جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES
كلية العلوم ظهر المهراز فاس
FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MAHRAZ FES

N° d'ordre : 60/2023

Centre des Études Doctorales	**:**	Science et Technologie
Formation Doctorale	**:**	Ressources Naturelles environnement et développement durable (RNE2D)
Discipline	**:**	Géologie
Spécialité	**:**	Géosciences et Ressources Naturelles
Laboratoire	**:**	Laboratoire d'Ingénierie, d'Électrochimie, de Modélisation et d'Environnent (LIEME)

Thèse pour l'obtention de DOCTORAT

Modélisation climatique et indices de suivi et d'évaluation de la sécheresse agrométéorologique : cas du bassin Bas Sebou, Nord-Ouest du Maroc

Préparé par : **Hakam Oualid**

Soutenue le 14/06/2023 devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Établissement	Qualité
EL FALEH El Mâti	PES	Université Moulay Ismaïl – Faculté des sciences Meknès	Président
DRIDRI Abdallah	PES	Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Faculté des sciences Dhar El Mahraz	Rapporteur & examinateur
TALEB Abdeslam	PES	Université Hassan II – Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia	Rapporteur & examinateur
LABBASSI Kamal	PES	Université Chouaïb Doukkali – Faculté des sciences El Jadida	Rapporteur & examinateur
AIT BRAHIM Yassine	PH	Université Mohammed VI Polytechnique – Institut International de Recherche en Eau (IWRI), Benguerir	Examinateur
ONGOMA Victor	PH	Université Mohammed VI Polytechnique – Institut International de Recherche en Eau (IWRI), Benguerir	Examinateur
LOUAYA Abdelkarim	PESA	Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Faculté des sciences Dhar El Mahraz	Invité
BOUSHABA Abdellah	PES	Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Faculté des sciences Dhar El Mahraz	Invité
BAALI Abdennasser	PES	Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Faculté des sciences Dhar El Mahraz	Directeur de thèse

Année universitaire : 2022 - 2023

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail que j'ai effectué avec une grande satisfaction, j'ai les sentiments d'avoir acquis une expérience inoubliable, ponctuée de rencontres enrichissantes, de collaborations fructueuses et de discussions stimulantes. Cela a également été une véritable aventure humaine, avec ses moments difficiles mais aussi ses moments de bonheur. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui m'ont soutenu et accordé leur confiance, sans lesquelles ce travail n'aurait probablement pas été possible.

Tout d'abord, je souhaite exprimer mes expressions de renaissances à l'égard de mon directeur de thèse, **Pr. BAALI Abdennasser**, qui m'a apporté de précieux conseils dans les moments de doute, m'a accompagné dans mes choix et m'a soutenu face aux difficultés. J'ai énormément appris à ses côtés entant que guide essentiel tout au long de cette thèse. Mes visites régulières dans son laboratoire de recherche ont souvent été décisives pour la réussite de ces cinq années d'inscription en doctorat.

Je voudrais ensuite exprimer ma gratitude envers **Pr. DRIDRI Abdallah**, **Pr. TALEB Abdeslam** et **Pr. LABBASSI Kamal** pour avoir accepté de rapporter cette thèse, ainsi que **Pr. EL FALEH El Mâti** pour avoir accepté de présider le Jury. J'adresse également les expressions de gratitude les plus raffinées aux autres membres de jury qui ont accepté d'examiner ce travail de thèse, professeurs **LOUAYA Abdelkarim**, **AIT BRAHIM Yassine**, **ONGOMA Victor** ainsi qu'à mon cher professeur **BOUSHABA Abdellah**. C'est pour moi un immense honneur et un réel plaisir de pouvoir présenter mon travail devant ces personnalités.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à tous les doctorants que j'ai rencontrés et avec lesquels j'ai passé des bons moments en échangeant des connaissances et des expériences sur le terrain et au Laboratoire d'Ingénierie, Électrochimie, Modélisation et Environnement (LIEME) : **Dr. Youssra Ahouach, Dr. Khalil Azennoud, Pr. Amine Couscous, Dr. El Hamdani Nadia, Dr. El Kamel Touria, Dr. El Ibrahimi Abdelhamid, Lyazdi Aziza et Bourchachen Mariam**.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers les membres de ma famille proche et élargie, qui ont contribué à façonner la personne que je suis aujourd'hui. Je suis reconnaissant pour leur compréhension et leur acceptation de mon absence durant ces années, ainsi que pour leur soutien inconditionnel, qui a rendu mon parcours très agréable. Merci encore une fois.

Pardon à toutes celles et ceux que j'ai oublié...

RÉSUMÉ

Le bassin Bas Sebou a la particularité de se trouver au Nord du Maroc à la limite de l'influence d'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) et sous l'influence océanique avec effets de degré de continentalité vers l'Est. Il présente aussi des atouts pour jouer un rôle important dans la vie socio-économique dominée par l'agriculture et aussi pour expliquer les impacts des changements climatiques vécus ces dernières décennies. La série chronologique des données climatiques est dominée par les précipitations pendant l'hiver et le printemps avec des tendances au cours des mois de décembre et mars, déterminées par le test de Mann-Kendall. L'ONA et l'OM (Oscillation Méditerranéenne) ont manifestement présenté leur influence modérée à forte sur les précipitations en mettant l'action sur l'ONA comme agent potentiel causant la variabilité des précipitations, en utilisant la technique FOE. À partir des données climatiques (1984-2016) principalement celles des précipitations et températures et en tenant compte des limites et avantages de chaque indice de sécheresse, les quatre indices dont l'indice de précipitations standardisé (SPI) basé uniquement sur les précipitations, l'indice d'évapotranspiration des précipitations standardisé (SPEI), l'indice de reconnaissance de la sécheresse (RDI) et l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer auto-calibré (sc-PDSI) incluant l'évapotranspiration potentielle (PET), il a été confirmé que le SPI est le plus adapté pour détecter la durée et l'intensité de la sécheresse, en particulier dans les régions à climat subhumide. Toutefois, le SPI sous-estime les changements de sécheresses en ne prenant pas en compte le paramètre de PET. Les quatre indices ont montré des tendances similaires sur toute la période étudiée, bien que le sc-PDSI ait tendance à surestimer les conditions de sécheresse en raison de sa sensibilité aux températures et précipitations. Enfin, l'utilisation des indices SPI et SPEI pour l'analyse des tendances saisonnières a montré des tendances significatives, avec une augmentation de la température indiquant un réchauffement accru en été et une diminution des précipitations en hiver. Ces tendances sont liées aux oscillations Nord-Atlantique et Méditerranéenne, qui sont fortement influencées par les systèmes cycloniques de l'Atlantique Nord-Est et qui favorisent la cyclogenèse méditerranéenne.

