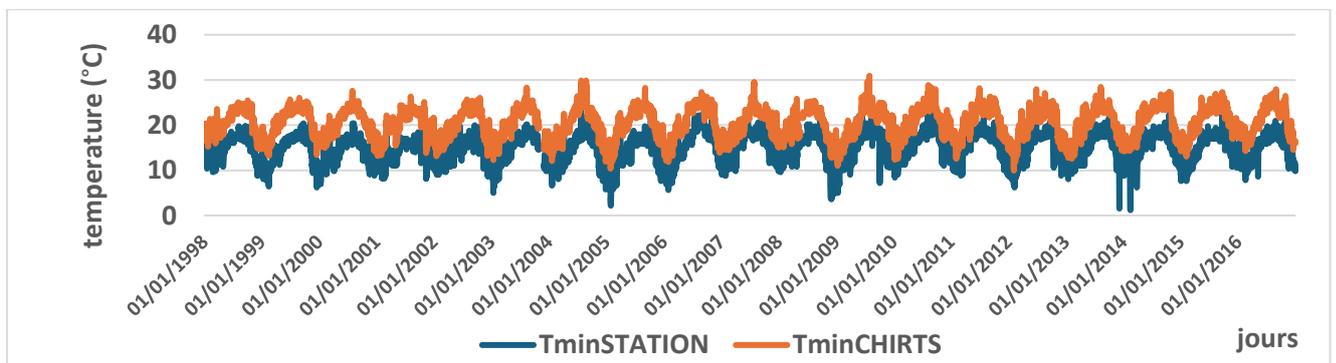


Figure 18: Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle journalière (1998-2016)

En ce qui concerne les évaluations mensuelles (figure 19), nous avons constaté une surestimation des températures minimales.

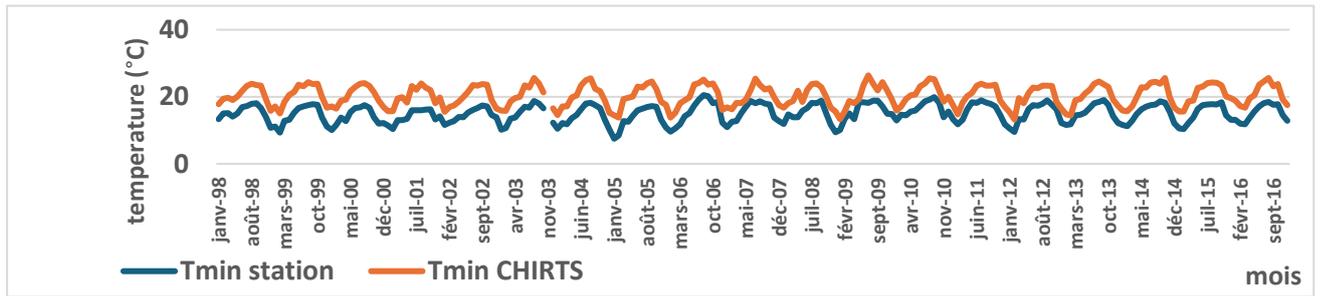


Figure 19: Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1998-2016)

À l'échelle annuelle (figure 20), notre analyse révèle une tendance générale du produit à surestimer toutes les températures minimales au fil des années.

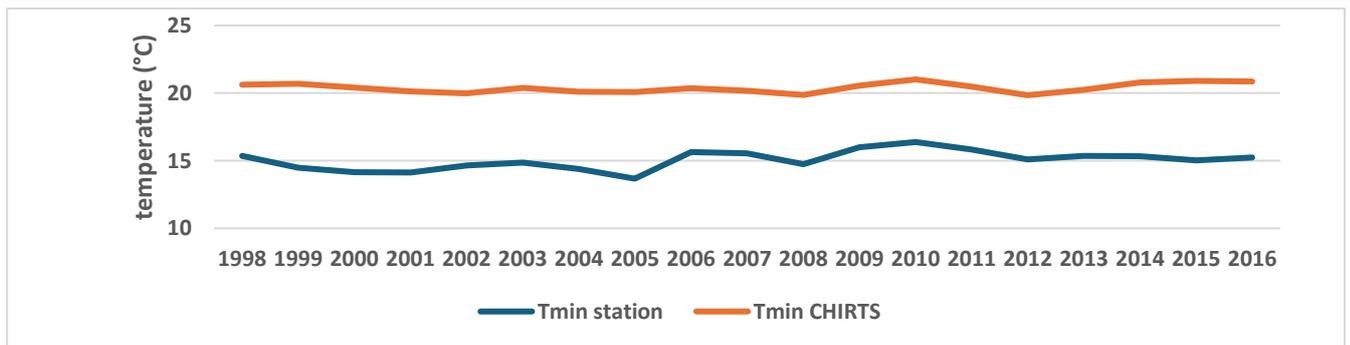


Figure 20: Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1998-2016)

- **SAFI** L'efficacité du produit CHIRTS en zone côtière, dans le cas de la station SAFI, est analysée à différentes échelles de temps entre 1998 et 2016. Les résultats journaliers (voir figure 21) mettent en évidence une surestimation des températures minimales. Les températures estimées par CHIRTS varient entre 7,13 °C et 31,72 °C, tandis que les relevés de la station oscillent entre -2,2 °C et 28,6 °C.

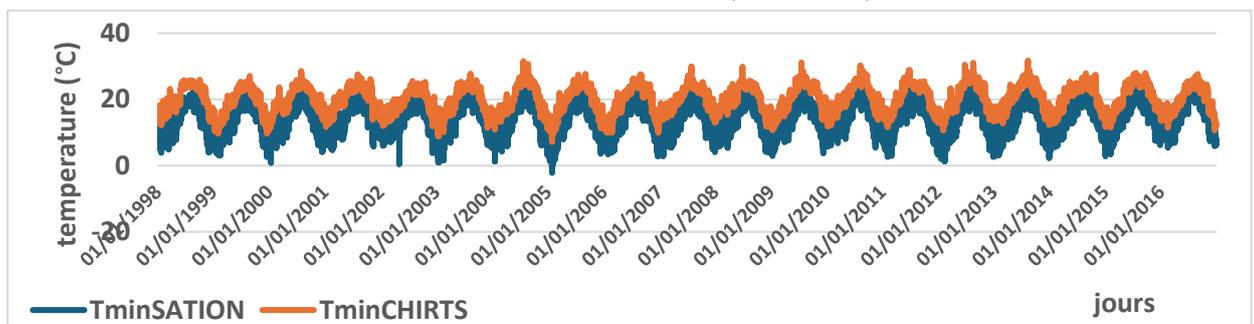


Figure 21: Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle journalière (1998-2016)

À échelle mensuelles (voir figure 22), nous avons observé une surestimation des températures minimales.

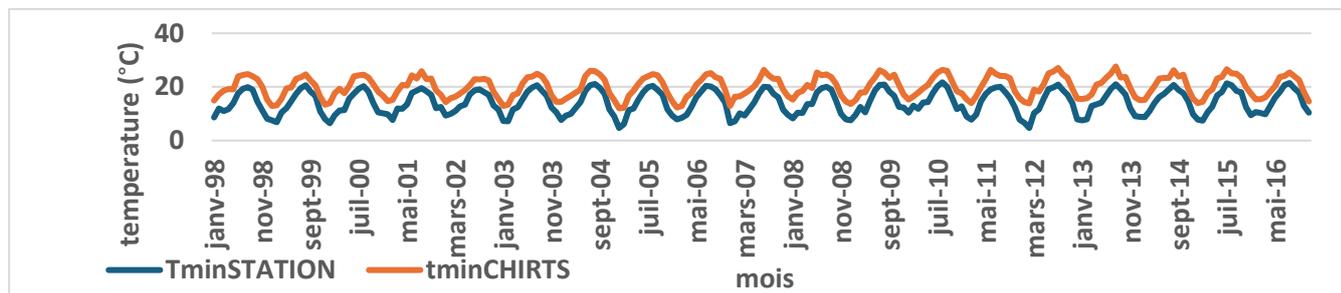


Figure 22: Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1998-2016)

Annuellement (figure 23), le produit montre une surestimation de tous les événements de températures minimales. Les températures estimées par CHIRTS varient entre 18,78 °C et 20,87 °C, tandis que les relevés de la station indiquent des températures variantes entre 13,64 °C et 15,35 °C.

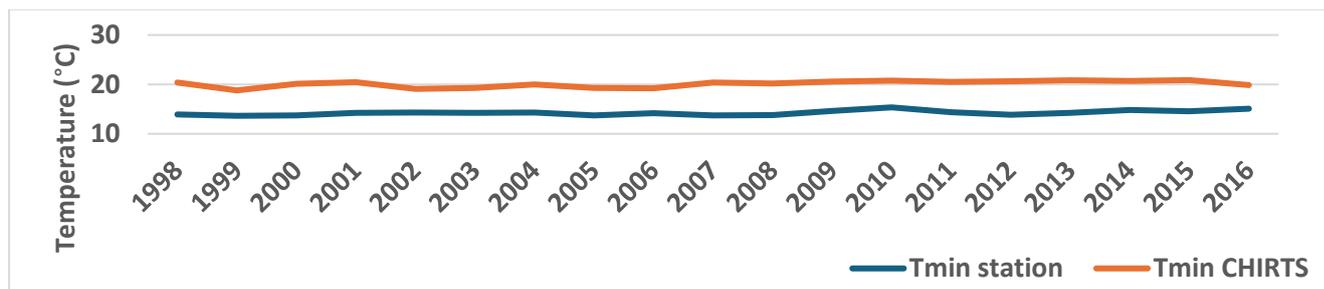


Figure 23: Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1998-2016)

2) Température maximale :

Le tableau 7 ci-dessous présente les résultats du traitement des données observées de cinq stations météorologiques et les données simulées du produit CHIRTS à différentes échelles temporelles concernant la température maximale :

a- Corrélation, RMSE et Biais entre Températures max Observées et estimées par CHIRTS :

Cette collection de données montre une corrélation allant de moyenne à forte entre les températures des stations et celles détectées par le produit CHIRTS à l'échelle journalière, avec une corrélation maximale de 0,98 à Marrakech et une corrélation minimale de 0,72 à Essaouira.

À l'échelle mensuelle, les données observées et les données estimées par le produit CHIRTS sont bien corrélées, atteignant une valeur maximale de 0,99 à Marrakech et une valeur minimale de 0,82 à Essaouira.

À l'échelle annuelle, la corrélation varie entre les stations, allant de 0,54 à Safi (faible) à 0,99 à Dakhla (forte).

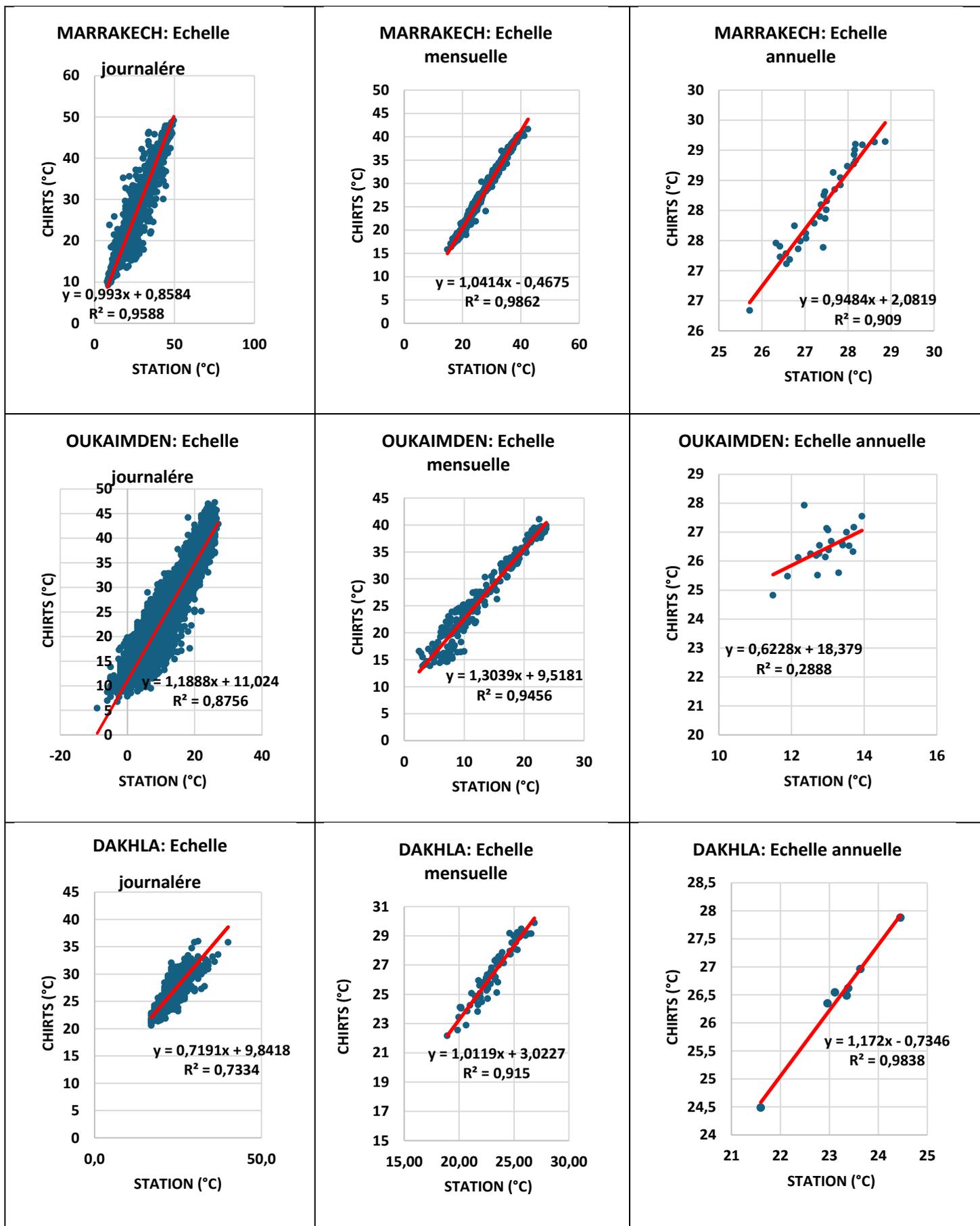
Dans le but de comprendre la précision de l'estimation de la température par le produit satellite CHIRTS, le paramètre RMSE, exprimé en unité de °C par unité de temps (par exemple, 0,16 °C/jour), enregistre différentes valeurs à différentes échelles temporelles en fonction de l'emplacement géographique et topographique des stations. Ces valeurs varient entre 0,02 °C, enregistrées à la station de Marrakech, et 0,16 °C à la station d'Oukaimden à l'échelle journalière. L'ampleur de l'erreur à l'échelle mensuelle est généralement plus élevée dans les régions montagneuses d'Oukaimden par rapport à la zone côtière, où l'erreur est minimale et ne dépasse pas 0,05 °C à Safi, 0,25 °C à Essaouira et 0,4 °C à Dakhla.

Annuellement, le RMSE présente des valeurs moyennes comprises entre 0,14 °C et 2,88 °C, allant de la zone côtière de Dakhla vers les montagnes.

Un autre paramètre très important concerne la surestimation ou la sous-estimation de la température maximale par le produit satellite CHIRTS par rapport à celle mesurée par les stations au sol, et ce, à trois échelles temporelles. Les stations de Marrakech et Safi sont marquées par des biais proches de la valeur parfaite (0 %), avec des valeurs entre 2 % et 3 %, tandis que les stations de Dakhla et Essaouira présentent des biais caractérisés par des valeurs comprises entre 14 % et 18 %. La station d'Oukaimden présente un biais très élevé atteignant 104 %.

Tableau 7: Résultats de traitement des données avec CHIRTS au niveau de Tmax

| Station | Altitude (m) | Emplacement | Echelle | r | ME | MAE | RMSE | BIAIS % |
|------------|--------------|--------------------|-------------|------|-------|-------|------|---------|
| MARRAKECH | 468 | Plaine | Journalière | 0,98 | 0,67 | 1,22 | 0,02 | 2,43 |
| | | | Mensuelle | 0,99 | 0,66 | 0,88 | 0,05 | 2,43 |
| | | | Annuelle | 0,95 | 0,67 | 0,67 | 0,12 | 2,44 |
| OUKAIMEDEN | 2726 | Montagne | Journalière | 0,94 | 13,47 | 13,47 | 0,16 | 104,04 |
| | | | Mensuelle | 0,97 | 13,44 | 13,44 | 0,85 | 104,09 |
| | | | Annuelle | 0,54 | 13,49 | 13,49 | 2,88 | 104,16 |
| DAKHLA | 7 | Côtière saharienne | Journalière | 0,86 | 3,78 | 3,86 | 0,11 | 16,59 |
| | | | Mensuelle | 0,96 | 3,30 | 3,30 | 0,39 | 14,19 |
| | | | Annuelle | 0,99 | 3,26 | 3,26 | 1,23 | 14,03 |
| ESSAOUIRA | 15 | Côtière semi-aride | Journalière | 0,72 | 3,54 | 3,69 | 0,05 | 17,38 |
| | | | Mensuelle | 0,82 | 3,37 | 3,41 | 0,25 | 16,50 |
| | | | Annuelle | 0,80 | 3,39 | 3,39 | 0,78 | 16,52 |
| SAFI | 52 | Côtière semi-aride | Journalière | 0,91 | 0,58 | 1,76 | 0,03 | 2,41 |
| | | | Mensuelle | 0,98 | 0,59 | 0,85 | 0,06 | 2,45 |
| | | | Annuelle | 0,89 | 0,58 | 0,58 | 0,14 | 2,43 |



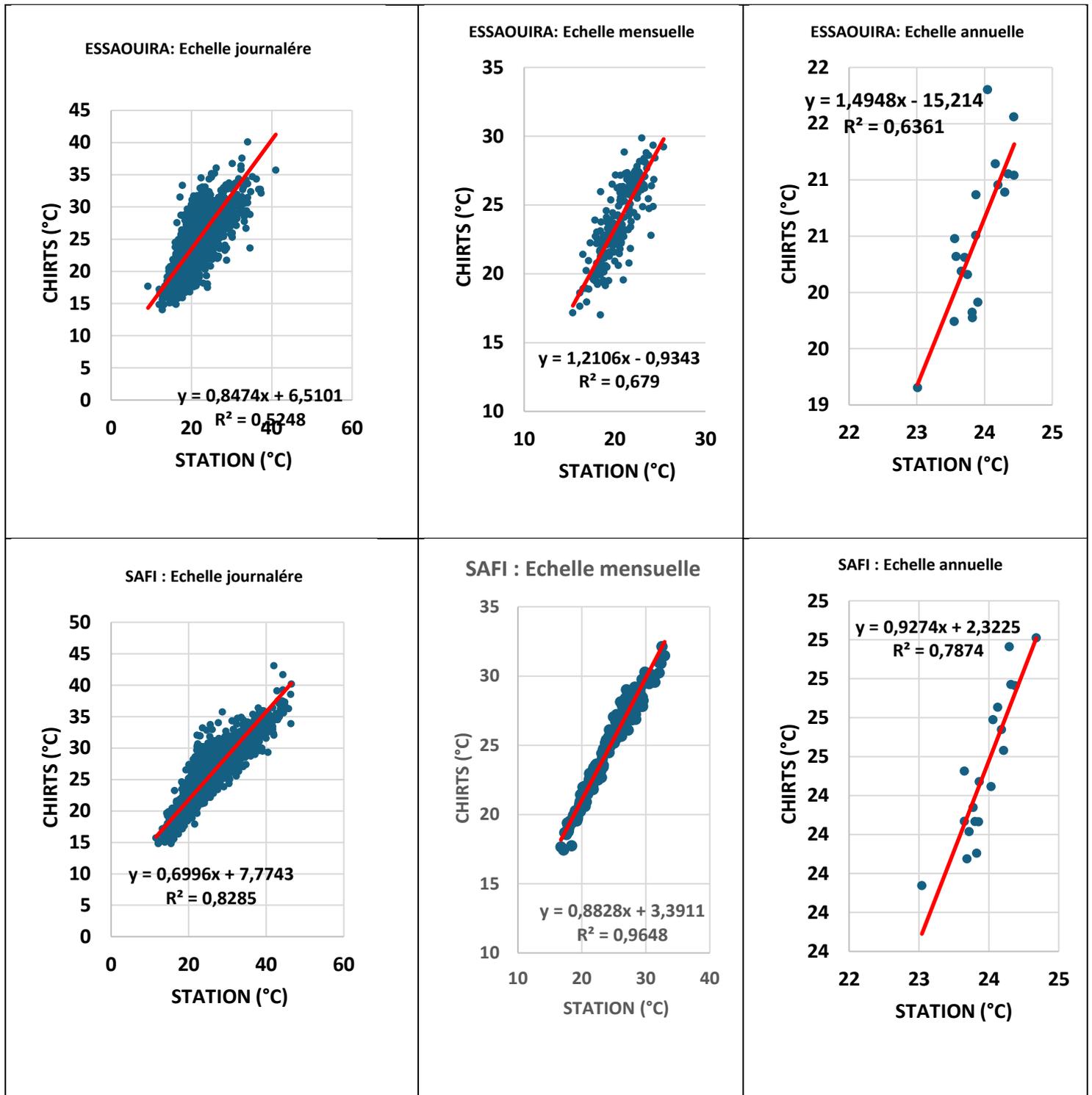


Figure 24: Corrélation entre les données observées et les données CHIRTS pour les cinq stations selon les trois échelles au niveau de Tmax.

b- Variation des données observées de chaque station et les données de CHIRTS à différent l'échelle temporelle :

Oukaimden : La performance du produit CHIRTS dans cette station, située dans les montagnes du Haut Atlas, est analysée à différentes échelles temporelles entre 1988 et 2009.

À l'échelle journalière, la courbe ci-dessous montre une surestimation des températures maximales. Les températures détectées par CHIRTS varient entre 5,43 °C et 47,23 °C, tandis que les températures observées par la station varient entre -9 °C et 27 °C. Cette surestimation est particulièrement marquée tout au long de l'année.

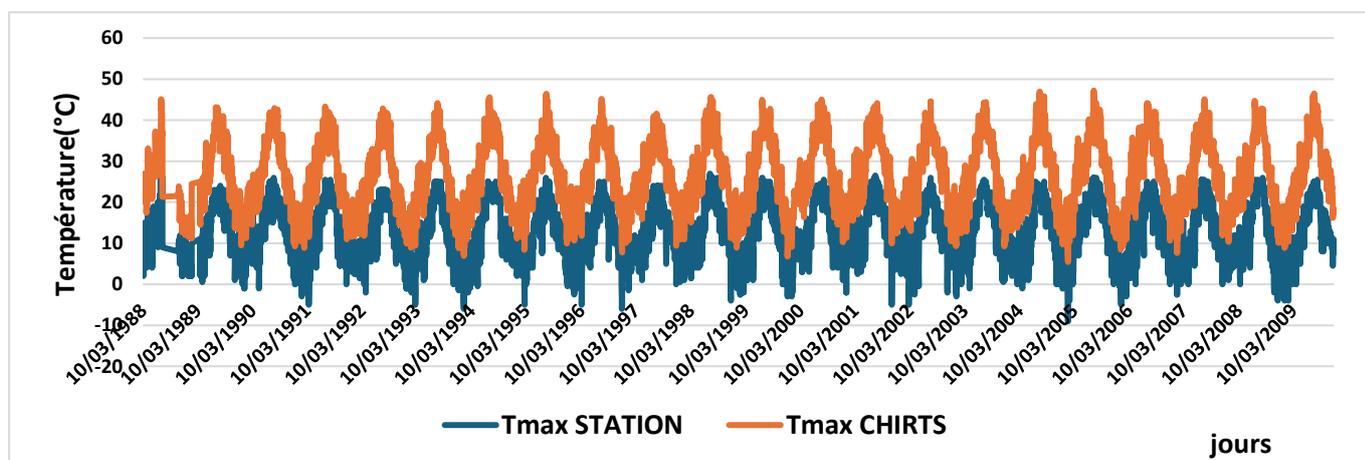


Figure 25 : Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle journalière (1988-2009)

Chaque mois, on constate que les températures maximales sont surestimées. Les estimations de CHIRTS vont de 13,8 °C à 41,02 °C, tandis que les températures observées varient de 2,5 °C à 23,71 °C. Cette surestimation est constante tout au long de l'année.

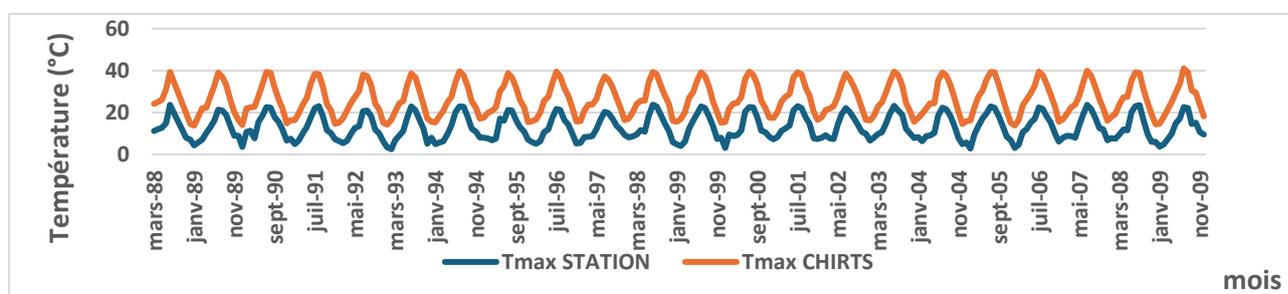


Figure 26: Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1988-2009)

Enfin, sur une base annuelle, il est clair que les températures maximales sont surestimées. Selon les calculs de CHIRTS, les températures maximales vont de 24,81 °C à 27,92 °C, tandis que la station météo enregistre des températures allant de 11,49 °C à 13,94 °C.

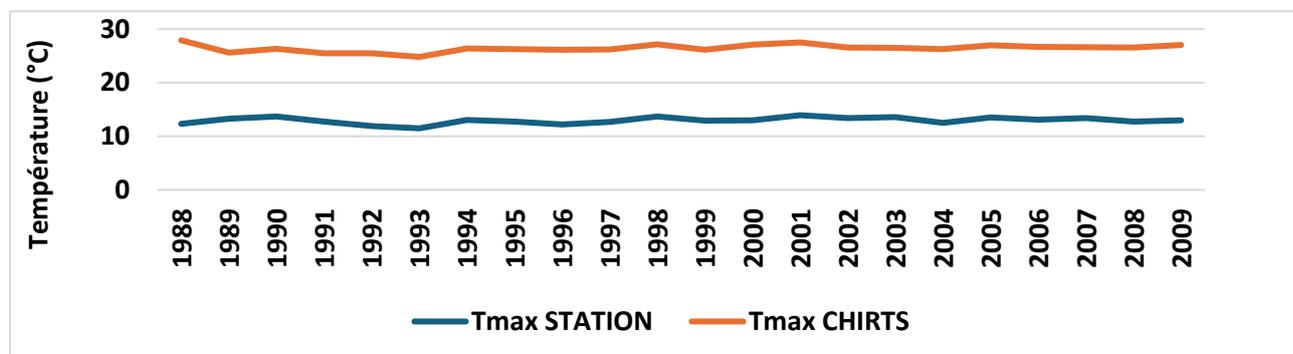


Figure 27: Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1988-2009)

Marrakech : L'analyse de la performance du produit CHIRTS dans la station de Marrakech a été effectuée pour différentes échelles de temps entre 1983 et 2016. Les résultats obtenus quotidiennement (voir figure 28) montrent une légère surestimation des températures maximales, d'environ 2,43 %. Les températures estimées par CHIRTS varient entre 7,9 °C et 49,6 °C, tandis que les températures observées par la station varient entre 9,29 °C et 49,15 °C.