En utilisant les indices de télédétection et météorologiques afin d'évaluer la sécheresse agricole et la santé de la végétation d'une part et de chercher la relation entre le rendement des céréales et la sécheresse d'autre part, il a été montré que la santé des cultures depuis le début du 21ème siècle a diminué et que les rendements céréaliers ont présenté une forte réaction vis-à-vis de la variabilité interannuelle de la sécheresse. Les indices de sécheresse basés sur la température ont été plus corrélés et plus sensibles au rendement céréalier que les indices basés sur les précipitations, ce qui suggère que le rendement est plus sensible aux changements de température qu'à l'humidité. Pour prédire ces rendements, les modèles empiriques à l'échelle provinciale en utilisant des données multi-sources, y compris des indices basés sur la télédétection et des données météorologiques et les algorithmes d'apprentissage automatique tels la régression linéaire multiple, le réseau neuronal artificiel (ANN) et la forêt aléatoire (RF), ont démontré que la combinaison de données issues de différentes sources a conduit à de meilleurs résultats comparativement aux modèles basés sur une source unique. En effet, les modèles exploitant les algorithmes de RF et d'ANN ont permis de prédire les rendements des céréales dès les mois d'hiver, avec des mesures statistiques satisfaisantes ($0.7 < R^2 < 0.8$ et $0.3 < RMSE < 0.5$ t. ha^{-1}).

Mots clés : Changements climatiques ; Indices de sécheresse ; Indices climatiques ; Indices de télédétection ; Rendement céréalier ; Algorithmes d'apprentissage automatique ; Bassin Bas Sebou ; Maroc.

ABSTRACT

The Lower Sebou basin is unique in that it lies in the north of Morocco at the limit of the influence of the North Atlantic Oscillation (NAO) and under the oceanic influence, with continental effects towards the east. It also has the potential to play an important role in the socio-economic life of the region, which is dominated by agriculture, and to explain the impact of climate change in recent decades. The time series of climate data is dominated by precipitation in winter and spring and trends in December and March, determined by the Mann-Kendall test. The NAO and Mediterranean Oscillation (MO) have clearly shown their moderate to strong influence on precipitation by focusing on the NAO as a potential cause of precipitation variability, using the EOF technique. Based on climate data (1984-2016), mainly precipitation and temperature data, and taking into account the limitations and advantages of each drought index, four indices were developed, including the Standardized Precipitation Index (SPI) based solely on precipitation, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), the Drought Recognition Index (DRI) and the self-calibrated Palmer Drought Severity Index (sc-PDSI) including potential evapotranspiration (PET), it has been confirmed that the SPI is the most suitable for detecting the duration and intensity of drought, particularly in sub-humid climate regions. However, the SPI underestimates drought changes by not taking the PET parameter into account. The four indices showed similar trends throughout the period studied, although the sc-PDSI tends to overestimate drought conditions due to its sensitivity to temperature and precipitation. Finally, using the SPI and SPEI indices to analyse seasonal trends showed significant trends, with an increase in temperature indicating increased warming in summer and a decrease in precipitation in winter. These trends are linked to the North Atlantic and Mediterranean oscillations, which are strongly influenced by cyclonic systems in the north-east Atlantic and which favour Mediterranean cyclogenesis.
Using remote sensing and meteorological indices to assess agricultural drought and vegetation health on the one hand and to investigate the relationship between cereal yield and drought on the other, it was shown that crop health since the beginning of the 21st century has declined and that cereal yields have shown a strong response to inter-annual drought variability. Temperature-based drought indices were more correlated and sensitive to cereal yields than precipitation-based indices, suggesting that yields are more sensitive to changes in temperature than humidity. To predict these yields, province-wide empirical models using multi-source data, including indices based on remote sensing and meteorological data, and machine learning algorithms such as multiple linear regression, artificial neural network and random forest, showed that combining data from different sources led to better results than models based on a single source. Indeed, the models exploiting the RF and ANN algorithms were able to predict cereal yields as early as the winter months, with satisfactory statistical measures ($0.7 < R^2 < 0.8$ and $0.3 < RMSE < 0.5$ t. ha^{-1}).

Keywords: Climate change; Drought indices; Climatic indices; Remote sensing indices; Cereal yields; Machine learning algorithms; Lower Sebou Basin; Morocco.

FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE

Nom et Prénom de l'auteur : Hakam Oualid

Intitulé du travail : Modélisation climatique et indices de suivi et d'évaluation de la sécheresse agrométéorologique : cas du bassin Bas Sebou, Nord-Ouest du Maroc.

Encadrant : Baali Abdennasser, Professeur d'Enseignement Supérieur, Laboratoire d'Ingénierie, Électrochimie, Modélisation et Environnement (LIEME), Département de Géologie, Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.

Lieux de réalisation des travaux (laboratoires, institution) : Laboratoire d'Ingénierie, Électrochimie, Modélisation et Environnement (LIEME), Département de Géologie, Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.

Période de réalisation du travail de thèse : Janvier 2018 - Mai 2023

Ce travail a donné lieu aux résultats suivants (publications et communications) :

Articles dans des revues internationales à comité de lecture

Hakam, O., Baali, A., Azennoud, K., Lyazidi, A., & Bourchachen, M. (2023). Assessments of Drought Effects on Plant Production Using Satellite Remote Sensing Technology, GIS and Observed Climate Data in Northwest Morocco, Case of the Lower Sebou Basin. International Journal of Plant Production, 1-16. DOI: https://doi.org/10.1007/s42106-023-00236-5

Hakam, O., Baali, A., & Belhaj Ali, A. (2022). Modeling drought-related yield losses using new geospatial technologies and machine learning approaches: case of the Gharb plain, North-West Morocco. Modeling Earth Systems and Environment, 9(1), 647-667. DOI: https://doi.org/10.1007/s40808-022-01523-2

Hakam, O., Baali, A., Azennoud, K., El Kamel, T., Brahim, Y. A., & Ahouach, Y. (2022). Spatiotemporal evolution of droughts and their teleconnections with large-scale climatic indices in the Lower Sebou Basin in northwestern Morocco. Acta Geographica Slovenica, 62(2). DOI: https://doi.org/10.3986/AGS.10508

Hakam, O., Baali, A., Ait Brahim, Y., El Kamel, T., & Azennoud, K. (2022). Regional and global teleconnections patterns governing rainfall in the Western Mediterranean: Case of the Lower Sebou Basin, North-West Morocco. Modeling Earth Systems and Environment, 8(4), 5107-5128. DOI: https://doi.org/10.1007/s40808-022-01425-3

Hakam, O., Baali, A., El Kamel, T., Ahouach, Y., Azennoud, K. (2022). Comparative evaluation of precipitation-temperature based drought indices (DIs): A case study of Moroccan Lower Sebou Basin. Kuwait Journal of Sciences 49-3. DOI: https://doi.org/10.48129/kjs.13911

Ahouach, Y., Baali, A., Boushaba, A., **Hakam, O.,** Azennoud, K., Lyazidi, A., Benmessaoud, S., Assouguem, A., Kara, M., Alsaigh, M.A., Al-Mohaimeed, A.M., Chen, T.-W. (2023). Impact of the Controlled Dump of Fez City (Morocco): Evaluation of Metallic Trace Elements Contamination in the Sediments. Water, 15, 1209. DOI: https://doi.org/10.3390/w15061209

Azennoud, K., Baali, A., El Asmi, H., Brahim, Y. A., **Hakam, O.,** Hayati, A., & El Kamel, T. (2022). Soft-sediment deformation structures recognised in a reverse-drag associated with normal faulting (Lake Ifrah, Northwest Africa): Palaeoseismic assessment and neotectonic implications. Sedimentary Geology, 441, 106264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2022.106264

Azennoud, K., Baali, A., Brahim, Y. A., Ahouach, Y., & **Hakam, O.** (2022). Climate controls on tufa deposition over the last 5000 years: A case study from Northwest Africa. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 586, 110767. DOI: https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110767

El Kamel, T., Baali, A., Couscous, A., **Hakam, O.,** Mesrar, H., & Babbou, C. A. (2020). Variation of soils erodibility according to physico-chemical and biogeographic parameters in Allal Al Fassi watershed, Middle Atlas, Morocco. Moroccan Journal of Chemistry, 8(4), 8-4. DOI: https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v8i4.21073

Communications dans des colloques nationaux et internationaux

Hakam O., Baali A. (2023). Regional and global teleconnections patterns governing rainfall in the Western Mediterranean: Case of the Lower Sebou Basin, North-West Morocco. 5ème édition du colloque international des utilisateurs SIG FES GIS USERS 2023, 10 et 11 mai 2023, Fès, Maroc.