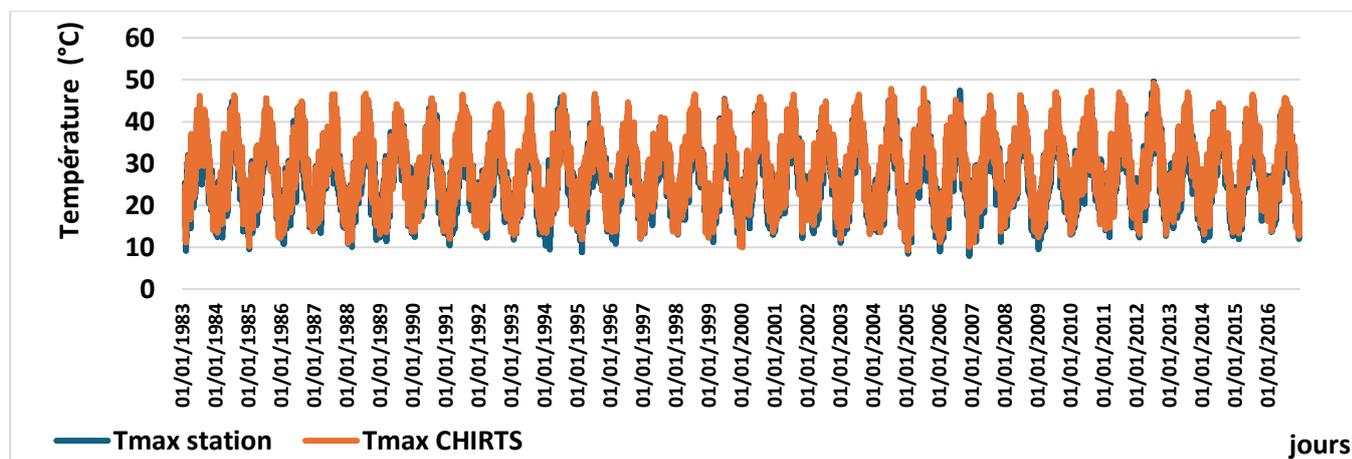


Figure 28: Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle journalière (1983-2016)

Les variations mensuelles (voir figure 29) mettent en évidence une tendance à la surestimation pour les événements de forte intensité. Les températures estimées par CHIRTS varient entre 15 °C et 42 °C, tandis que les températures observées par la station varient entre

14 °C et 42 °C.

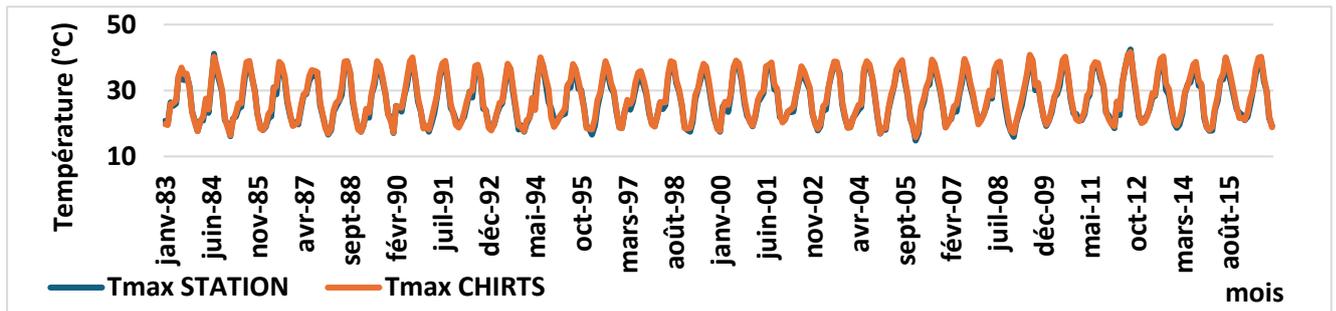


Figure 29: Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1983-2016)

En termes annuels (voir figure 30), le produit CHIRTS montre une surestimation presque faible de tous les événements. Les températures estimées varient entre 26 °C et 29 °C, tandis que les températures observées par la station varient entre 25,72 °C et 28,87 °C.

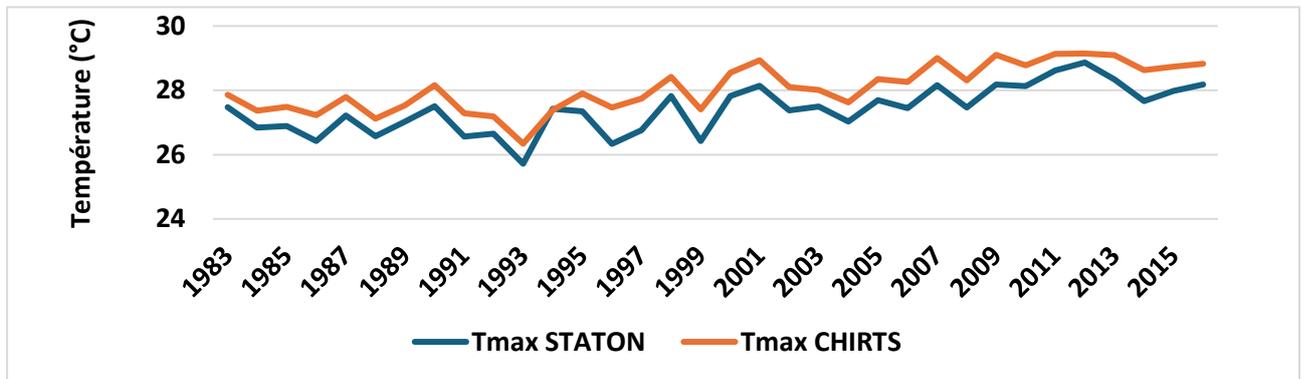


Figure 30: Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1983-2016)

Dakhla : Une analyse de l'efficacité du produit CHIRTS dans la région côtière saharienne a été effectuée sur différentes échelles temporelles de 2009 à 2015, en fonction des données disponibles de la station. L'évaluation du produit CHIRTS à la station montre une tendance générale à surestimer la température de 14 % à 16 %. À l'échelle quotidienne, les températures estimées par CHIRTS varient entre 20 °C et 36 °C, tandis que celles mesurées par la station oscillent entre 17 °C et 40 °C.

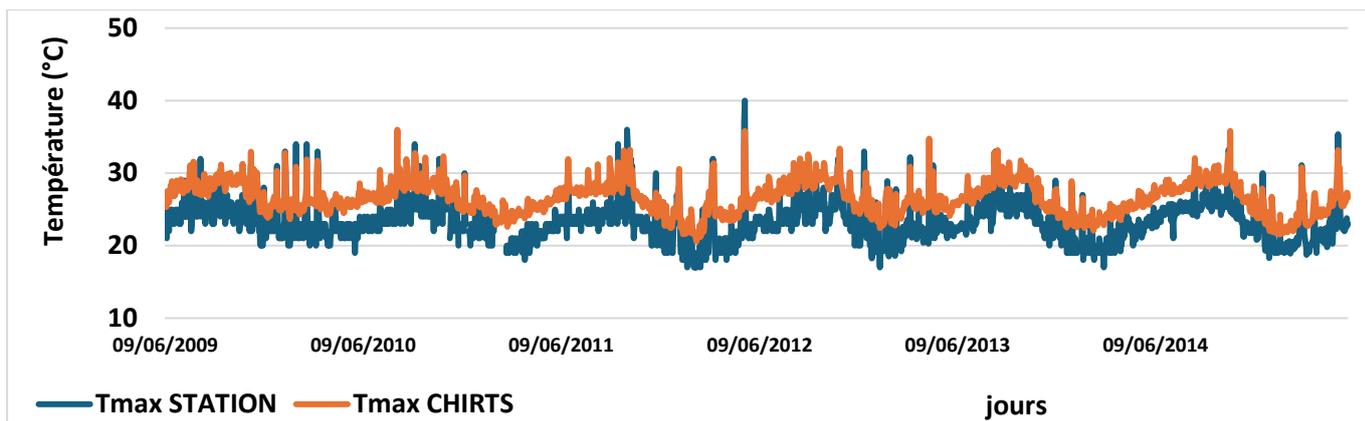


Figure 31: Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle journalière (2009-2015)

À l'échelle mensuelle, les températures estimées par CHIRTS varient entre 22 °C et 30 °C, alors que celles observées par la station varient entre 19 °C et 27 °C.

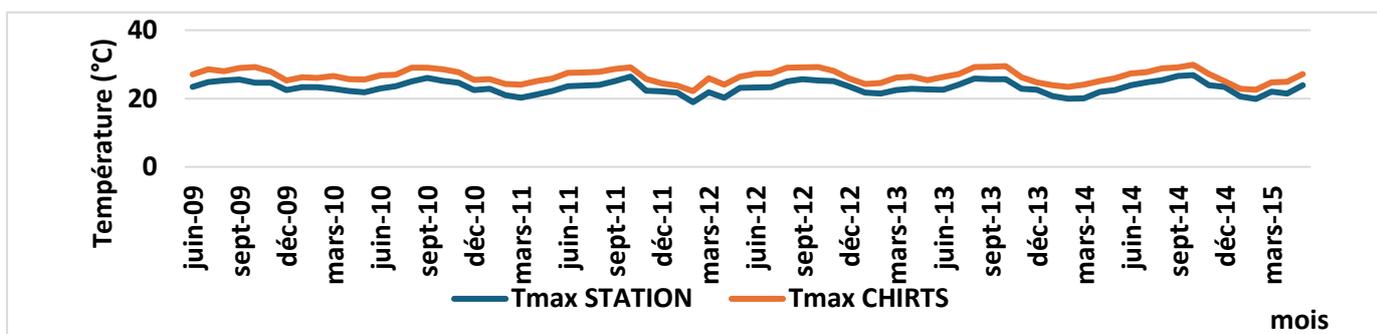


Figure 32: Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (2009-2015)

Annuellement, CHIRTS détecte une plage de températures comprise entre 24 °C et 28 °C, tandis que les valeurs mesurées par la station sont dans la plage de 21 °C à 25 °C.

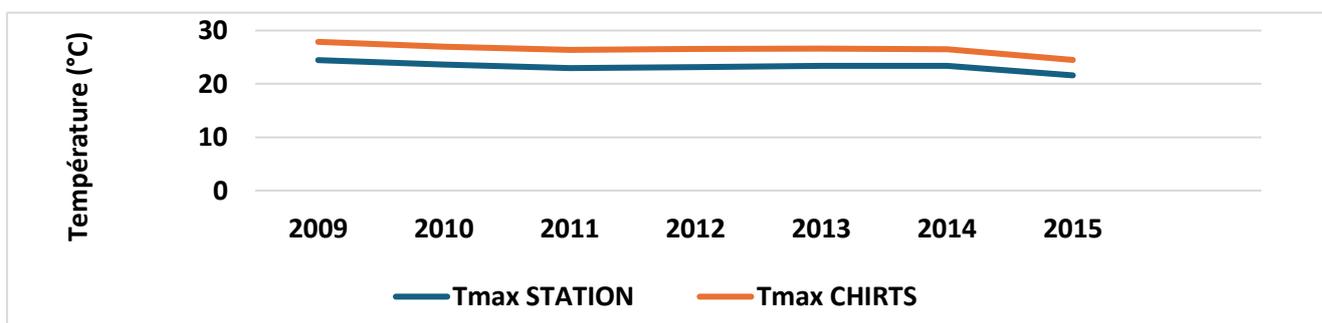


Figure 33: Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de CHIRTS à l'échelle annuelle (2009-2015)

ESSAOUIRA : Une analyse a été effectuée sur la précision du produit CHIRTS entre 1998 et 2016 dans les zones côtières, en se concentrant sur la station d'Essaouira. Les résultats

quotidiens montrent une tendance à surestimer les températures maximales de plus de 17 %, avec des estimations généralement comprises entre 14 °C et 40 °C, tandis que les relevés de la station sont compris entre 9 °C et 41 °C.

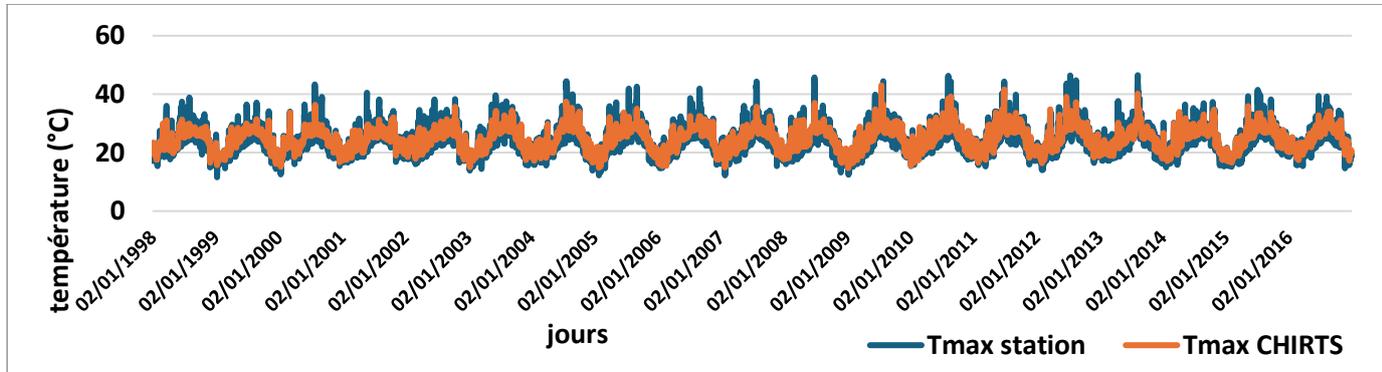


Figure 34: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle journalière (1998-2016)

Pour les évaluations mensuelles et annuelles, il y a toujours une surestimation des températures maximales, mais cette fois-ci inférieure à 17 %, avec une MAE similaire à tous les niveaux temporels.

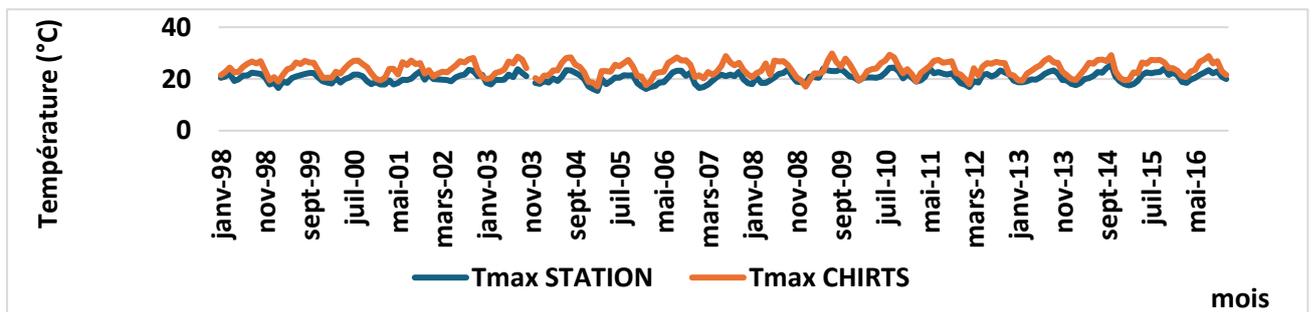


Figure 35: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1998-2016)

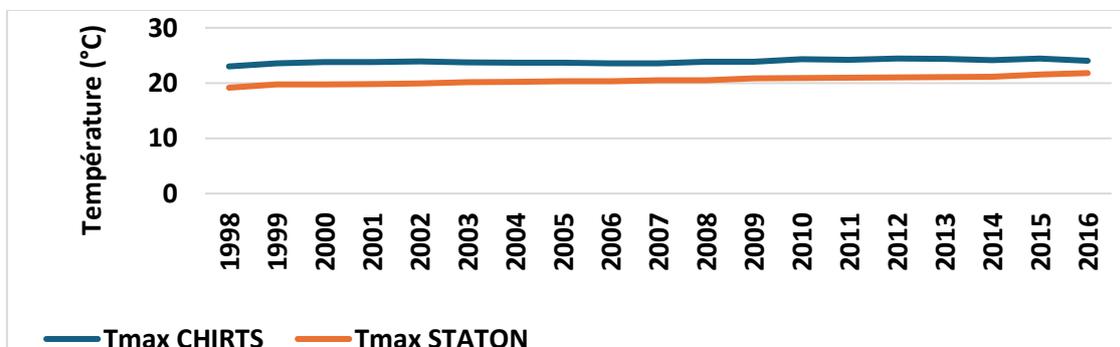


Figure 36: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1998-2016)

Safi : On a étudié l'efficacité du produit CHIRTS dans la zone côtière, à la station de Safi, sur différentes périodes entre 1998 et 2016. Les données journalières ont montré que les températures maximales étaient surestimées par le produit CHIRTS, avec une fourchette allant de 14 °C à 43 °C, tandis que les relevés de la station oscillaient entre 11 °C et 47 °C.

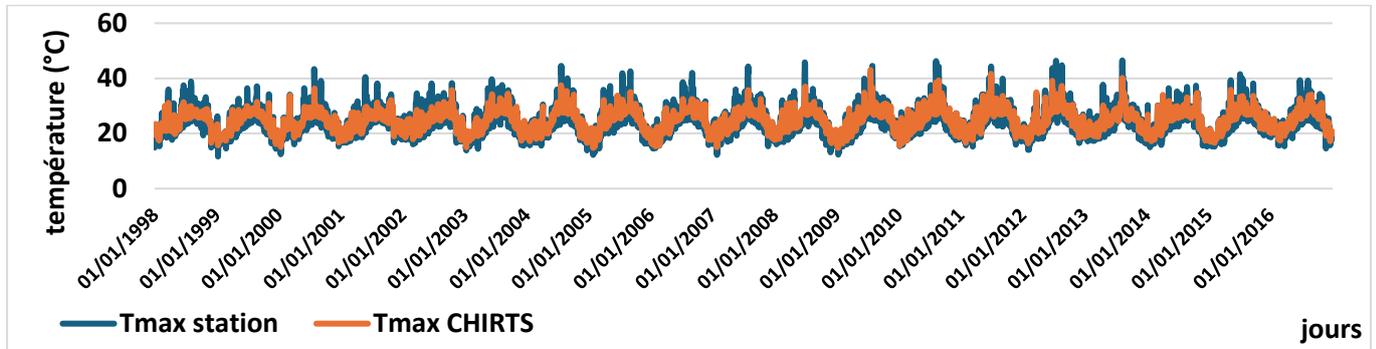


Figure 37: Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle journalière (1998-2016)

À l'échelle mensuelle, on a constaté une surestimation d'environ 3 % des températures maximales par CHIRTS.

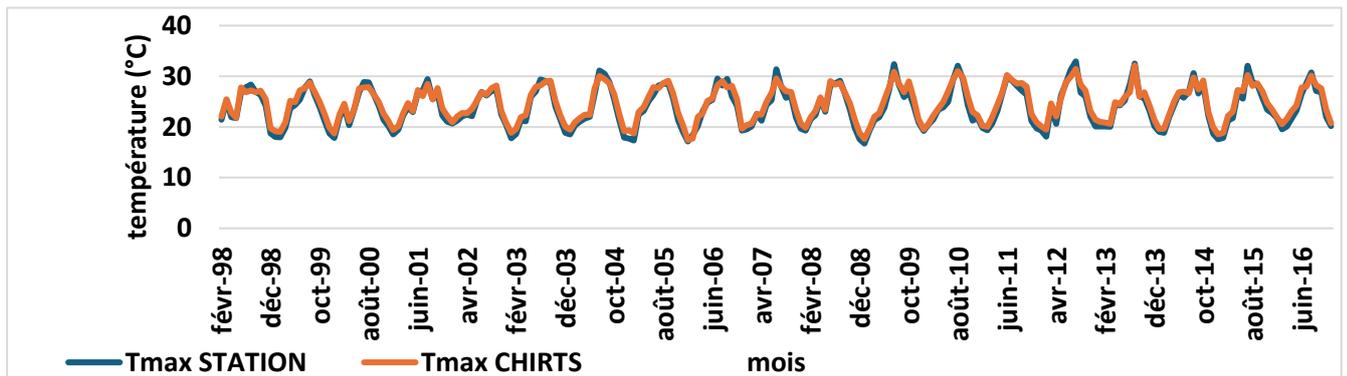


Figure 38: Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle mensuelle (1998-2016)

Annuellement, la surestimation persistait, avec des températures estimées par CHIRTS entre 23,93 °C et 25,21 °C, tandis que les relevés de la station indiquaient des températures allant

de 23 °C à 25 °C.

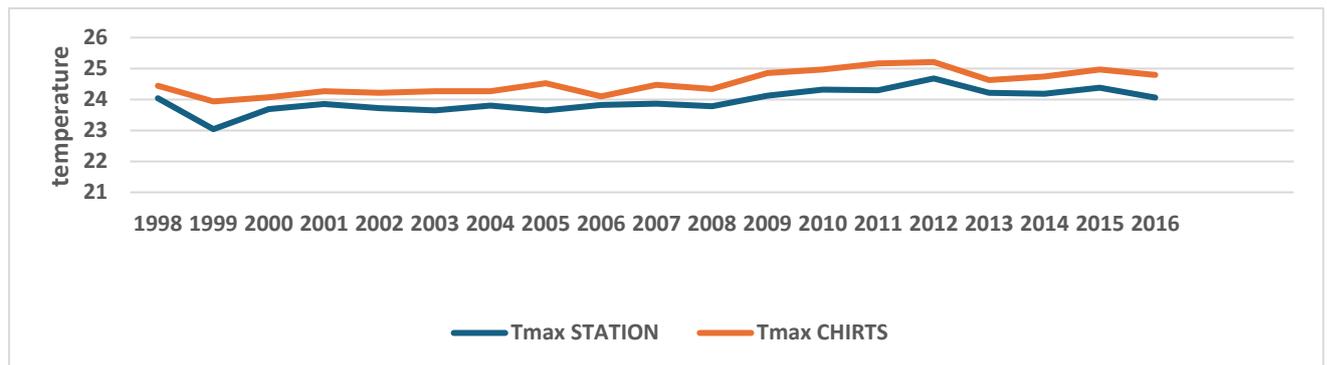


Figure 39: Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de CHIRTS à l'échelle annuelle (1998-2016)

II-Evaluation du produit ERA-5 :

1) La température minimale :

Le tableau 8 présente les résultats du traitement des données observées de 5 stations météorologiques et les données simulées du produit ERA-5 à différentes échelles temporelles :

a- Corrélation, RMSE et Biais entre Températures min Observées et estimées par ERA-5 :

En ce qui concerne la corrélation entre les données des stations météorologiques et les données du produit ERA-5 à l'échelle journalière, on observe une forte corrélation pour toutes les stations. Celle-ci varie de 0,98 pour la station de Marrakech à 0,81 pour la station d'Essaouira.

À l'échelle mensuelle, les données observées et les données estimées par le produit ERA-5 montrent une bonne corrélation, atteignant une valeur maximale de 1 à Marrakech et une valeur minimale de 0,87 à Essaouira.

À l'échelle annuelle, les corrélations entre les stations varient considérablement, allant d'une faible valeur de 0,04 à Essaouira à une forte valeur de 0,98 à Dakhla.

Le paramètre RMSE enregistre une erreur à l'échelle journalière avec une valeur maximale de 0,04 °C/j dans la région montagneuse (station d'Oukaïmeden), tandis que dans la zone côtière (station de Safi), l'erreur est minimale à 0,02 °C/j. À l'échelle mensuelle, le RMSE présente une erreur maximale de 0,2 °C/mois dans la région d'Oukaïmeden et une erreur

minimale de 0,05 °C/mois dans la plaine (station de Marrakech). De même, à l'échelle annuelle, cet indicateur présente des erreurs plus importantes que pour les autres échelles, variant de 0,69 °C/an pour la région d'Oukaïmeden à 0,17 °C/an pour Marrakech.

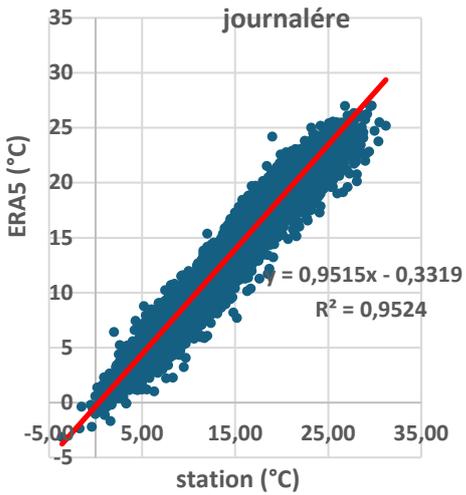
Aux trois échelles, la station de Marrakech affiche un biais inférieur à 0 %, avoisinant -7,32 %. Les stations de Dakhla et de Safi présentent un biais proche de la valeur parfaite (0 %), avec des valeurs respectives de 4,44 % et 6,19 %. En revanche, les autres stations montrent des biais importants, notamment la station d'Oukaïmeden, qui atteint 69,17 %.