Hakam O., Baali A. (2023). Évaluation des effets de la sécheresse sur la production végétale à l'aide de la télédétection et du SIG : cas du bassin Bas Sebou (Nord-Ouest du Maroc). 5ème édition du colloque international des utilisateurs SIG FES GIS USERS 2023, 10 et 11 mai 2023, Fès, Maroc.

Hakam O., Baali A., El Kamel T., Azennoud K. (2021). Contribution of remote sensing in assessing the extent of rainfall and temperature effect on agriculture: case of the lower Sebou basin, Morocco. 4th edition of the international congress on water and environment studies: The environment at the service of sustainable development, 15 - 17 décembre 2021.

Hakam O., Baali A., El Kamel T. (2021). Comparaison de la performance des indices de sécheresse pour l'analyse spatio-temporelle de la sécheresse météorologique dans le bassin Bas Sebou, Maroc. The Third Edition of the International Congress on Water and Environment Studies December 10-12, 2020, Al Hoceima – Morocco.

El Kamel T., Baali A., Couscous A., **Hakam O.** (2021). Etude de l'érosion hydrique des sols et ses facteurs causaux dans le bassin versant Allal Al Fassi (Moyen Atlas, Maroc). International Symposium on Sediment Management - Lille – France, I2SM 7th edition, 29 june – 3 july 2021.

El Kamel T., Baali A., Couscous A., **Hakam O.,** Azennoud K. (2021). Evaluation qualitative et quantitative de l'érosion hydrique dans le bassin versant du barrage M'Dez (Moyen Atlas, Maroc). 4th edition of the international congress on water and environment studies: The environment at the service of sustainable development, 15 – 1

TABLE DES MATIÈRES

FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX
LISTE DES ANNEXES
LISTE DES ACRONYMES
INTRODUCTION GÉNÉRALE 1
QUESTIONS DANS UN CONTEXTE SCIENTIFIQUE 5
APPROCHES 9
STRUCTURE DE LA THÈSE 12
CHAPITRE I 14
CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU MAROC 14
I. Changements des extrêmes climatiques 16
II. Effets sur les températures et les précipitations 16
III. Effets sur l'agriculture 19
IV. Effets sur les ressources en eau 20
V. Effets sur les infrastructures 22
VI. Effets sur la biodiversité 22
VII. Conclusion 24
CHAPITRE II 25
PRESENTATION DU BASSIN BAS SEBOU 26
I. Localisation et justification du choix de bassin Bas Sebou 27
II. Aspects socio-économiques 28
II . 1. Population 28
II . 2. Économie 29
III. Cadre naturel 29
III . 1. Géomorphologie 29
III . 1. a. Plaine centrale 29
III . 1. b. Littoral (SAHEL) 31
III . 1. c. Bordures continentales 34
i. Haut Gharb 34
ii. Pays Cherarda 35
iii. Rides prérifaines du pays Cherarda 35
III . 1. d. Maamora 38
III . 2. Cadre géologique 39
III . 2. a. Maamora et ses bordures 40
III . 2. b. Rides prérifaines 43
III . 2. c. Nappe prérifaine 43
III . 2. d. Bassin miocène du Gharb 45
III . 2. e. Golfe pliocène 46
III . 2. f. Quaternaire du bassin Bas Sebou 47
III . 3. Principaux types de sol 54
III . 4. Principales formations végétales 55
III . 5. Agriculture 60
III . 6. Aménagements agricoles dans le bassin Bas Sebou 61
IV. Aspect climatique 62

IV . 1. Types de temps 62
IV . 1. a. Type anticyclonique d'hiver 62
IV . 1. b. Types cycloniques du front polaire 64
IV . 1. c. Type occidental (flux d'Ouest) 64
IV . 1. d. Type septentrionale (flux de Nord) 64
IV . 1. e. Types de temps d'été 66
IV . 1. f. Types cycloniques d'été 69
IV . 2. Éléments du climat 72
IV . 2. a. Précipitations 72
IV . 2. b. Températures 75
IV . 2. c. Insolation et brouillard 77
IV . 2. d. Vent 78
V. Régimes hydrologiques 79
V . 1. Oued Ouergha en amont du basin Bas Sebou 80
V . 2. Oued Sebou en amont du bassin Bas Sebou 82
V . 3. Oueds secondaires 83
V . 4. Oued Sebou dans le bassin Bas Sebou 84
VI. Hydrogéologie 86
VI . 1. Nappe de Maamora 87
VI . 2. Nappe du Gharb 88
VI . 3. Nappe de Dradère-Souiere 90
VII. Banque des données 92
VII . 1. Données météorologiques 92
VII . 1. a. Séries mensuelles de référence (données observées) 92
VII . 2. Données de réanalyses 93
VII . 3. Vérification et contrôle des données météorologiques 95
VII . 4. Analyse critique des données météorologiques 96
VII . 4. a. Critique des données observées 97
VII . 4. b. Critique des données de réanalyses (ERA5- Land) 100
VII . 5. Données liées aux interactions Océan-atmosphère à grande échelle (données de réanalyse) 102
VII . 6. Données agronomiques 104
VII . 7. Données satellitaires 104
VII . 7. a. Capteurs à haute résolution spatiale 105
VII . 7. b. Capteurs à moyenne résolution spatiale 106
VIII. Conclusion 108
CHAPITRE III 109
VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS DANS LE BASSIN BAS SEBOU 109
I. Introduction 112
II. Méthodologie 113
II . 1. Sources et traitement des données 113
II . 1. a. Données pluviométriques 113
II . 1. b. Indices climatiques 114
II . 1. c. Variables de la circulation atmosphérique et océanique (données de la réanalyse) 116
II . 2. Analyses statistiques 117
II . 2. a. Détection de tendances (test de Mann-Kendall) 117
II . 2. b. Pente de Theil Sen (TS) 118