Tableau 8: Résultats de traitement des données avec ERA-5 au niveau de Tmin.

| Station | Altitude (m) | Emplacement | Echelle | r | ME | MAE | RMSE | BIAIS % |
|------------|--------------|--------------------|-------------|------|-------|------|------|---------|
| MARRAKECH | 468 | Plaine | Journalière | 0,98 | -1 | 1,25 | 0,03 | -7,28 |
| | | | Mensuelle | 1 | -0,99 | 1 | 0,05 | -7,32 |
| | | | Annuelle | 0,90 | -0,99 | 0,99 | 0,17 | -7,28 |
| OUKAIMEDEN | 2726 | Montagne | Journalière | 0,92 | 3,06 | 3,28 | 0,04 | 68,14 |
| | | | Mensuelle | 0,97 | 3,02 | 3,02 | 0,2 | 69,17 |
| | | | Annuelle | 0,46 | 3,06 | 3,06 | 0,69 | 68,63 |
| DAKHLA | 7 | Côtière saharienne | Journalière | 0,91 | 0,75 | 1,01 | 0,03 | 4,39 |
| | | | Mensuelle | 0,98 | 0,77 | 0,81 | 0,11 | 4,44 |
| | | | Annuelle | 0,98 | 0,76 | 0,76 | 0,31 | 4,37 |
| ESSAOUIRA | 15 | Côtière semi-aride | Journalière | 0,81 | 1,64 | 2,00 | 0,03 | 10,97 |
| | | | Mensuelle | 0,87 | 1,64 | 1,76 | 0,14 | 10,93 |
| | | | Annuelle | 0,04 | 1,66 | 1,66 | 0,44 | 11,00 |
| SAFI | 52 | Côtière semi-aride | Journalière | 0,95 | 0,88 | 1,41 | 0,02 | 6,16 |
| | | | Mensuelle | 0,98 | 0,88 | 1,09 | 0,09 | 6,19 |
| | | | Annuelle | 0,64 | 0,88 | 1,01 | 0,24 | 6,14 |

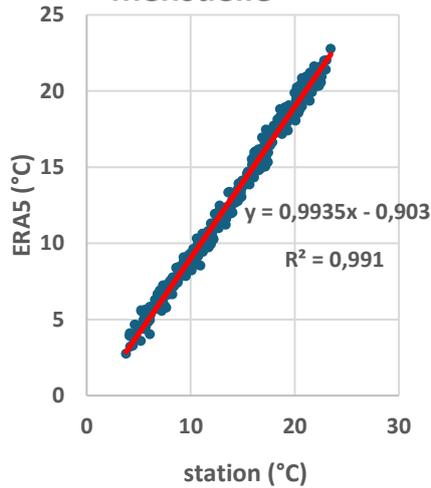
MARRAKECH: Echelle

journalère



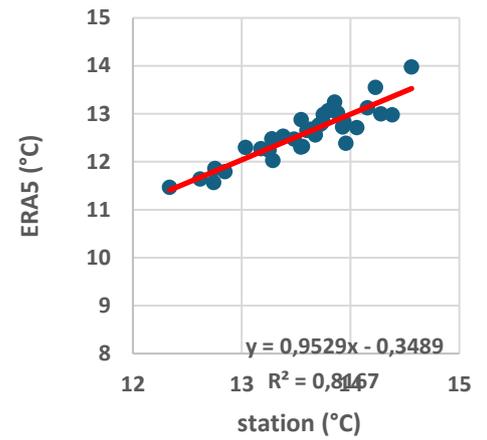
MARRAKECH: Echelle

mensuelle



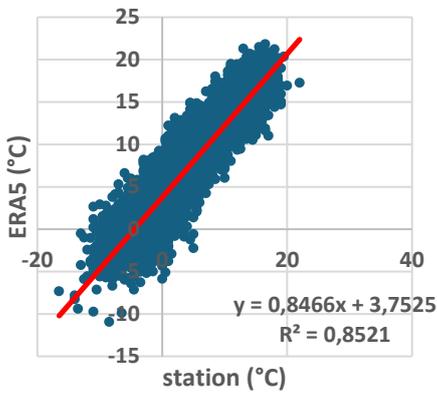
MARRAKECH: Echelle

annuelle



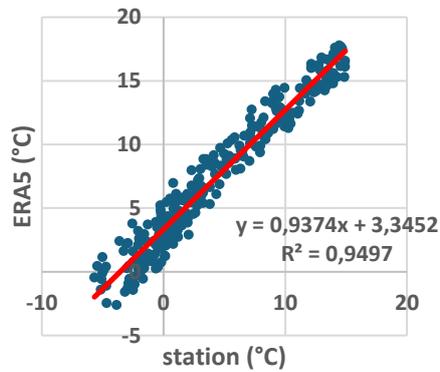
OUKAIMEDEN: Echelle

journalère



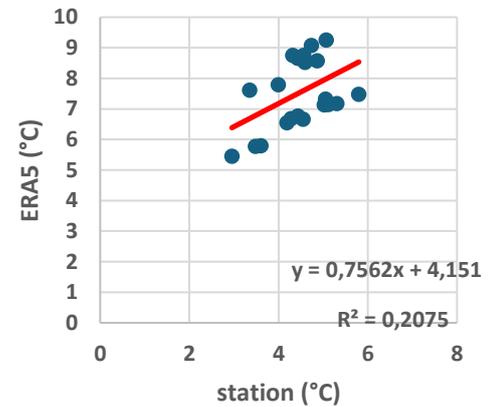
OUKAIMEDEN : Echelle

mensuelle

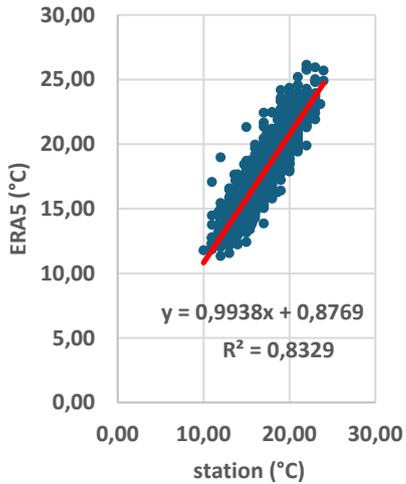


OUKAIMEDEN : Echelle

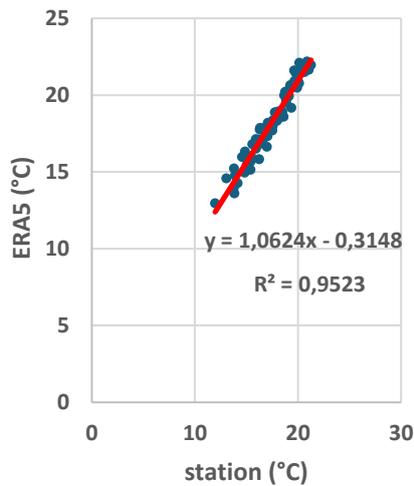
annuelle



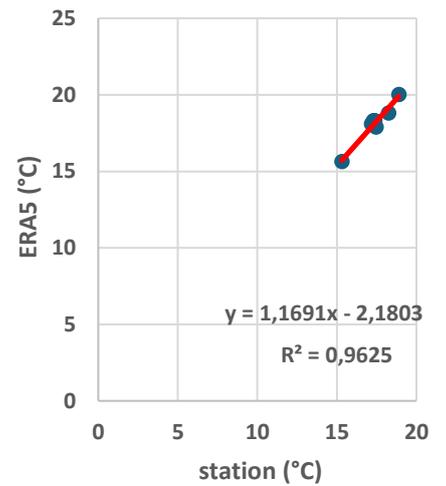
DAKHILA : Echelle journalère



DAKHILA : Echelle mensuelle



DAKHILA : Echelle annuelle



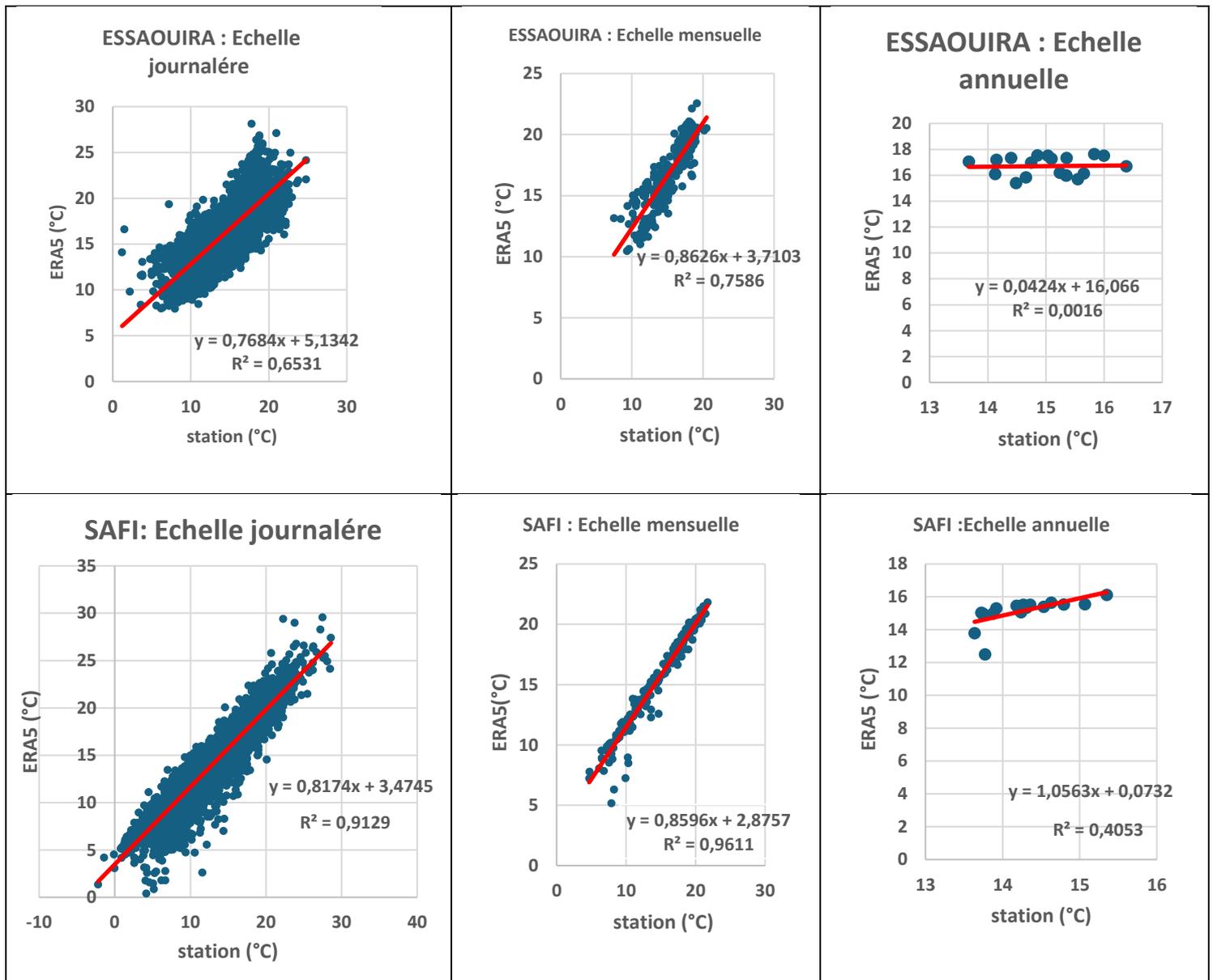


Figure 40: Corrélation entre les données observées et les données ERA-5 pour les cinq stations selon les trois échelles au niveau de Tmin.

b- Variation des données observées de chaque station et les données de ERA-5 à différent l'échelle temporelle :

OUKAIMEDEN : L'analyse de la performance du produit ERA-5 à la station d'Oukaimeden en haute montagne a été effectuée sur différentes échelles de temps entre 1988 et 2009. Les résultats ont montré une surestimation des températures minimales à l'échelle journalière. Les températures estimées par ERA-5 varient entre $-10,96\text{ °C}$ et $21,80\text{ °C}$, tandis que les températures observées par la station varient entre $-16,5\text{ °C}$ et 22 °C .

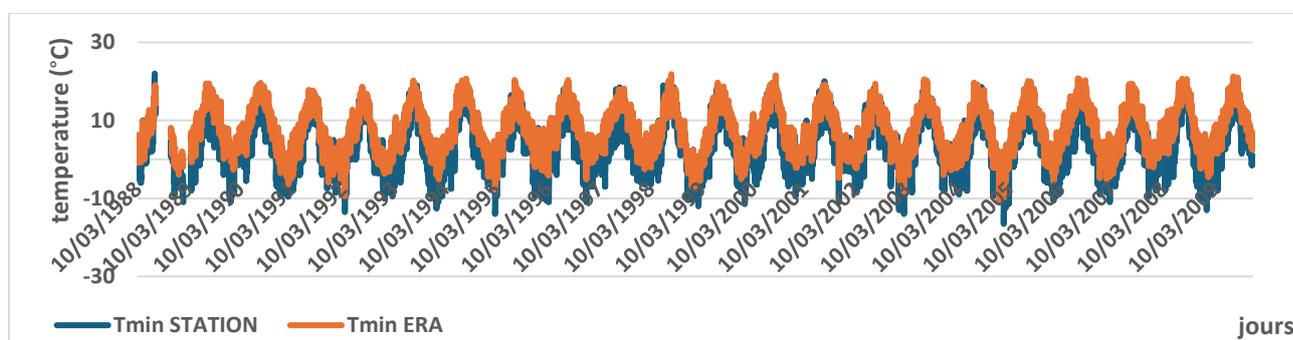


Figure 41: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle journalière (1988-2009)

Chaque mois, les données indiquent que les températures minimales sont surestimées d'environ 80,58 %. Les températures calculées à partir des données ERA-5 vont de $-2,62\text{ °C}$ à $17,78\text{ °C}$, tandis que les températures relevées par la station vont de $-5,68\text{ °C}$ à $14,93\text{ °C}$.

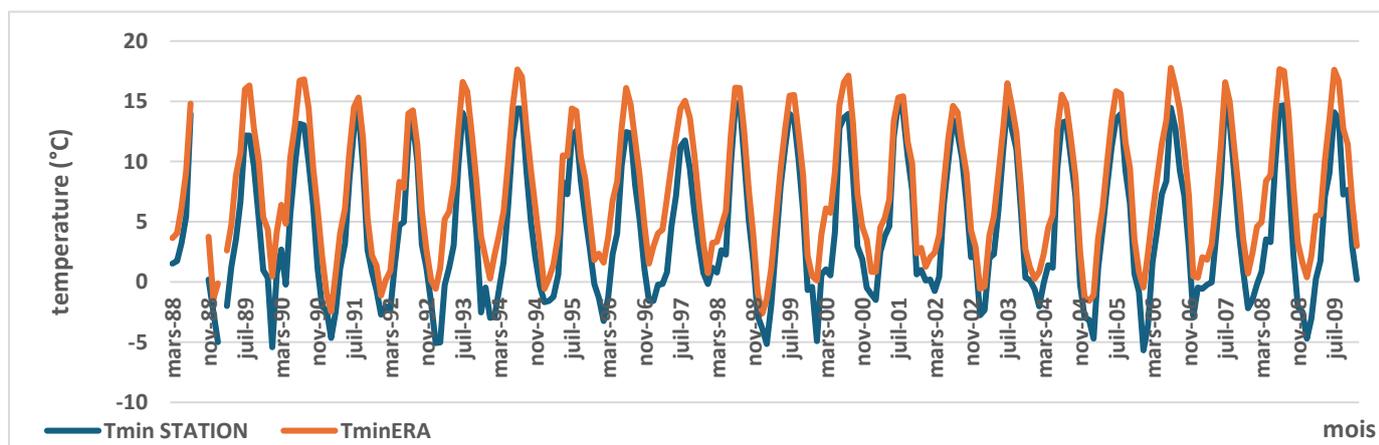


Figure 42: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1988-2009)

Enfin, à l'échelle annuelle, il est observé que les températures minimales sont surestimées. Les températures estimées par ERA-5 varient entre 5,45°C et 9,25°C, tandis que les températures observées par la station varient entre 2,95 °C et 5,80 °C.

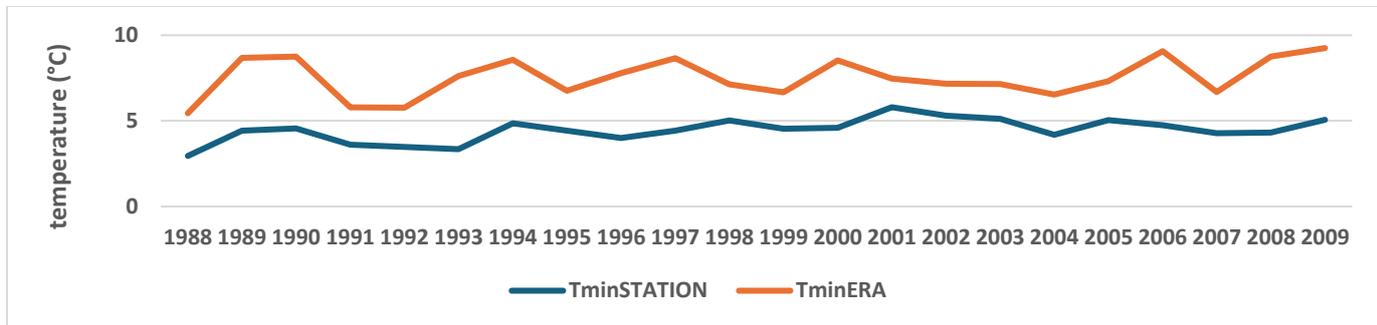


Figure 43: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIME DEN et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1988-2009)

MARRAKECH : La performance du produit ERA-5 dans le cas de la station de Marrakech est analysée à différentes échelles de temps entre 1983 et 2016. Les résultats journaliers (voir figure 44) montrent une légère sous-estimation des températures minimales d'environ -8,08%. Les températures estimées par ERA-5 varient entre -3,13°C et 27,02°C, tandis que les températures observées par la station varient entre -3,6°C et 31,2°C.

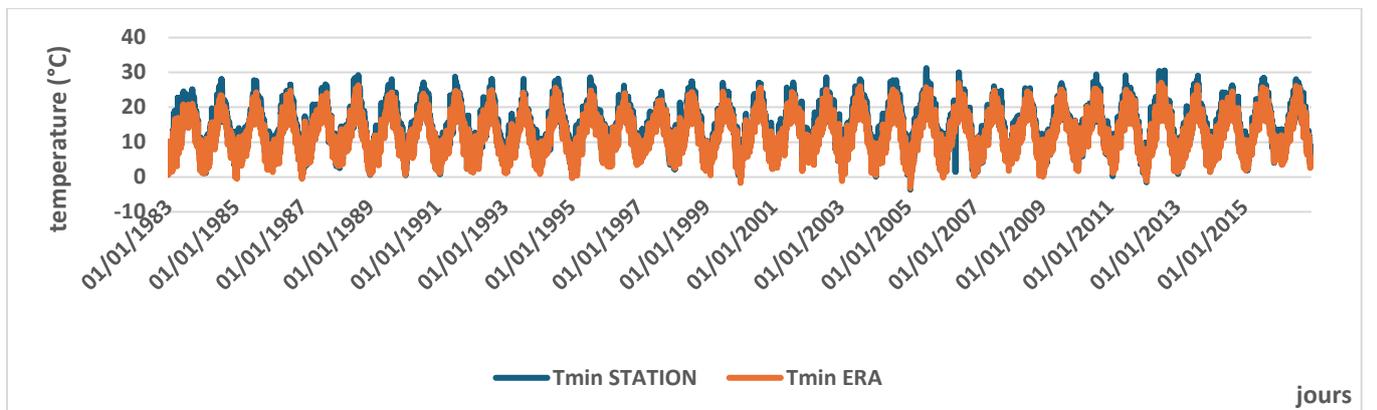


Figure 44: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle journalière (1983-2016)

Les données mensuelles (voir figure 45) indiquent une tendance à la sous-estimation pour les phénomènes de faible intensité. Les températures estimées par ERA-5 oscillent entre 2,75°C et 22,77°C, tandis que les températures enregistrées par la station varient entre 3,79°C

et 23,46°C.

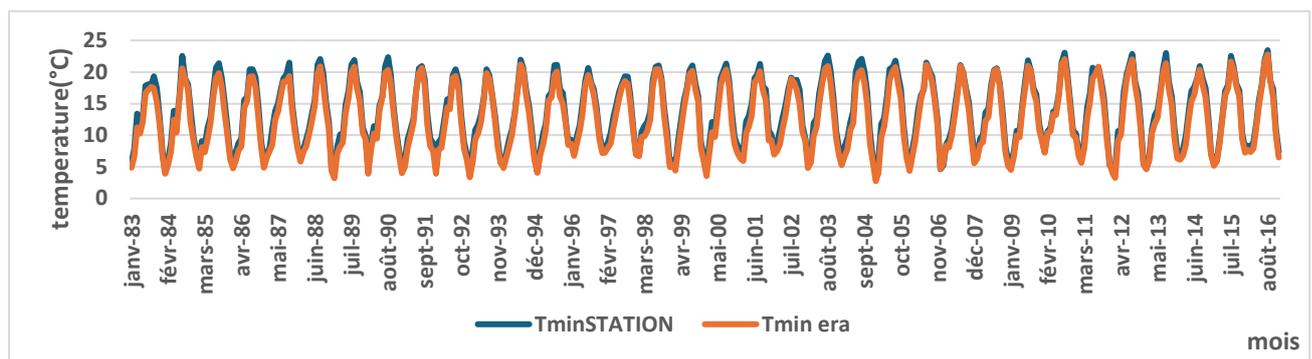


Figure 45: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1983-2016).

Chaque année (voir figure 46), le produit affiche une légère sous-estimation de tous les événements. Les températures estimées par ERA-5 se situent entre 11,47°C et 13,98 °C, tandis que les températures mesurées par la station varient de 12,34°C à 14,56°C.

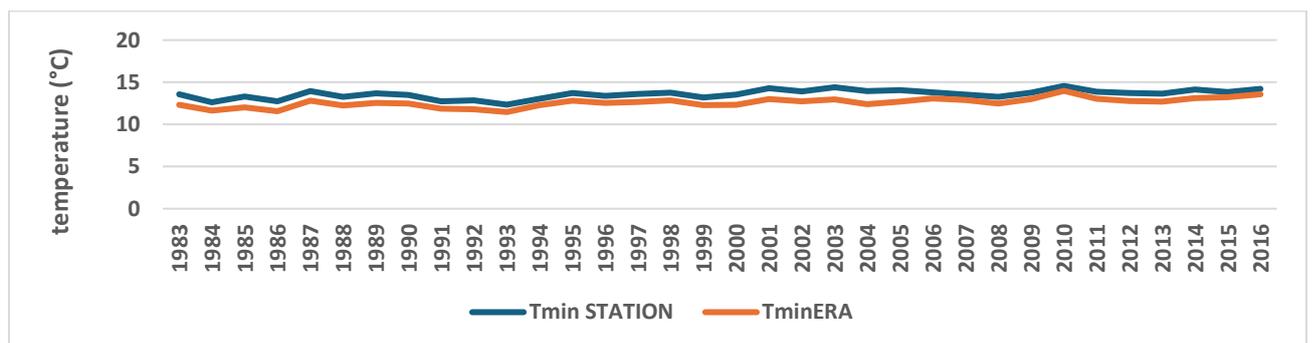


Figure 46: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1983-2016)

DAKHLA : L'évaluation de l'efficacité du produit ERA-5 dans les zones côtières de la station de Dakhla sur différentes périodes allant de 2009 à 2015 a été réalisée. Les résultats révèlent une tendance du produit ERA-5 à légèrement surestimer les températures minimales. À une échelle de temps quotidienne, les températures estimées par ERA-5 varient entre 11,33 °C et 26,12 °C, tandis que celles mesurées par la station se situent entre 10 °C et 24 °C. Sur une échelle de temps mensuelle, les températures estimées par ERA-5 varient entre 12,95 °C et 22,18 °C, tandis que celles mesurées par la station oscillent entre 11,97°C et 21,27 °C.

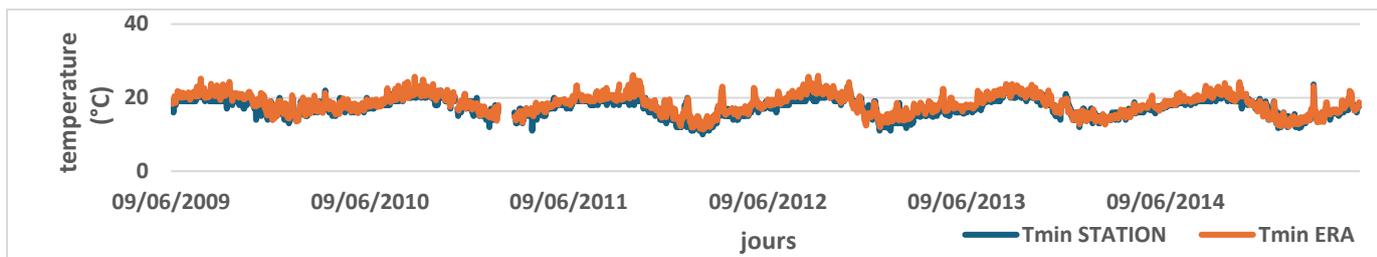


Figure 47: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle journalier (2009-2015).

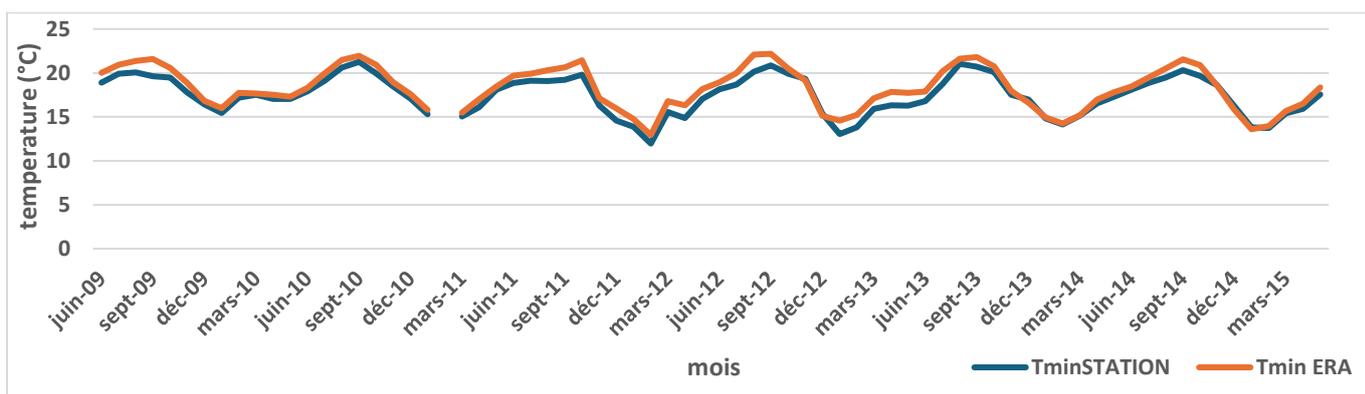


Figure 48: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (2009-2015)

À l'échelle annuelle, une surestimation (4,37%) des températures est observée, avec des valeurs estimées par ERA-5 se situant entre 15,63°C et 20,02°C, tandis que les relevés de la station indiquent des températures variant entre 15,32 °C et 18,88 °C.

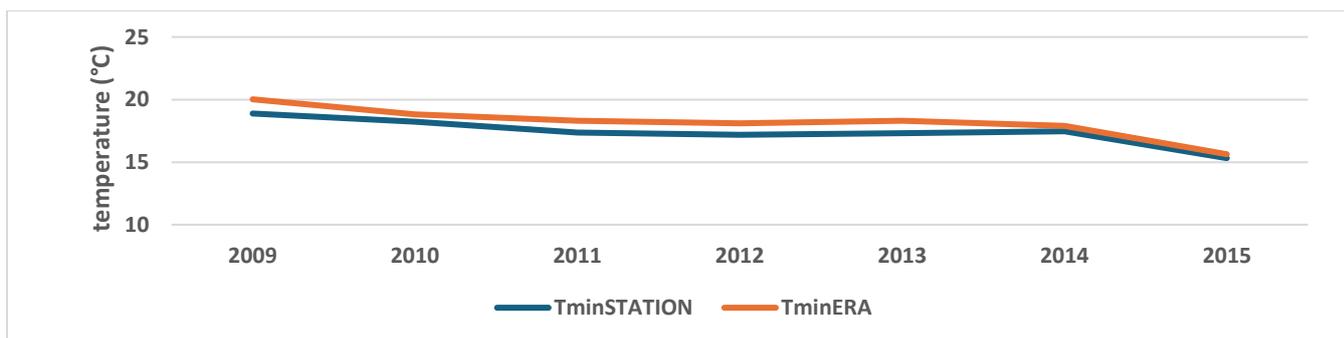


Figure 49: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (2009-2015).

ESSAOUIRA : L'analyse de la performance du produit ERA-5 dans la zone côtière de la station Essaouira a été effectuée sur différentes périodes entre 1998 et 2016. Les résultats quotidiens obtenus (voir figure 50) montrent une tendance à la surestimation des températures

minimales par le produit. Les estimations varient généralement entre 7,95°C et 28,12°C, tandis que les relevés de la station se situent entre 1,2°C et 24,8°C.

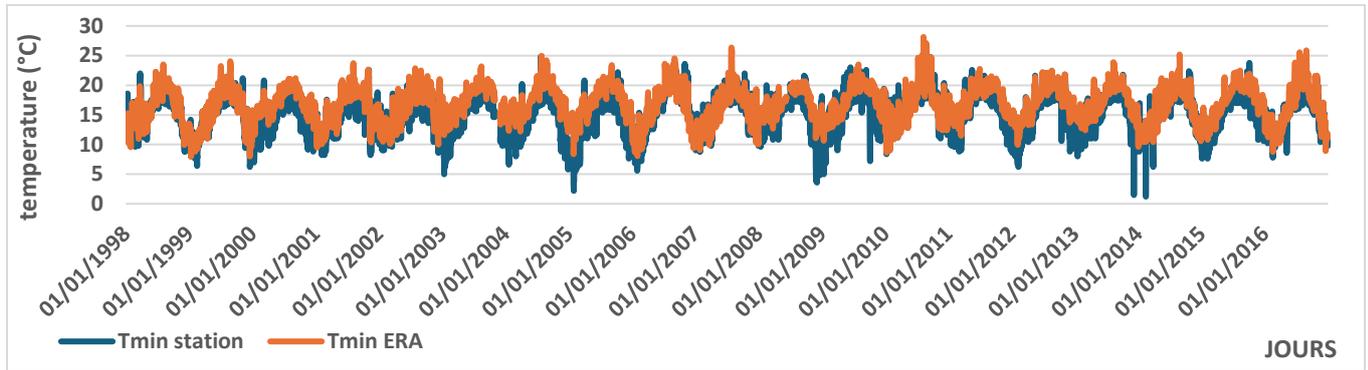


Figure 50: Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle journalière (1998-2016)

En ce qui concerne les relevés mensuels, il est apparu que les températures minimales étaient surestimées. Les températures estimées par ERA-5 varient entre 10,45°C et 22,56°C, tandis que les températures observées par la station varient entre 7,5°C et 20,52°C.

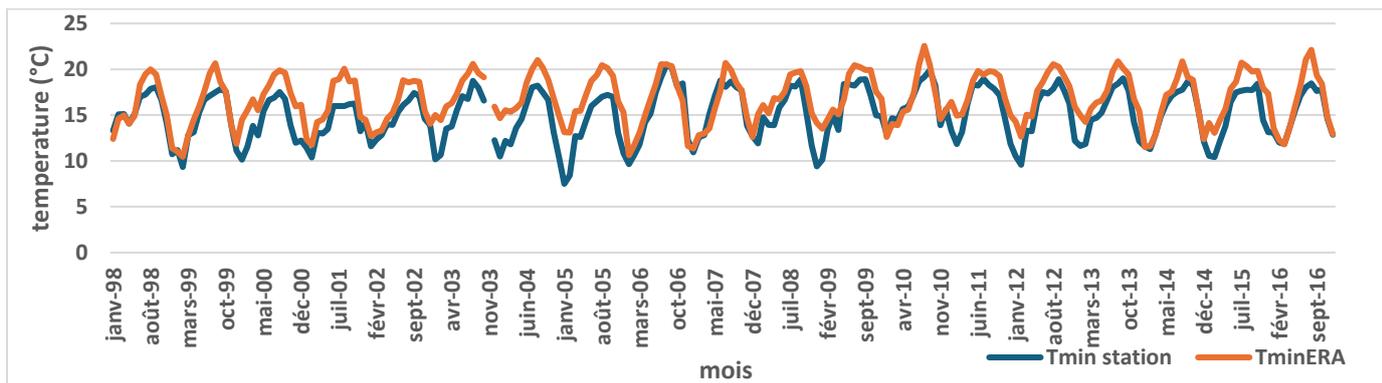


Figure 51: Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1998-2016)

À l'échelle annuelle (voir figure 52), notre analyse révèle une tendance générale du produit à surestimer toutes les températures minimales au fil des années.

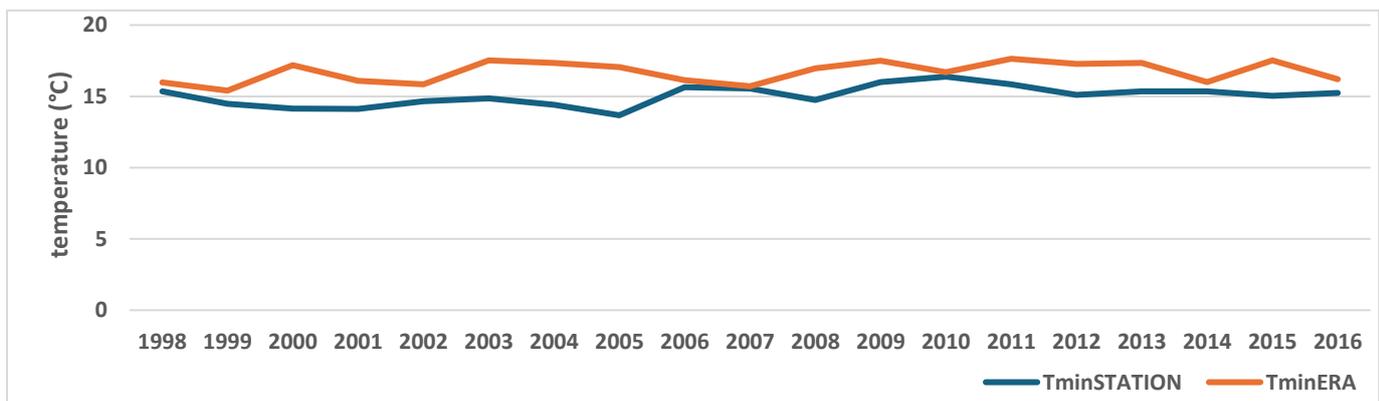


Figure 52: Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1998-2016).

SAFI : L'efficacité du produit ERA-5 en zone côtière, dans le cas de la station SAFI, est analysée à différentes échelles de temps entre 1998 et 2016. Les résultats journaliers (voir figure 53) mettent en évidence une surestimation des températures minimales. Les températures estimées par ERA-5 varient entre 0,39°C et 29,56°C, tandis que les relevés de la station oscillent entre -2,2°C et 28,6°C.

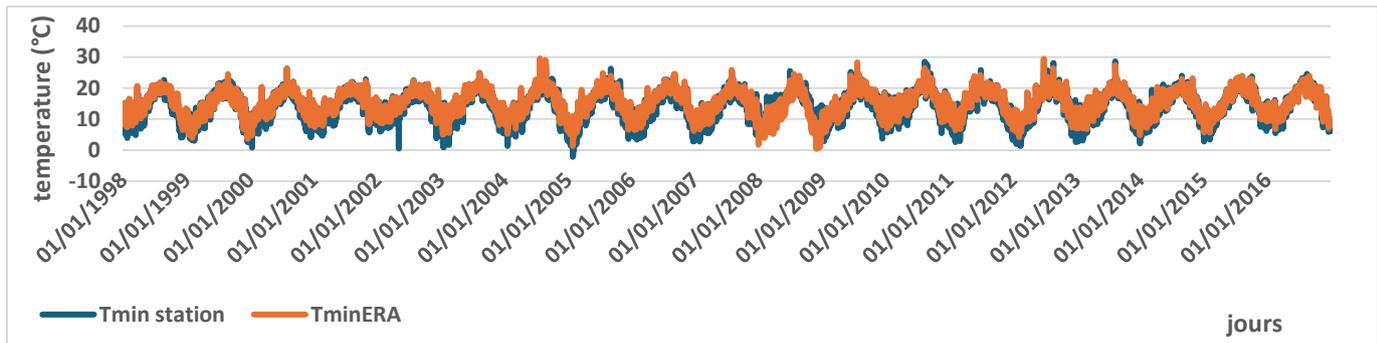


Figure 53: Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de ERA-5 à l'échelle journalier (1998-2016).

À l'échelle mensuelle (voir figure 54), nous avons observé une surestimation des températures minimales.

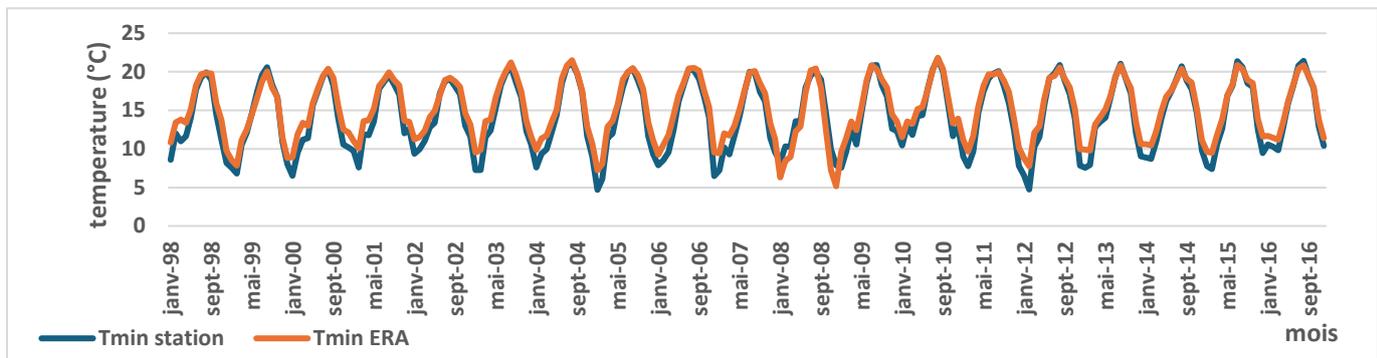


Figure 54: Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1998-2016).

Annuellement (voir figure 55), le produit démontre une surestimation, à l'exception de l'année 2008 où une légère sous-estimation est observée. Les températures estimées par ERA-5 varient entre 12,48°C et 16,10°C, tandis que les relevés de la station indiquent des

températures variant entre 13,64°C et 15,35°C.

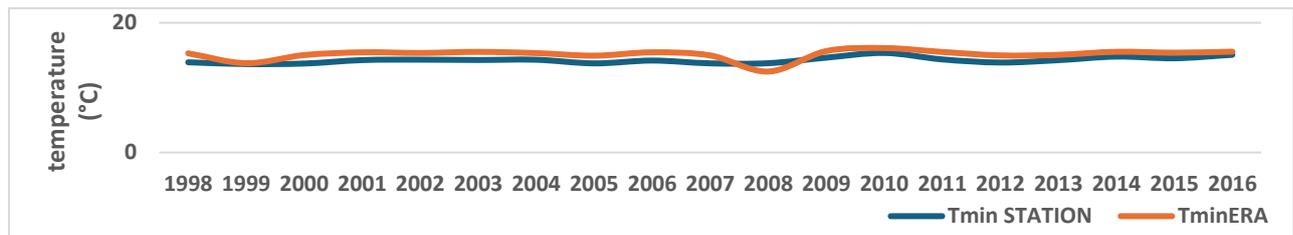


Figure 55: Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1998-2016).

2) Température maximale :

Le tableau 9 ci-dessous présente les résultats du traitement des données observées de cinq stations météorologiques ainsi que les données détectées par le produit de réanalyse ERA-5 à différentes échelles temporelles, portant sur la température maximale :

a- Corrélation, RMSE et Biais entre Températures max observées et estimées par ERA-5 :

Il existe une corrélation puissante entre les températures observées et celles de la réanalyse ERA-5 au niveau de Tmax. Dans cette collection de données, à l'exception d'Essaouira, il y a une forte corrélation entre les températures des stations et celles détectées par le produit de réanalyse ERA-5 à l'échelle journalière, atteignant une approximation maximale de 0,98 à Marrakech et un minimum de 0,63 à Essaouira. À l'échelle mensuelle, les données observées et celles estimées par le produit ERA-5 sont bien corrélées, atteignant une valeur maximale de 0,99 à Marrakech et un minimum de 0,73 à Essaouira. Annuellement, il y a différentes corrélations entre les stations, avec une valeur faible de 0,38 à Essaouira et une forte valeur de 0,90 à Marrakech.

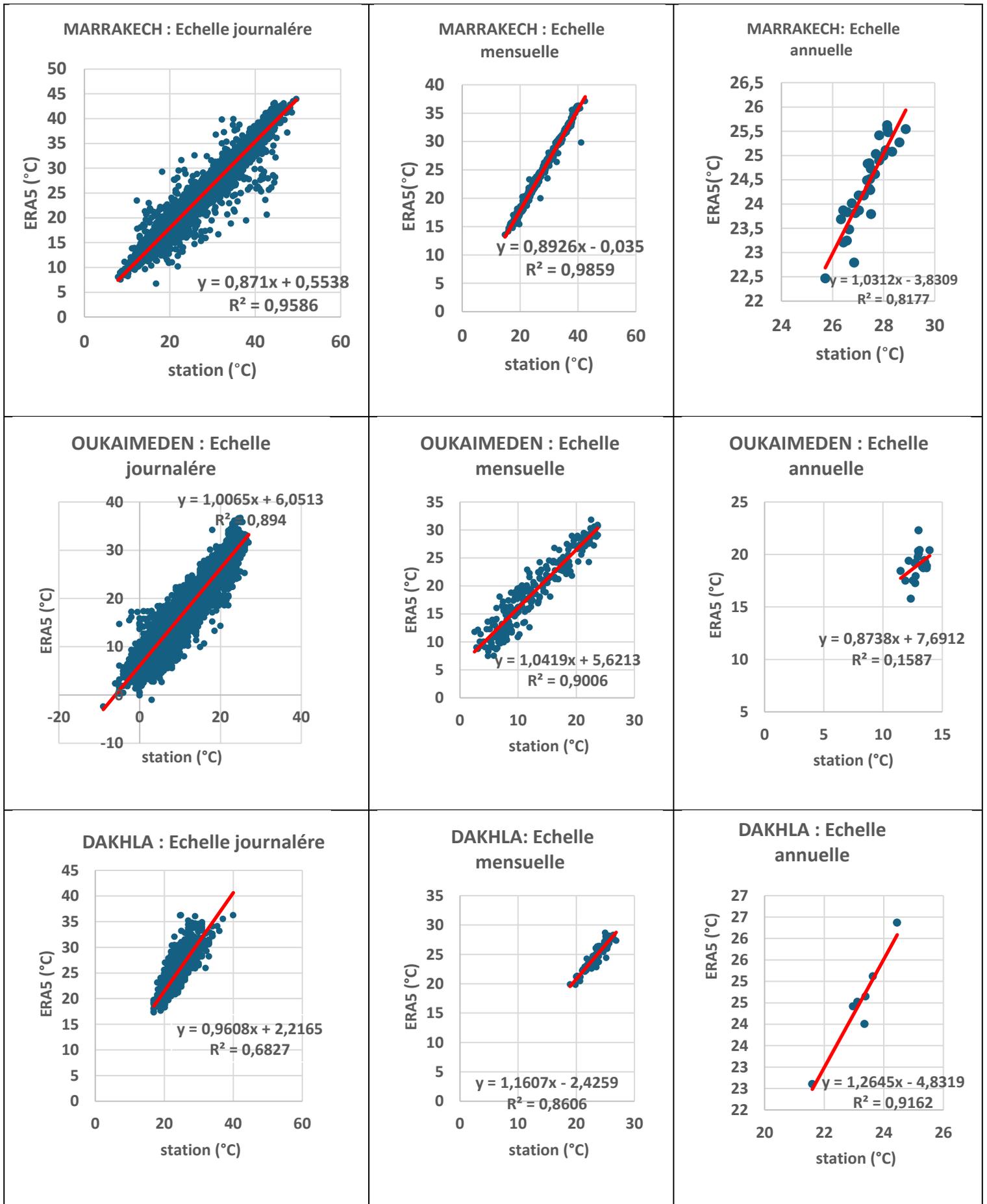
Afin de comprendre la précision de l'estimation de la température par le produit de réanalyse ERA-5, le paramètre RMSE, exprimé en °C par unité de temps, enregistre différentes valeurs à différentes échelles temporelles en fonction de l'emplacement géographique et topographique des stations, ainsi que de la résolution du produit. Les valeurs varient de 0,03°C enregistrées à Marrakech, Dakhla et Safi et 0,11°C à Oukaimden à l'échelle journalière. À l'échelle mensuelle, l'erreur est surtout plus élevée dans les régions montagneuses d'Oukaimden par rapport à la zone côtière et à Marrakech, où l'erreur est

minimale et ne dépasse pas 0,17°C et 0,25°C. Annuellement, le RMSE présente des valeurs moyennes comprises entre 0,23°C et 0,55°C, sauf à Oukaimden où elle dépasse 1,3°C.

Un autre facteur crucial est la différence de température maximale estimée par le produit de réanalyse ERA-5 comparée à celle mesurée par les stations au sol, à trois échelles temporelles différentes. Les BIAS des stations de Dakhla, Essaouira et Safi sont proches de zéro, entre -3 % et 5 %. En revanche, la station de Marrakech a un BIAS de -10 %. La station d'Oukaimden, quant à elle, présente un BIAS très élevé qui atteint 61 % quotidiennement.

Tableau 9: Résultats de traitement des données avec ERA-5 au niveau de Tmax.

| Station | Altitude (m) | Emplacement | Echelle | r | ME | MAE | RMSE | BIAS % |
|------------|--------------|--------------------|-------------|------|-------|------|------|--------|
| MARRAKECH | 468 | Plaine | Journalière | 0,98 | -2,98 | 3,05 | 0,03 | -10,88 |
| | | | Mensuelle | 0,99 | -2,97 | 2,97 | 0,16 | -10,87 |
| | | | Annuelle | 0,90 | -2,98 | 2,86 | 0,51 | -10,86 |
| OUKAIMEDEN | 2726 | Montagne | Journalière | 0,95 | 7,93 | 7,95 | 0,11 | 61,26 |
| | | | Mensuelle | 0,95 | 6,16 | 6,16 | 0,40 | 47,71 |
| | | | Annuelle | 0,40 | 6,06 | 6,06 | 1,32 | 46,76 |
| DAKHLA | 7 | Côtière saharienne | Journalière | 0,83 | 1,79 | 2,14 | 0,09 | 7,87 |
| | | | Mensuelle | 0,93 | 1,31 | 1,37 | 0,19 | 5,64 |
| | | | Annuelle | 0,96 | 1,31 | 1,31 | 0,51 | 5,64 |
| ESSAOUIRA | 15 | Côtière semi-aride | Journalière | 0,63 | -0,24 | 1,98 | 0,03 | -1,16 |
| | | | Mensuelle | 0,73 | -0,25 | 1,59 | 0,13 | -1,22 |
| | | | Annuelle | 0,38 | -0,24 | 1,33 | 0,33 | -1,19 |
| SAFI | 52 | Côtière semi-aride | Journalière | 0,92 | -0,85 | 1,59 | 0,03 | -3,55 |
| | | | Mensuelle | 0,96 | -0,85 | 1,05 | 0,09 | -3,54 |
| | | | Annuelle | 0,02 | -0,85 | 0,97 | 0,23 | -3,55 |



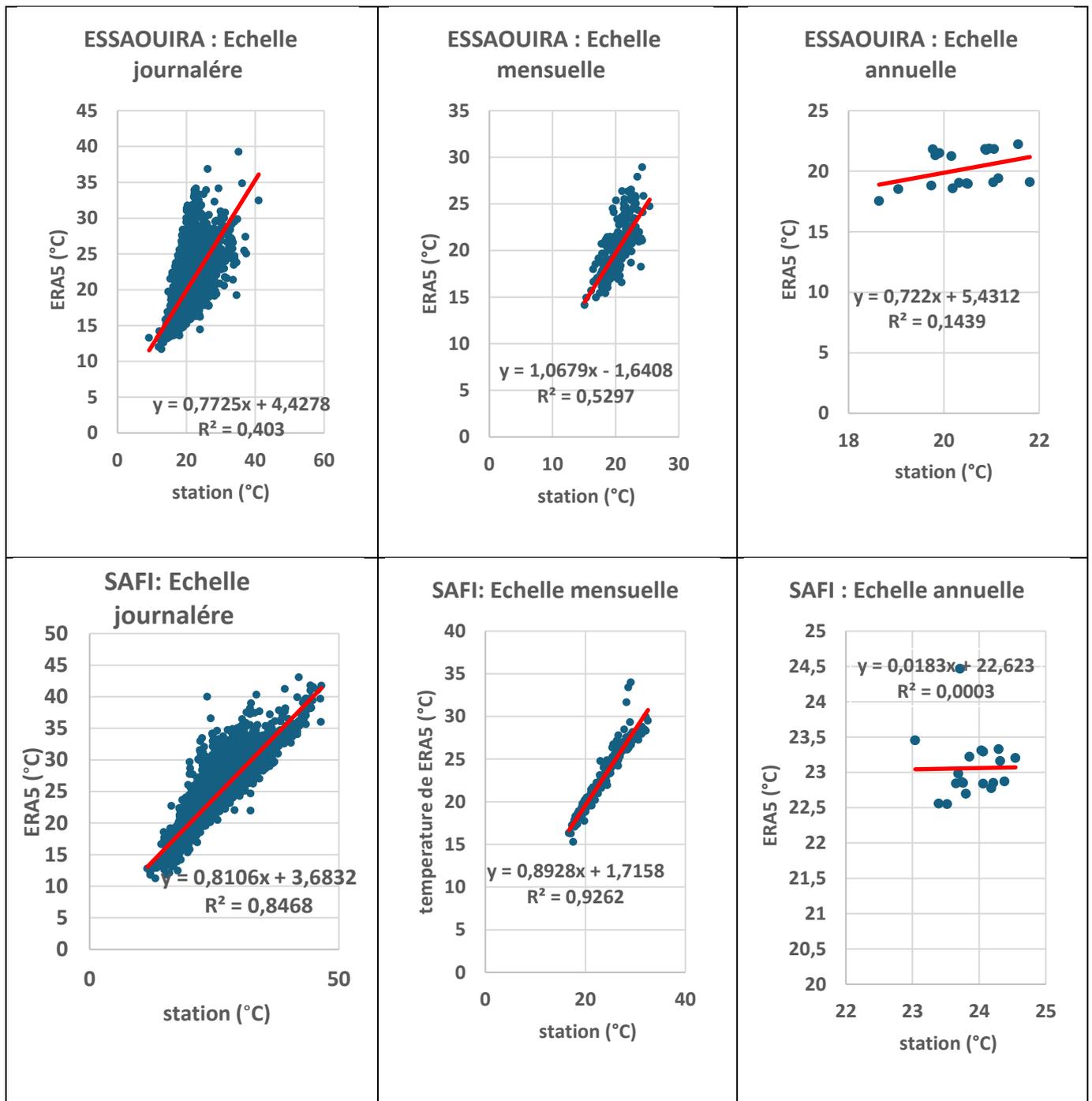


Figure 56: Corrélation entre les données observées et les données ERA-5 pour les cinq stations selon les trois échelles au niveau de Tmax.

b- Variation des données observées de chaque station et les données de ERA-5 à différent l'échelle temporelle :

Oukaimden : La performance du produit de réanalyse ERA-5 pour cette station, située dans les montagnes du Haut-Atlas, a été étudiée sur différentes échelles temporelles entre 1988 et 2009. À l'échelle quotidienne, les températures maximales ont été surestimées de plus de 140 %, avec des températures allant de $-2,38^{\circ}\text{C}$ à $36,67^{\circ}\text{C}$ pour ERA-5, alors que les températures observées allaient de -9°C à 27°C . Cette surestimation était constante tout au long de l'année.

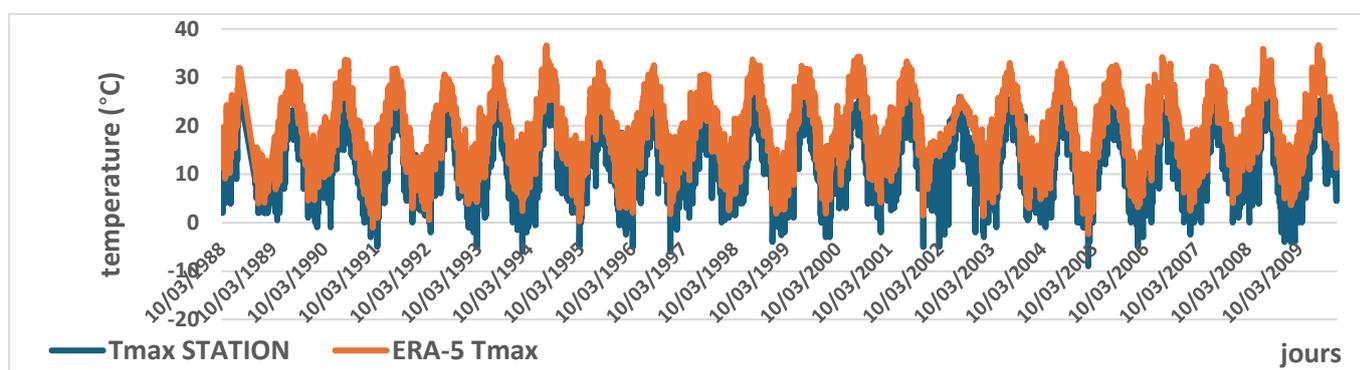


Figure 57: Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle journalière (1988-2009).