II . 2. c. Test de Mann-Kendall partiel (MK-P) pour évaluer l'influence des indices climatiques sur les tendances pluviométriques…… 119
II . 2. d. Détection des modèles de téléconnexions qui prédominent dans le bassin Bas Sebou (fonctions orthogonales empiriques et analyse en composantes principales)…… 119
III. Résultats et discussions 121
III . 1. Tendances spatiales et temporelles des précipitations 121
III . 2. Influence des indices climatiques sur les tendances des précipitations 121
III . 3. Influence des indices climatiques sur la variabilité des précipitations 123
III . 4. Liens entre les indices climatiques et la variabilité des précipitations en mars 123
III . 4. a. Modes de précipitations du mois de mars……...123
III . 4. b. Corrélation entre les indices climatiques et les précipitations du mois de mars…….123
III . 4. c. Principaux modes des schémas de téléconnexion pour le mois de mars : Analyse par FOE…. 124
III . 4. d. Relation entre les anomalies de la circulation océanique et la variabilité des précipitations pour le mois de mars……... 127
III . 4. e. Relation entre les anomalies de la circulation atmosphérique et la variabilité des précipitations du mois de mars…….. 127
III . 4. f. Relation temporelle entre PC1-Mars et les indices climatiques pour le mois de mars……... 130
III . 4. g. Synthèse des résultats des analyses pour le mois de mars……..…131
III . 5. Liens entre les indices climatiques et la variabilité des précipitations en décembre 132
III . 5. a. Modes de précipitations du mois de décembre……... 132
III . 5. b. Corrélation entre les indices climatiques et les précipitations……132
III . 5. c. Principaux Modes des schémas de téléconnexion pour le mois de décembre : Analyse par FOE……132
III . 5. d. Relation entre les anomalies de la circulation océanique et la variabilité des précipitations pour le mois de décembre…… 134
III . 5. e. Relation entre les anomalies de la circulation atmosphérique et la variabilité des précipitations pour le mois de décembre……... 134
III . 5. f. Relation temporelle de la PC1 avec les indices climatiques pour le mois de décembre……136
III . 5. g. Synthèse des résultats des analyses pour le mois de décembre…….. 138
IV. Discussion..... 139
V. Conclusion 141
CHAPITRE IV 144
ÉVALUATION COMPARATIVE DES INDICES DE SÉCHERESSE 144
I. Introduction 146
II. Matériels et méthodologie 147
II . 1. Données et prétraitement 147
II . 2. Sélection des indices de sécheresse (DIs) 148
II . 3. Calcul des indices de sécheresse (DIs) 149
II . 4. Évaluation des indices de sécheresse (DIs – *Drought Indices*) 152
III. Résultats et discussion 153
III . 1. Distribution spatio-temporelle des épisodes de sécheresse 153
III . 1. a. Distribution spatio-temporelle de SPI……153
III . 1. b. Distribution spatio-temporelle de SPEI…….. 154
III . 1. c. Distribution spatio-temporelle de RDI……155
III . 1. d. Distribution spatio-temporelle de l'indice sc-PDSI…… 156
III . 2. Corrélation entre les différents indices de sécheresse (DSs) 157
III . 3. Évaluation des caractéristiques de la sécheresse météorologique 158

III . 4. Performance des indices de sécheresse (DIs) par rapport aux sécheresses historiques 160
III . 5. Réponses temporelles des indices de sécheresse (DIs) aux rendements des cultures 164
IV. Conclusion 167
CHAPITRE V 170
ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE
I. Introduction 172
II. Données utilisées et méthodologie 174
II . 1. Données utilisées 174
II . 2. Indices de sécheresse (DIs) 174
II . 3. Identification et caractérisation des événements de sécheresse 175
II . 4. Analyse des tendances (test de Mann-Kendall) 175
II . 5. Sécheresses et anomalies climatiques à grande échelle 176
III. Résultats 177
III . 1. Évolution temporelle de l'indice SPI et de l'indice SPEI 177
III . 2. Variations mensuelles de l'indice SPI et de l'indice SPEI 179
III . 3. Variabilité temporelle 181
III . 4. Variabilité spatiale et interannuelle 182
III . 5. Cohérence entre les indices de sécheresse (DIs) et les indices climatiques à grande échelle 184
IV. Discussion 186
V. Conclusion 187
CHAPITRE VI 189
ÉVALUATION DE LA SÉCHERESSE AGRICOLE 189
I. Introduction 192
II. Matériel et méthodologie 194
II . 1. Matériel 194
II . 2. Méthodologie 194
II . 2. a. Identification des terres agricoles 194
II . 2. b. Indices de sécheresse (DIs – *Drought Indices*) 195
II . 2. c. Changement décennal moyen de VHI 199
II . 2. d. Modélisation de la cohérence de VHI à l'aide de l'approche fréquentielle 200
II . 2. e. Performance des indices de sécheresse (DIs) 200
III. Résultats et discussions 200
III . 1. Cartographie de VCI et de TCI 200
III . 2. Cartographie de la VHI 202
III . 3. Variation décennale moyenne du VHI 204
III . 4. Cohérence du VHI 206
III . 5. Sécheresse et rendement des cultures céréalières 207
III . 6. Performance des indices de sécheresse (DIs) 209
IV. Discussion 210
V. Conclusion 212
CHAPITRE VII 214
PRÉVISION SAISONNIÈRE DES RENDEMENTS DES CÉRÉALES 214
I. Introduction 216
II. Données 217
II . 1. Données sur les rendements 217
II . 2. Télédétection et indices de sécheresse multiscalaires 218
III. Méthodologie 219

III . 1. Anomalies de rendement céréalier 219
III . 2. Corrélation entre indices de sécheresse et rendements des céréales pluviales 219
III . 3. Sélection de prédicteurs significatifs 220
III . 4. Modèles 220
III . 5. Mesures d'évaluation 221
IV. Résultats 222
IV . 1. Céréales et indices de sécheresse pendant les années à faible rendement 222
IV . 2. Relation entre le rendement céréalier (SYRS) et les indices de sécheresse 226
IV . 3. Sélection de prédicteurs statistiques significatifs 230
IV . 4. Modèles MLR, RF et ANN 231
V. Discussion 238
VI. Conclusion 241
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 242
BIBLIOGRAPHIE 246
ANNEXES 268