À l'échelle mensuelle, la surestimation des températures maximales a diminué à 48 %. Les températures estimées par ERA-5 allaient de $7,46^{\circ}\text{C}$ à $31,8^{\circ}\text{C}$, tandis que les températures observées allaient de $2,5^{\circ}\text{C}$ à 24°C . Cette surestimation était constante tout au long de l'année.

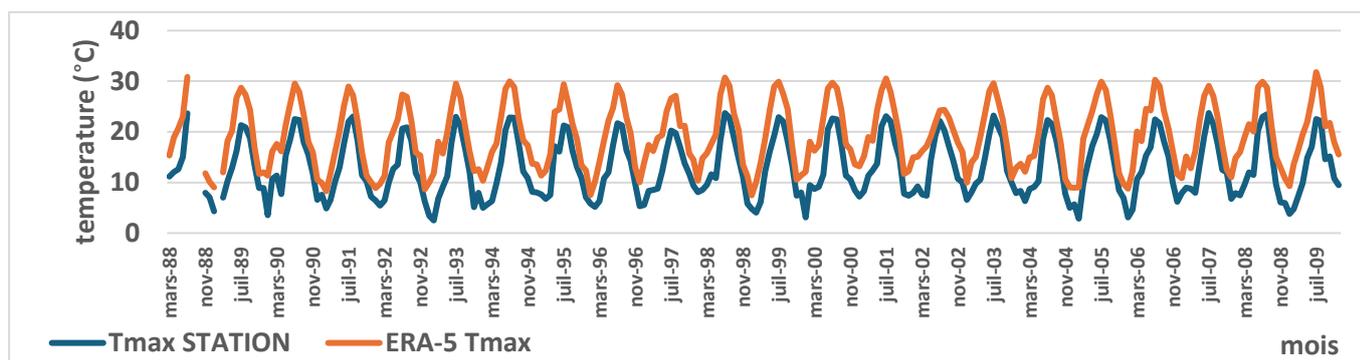


Figure 58: Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1988-2009).

Enfin, sur une base annuelle, les températures ont été surestimées d'environ 47 %. ERA-5 a estimé des températures maximales allant de $15,8^{\circ}\text{C}$ à $22,3^{\circ}\text{C}$, tandis que la station météo a enregistré des températures allant de $11,49^{\circ}\text{C}$ à $13,94^{\circ}\text{C}$.

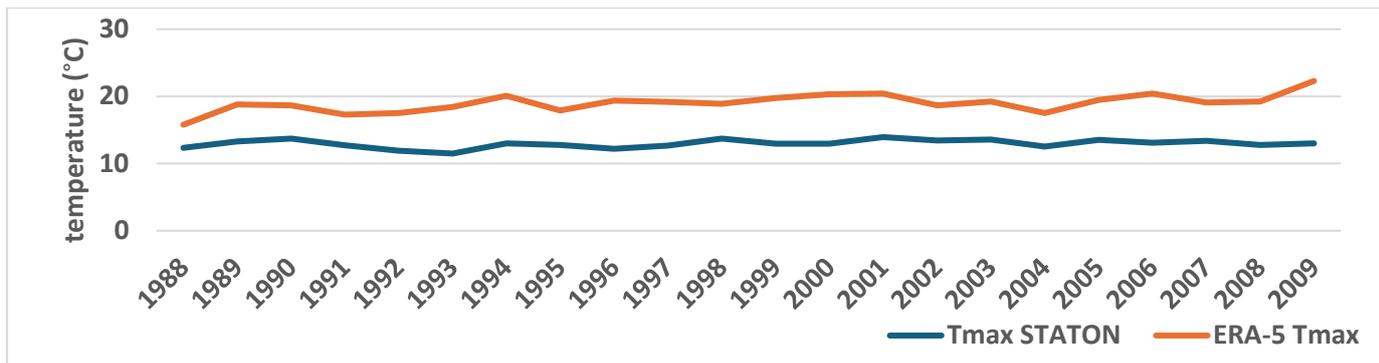


Figure 59: Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1988-2009).

Marrakech : Une analyse a été réalisée pour évaluer la performance du produit de réanalyse ERA-5 dans la région de Marrakech sur une période de 1983 à 2016, à trois échelles temporelles différentes. Les résultats quotidiens ont montré que les températures maximales ont été sous-estimées d'environ 11 %. Les températures estimées par ERA-5 varient de 6,74°C à 43,33°C, tandis que les températures observées varient de 9,29°C à 49,15°C.

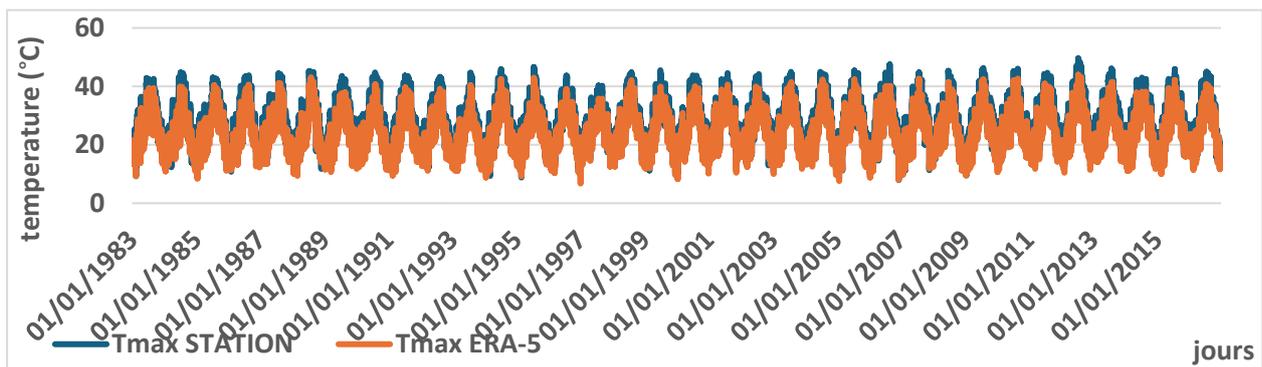


Figure 60: Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle journalière (1983-2016).

Les variations mensuelles ont révélé une tendance à la sous-estimation continue d'environ 11 %. Les températures estimées par ERA-5 varient de 13,15°C à 37,1°C, tandis que les températures observées varient de 14°C à 42°C.

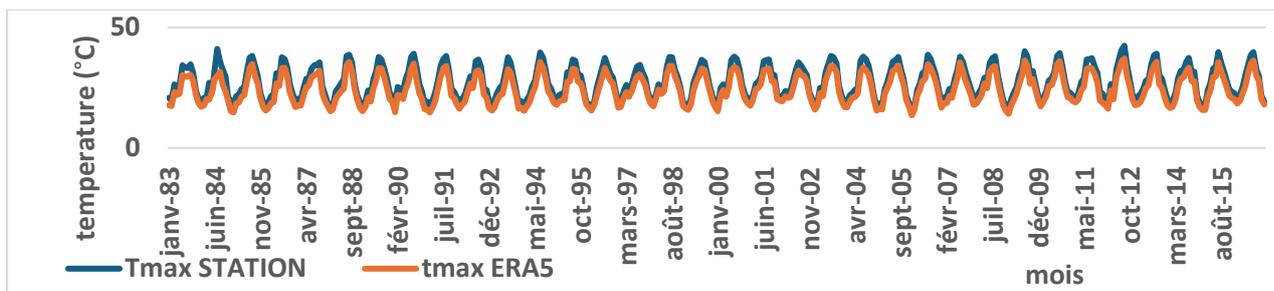


Figure 61: Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1983-2016).

En termes annuels, le produit de réanalyse ERA-5 a montré une sous-estimation continue de la température maximale par rapport à celle enregistrée par la station. Les températures estimées varient de 22,47°C à 25,63°C, tandis que les températures observées varient de 25°C à 29°C.

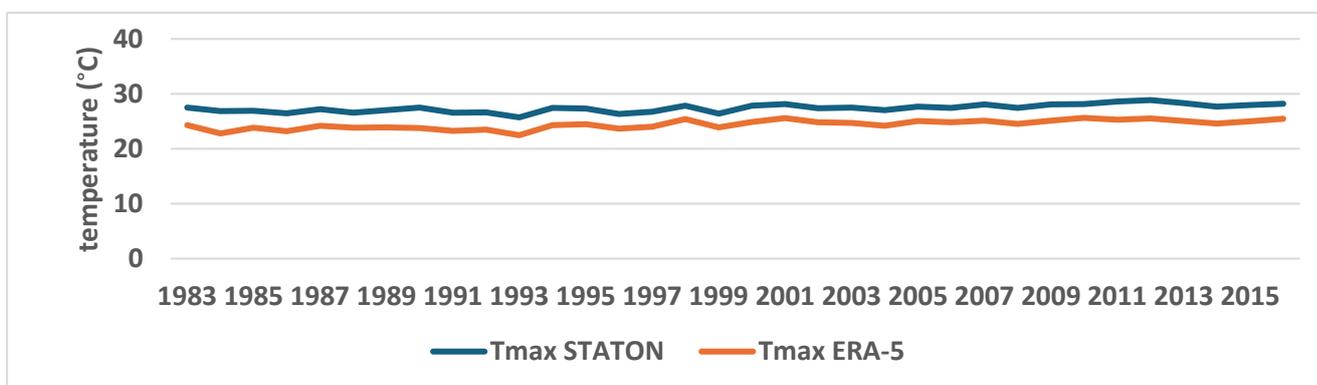


Figure 62: Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1983-2016).

Dakhla : Une analyse de l'efficacité du produit ERA-5 dans la région côtière saharienne a été réalisée en utilisant différentes durées de temps sur une période de sept ans, de 2009 à 2015, en raison de la quantité de données disponibles dans cette station. L'évaluation du produit ERA-5 à la station a révélé une tendance générale à surestimer la température de 7,87 % à 5,4 %. À une échelle journalière, les températures estimées par ERA-5 varient entre 17,3°C et 36,3°C, tandis que celles mesurées par la station oscillent entre 17°C et 40°C.

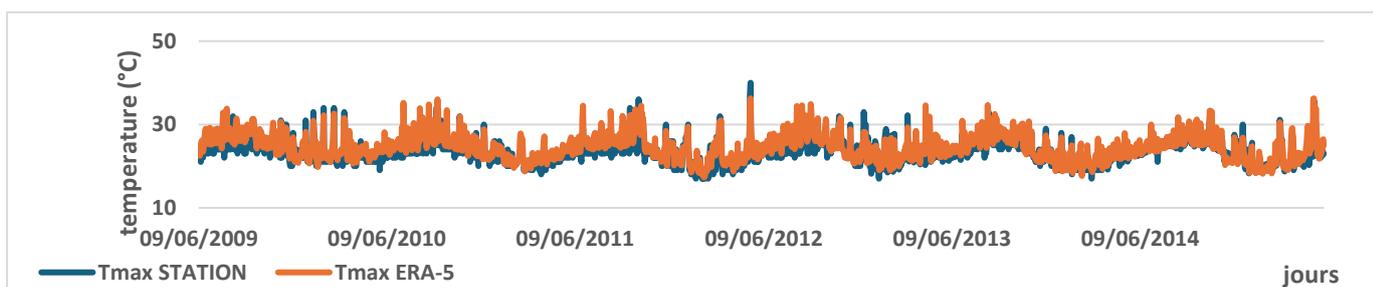


Figure 63: Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle journalier (2009-2015).

À une échelle mensuelle, les températures estimées par ERA-5 varient entre 19,8°C et 28,7°C, tandis que celles observées par la station varient entre 19°C et 27°C.

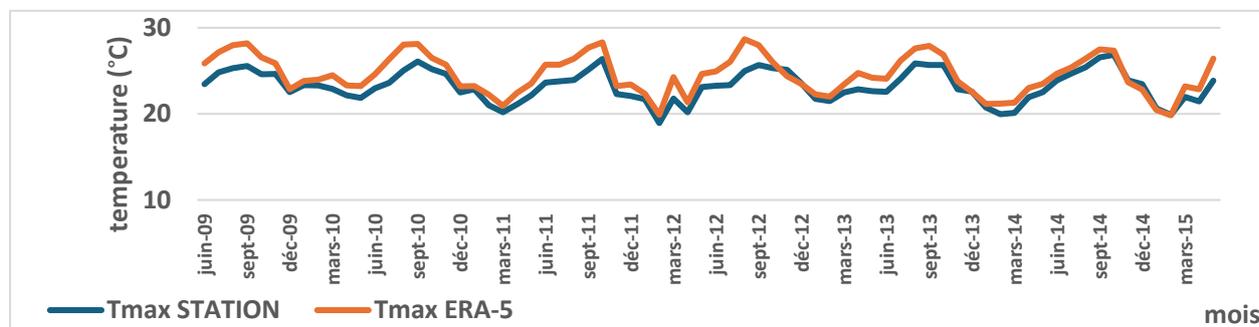


Figure 64: Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (2009-2015).

Sur une base annuelle, ERA-5 détecte une plage de températures comprise entre 22,6°C et 26,4°C, tandis que les valeurs mesurées par la station se situent dans la plage de 21°C à 25°C.

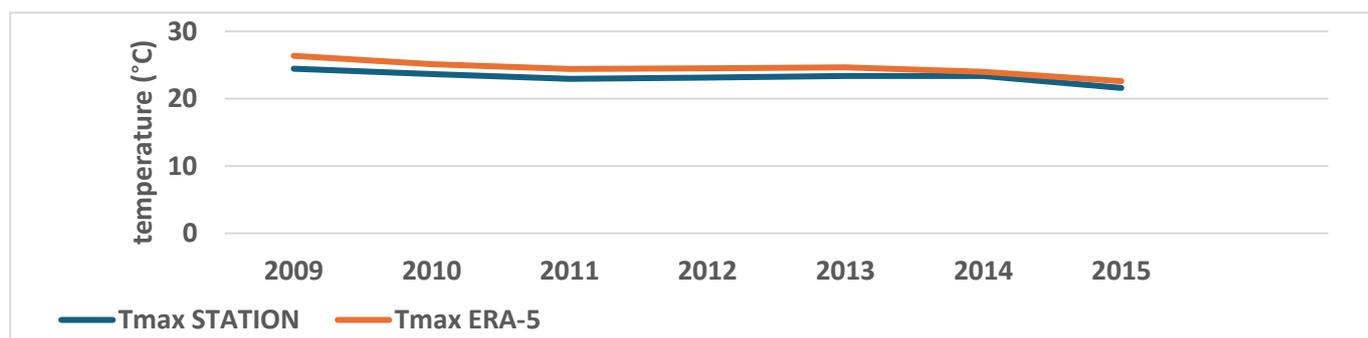


Figure 65: Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (2009-2015).

Essaouira : Une étude a été réalisée pour évaluer l'exactitude des données météorologiques du produit de réanalyse ERA-5 dans les zones côtières, plus précisément à la station Essaouira, de 1998 à 2016. Les résultats quotidiens ont montré une tendance à sous-estimer les températures maximales, avec une différence d'environ -1,5 % par rapport aux mesures de la station au sol, allant de 11,7°C à 39,3°C, tandis que les relevés de la station varient entre 9°C et 41°C.

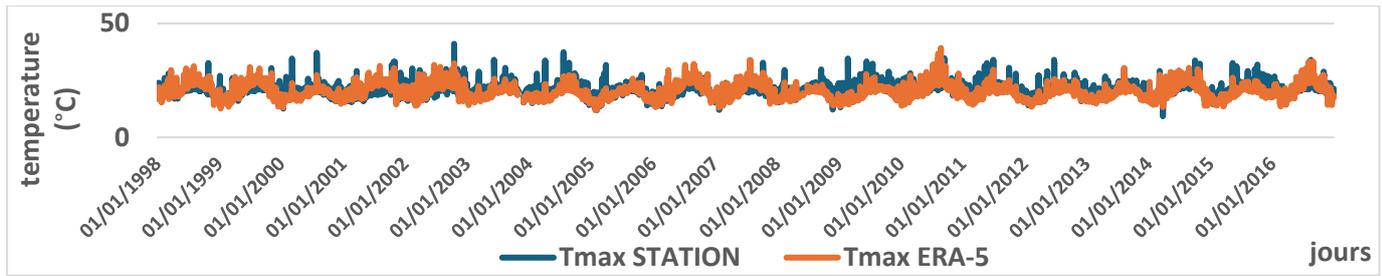


Figure 66: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle journalière (1998-2016).

En ce qui concerne les évaluations mensuelles et annuelles, il y a une alternance entre sous-estimation et surestimation, mais en moyenne, le produit sous-estime les températures maximales, avec une erreur de plus de $0,02^{\circ}\text{C}$, et une RMSE qui ne dépasse pas $0,33^{\circ}\text{C}$.

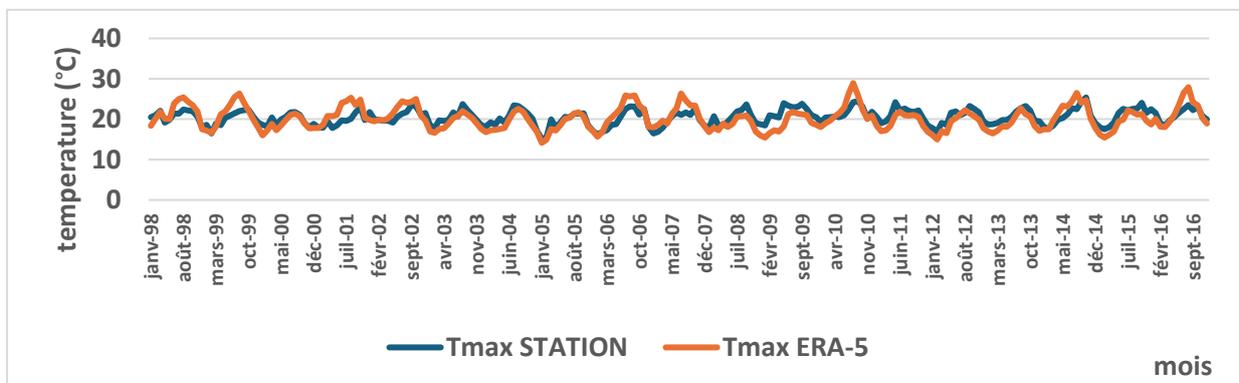


Figure 67: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1998-2016).

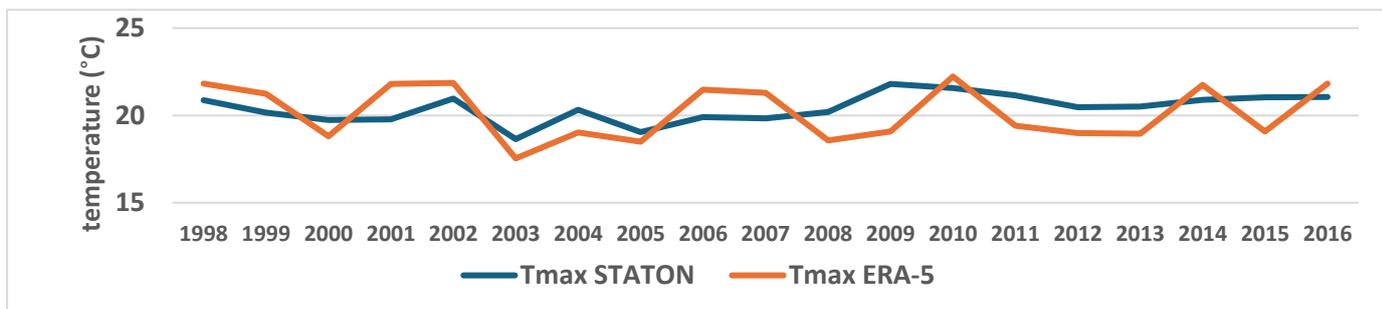


Figure 68: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1998-2016).

Safi : Une étude a été menée pour évaluer l'efficacité du produit ERA-5 dans la région côtière de la station Safi sur différentes périodes allant de 1998 à 2016. Les données quotidiennes ont révélé que les températures maximales étaient sous-estimées par le produit ERA-5, avec une fourchette allant de $11,25^{\circ}\text{C}$ à 43°C , tandis que les relevés de la station variaient de $11,6^{\circ}\text{C}$ à 47°C .

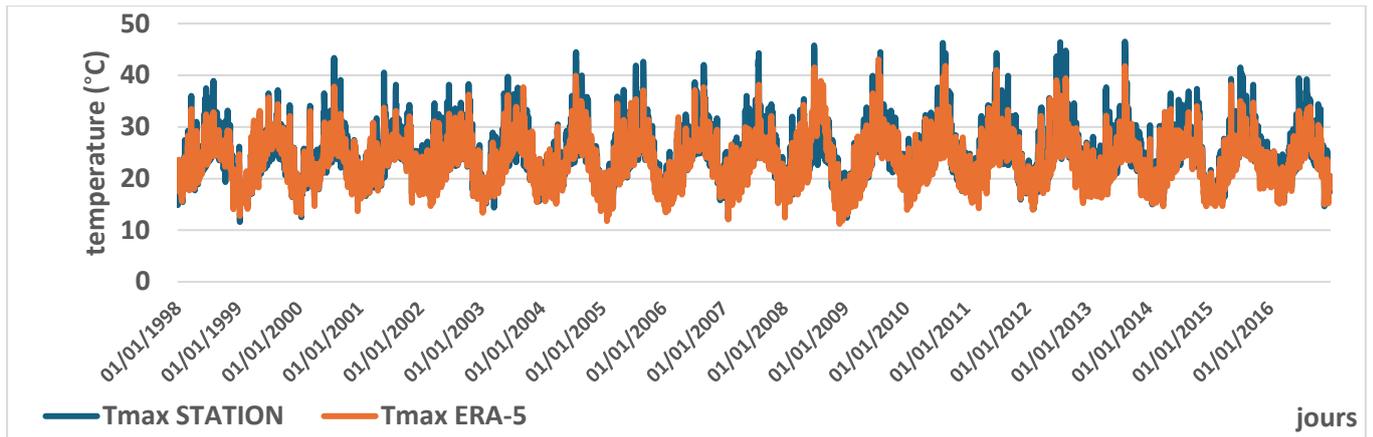


Figure 69: Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de ERA-5 à l'échelle journalière (1998-2016).

À l'échelle mensuelle, une sous-estimation d'environ -3 % des températures maximales a été constatée par ERA-5.

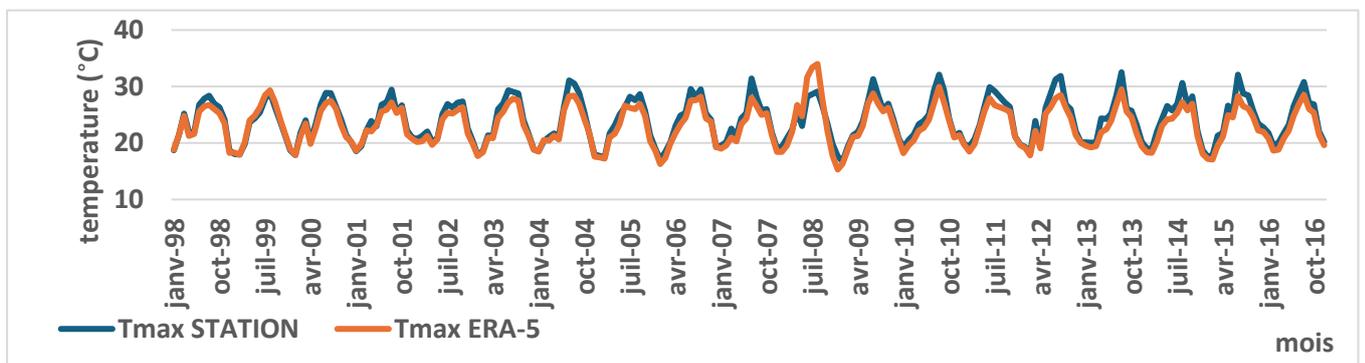


Figure 70: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle mensuelle (1998-2016).

Annuellement, la sous-estimation persistait, à l'exception de 1999 et 2008 qui étaient surestimés, avec des températures estimées par ERA-5 entre 22,5°C et 24,5°C, tandis que les relevés de la station indiquaient des températures allant de 23°C à 24,5°C dans toutes les échelles temporelles. La sous-estimation du produit ERA-5 dans cette station n'a pas dépassé -

3,6 %, avec une erreur d'environ 0,23°C par an.

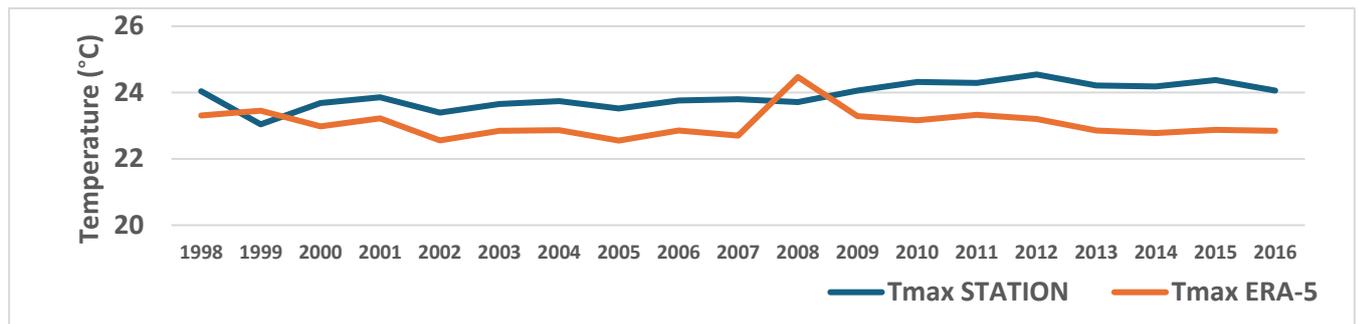


Figure 71: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de ERA-5 à l'échelle annuelle (1998-2016).

III- Résultats du traitement avec le produit TerraClimate :

1) La température minimale :

Le tableau 10 présente les résultats du traitement des données observées de 5 stations météorologiques ainsi que les données simulées du réanalyse TerraClimate à différentes échelles temporelles :

a- Corrélation, RMSE et Biais entre Températures min observées et estimées par TerraClimate :

La corrélation entre les données des stations météorologiques et celles du réanalyse TerraClimate est globalement très forte à l'échelle mensuelle pour toutes les stations. Les valeurs de corrélation varient de 0,99 à Marrakech à 0,94 à Essaouira, ce qui indique une grande précision des estimations mensuelles de TerraClimate par rapport aux observations réelles. Cependant, à l'échelle annuelle, les corrélations montrent une plus grande variabilité. La corrélation maximale est observée à Dakhla avec une valeur de 0,99, tandis que la corrélation minimale se trouve à Oukaimeden avec une valeur de 0,51. Ces différences suggèrent que bien que TerraClimate soit généralement fiable pour des estimations mensuelles, sa précision peut varier de manière significative lorsqu'il s'agit de données annuelles, en particulier dans des zones spécifiques comme Oukaimeden.