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Tendances moyennes observées en (gauche) température moyenne (°C par décennie) et (droite) précipitations moyennes en (mm par décennie) pour la période 1980–2015. Les régions sans hachures indiquent des tendances statistiquement significatives au cours de cette période et les régions en gris indiquent des données insuffisantes. (Source : Gutiérrez, et al., 2021) 17
Figure 2 : Tendances des anomalies des températures au Maroc pour la période 1787 – 2020. (Source : Berkeley Earth's Global Temperature Report, 2022) 17
Figure 3: Évolution des températures moyennes saisonnières au Maroc. (Source : CS3 climate data store, 2022) ... 18
Figure 4 : Tendances des précipitations totales(mm/décennie) entre 1970 et 2012. Les triangles vers le haut (le bas) représentent une augmentation (diminution). Les triangles noirs correspondent aux tendances significatives. (D'après Filahi, et al., 2016) 19
Figure 5: Répartition des ressources en eau de surface mobilisable. (Source : ABHS, 2022) 21
Figure 6: Localisation géographique du bassin Bas Sebou. 27
Figure 7: Carte des zones inondables inondations de la plaine centrale du bassin Bas Sebou, 10 mars 2010. (Source : CRTS, 2010) 31
Figure 8: Disposition schématique des complexes dunaires du bassin Bas Sebou. (D'après Inesco, 1957) 33
Figure 9: Coupe géologique à travers le Haut Gharb central et Had Kourt. (Source : Le Coz, 1964 d'après les documents de SCP) 34
Figure 10: Coupes géologique à travers le pays Cherarda. (Source : Le Coz, 1964 d'après les documents de SCP) . 35
Figure 11: Coupe géologique à travers le plateau d'El Gaada. (D'après Le Coz., 1964) 37
Figure 12: Carte de situation de la région Glacis du Zrar. 38
Figure 13 : Situation géographique de la région de Maamora. 39
Figure 14: Coupe géologique à travers la Maamora et le bassin du Gharb. (D'après Flinch, 1993) 41
Figure 15: Log stratigraphique de la région de Maamora. (D'après Wernli, 1988 et Flinch, 1993) 41
Figure 16 : Formations géologiques du bassin Bas Sebou. (Source : la carte géologique du Maroc (1951) 42
Figure 17: Stratigraphie synthétique de la nappe prérifaine basée sur la description de Tilloy, 1955 et Fienberg, 1986. 45
Figure 18: Tracés du littoral marin à partir du Miocène au niveau de Gharb. (D'après Gigout, 1956) 46
Figure 19: Stratigraphie au niveau des collines de Lalla Zahra. (D'après Wernli, 1988 et Morel, 1988) 47
Figure 20: Terrasses du Beht. (D'après Le Coz, 1964) 49
Figure 21: Disposition des terrasses le long du Beht à son entré dans le Gharb. (D'après Le Coz, 1964) 50
Figure 22: Carte pédologique du bassin Bas Sebou. (Source : INRA, 2022) 54
Figure 23 : Principales formations végétales observées dans la bordure côtière du bassin Bas Sebou. 56
Figure 24 : Principales formations végétales observées dans les bordures septentrionale et méridionale du bassin Bas Sebou 57
Figure 25: Principales formations végétales observées dans la plaine centrale et les Merjas du bassin Bas Sebou. .. 58
Figure 26 : Principales formations végétales observées dans la plaine centrale du bassin Bas Sebou. 59
Figure 27 : Couverture forestière dans le bassin Bas Sebou. 59
Figure 28 : Carte d'occupation des sols et les principaux types de culture dans le bassin Bas Sebou ; élaborée à partir des images Spot 6 et 7. (Source : CRTS & ORMVAG, 2022) 61
Figure 29: Zones aménagées du périmètre irrigué du bassin Bas Sebou. (Source : ORMVAG, 2021) 62
Figure 30 : (A). Régime anticyclonique d'hiver capté le 30/décembre/2020. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Vue aérienne durant le régime anticyclonique d'hiver captée le même jour à 09h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (OEESM) EUMETSAT, 2022). 63
Figure 31 : (A). Régime cyclonique d'hiver (type occidental) capté le 25/novembre/2020. (Source : Wtterzentrale, 2022) ; **(B).** Hauteur du géopotentiel à 500 mb durant le régime cyclonique d'hiver de type occidental du même jour. (Source : Wetterzentrale, 2022). 65
Figure 32 : (A). Régime cyclonique d'hiver à flux de Nord capté le 30/janvier/2020. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Hauteur du géopotentiel à 500 mb durant le régime cyclonique d'hiver à flux de Nord du même jour. (Source : Wetterzentrale, 2022). 65

Figure 33 : Type de temps chaud anticyclonique capté le 24/juillet/2020. (Source : Wetterzentrale, 2022) 67
Figure 34 : (A). Régime de Nord-Est capté le 06/juin/2022. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Vue aérienne durant le régime de Nord-Est captée le même jour à 10h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques EUMETSAT (OEESM), 2022)..... 68
Figure 35 : Régime d'Est (Chergui) capté le 09/juillet/2022. (Source : Wetterzentrale, 2022) 69
Figure 36 : (A). Régime orageux du front des Alizés capté le 05/juin/2022. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Vue aérienne durant le régime orageux du front des Alizés captée le même jour à 08h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques EUMETSAT (OEESM), 2022 modifiée). 70
Figure 37 : (A). Régime légèrement perturbé à flux polaire de Nord et Nord-Ouest capté le 03/juin/2021. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Vue aérienne durant le régime perturbé à flux polaire de Nord et Nord-Ouest captée le 03/juin/2021 à 11h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques EUMETSAT (OEESM), 2022) ; **(C).** Régime à faible cyclogenèse au voisinage du Maroc capté le 07/juillet/2021. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(D).** Vue aérienne durant le régime à faible cyclogenèse au voisinage du Maroc captée le 07/juillet/2021 à 09h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques EUMETSAT (OEESM), 2022). 71
Figure 38: Moyennes des précipitations mensuelles à Kénitra et à Sidi Slimane pour la période 1933-2017. (Source : ORMVAG) 72
Figure 39: Pics des précipitations enregistrées dans la station de Kénitra depuis l'année 1936. (Source : ORMVAG) 73
Figure 40: Extrêmes pluviométriques annuelles à Kénitra. (Source : ORMVAG) 74
Figure 41: Carte pluviométrique dans le bassin versant de Sebou. (Source : ABHS, 2020)..... 75
Figure 42: (A). Températures moyennes annuelles du Maroc occidental ; **(B).** Températures moyennes minimales du mois le plus froid de l'année (Janvier). 76
Figure 43: Moyennes mensuelles des températures maxima et minima à Kénitra, Souk Larbaa et Sidi Slimane. (Source : ORMVAG) 77
Figure 44: Moyennes des durées totales de la présence du soleil au-dessus de l'horizon. (Source : ORMVAG)..... 78
Figure 45: Moyennes de nombre de jours de brouillard à Kénitra. (Source : ORMVAG) 78
Figure 46: Rose des vents à la station de Kénitra. (Source : ORMVAG) 79
Figure 47 : Réseau hydrographique du bassin versant de Sebou. 80
Figure 48 : Réseau hydrographique du Haut-Ouergha. 82
Figure 49: Débits mensuels moyens (m^3/s) de l'Ouergha à Khenichet, du Sebou à Azib Soltan et du Sebou à Mechra Belksiri pour la période 1984-2016. (Source : ABHS) 83
Figure 50: Principaux influents de l'Oued Sebou. 85
Figure 51: Répartition des apports annuels en eau de l'Oued Sebou par sous-bassins versants (1939/1940 à 2006/2007). (Source : ABHS)..... 85
Figure 52 : Principales nappes phréatiques du bassin versant de Sebou. (Source : ABHS)..... 87
Figure 53 : Carte piézométrique de la nappe de la Maamora. (Source : PDAIRE, 2007)..... 88
Figure 54: Carte piézométrique de la nappe du Gharb. (Source : PDAIRE, 2007)..... 90
Figure 55 : Carte piézométrique de la nappe du Dradère-Souiere. (Source : PDAIRE, 2007) 91
Figure 56: Situation des stations météorologiques retenues. 93
Figure 57: Grille de résolution spatiale des données de réanalyses ERA5-Land utilisées. 94
Figure 58 : Carte de répartition spatiale de continentalité selon la classification de Daget, 1977. 96
Figure 59: Historique des 7 stations météorologiques dans le bassin Bas Sebou entre 1916 et 2017 (durée et taux de remplissage (%) des bases de données). 97
Figure 60: Méthode « Double cumul » pour les stations à tester. 99
Figure 61: Pixels sélectionnés de la base de données ERA5-Land selon la localisation géographique des stations existants dans le bassin Bas Sebou. 101
Figure 62: État de la température de la surface de la mer moyenne (SST) pour le mois de décembre 2017. (Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html* ; **Annexe 15**) 103
Figure 63: État de la pression au niveau de la surface de la mer moyenne (SLP) pour le mois de janvier 2017. (Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html* ; **Annexe 16**) 103

Figure 64: État de la hauteur du géopotentiel à 500 hPa moyenne (GPH-500) pour le mois de janvier 2017. La variation dans la carte est l'altitude en décamètre (dm) à laquelle on atteint 500 hPa par rapport au niveau moyen des mers. (Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html* ; **Annexe 16**)..... 103
Figure 65: Spectre du rayonnement. 104
Figure 66: État de température à la surface du sol pour la première semaine de janvier 2020 obtenue par le capteur NOAA-AVHRR. 107
Figure 67: État de NDVI utilisé pour la première semaine de janvier 2020 obtenue par le capteur NOAA-AVHRR. (Source : https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/data/Blended_VH_4km/geo_TIFF/ ; **Annexe 14**)107
Figure 68 : Situation géographique et stations météorologiques sélectionnées dans bassin Bas Sebou. 114
Figure 69 : Principales téléconnexions climatiques dominantes dans le bassin Bas Sebou. 116
Figure 70 : Spectre des valeurs propres (%) de la matrice de covariance pour les mois de mars et décembre (SST, SLP et GPH-500). La barre verticale montre les estimations d'incertitude basées sur la règle empirique de North et al. (1982). Les 20 premières valeurs propres sur 70 sont affichées..... 125
Figure 71 : FOEs de la SST normalisée pour le mois de mars durant la période 1948-2017..... 125
Figure 72 : FOEs du SLP standardisé pour le mois de mars durant la période 1948-2017. 126
Figure 73 : FOEs normalisées du GPH-500 pour le mois de mars durant la période 1948-2017. 127
Figure 74 : Corrélation entre le PC1-Mars des précipitations dans le bassin Bas Sebou et la SST normalisée (a), le SLP (b) et le GPH-500 (c) pour le mois de mars (1948-2017). Les points de grille significatifs au niveau de confiance de 95 % sont marqués d'une croix (+). 129
Figure 75 : Coefficient de corrélation temporelle entre les PCs les plus significatifs (PC1-Mars) et les indices climatiques. Le mois de mars est considéré comme le mois pivot, la valeur "0" étant représentée par une ligne verticale, tandis que les valeurs négatives/positives le long de l'axe des x (mois) indiquent les mois précédents/suivants à partir du mois de mars. Les limites supérieure et inférieure représentent le niveau de signification à 95 %. 131
Figure 76: FOEs de la SST normalisée pour le mois de décembre durant la période 1948-2017. 133
Figure 77 : FOEs du SLP standardisé pour le mois de décembre durant la période 1948-2017. 133
Figure 78 : FOEs normalisées du GPH-500 pour le mois de mars durant la période 1948-2017. 134
Figure 79 : Corrélation entre le PC1-Décembre des précipitations dans le bassin Bas Sebou et la SST normalisée (a), le SLP (b) et le GPH-500 (c) pour le mois de mars (1948-2017). Les points de grille significatifs au niveau de confiance de 95 % sont marqués d'une croix (+). 137
Figure 80 : Coefficient de corrélation temporelle entre les PCs les plus significatifs (PC1-Décembre) et les indices climatiques. Le mois de décembre est considéré comme le mois pivot, la valeur "0" étant représentée par une ligne verticale, tandis que les valeurs négatives/positives le long de l'axe des x (mois) indiquent les mois précédents/suivants à partir du mois de décembre. Les limites supérieure et inférieure représentent le niveau de signification à 95 %... 138
Figure 81 : Localisation géographique du bassin du Bas Sebou et répartition spatiale des stations hydrométéorologiques d'observation. 148
Figure 82 : Distribution spatio-temporelle de SPI-12 dans le bassin Bas Sebou et matrice de corrélation de SPI-12 entre les différentes stations : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara. 154
Figure 83 : Distribution spatio-temporelle de SPEI-12 dans le bassin Bas Sebou et matrice de corrélation de SPEI-12 entre les différentes stations : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara. 155
Figure 84 : Distribution spatio-temporelle de RDI-12 dans le bassin Bas Sebou et matrice de corrélation de SPI-12 entre les différentes stations : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara. 156
Figure 85: Distribution spatio-temporelle de sc-PDSI dans le bassin Bas Sebou et matrice de corrélation de SPI-12 entre les différentes stations : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara. 157
Figure 86 : Matrice de corrélation de Pearson des indices de sécheresse pour toutes les stations du bassin Bas Sebou. 158
Figure 87: Distribution spatiale du nombre de mois secs des stations du bassin Bas Sebou : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara, pour la période 1984-2016. 159
Figure 88 : Histogrammes de fréquence relative des classes de sécheresse dans le bassin Bas Sebou durant la période 1984-2016 ; « Extrêmes sec (E.S) », « Sévèrement sec (S.S) », « Modérément sec (M.S) », « Légèrement Sec (L.S) » et « Sec (S) ». 160
Figure 89 : Variation annuelle de l'indice SDI au cours de la période 1984-2016. 162