Le paramètre RMSE (Root Mean Square Error) montre une variabilité des erreurs à l'échelle mensuelle et annuelle entre différentes régions. À l'échelle mensuelle, la valeur maximale de l'erreur est de 0,21 °C/mois dans la zone côtière (station de Dakhla), tandis que la plaine (station de Marrakech) enregistre l'erreur minimale à 0,07 °C/mois. À l'échelle annuelle, les

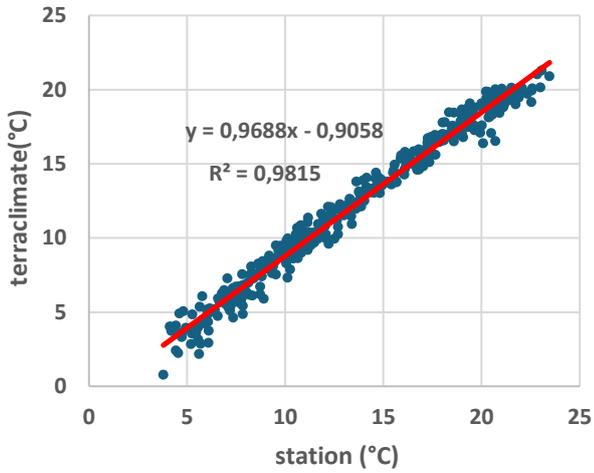
erreurs sont globalement plus importantes. Elles varient de 0,30 °C/an pour la région d'Oukaïmeden à 0,07 °C/an pour Dakhla, indiquant que les estimations de TerraClimate sont plus précises dans certaines régions (comme Dakhla) par rapport à d'autres (comme Oukaïmeden).

Aux deux échelles, la station de Marrakech affiche un biais d'environ -10 %. Les stations d'Essaouira et de Safi montrent des biais proches de la valeur idéale de 0 %, avec respectivement 5 % et 3 %. En revanche, certaines stations présentent des biais importants, en particulier celle d'Oukaïmeden, qui atteint 30 %.

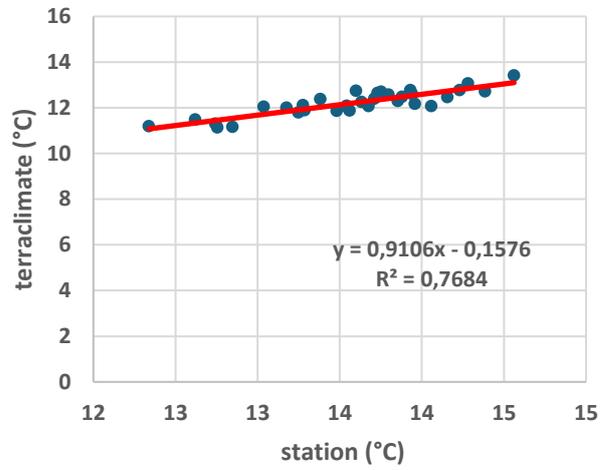
Tableau 10: Résultats de traitement des données avec TerraClimate au niveau de Tmin.

| Station | Altitude (m) | Emplacement | Echelle | r | ME | MAE | RMSE | BIAIS % |
|------------|--------------|-------------------|-----------|------|-------|------|------|---------|
| Marrakech | 428 | Plaine | Mensuelle | 0,99 | -1,33 | 1,34 | 0,07 | -9,81 |
| | | | Annuelle | 0,88 | -1,37 | 1,37 | 0,24 | -10,10 |
| Oukaïmeden | 2726 | Montagne | Mensuelle | 0,97 | 1,30 | 1,61 | 0,12 | 29,86 |
| | | | Annuelle | 0,51 | 1,33 | 1,33 | 0,30 | 30,18 |
| Dakhla | 7 | Côtère saharienne | Mensuelle | 0,95 | 0,15 | 0,72 | 0,21 | 0,90 |
| | | | Annuelle | 0,99 | -0,10 | 0,17 | 0,07 | -0,59 |
| Essaouira | 15 | Côtère semi-aride | Mensuelle | 0,94 | 0,78 | 1,09 | 0,11 | 5,18 |
| | | | Annuelle | 0,53 | 0,70 | 0,73 | 0,21 | 4,66 |
| Safi | 52 | Côtère semi-aride | Mensuelle | 0,98 | 0,54 | 1,02 | 0,08 | 3,78 |
| | | | Annuelle | 0,72 | 0,51 | 0,53 | 0,14 | 3,58 |

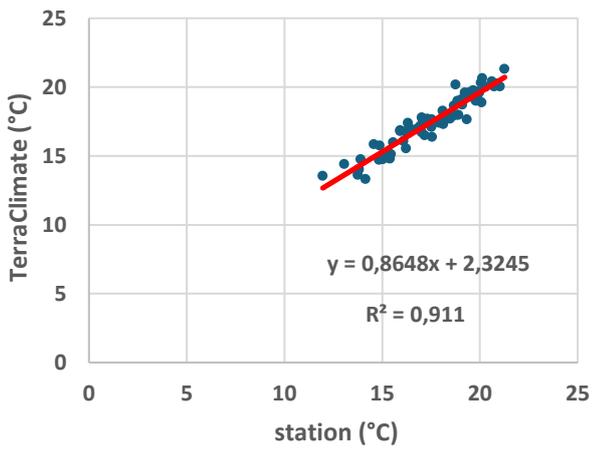
MARRAKECH: Echelle mensuelle



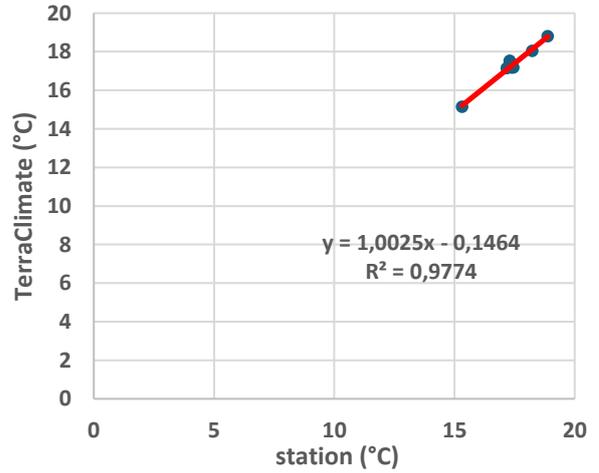
MARRAKECH : Echelle annuelle



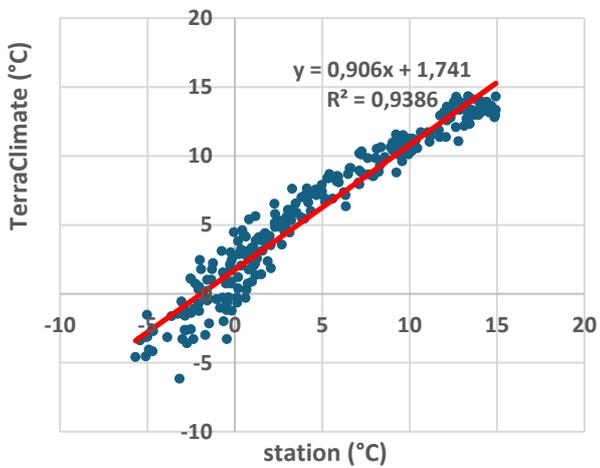
Dakhla: Echelle mensuelle



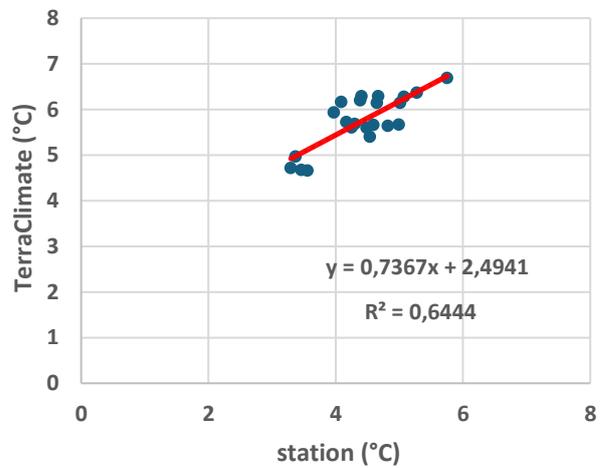
Dakhla: Echelle annuelle



OUKAIMEDEN: Echelle mensuelle



OUKAIMEDENE: Echelle annuelle



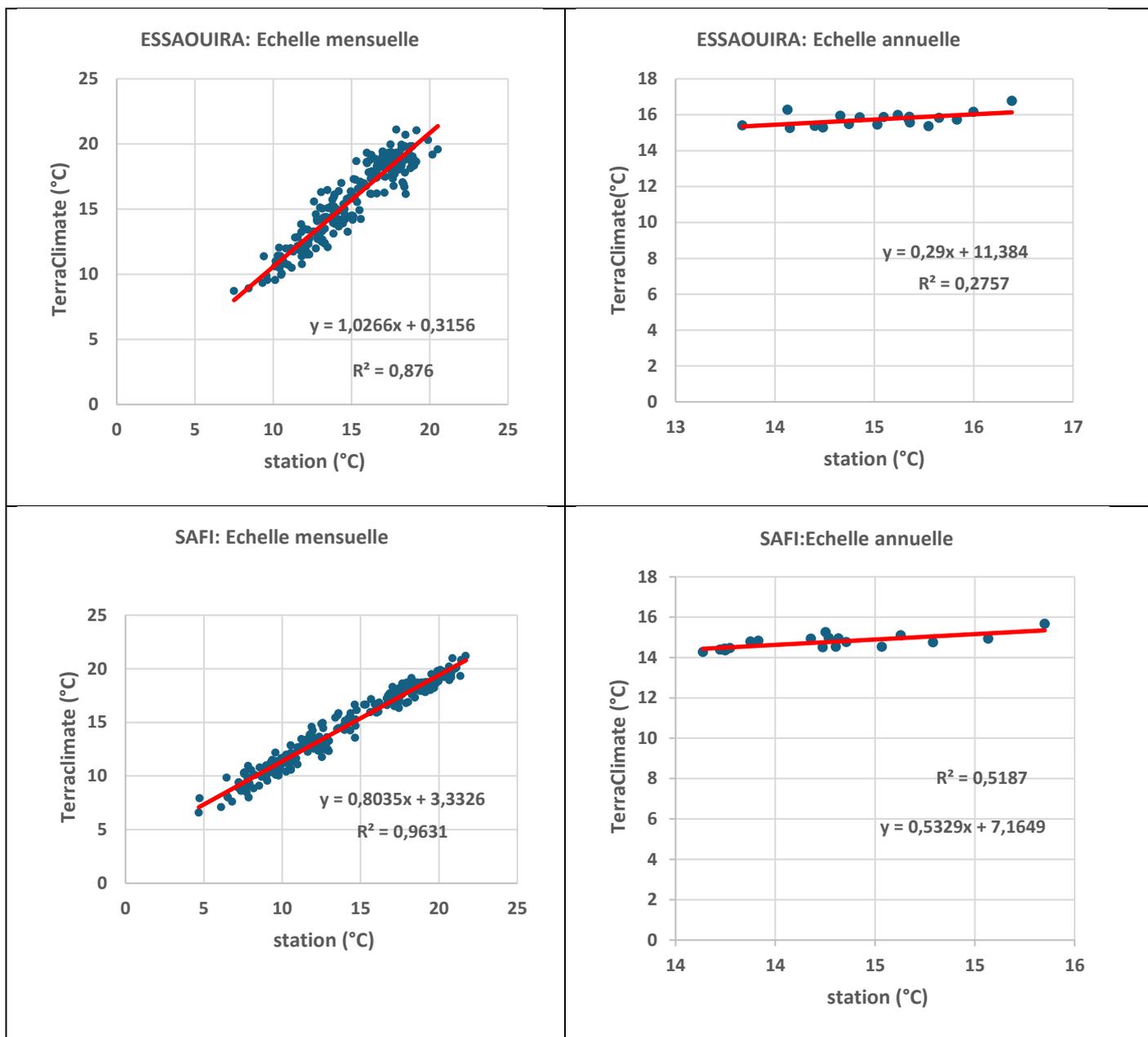


Figure 72: Corrélation entre les données observées et les données TerraClimate pour les cinq stations selon les deux échelles au niveau de Tmin.

b- Variation des données observées de chaque station et les données de TerraClimate à différent l'échelle temporelle :

OUKAIMEDEN : L'analyse de la performance du réanalyse TerraClimate à la station d'Oukaimeden, en haute montagne, a été réalisée sur différentes échelles de temps entre 1988 et 2009. À l'échelle mensuelle, les données montrent que les températures minimales sont légèrement surestimées, d'environ 29,86 %. Les températures calculées à partir des données TerraClimate varient de -6,16 °C à 14,32 °C, tandis que les températures relevées par la station varient de -5,68 °C à 14,93 °C.

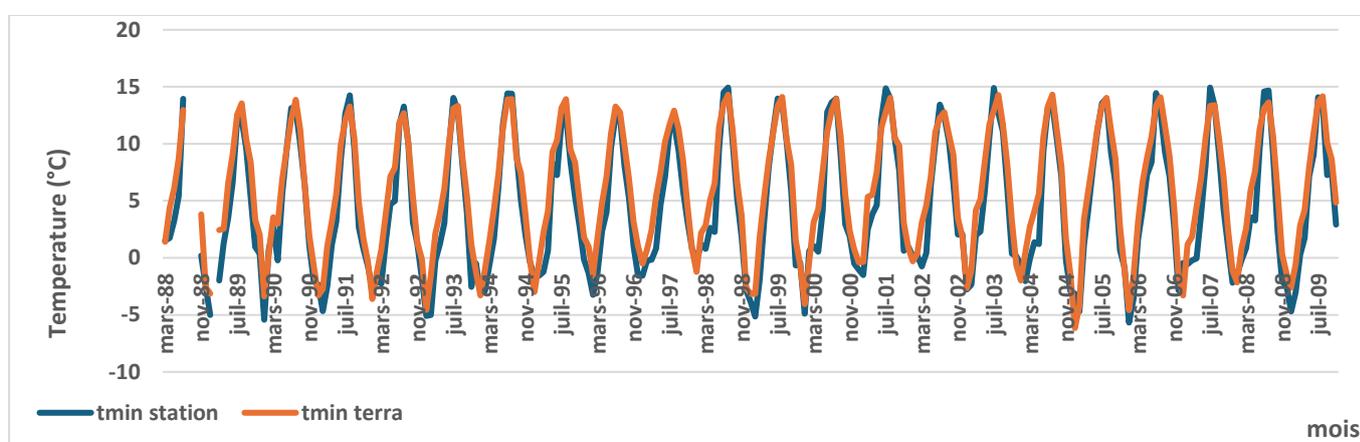


Figure 73: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1988-2009).

Enfin, à l'échelle annuelle, les données indiquent que les températures minimales sont surestimées. Les températures estimées par TerraClimate varient entre 4,65°C et 6,68°C, alors que les températures observées par la station varient entre 2,95 °C et 5,80 °C.

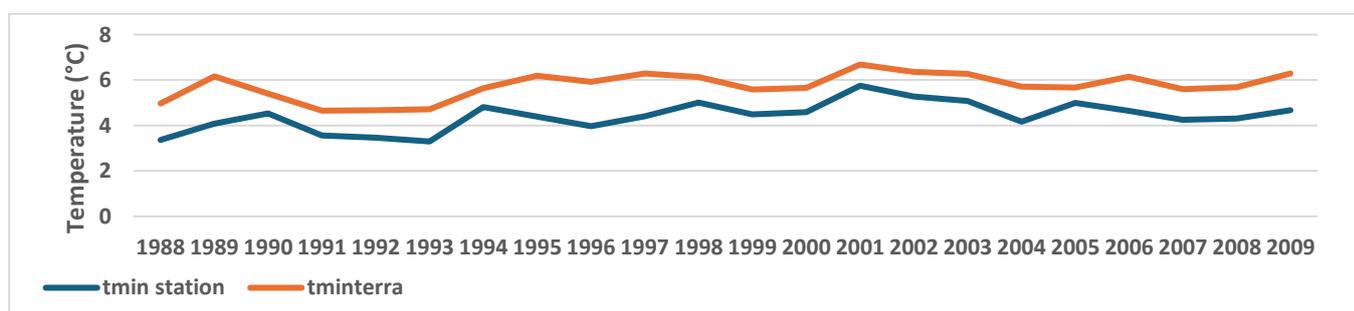


Figure 74: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1988-2009).

MARRAKECH : La fiabilité du réanalyse TerraClimate en plaine, dans le cas de la station de Marrakech, a été analysée à différentes échelles de temps entre 1983 et 2016. Les résultats mensuels montrent une légère sous-estimation des températures minimales, de l'ordre de -9,81

% . Les températures estimées varient entre 0,78 °C et 21,28 °C, tandis que les températures observées par la station varient entre 3,79 °C et 23,46 °C.

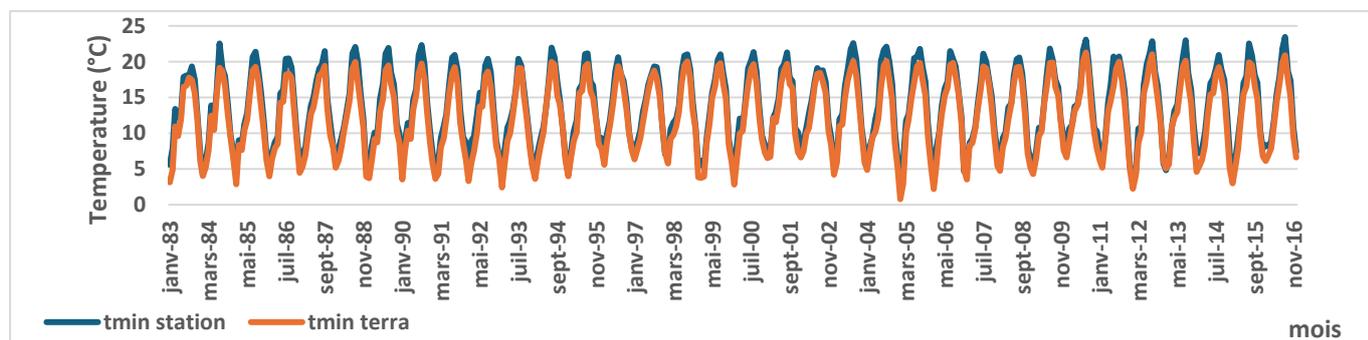


Figure 75: Variation des températures minimales observées de la station MARRAKECH et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1983-2016).

Les données annuelles indiquent une tendance à la sous-estimation des températures minimales. Les températures estimées par TerraClimate oscillent entre 11,14 °C et 13,21 °C, tandis que les températures enregistrées par la station varient entre 12,34 °C et 14,56 °C.

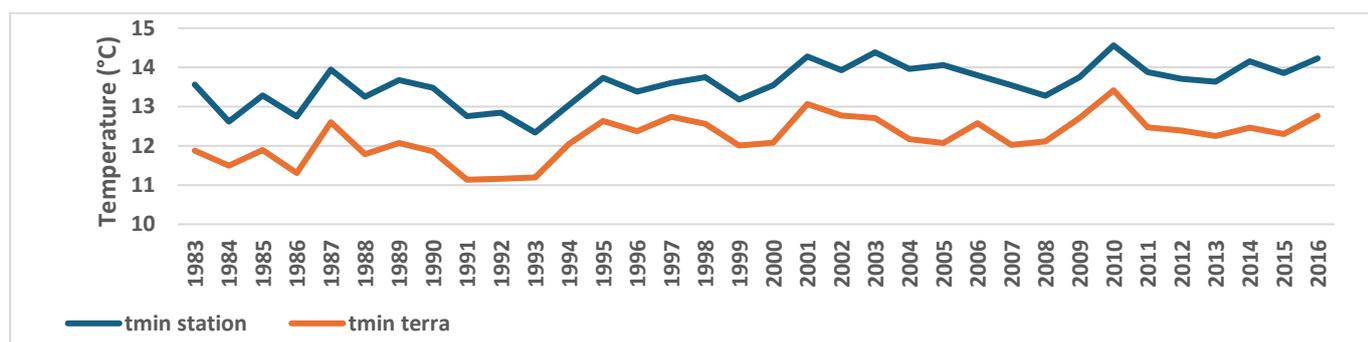


Figure 76: Variation des températures minimales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1983-2016).

DAKHLA : L'évaluation de l'efficacité du réanalyse TerraClimate dans les zones côtières de la station de Dakhla sur différentes périodes allant de 2009 à 2015 a été réalisée. Les résultats ont montré une légère surestimation des températures minimales à l'échelle mensuelle. Les températures estimées par TerraClimate varient entre 13,34 °C et 21,33 °C, tandis que les

températures observées par la station varient entre 11,97 °C et 21,27 °C.

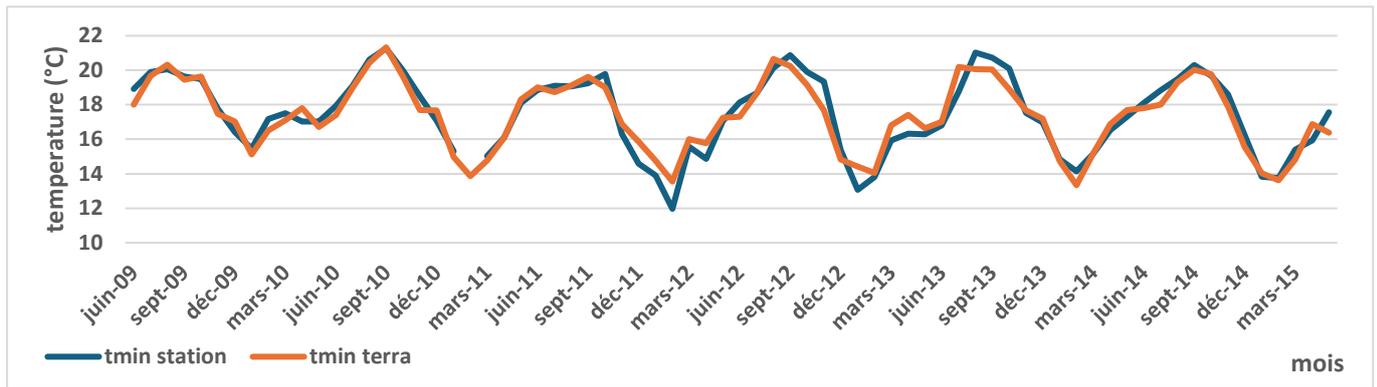


Figure 77: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (2009-2015).

À l'échelle annuelle, une légère sous-estimation (-0,59 %) des températures est observée, avec des valeurs estimées par TerraClimate se situant entre 15,15 °C et 18,80 °C, tandis que les relevés de la station indiquent des températures variant entre 15,32 °C et 18,88 °C.

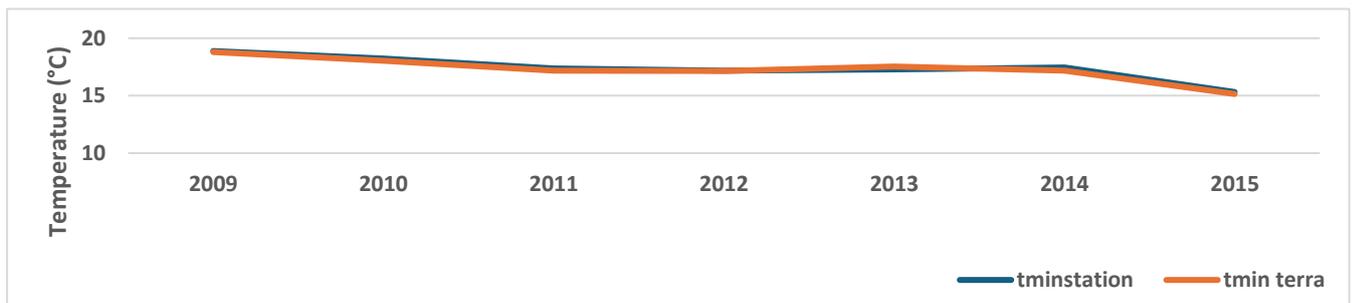


Figure 78: Variation des températures minimales observées de la station DAKHLA et de TerraClimate à l'échelle annuelle (2009-2015).

ESSAOUIRA : La fiabilité du réanalyse TerraClimate dans la zone côtière de la station Essaouira sur différentes périodes entre 1998 et 2016 a été évaluée. Les résultats mensuels obtenus mettent en évidence une tendance à la surestimation des températures minimales par le réanalyse. Les estimations varient généralement entre 8,71°C et 21,1°C, tandis que les relevés de la station s'étendent de 7,5°C à 20,52°C.

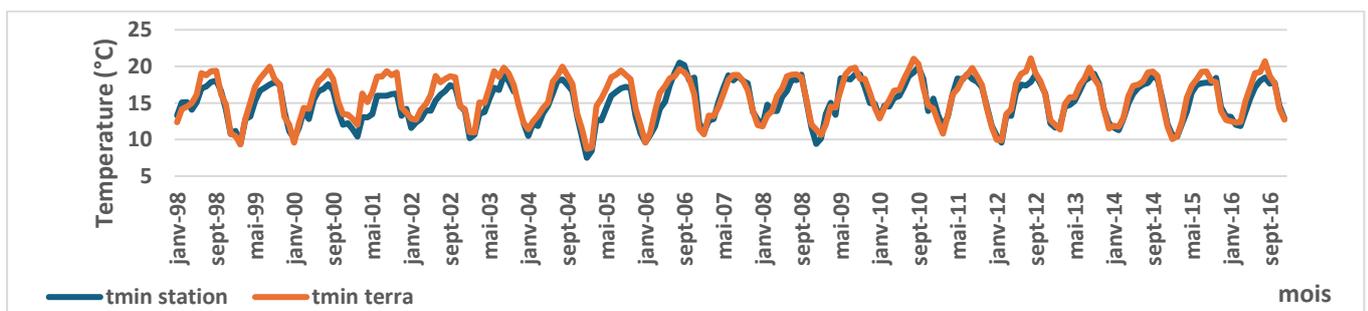


Figure 79: Variation des températures minimales observées de la station et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016).

Annuellement (voir figure 80), le réanalyse montre une légère surestimation des températures minimales. Les températures estimées par TerraClimate varient entre 15,26 °C et 16,77 °C, tandis que les relevés de la station indiquent des températures variant entre 13,67 °C et 16,67 °C.

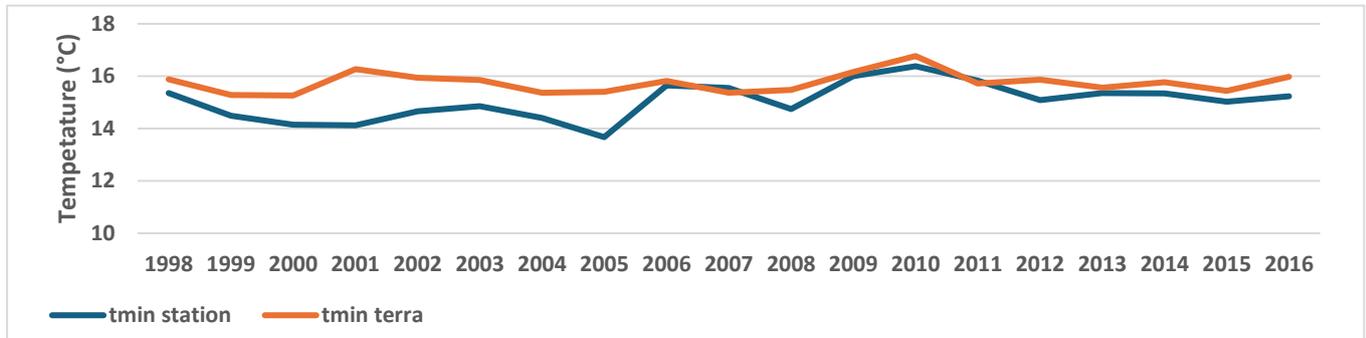


Figure 80: Variation des températures minimales observées de la station ESSAOUIRA et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1998-2016).

SAFI : L'efficacité du produit TerraClimate en zone côtière, dans le cas de la station SAFI, est analysée à différentes échelles de temps entre 1998 et 2016. Les résultats mensuels (voir figure 81) mettent en évidence une faible surestimation des températures minimales. Les températures estimées par TerraClimate varient entre 6,59°C et 21,19°C, tandis que les relevés de la station oscillent entre 4,68°C et 21,72°C.

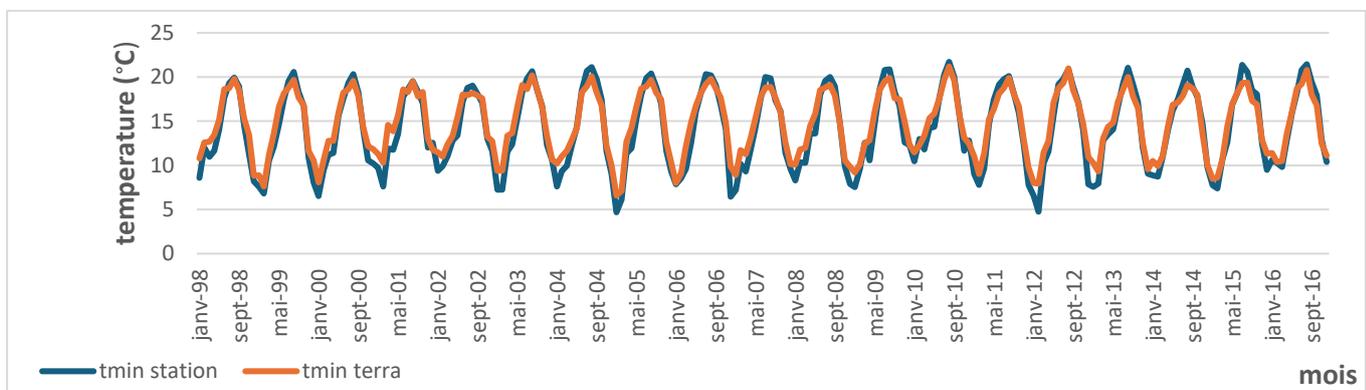


Figure 81: Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016).

À l'échelle annuelle (voir figure 82), nous avons observé une surestimation des températures minimales.

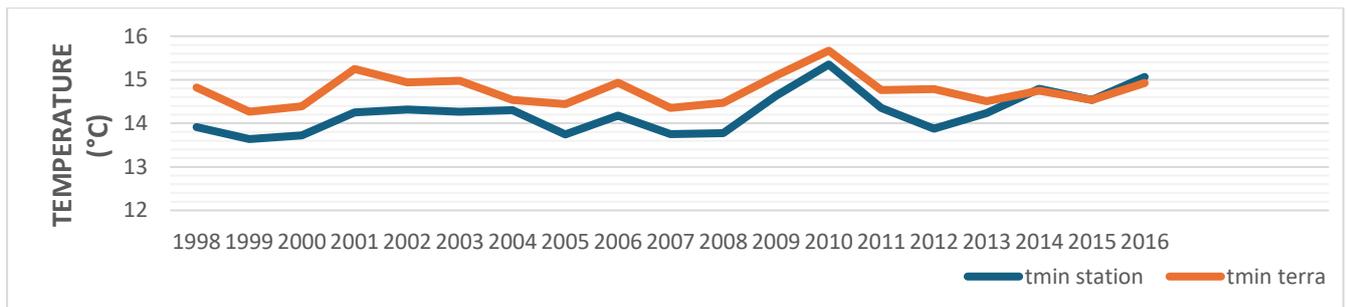


Figure 82: Variation des températures minimales observées de la station SAFI et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016).

2) Température maximale :

a- Corrélation, RMSE et Biais entre températures max observées et estimées par TerraClimate :

Nous avons évalué TerraClimate à deux échelles, mensuelle et annuelle, car il ne consigne pas les données de la même manière que CHIRTS et ERA-5. Les données de température de station et celles détectées par le produit TerraClimate sont bien corrélées à l'échelle mensuelle, avec un coefficient de corrélation de 0,99 comme approximation maximale à Marrakech et de 0,78 comme minimum à Essaouira. Annuellement, les corrélations varient, allant d'une très faible valeur de 0,03 à Dakhla à une forte valeur de 0,8 à Safi, à l'exception de Marrakech qui présente un coefficient de corrélation négatif de -0,45.

La performance du produit de réanalyse TerraClimate pour cette station située dans les montagnes du Haut-Atlas a été étudiée sur deux échelles temporelles entre 1988 et 2009. À l'échelle mensuelle, les températures maximales ont été surestimées de plus de 68 %. Les températures estimées par TerraClimate allaient de 11°C à 33,5°C, tandis que les températures observées allaient de 2,5°C à 24°C. Cette surestimation était constante tout au long de l'année. Enfin, sur une base annuelle, les températures ont été surestimées d'environ 65 %.

TerraClimate a estimé des températures maximales allant de 20,34°C à 22,2°C, tandis que la station météo a enregistré des températures allant de 11,25°C à 15,2°C.

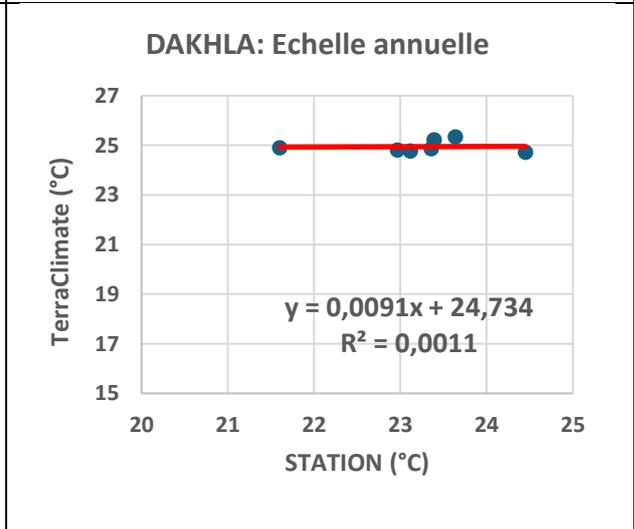
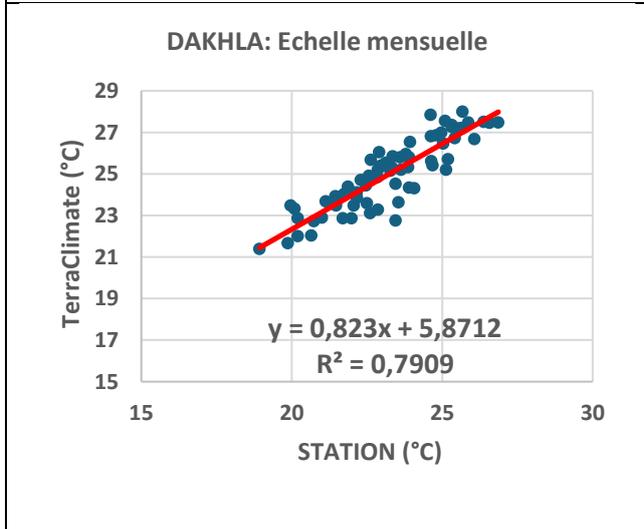
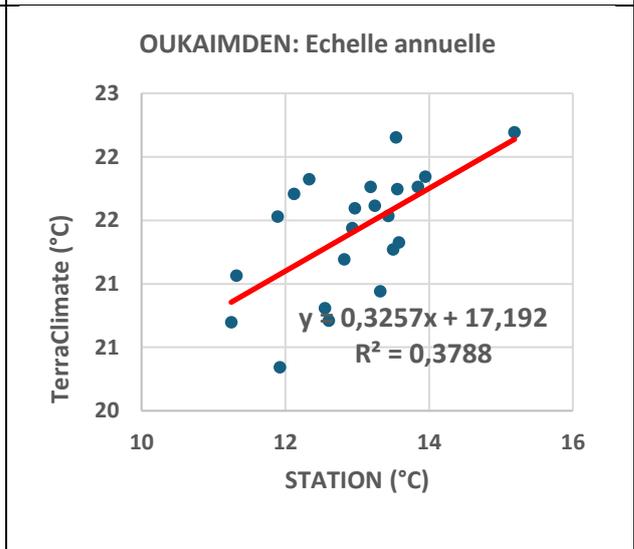
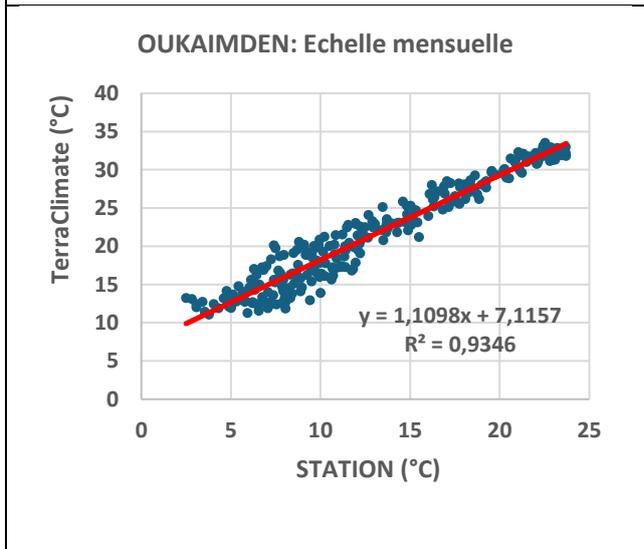
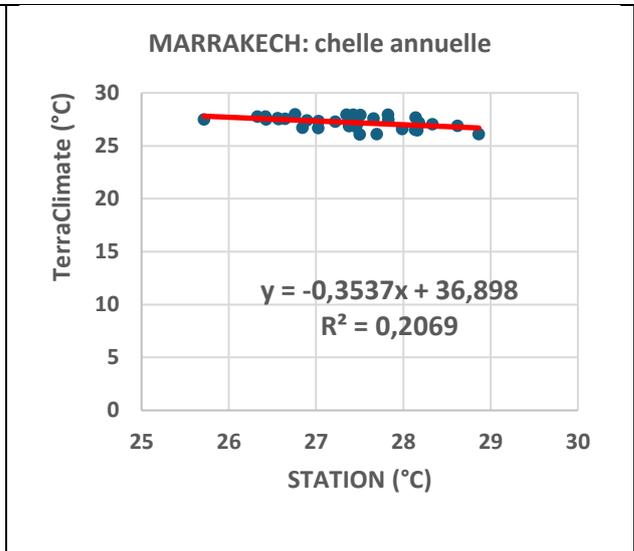
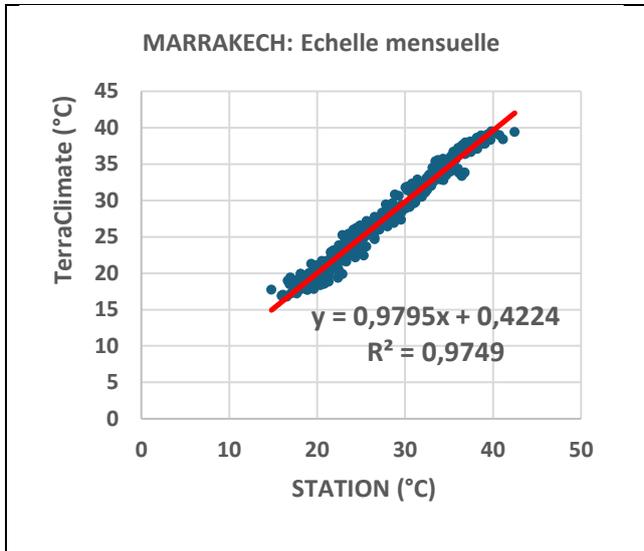
Le paramètre RMSE est utilisé pour mesurer la précision de l'estimation de la température du produit de réanalyse TerraClimate. Les valeurs de ce paramètre varient en fonction de l'emplacement géographique et topographique des stations ainsi que de la résolution du produit. À l'échelle mensuelle, les valeurs oscillent entre 0,05°C et 0,16°C pour Marrakech, Safi et Essaouira, ce qui signifie que l'estimation est très précise. Cependant, pour

Oukaimden, les erreurs peuvent atteindre 0,57°C, soit moins que Dakhla, avec un écart allant jusqu'à 2,95°C.

À l'échelle annuelle, les valeurs de RMSE sont faibles, soit environ 0,2°C pour Marrakech et Safi, et moyennes, soit environ 0,7°C pour Dakhla, sauf pour Oukaimden, où elles dépassent 1,8°C. Un autre facteur important est la différence entre la température maximale estimée par le produit de réanalyse TerraClimate et celle mesurée par les stations au sol, mesurée à deux échelles différentes. Les BIAS des stations de Dakhla, Essaouira et Safi sont proches de zéro, avec des écarts allant de -3 % à 7 %. En revanche, la station d'Oukaimden a un BIAS très élevé, atteignant 69 %.

Tableau 11: Résultats de traitement des données avec TerraClimate au niveau de Tmax.

| Station | Altitude (m) | Emplacement | Echelle | r | ME | MAE | RMSE | BIAS % |
|------------|--------------|-------------------|-----------|-------|-------|------|------|--------|
| MARRAKECH | 428 | Plaine | Mensuelle | 0,99 | -0,14 | 0,84 | 0,05 | -0,50 |
| | | | Annuelle | -0,45 | -0,19 | 0,91 | 0,19 | -0,70 |
| OUKAIMEDEN | 2726 | Montagne | Mensuelle | 0,97 | 8,77 | 8,77 | 0,57 | 68,93 |
| | | | Annuelle | 0,62 | 8,45 | 8,45 | 1,81 | 65,24 |
| DAKHLA | 7 | Côtère saharienne | Mensuelle | 0,89 | 1,76 | 1,78 | 0,23 | 7,55 |
| | | | Annuelle | 0,03 | 1,73 | 1,73 | 0,72 | 7,44 |
| ESSAOUIRA | 15 | Côtère semi-aride | Mensuelle | 0,78 | 1,48 | 1,67 | 0,16 | 7,27 |
| | | | Annuelle | 0,64 | 1,4 | 1,4 | 0,34 | 6,74 |
| SAFI | 52 | Côtère semi-aride | Mensuelle | 0,97 | -0,83 | 0,98 | 0,09 | -3,48 |
| | | | Annuelle | 0,80 | -0,86 | 0,86 | 0,20 | -3,58 |



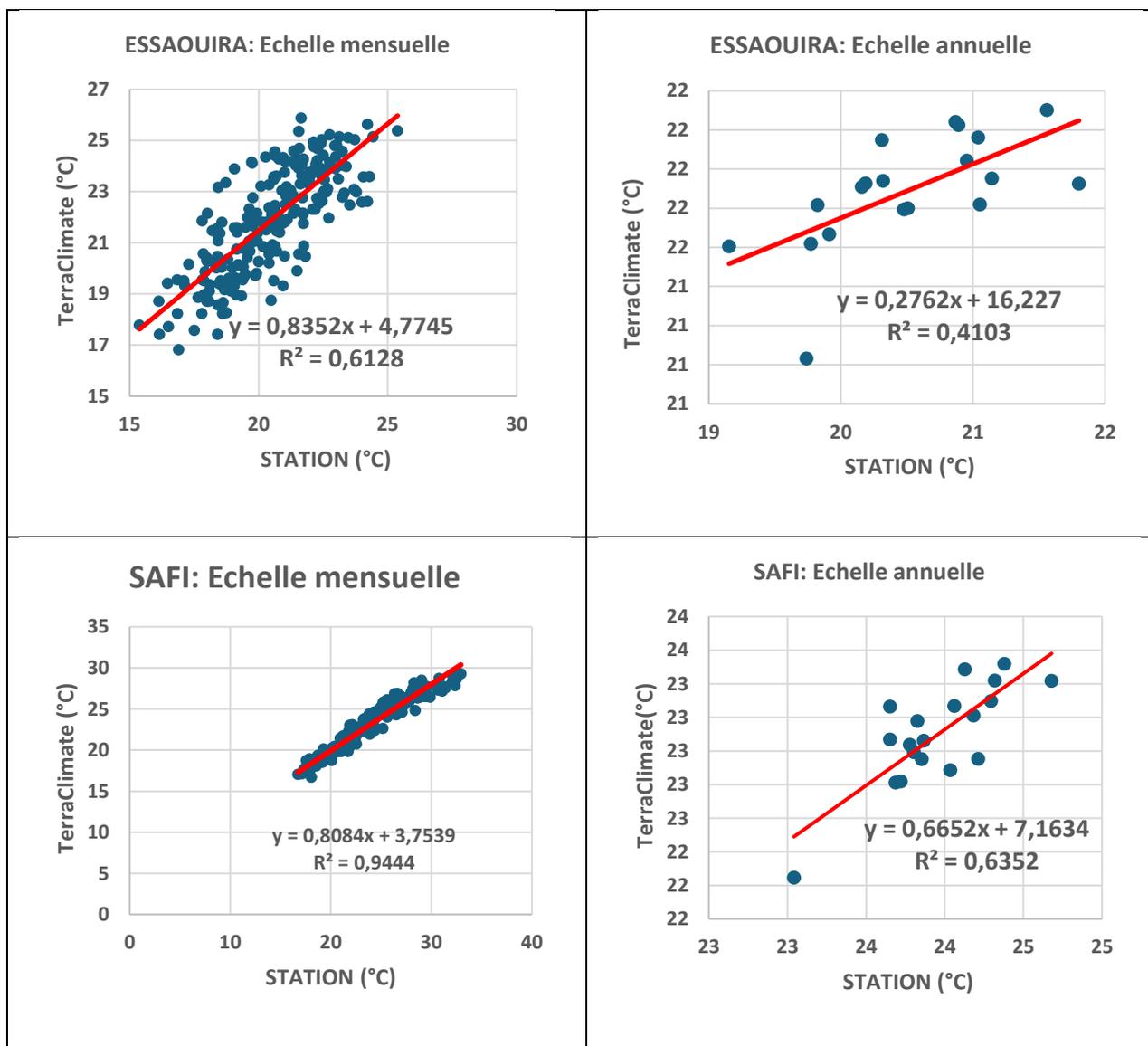


Figure 83: Corrélation entre les données observées et les données TerraClimate pour les cinq stations selon les deux échelles au niveau de Tmax.

b- Variation des données observées de chaque station et les données de TerraClimate à différentes échelles temporelles :

Oukaimden : La performance du produit de réanalyse TerraClimate pour cette station, située dans les montagnes du Haut-Atlas, a été étudiée sur différentes échelles temporelles entre 1988 et 2009. À l'échelle mensuelle, les températures maximales ont été surestimées de plus de 68 %, avec des températures allant de 11°C à 32,6°C pour TerraClimate, tandis que les températures observées allaient de 2,5°C à 23,7°C. Cette surestimation était constante tout au long de l'année.

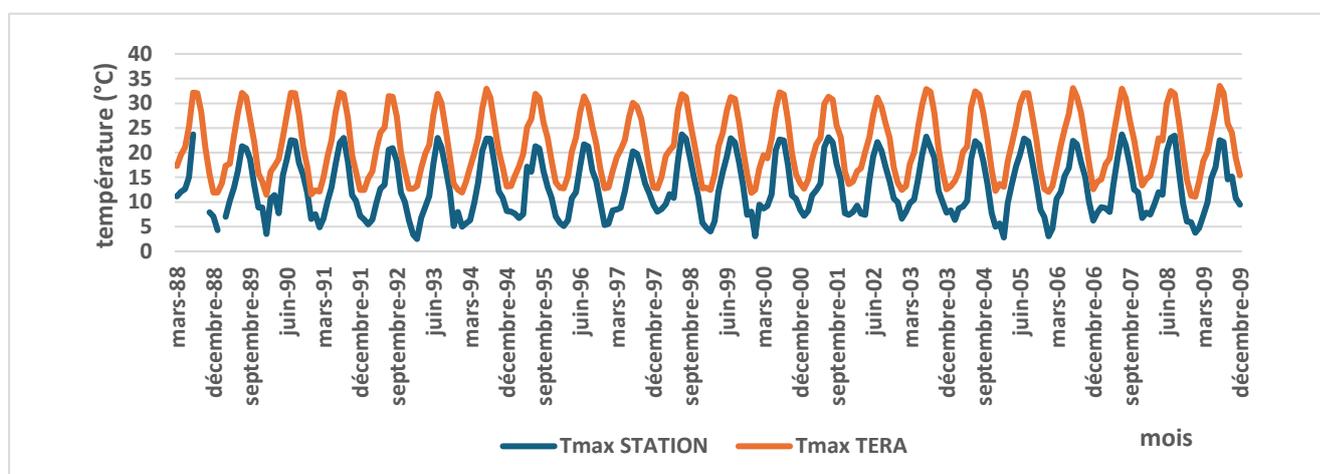


Figure 84: Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1988-2009).

Sur une base annuelle, les températures ont été surestimées d'environ 66 %. TerraClimate a estimé des températures maximales allant de 20,34°C à 22,19°C, tandis que la station météo a enregistré des températures allant de 11,25°C à 15,2°C.

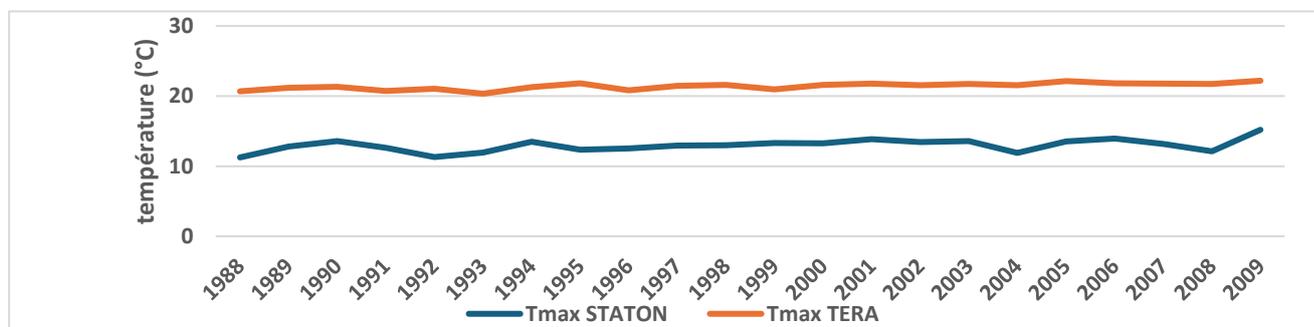


Figure 85: Variation des températures maximales observées de la station OUKAIMEDEN et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1988-2009).

Marrakech : Pendant l'analyse de la performance du produit de réanalyse TerraClimate dans la région de Marrakech sur une période de 1983 à 2016, des évaluations à différentes échelles temporelles ont été réalisées. Les variations mensuelles ont révélé une tendance à une sous-estimation continue d'environ 0,5 % avec un RMSE de 0,05°C. Les températures estimées par TerraClimate varient de 16,8°C à 39,5°C, tandis que les températures observées varient de 14°C à 42°C.

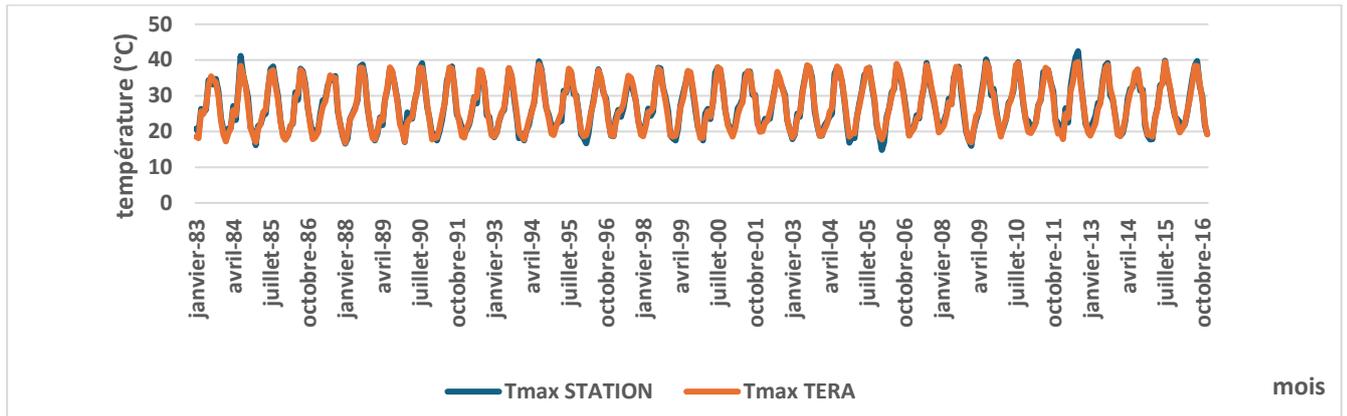


Figure 86: Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1983-2016).

En termes annuels, le produit TerraClimate a montré une surestimation de 1983 à 2000 suivie par une sous-estimation de 2001 à 2016, de la température maximale par rapport à celle enregistrée par la station. Les températures estimées varient de 26°C à 28°C, tandis que les températures observées varient de 25,8°C à 29°C avec une RMSE inférieure à 0,2°C.