Figure 90 : évolution des indices de sécheresse et les précipitations mensuelles au cours de la période 1991-1995, et les précipitations moyennes pour la période 1984-2016 dans le bassin Bas Sebou. 163
Figure 91: Relation entre les indices de sécheresse et le rendement des céréales pluviales pendant la campagne de l'orge (d'octobre de l'année précédente à juin de l'année en cours). Les limites supérieures et inférieures de la boîte indiquent les quartiles supérieurs et inférieurs, respectivement. La ligne dans la boîte indique la médiane, les lignes à l'extérieur de la boîte indiquent les limites supérieures et inférieures, et les cercles indiquent les valeurs aberrantes dans l'ensemble des données. 165
Figure 92 : Relation entre les indices de sécheresse et le rendement des céréales pluviales pendant la campagne du blé dur (d'octobre de l'année précédente à juin de l'année en cours). Les limites supérieures et inférieures de la boîte indiquent les quartiles supérieurs et inférieurs, respectivement. La ligne dans la boîte indique la médiane, les lignes à l'extérieur de la boîte indiquent les limites supérieures et inférieures, et les cercles indiquent les valeurs aberrantes dans l'ensemble des données. 166
Figure 93 : Relation entre les indices de sécheresse et le rendement des céréales pluviales pendant la campagne du blé tendre (d'octobre de l'année précédente à juin de l'année en cours). Les limites supérieures et inférieures de la boîte indiquent les quartiles supérieurs et inférieurs, respectivement. La ligne dans la boîte indique la médiane, les lignes à l'extérieur de la boîte indiquent les limites supérieures et inférieures, et les cercles indiquent les valeurs aberrantes dans l'ensemble des données. 167
Figure 94 : Caractéristiques de la sécheresse selon la théorie de "Run". 175
Figure 95 : Évolution temporelle de l'indice SPI et de l'indice SPEI aux échelles de 1, 3, 6 et 12 mois au cours de la période 1984-2016. 178
Figure 96 : Différence (D) entre les indices SPI et SPEI dans les différentes échelles de temps (1, 3, 6 et 12 mois) au cours de la période 1984-2016. 179
Figure 97 : Variations mensuelles des indices SPI et SPEI aux échelles temporelles de 1, 3, 6 et 12 mois pendant la période 1984-2016 dans le bassin Bas Sebou, Les indications de la légende des couleurs sont obtenues dans **le tableau 41**. 180
Figure 98 : Variations saisonnières et annuelles du test de tendance MK et changements abrupts de SPEI (à gauche) et SPI (à droite) dans le bassin Bas Sebou au cours de la période 1984-2016. 182
Figure 99 : Distribution des tendances de la durée de la sécheresse (a) et de la sévérité de la sécheresse (b) pour SPEI (gauche) et SPI (droite). Tendance positive significative ($Z > 1,96$), tendance non significative ($-1,95 < Z > 1,96$) et tendance négative significative ($Z < -1,95$). 183
Figure 100 : Spectre de cohérence des ondelettes entre les indices climatiques à grande échelle (ONA) et les séries SPEI (a) et SPI (b). Les couleurs allant du bleu au rouge indiquent une cohérence croissante. Le niveau de signification de 95 % par rapport au bruit rouge est représenté par un contour blanc. 185
Figure 101 : Spectre de cohérence des ondelettes entre les indices climatiques à grande échelle (OM) et les séries SPEI (a) et SPI (b). Les couleurs allant du bleu au rouge indiquent une cohérence croissante. Le niveau de signification de 95 % par rapport au bruit rouge est représenté par un contour blanc. 185
Figure 102 : Indice annuel de l'état de la végétation (VCI) et indice de l'état de la température (TCI) (1984-2016). 202
Figure 103 : Indice de santé de la végétation (VHI) pour chaque année (1984-2016). 203
Figure 104 : Zone de l'état sanitaire des cultures sur la base de l'indice VHI pour la période 1684 à 2016. 204
Figure 105 : Pourcentage de la superficie agricole touchée par des sécheresses dues à l'indice VHI au cours de la période 1984-2016. 204
Figure 106 : Changement décennal de l'indice de santé de la végétation (VHI). 205
Figure 107 : Cohérence de VHI au cours de différentes périodes. 207
Figure 108 : Variations temporelles de rendement standardisé (SYRS) et de SPI à différentes échelles de temps (1, 3, 6 et 12 mois) durant la période 1984-2016. 208
Figure 109: Variations temporelles de rendement standardisé (SYRS) et de SPEI à différentes échelles de temps (1, 3, 6 et 12 mois) au cours de la période 1984-2016. 209
Figure 110 : Variations temporelles du rendement standardisé (SYRS) et des indices de télédétection (VCI, TCI et VHI) au cours de la période 1984-2016. 209
Figure 111 : Matrice de corrélation de Pearson entre les différentes ISs et le SYRS. 210
Figure 112 : Localisation géographique des provinces sélectionnées. 222

Figure 113 : Évolution temporelle du SYRS pour le blé tendre, le blé dur et l'orge au niveau des provinces Kenitra (Kt) et Sidi Kacem (SK) pendant les années agricoles 2000-2020. 224
Figure 114 : Valeurs mensuelles des moyennes spatiales de SPI et SPEI à des échelles temporelles de 1 à 12 mois au niveau de la province de Sidi Kacem (a) et de Kénitra (b) pendant la période de 2000 à 2020. Les barres rouges en pointillés indiquent les années à faible rendement (entre janvier et juin). 225
Figure 115 : Valeurs hebdomadaires des moyennes spatiales de VCI, de TCI, de VHI et de SMCI entre la semaine 42 (octobre de l'année n-1) et la semaine 25 (fin juin de l'année n), pendant les années de faible rendement dans les provinces de Sidi Kacem (SK) et de Kénitra (Kt). Les valeurs inférieures à 40 indiquent des conditions de sécheresse pour VCI, TCI et VHI. 226
Figure 116 : Corrélations entre les valeurs hebdomadaires de VCI, TCI, VHI et SMCI et le rendement du blé dur et du blé tendre (ligne noire complète et grise), et le rendement de l'orge (ligne complète) dans la province de SK (à gauche) et de Kt (à droite) de 2000 à 2020. Les corrélations significatives au niveau de confiance de 95 % sont marquées par un cercle. 228
Figure 117 : Corrélations entre les indices de sécheresse multiscalaires moyens et le rendement du blé tendre, du blé dur (ligne noire et grise complète) et de l'orge (ligne complète) dans la province de Kénitra (Kt), entre octobre et juin de la période 2000-2020. Les résultats sont présentés pour des périodes de 1, 3, 6, 9 et 12 mois. Les corrélations significatives à un niveau de confiance de 95 % sont marquées par un cercle. 229
Figure 118 : Corrélations entre les indices de sécheresse multi-scalaires moyens et le rendement du blé tendre, le rendement du blé dur (ligne complète noire et grise) et le rendement de l'orge (ligne entière) dans la province de Kenitra (Kt), entre octobre et juin 2000-2020. Les résultats sont présentés pour des échelles de temps de 1, 3, 6, 9 et 12 mois. Les corrélations significatives à un niveau de confiance de 95 % sont indiquées par un cercle. 230
Figure 119 : Séries chronologiques d'observations des rendements du blé dur, du blé tendre et d'orge (ligne noire pleine) et estimations statistiques respectives par les méthodes MLR, RF et ANN à l'aide des modèles présentant les relations les plus fortes (B1b, DW1d, SW1a , B2c, DW2a et SW2a) pour la province de Kt de 2000 à 2020. 236
Figure 120 : Séries chronologiques d'observations des rendements du blé dur, du blé tendre et d'orge (ligne noire pleine) et estimations statistiques respectives par les algorithmes MLR, RF et ANN à l'aide des modèles présentant les relations les plus fortes (B1b, DW1d, SW1a, B2c, DW2a et SW2a) pour la province de SK de 2000 à 2020. 237
Figure 121 : Résultats de l'éventualité d'une perte de récolte (anomalie de rendement standardisée <-1,5) en termes de biais de fréquence (FB), de taux de réussite (SR), de taux de succès (HR) et de taux de fausse alarme (FAR) sur la base des algorithmes MLR, RF et ANN des modèles B1b, DW1d, SW1a, B2c, DW2a et SW2a. 238