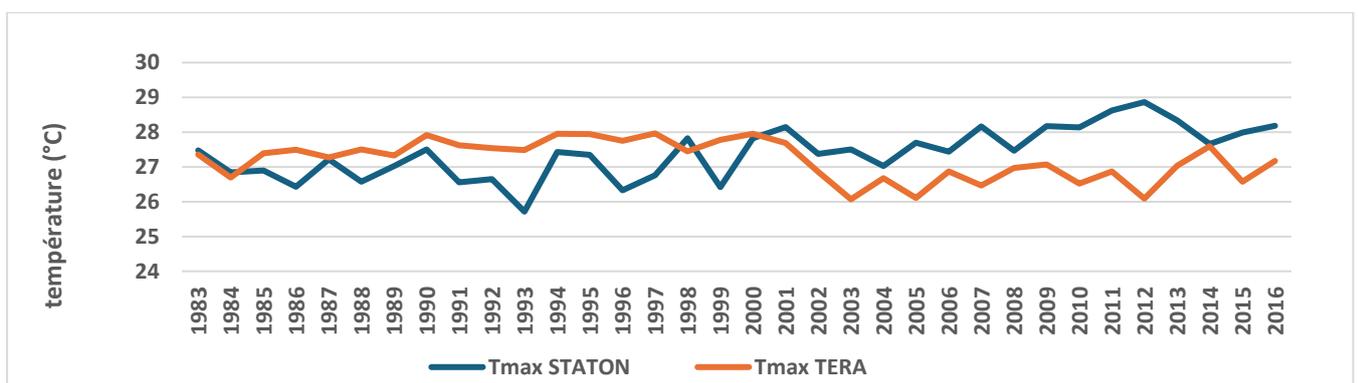


Figure 87: Variation des températures maximales observées de la station MARRAKECH et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1983-2016).

Dakhla : L'analyse de l'efficacité du produit TerraClimate dans la région côtière saharienne sur une période de sept ans, de 2009 à 2015, a révélé une surestimation mensuelle estimée

sous 7,55 % de BIAS. Les températures estimées par TerraClimate varient entre 21,4°C et 28°C, tandis que celles observées par la station varient entre 19°C et 27°C. Sur une base annuelle, TerraClimate détecte une plage de températures comprise entre 24,7°C et 25,4°C, tandis que les valeurs mesurées par la station se situent dans la plage de 21,6°C à 24,5°C.

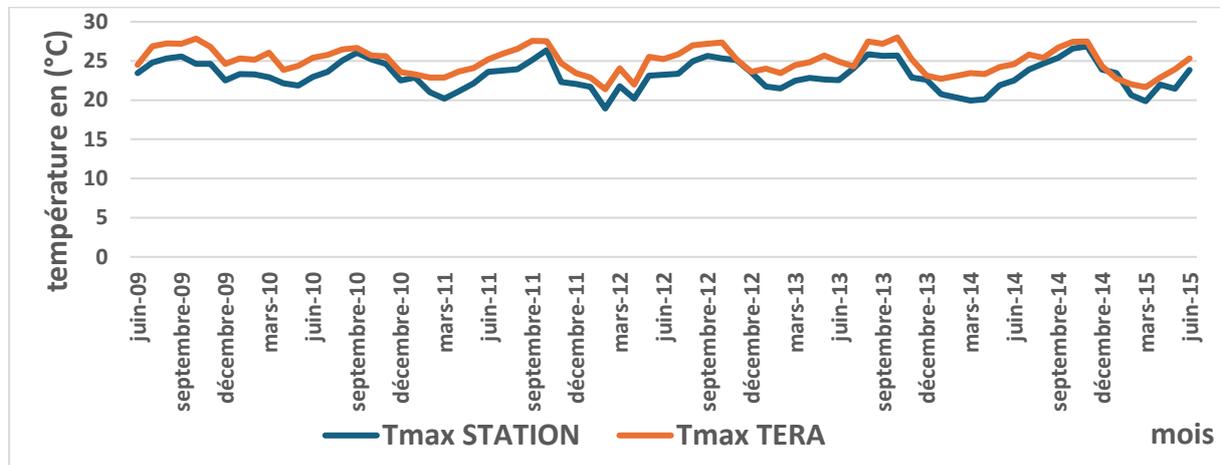


Figure 88: Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de T TerraClimate à l'échelle mensuelle (2009-2015).

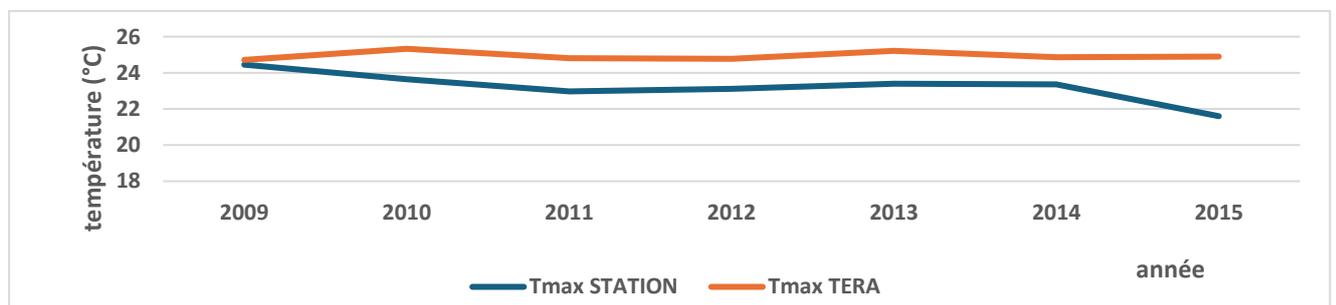


Figure 89: Variation des températures maximales observées de la station DAKHLA et de TerraClimate à l'échelle annuelle (2009-2015).

Essaouira : Une étude a été menée pour évaluer l'exactitude des données météorologiques du produit de réanalyse TerraClimate dans la zone côtière de la ville d'Essaouira, de 1998 à 2016. Le résultat mensuel montre parfois une surestimation et parfois une sous-estimation, mais en général, il y a une tendance à la surestimation moyenne d'environ 7,27 %.

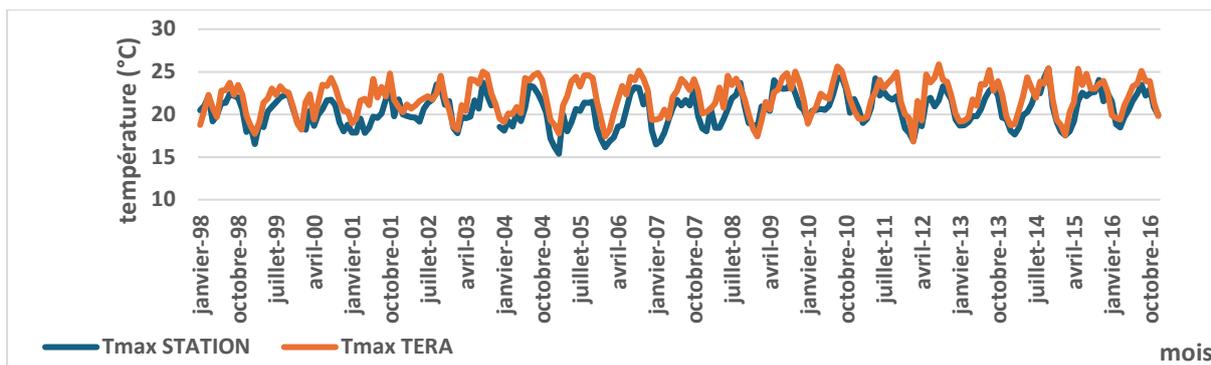


Figure 90: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016).

Sous une échelle annuelle, le produit de réanalyse surestime légèrement la température maximale annuelle avec un taux de 6,82 %, mais avec une erreur de plus de 0,02°C des températures maximales et une RMSE qui ne dépasse pas 0,34°C.

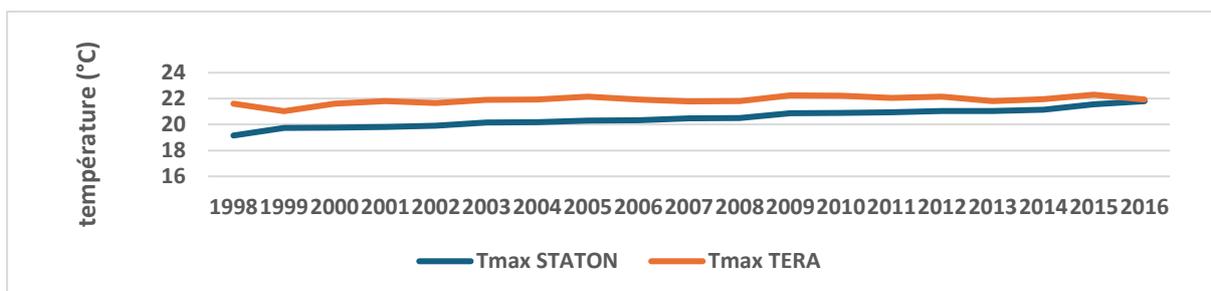


Figure 91: Variation des températures maximales observées de la station ESSAOUIRA et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1998-2016).

Safi : Cette étude a été menée pour évaluer l'efficacité du produit TerraClimate dans la région côtière de la station Safi sur différentes périodes allant de 1998 à 2016. À l'échelle mensuelle, on a constaté une sous-estimation d'environ -3,5 % des températures maximales par TerraClimate, avec un taux de RMSE de 0,02°C.

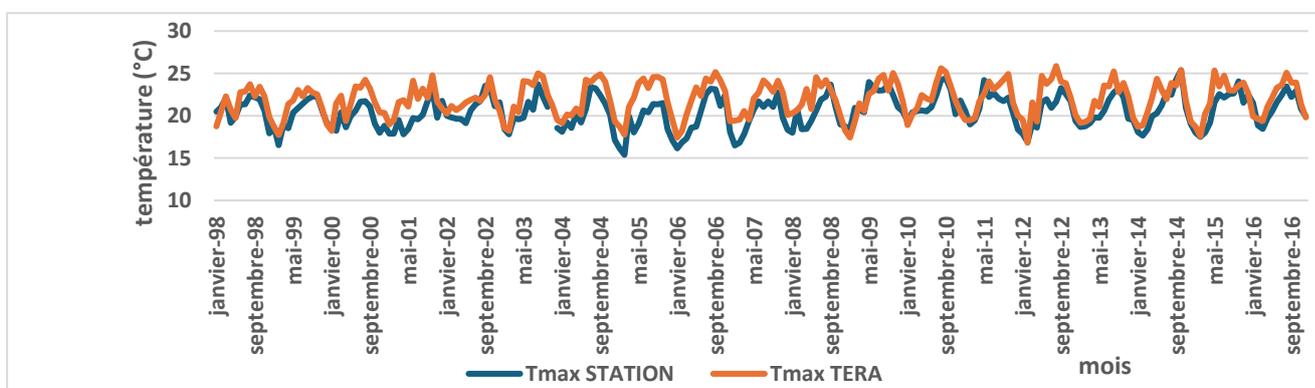


Figure 92: Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de TerraClimate à l'échelle mensuelle (1998-2016).

Annuellement, la sous-estimation persistait, avec des températures estimées par TerraClimate entre 22,25°C et 23,52°C, tandis que les relevés de la station indiquaient des températures allant de 23,04°C à 24,67°C, dans les deux échelles temporelles. La sous-estimation du produit TerraClimate dans cette station n'a pas dépassé -3,6 %, avec une erreur d'environ 0,20°C/an.

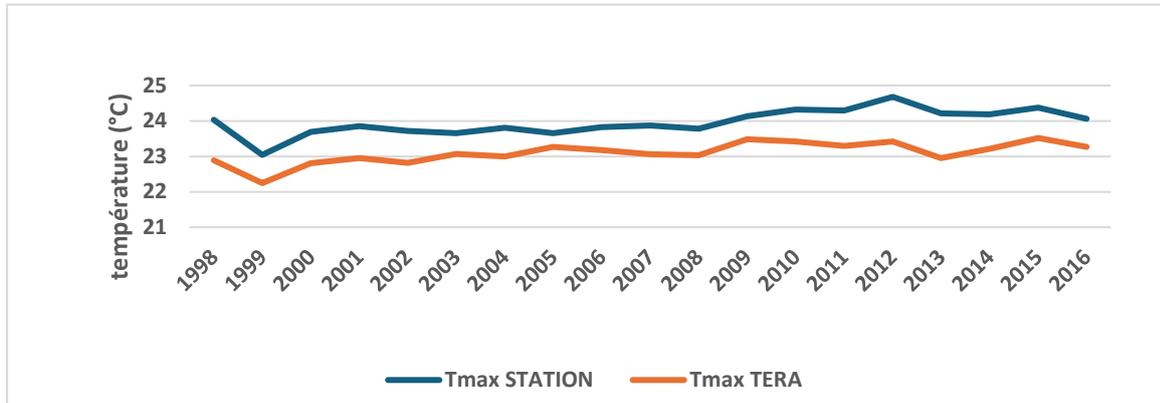


Figure 93: Variation des températures maximales observées de la station SAFI et de TerraClimate à l'échelle annuelle (1998-2016).

Partie IV : Discussion

Les résultats de l'étude indiquent que les données simulées des trois produits, CHIRTS, ERA-5 et TerraClimate, correspondent parfois aux observations des cinq stations météorologiques, mais ne sont pas toujours très performantes. Certains facteurs perturbent la température mesurée, notamment l'émissivité, qui est la propriété de rayonnement infrarouge émise par une surface. Les matériaux ont des niveaux d'émissivité variables, ce qui peut rendre difficile la conversion des mesures de radiance en températures précises mesurées par les stations. Des estimations erronées de l'émissivité peuvent causer des erreurs importantes.

L'altitude a également un effet. Les nuages ont la capacité d'altérer le rayonnement thermique de la surface terrestre, ce qui peut rendre la mesure de la température de surface difficile. Par exemple, à Oukaimden, les erreurs peuvent atteindre 0,11 °C à l'échelle journalière et 2,88 °C à l'échelle annuelle. Le biais peut parfois dépasser 200 %, ce qui signifie que la température des produits est supérieure de deux fois à celle mesurée à la station de haute montagne.

Une autre raison affectant l'exactitude des produits de télédétection de la température est l'influence des océans, qui libèrent de l'énergie thermique de manière variable selon les saisons et divers facteurs tels que l'exposition au soleil. Par exemple, à Safi, la température mesurée par la station est plus élevée que celle détectée par les produits spatiaux, avec des biais négatifs surtout en été (juillet-août) d'environ -3 %, mais aussi des biais positifs le reste de l'année (atteignant parfois 1 %). De plus, la résolution des produits CHIRTS, ERA-5 et TerraClimate, couvrant respectivement des surfaces de 25 km², 625 km² et 16 km², doit être prise en compte. Les mesures effectuées par ces produits représentent la moyenne de la température sur ces surfaces. Ainsi, les produits avec une plus petite surface résolvent la température de manière plus précise. TerraClimate présente une exactitude plus élevée car la moyenne de température de ce produit est proche de celle mesurée par les stations.

Les chaînes de montagnes peuvent bloquer les masses d'air, créant des différences de température entre les côtés au vent et sous le vent. Par exemple, le côté au vent peut recevoir plus de précipitations et être plus frais, tandis que le côté sous le vent peut être plus sec et plus chaud. Dans ce cas, la mesure de la température à un emplacement donné peut différer de la moyenne sur la superficie résolue par les produits spatiaux.

Les régions proches des grandes masses d'eau ont des variations de température plus modérées, et les erreurs de précision varient entre 0,02 °C et 1,35 °C. L'eau, avec sa capacité thermique élevée, chauffe et refroidit plus lentement que la terre, influençant les températures mesurées par les stations.

Les vastes plaines et déserts, en particulier ceux éloignés des influences océaniques, peuvent connaître des températures extrêmement élevées en été et très basses en hiver.

Tableau 12: Résultats statistiques de la comparaison entre les températures minimales et maximales des produits maillés et celles des différentes stations à l'échelle journalière.

| STATION à l'échelle journalière | PRODUIT | Tmin | | | Tmax | | |
|---------------------------------|---------|------|------|--------|------|------|--------|
| | | CC | RMSE | BIAS % | CC | RMSE | BIAS % |
| OUKAIMDEN | CHIRTS | 0,89 | 0,12 | 230,26 | 0,94 | 0,16 | 104,04 |
| | ERA-5 | 0,92 | 0,06 | 68,14 | 0,95 | 0,11 | 61,26 |
| MARRAKECH | CHIRTS | 0,97 | 0,02 | 11,37 | 0,98 | 0,02 | 2,43 |
| | ERA-5 | 0,98 | 0,03 | -7,28 | 0,98 | 0,03 | -10,88 |
| DAKHLA | CHIRTS | 0,90 | 0,15 | 38,93 | 0,86 | 0,11 | 16,59 |
| | ERA-5 | 0,91 | 0,03 | 4,39 | 0,83 | 0,09 | 7,87 |
| ESSAOUIRA | CHIRTS | 0,87 | 0,07 | 35,51 | 0,72 | 0,05 | 17,38 |
| | ERA-5 | 0,81 | 0,03 | 10,97 | 0,63 | 0,03 | -1,16 |
| SAFI | CHIRTS | 0,93 | 0,07 | 41,11 | 0,91 | 0,03 | 2,41 |
| | ERA-5 | 0,95 | 0,02 | 6,16 | 0,92 | 0,03 | -3,55 |

Tableau 13: Résultats statistiques de la comparaison entre les températures minimales et maximales des produits maillés et celles des différentes stations à l'échelle mensuelle.

| STATION à l'échelle mensuelle | PRODUIT | Tmin | | | Tmax | | |
|-------------------------------|--------------|------|------|--------|------|------|--------|
| | | CC | RMSE | BIAS % | CC | RMSE | BIAS % |
| OUKAIMDEN | CHIRTS | 0,96 | 0,65 | 233,14 | 0,97 | 0,85 | 104,09 |
| | ERA-5 | 0,97 | 0,02 | 69,17 | 0,95 | 0,40 | 47,71 |
| | TerraClimate | 0,97 | 0,12 | 29,86 | 0,97 | 0,57 | 68,93 |
| MARRAKECH | CHIRTS | 0,99 | 0,09 | 11,36 | 0,99 | 0,05 | 2,43 |
| | ERA-5 | 1 | 0,05 | -7,32 | 0,99 | 0,16 | -10,87 |
| | TerraClimate | 0,99 | 0,07 | -9,81 | 0,99 | 0,05 | -0,50 |
| DAKHLA | CHIRTS | 0,95 | 0,8 | 38,92 | 0,96 | 0,39 | 14,19 |
| | ERA-5 | 0,98 | 0,11 | 4,44 | 0,93 | 0,19 | 5,64 |
| | TerraClimate | 0,95 | 0,21 | 0,9 | 0,89 | 0,23 | 7,55 |
| ESSAOUIRA | CHIRTS | 0,92 | 0,36 | 35,46 | 0,82 | 0,25 | 16,50 |
| | ERA-5 | 0,87 | 0,14 | 10,93 | 0,73 | 0,13 | -1,22 |
| | TerraClimate | 0,94 | 0,11 | 5,18 | 0,78 | 0,16 | 7,27 |
| SAFI | CHIRTS | 0,96 | 0,4 | 41,22 | 0,98 | 0,06 | 2,45 |
| | ERA-5 | 0,98 | 0,09 | 6,19 | 0,96 | 0,09 | -3,54 |
| | TerraClimate | 0,98 | 0,08 | 3,78 | 0,80 | 0,20 | -3,58 |

Tableau 14: Résultats statistiques de la comparaison entre les températures minimales et maximales des produits maillés et celles des différentes stations à l'échelle annuelle.

| STATION à l'échelle annuelles | PRODUIT | Tmin | | | Tmax | | |
|-------------------------------|--------------|------|------|--------|-------|------|--------|
| | | CC | RMSE | BIAS % | CC | RMSE | BIAS % |
| OUKAIMDEN | CHIRTS | 0,66 | 2,21 | 232,23 | 0,54 | 2,88 | 104,16 |
| | ERA-5 | 0,46 | 0,69 | 68,63 | 0,40 | 1,32 | 46,76 |
| | TerraClimate | 0,51 | 0,30 | 30,18 | 0,62 | 1,81 | 65,24 |
| MARRAKECH | CHIRTS | 0,70 | 0,27 | 11,37 | 0,95 | 0,12 | 2,44 |
| | ERA-5 | 0,9 | 0,17 | -7,28 | 0,9 | 0,51 | -10,86 |
| | TerraClimate | 0,88 | 0,24 | -10,10 | -0,45 | 0,19 | -0,70 |
| DAKHLA | CHIRTS | 0,96 | 2,57 | 39,10 | 0,99 | 1,23 | 14,03 |
| | ERA-5 | 0,98 | 0,31 | 4,37 | 0,96 | 0,51 | 5,64 |
| | TerraClimate | 0,99 | 0,07 | -0,59 | 0,03 | 0,72 | 7,44 |
| ESSAOUIRA | CHIRTS | 0,47 | 1,23 | 35,51 | 0,80 | 0,78 | 14,18 |
| | ERA-5 | 0,04 | 0,44 | 11,00 | 0,63 | 0,03 | -1,16 |
| | TerraClimate | 0,53 | 0,21 | 4,66 | 0,64 | 0,34 | 6,82 |
| SAFI | CHIRTS | 0,35 | 1,35 | 41,11 | 0,89 | 0,14 | 2,43 |
| | ERA-5 | 0,64 | 0,24 | 6,14 | 0,02 | 0,23 | -3,55 |
| | TerraClimate | 0,72 | 0,14 | 3,58 | 0,80 | 0,20 | -3,58 |

Conclusion

La détection à distance de la température est un outil essentiel pour améliorer notre compréhension et notre gestion de l'environnement de manière durable et efficace. Cette étude visait à valider les produits de données maillées CHIRTS, ERA-5 et TerraClimate, avec différentes résolutions spatiales et temporelles, au niveau de cinq stations au Maroc. Nous avons évalué l'exactitude et la performance de ces produits en utilisant des critères statistiques importants tels que le BIAS, le RMSE et le coefficient de corrélation (r).

Les résultats de cette étude montrent qu'à l'échelle journalière, les produits CHIRTS et ERA-5 estiment la température avec des précisions variables. ERA-5 donne de bons résultats dans les stations côtières, tandis que dans la plaine de Marrakech, CHIRTS détecte les températures de manière plus précise que le produit de réanalyse ERA-5. À Oukaimden, située en haute montagne, aucun des deux produits n'est capable d'estimer précisément la température de la station. Le produit satellitaire CHIRTS a tendance à surestimer la température, surtout dans les stations de haute montagne.

À l'échelle mensuelle, malgré une mauvaise estimation des températures minimales dans toutes les stations sauf Marrakech, et des températures maximales à Oukaimden par le produit CHIRTS, les résultats de CHIRTS ainsi que des deux produits de réanalyse ERA-5 et TerraClimate sont satisfaisants, surtout TerraClimate qui présente les meilleurs résultats.

À l'échelle annuelle, le produit CHIRTS commet généralement des erreurs importantes en estimant la température minimale pour toutes les stations, à l'exception de Marrakech, et la température maximale à Oukaimden. Les produits de réanalyse ERA-5 et TerraClimate montrent des performances très satisfaisantes pour les températures maximales et minimales des stations côtières et de Marrakech. Cependant, ces produits de réanalyse rencontrent des difficultés pour détecter la température à Oukaimden, avec des surestimations pouvant atteindre 80 % (cas de ERA-5 T_{min} à Oukaimden à l'échelle annuelle).

En conclusion, les produits de réanalyse sont généralement plus fiables que les produits satellitaires pour estimer la température par télédétection, comme le montre les comparaisons précédentes.

Bibliographie et Webographie

- Alain Piqué, et al. (1994). *La Géologie du Maroc*. Rabat.
- Andrew Verdin, et al. (2020). Development and validation of the CHIRTS-daily quasi-global high-resolution daily temperature data set. *Scientific Data*.
- Bénédicte BAQUÉ, et al. (s.d.). *Utilisation de ré-analyses météorologiques pour le dimensionnement et le calcul de performances d'aéronefs*. DGA Maîtrise de l'Information.
- Benjamin R. et al. (2021). *Evaluation of Tropospheric Moisture Characteristics Among COSMIC-2, ERA5 and MERRA-2 in the Tropics and Subtropics*. University Corporation for Atmospheric Research.
- Boualla, O. (2016). *ÉTUDE DES RISQUES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA RÉGION DE SAFI (MAROC) : APPROCHE GÉOMATIQUE, GÉOPHYSIQUE ET GÉOSTATISTIQUE*. Université Chouaïb Doukkali Faculté des Sciences.
- CHAPRON, J.-Y. (2010). *LE CHANGEMENT CLIMATIQUE*. Académie des sciences.
- <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. (s.d.). Récupéré sur <https://cds.climate.copernicus.eu/>.
- <https://fr.climate-data.org/afrique/maroc-181/>. (s.d.). Récupéré sur <https://fr.climate-data.org>.
- <https://gifex.com/fr/fichier/carte-de-dakhla-oued-ed-dahab/>. (s.d.). Récupéré sur <https://gifex.com/>.
- https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/slide_captions.html?utm_source=textcortex&utm_medium=zenochat. (s.d.). Récupéré sur lambda.gsfc.nasa.gov.
- https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/slide_captions.html?utm_source=textcortex&utm_medium=zenochat. (s.d.). Récupéré sur <https://lambda.gsfc.nasa.gov/>.
- <https://metiers-du-spatial.com/missions/>. (s.d.). Récupéré sur <https://metiers-du-spatial.com>.
- <https://vigilance.marocmeteo.ma/?q=fr/meteo/metier/observation>. (s.d.). Récupéré sur <https://vigilance.marocmeteo.ma>.
- <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirtsdaily>. (s.d.). Récupéré sur www.chc.ucsb.edu.

<https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>. (s.d.). Récupéré sur www.climatologylab.org.

<https://www.encyclopedie-environnement.org/air/observations-meteo-au-sol/>. (2018). Récupéré sur [/www.encyclopedie-environnement.org](http://www.encyclopedie-environnement.org).

<https://www.equipement.gov.ma/Carte-Region/RegionMarrakech/Presentation-de-la-region/Monographie/Pages/Monographie-de-la-region.aspx>. (s.d.). Récupéré sur <https://www.equipement.gov.ma/>.

John T. et al. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*.

KHATRI, S. E. (2003). *CLIMATOLOGIE*. Casablanca.

M. Bahir, et al. (2000). RESSOURCES HYDRIQUES DU BASSIN SYNCLINAL. *Estudios Geológicos*.

Rachdane et al. (2022). Comparison of High-Resolution Satellite Precipitation Products in Sub-Saharan Morocco.

RATIER, A. (2019). L'observation, base de tout le processus. *Magazine N°747* .

Régis Caloz, et al. (2001). *Précis de télédétection : Traitements numériques d'images de télédétection*. Presses de l'Université du Québec, Sillery, Québec, 1992.

Roth, A. D. (1992). *La prohibition de l'appropriation et les régimes d'accès aux espaces extra-terrestres*. Genève: Graduate Institute Publications.

Salah Ouhamdouch, et al. (2017). Impact du changement climatique sur la ressource en eau eau milieu semi-aride : exemple du bassin d'Essaouira (Maroc). *Revue des sciences de l'eau*.

Wadi Badri, et al. (1994). Données météorologiques nouvelles sur le massif de l'Oukaïmeden (2570 m, Haut Atlas de Marrakech, Maroc): un exemple de climat de haute montagne méditerranéenne.

Weisrock, A. (2013). Oukaïmeden.