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Stratigraphie de la nappe prérifaine. (D'après Tilloy, 1955 et Feinberg, 1986)..... 44
Tableau 2: Tableau synthétique du Quaternaire du Gharb et ses corrélations. (D'parés Choubert, 1959) 53
Tableau 3: Moyennes mensuelles et annuelles du nombre de jours de précipitations. (Source : ORMVAG)..... 73
Tableau 4 : Pluviométrie moyenne mensuelle à la station de Jbel Outka pour la période 1980-2017. (Source : ABHS) 80
Tableau 5 : Débit moyens mensuels en m^3/s pour la période 1980-2017. (Source : ABHS)..... 81
Tableau 6 : Débits moyens mensuels (m^3/s) observés à la station de Khenichet durant l'année hydrologique 2009-2010. (Source : ABHS, 2010)..... 81
Tableau 7 : Bilan de la nappe de la Maamora. (Source : PDAIRE, 2007)..... 88
Tableau 8 : Bilan de la nappe du Ghab. (Source : PDAIRE, 2007)..... 89
Tableau 9 : Bilan de la nappe du Dradère-Souiere. (Source : PDAIRE, 2007) 91
Tableau 10: Caractéristiques principales de ERA5-Land. 94
Tableau 11: Listes des stations homogénéisées. 99
Tableau 12: Test d'homogénéité de Pettitt à un intervalle de confiance de 95 %..... 100
Tableau 13: Différences entre les indicateurs statistiques (BIAS et RMSE) des données de réanalyse (ERA5 land) et d'observation..... 102
Tableau 14: Caractéristiques des capteurs Landsat. (Source : http://landsat.gsfc.nasa.gov/) 105
Tableau 15: Bandes spectrales des capteurs Landsat 4-5 TM. (Source : http://landsat.gsfc.nasa.gov/) 105
Tableau 16: Bandes spectrales du capteur Landsat 7 ETM. (Source : http://landsat.gsfc.nasa.gov/) 106
Tableau 17: Bandes spectrales du capteur Landsat 8 OLI. (Source : http://landsat.gsfc.nasa.gov/)..... 106
Tableau 18: Bandes spectrales du capteur NOAA-AVHRR..... 107
Tableau 19: Précipitations moyennes dans le bassin Bas Sebou 116
Tableau 20 : Description des indices climatiques. 116
Tableau 21 : Tendance mensuelle à la hausse (à la baisse) des précipitations des stations du bassin Bas Sebou..... 121
Tableau 22 : Classification du type d'influence. 122
Tableau 23 : Influence de l'iONA sur les tendances pluviométriques dans le bassin Bas Sebou. 122
Tableau 24 : Influence de l'iOA sur les tendances pluviométriques dans le bassin Bas Sebou. 122
Tableau 25 : Influence de l'iOM sur les tendances pluviométriques dans le bassin Bas Sebou. 122
Tableau 26 : Influence des indices climatiques sur l'évolution des précipitations des mois de mars et décembre. .. 122
Tableau 27 : Principaux modes de précipitations (PCs) dans le bassin Bas Sebou pour le mois de mars. 123
Tableau 28 : Corrélation entre PC1-mars et les indices climatiques..... 124
Tableau 29 : Corrélation entre les PC de GPH-500 (C1 et C2) et les précipitations dans le bassin Bas Sebou (PC1-Mars). 130
Tableau 30 : Corrélation entre le PC du GPH-500 (C1) et les indices climatiques. 130
Tableau 31 : Résultats de l'analyse des précipitations et des indices climatiques dans le bassin Bas Sebou pour le mois de mars. 131
Tableau 32 : Principaux modes de précipitations (PCs) dans le bassin Bas Sebou pour le mois de décembre..... 132
Tableau 33 : Corrélation entre PC1-Décembre et les indices climatiques. 132
Tableau 34 : Corrélation entre les PC de GPH-500 (C1 et C2) et les précipitations dans le bassin Bas Sebou (PC1-Décembre)..... 136
Tableau 35 : Corrélation entre le PC du GPH-500 (C2) et les indices climatiques. 136
Tableau 36 : Résultats de l'analyse des précipitations et des indices climatiques dans le bassin Bas Sebou pour le mois de décembre. 139
Tableau 37 : Caractéristiques des stations synoptiques dans le bassin Bas Sebou et précipitations moyennes annuelles moyennes, évapotranspiration potentielle (ETP) durant la période (1984-2016)..... 148
Tableau 38 : Les variables d'ajustement et la distribution de probabilité sélectionnées des indices de sécheresses. 150
Tableau 39 : Catégorisation du degré de sécheresse / d'humidité en fonction des indices de sécheresse. 152
Tableau 40 : Caractéristiques des indices de sécheresse utilisés. 174

Tableau 41 : Classification des indices SPI et de l'indice SPEI. L'échelle des couleurs indique les classes de sécheresse dans **la figure 93**. 174
Tableau 42 : Constantes empiriques pour la série de capteurs Landsat. 196
Tableau 43 : Longueur d'onde centrale des bandes Landsat. 197
Tableau 44 : Catégories de santé de la végétation, de sécheresse, d'humidité et de pertes de rendement en fonction des indices de sécheresse (DIs) utilisés. 200
Tableau 45 : Superficies sous changement décennal de VHI (km^2). 205
Tableau 46 : Superficie sous différentes classes de cohérence de différentes périodes (km^2). 206
Tableau 47 : Données satellitaires utilisées. 219
Tableau 48 : Prédicteurs sélectionnés et statistiquement significatifs des rendements du blé (dur et tendre) et de l'orge par analyse de régression progressive au niveau de confiance de 95 % (les colonnes de l'indice de télédétection correspondent aux semaines respectives sélectionnées pour prédire le rendement des céréales, et l'IPS et l'IPS correspondent aux mois et aux échelles de temps sélectionnés par chaque modèle). 234
Tableau 49 : Résumé des statistiques d'évaluation des performances des modèles d'apprentissage automatique (MLR, RF et ANN) (les modèles les plus performants sont signalés par un *). 235

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Sidi Slimane 273
Annexe 2 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Kénitra 275
Annexe 3 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Souk Larbaa 277
Annexe 4 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Lalla Mimouna 279
Annexe 5 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Mechra Bel Ksiri 280
Annexe 6 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Zirara 281
Annexe 7 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Mnasra 281
Annexe 8 : Températures maxima et minima moyennes à la station Lalla Mimouna 282
Annexe 9 : Températures maxima et minima moyennes à la station Mechra Bel Ksiri 284
Annexe 10 : Températures maxima et minima moyennes à la station Zirara 286
Annexe 11 : Températures maxima et minima moyennes à la station Mnasra 287
Annexe 12 : Série chronologique des rendements céréaliers. 289
Annexe 13 : Série chronologique des rendements cerclières dans chaque province du bassin Bas Sebou. 290
Annexe 14 : Interface du site web de la base de données VH. (Source : https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/data/Blended_VH_4km/geo_TIFF/) 292
Annexe 15 : Interface du site web de la base de données SST. (Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html)* 292
Annexe 16 : Interface du site web de la base de données SLP et GPH-500. (Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html)* 293

LISTE DES ACRONYMES

ABHS	Agence du Bassin Hydraulique Sebou
AEP	Alimentation en Eau Potable
AEPI	Alimentation en Eau Potable et Industrielle
AGR	Agence de Gestion des Risques
ANN	*Artificial Neural Network* Réseau neuronal artificiel
AVHRR	*Advanced Very High Resolution Radiometer* Radiomètre avancé à très haute résolution
C3S	*Copernicus Climate Change Service* Service Copernicus sur le changement climatique
CRTS	Centre Royal de Télédétection Spatiale
ECMWF	*European Center for Medium Range Weather Forecasting* Centre européen de prévision
ESA	*European Space Agency* Agence spatiale européenne
ETM	*Enhanced Thematic Mapper* Cartographe thématique amélioré
ETP	Évapotranspiration potentielle
FAO	*Food and Agriculture Organization* Organisation pour l'alimentation et l'agriculture
GES	Gaz à Effet de Serres
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GPH-500	*Geopotential height at 500-hPa level* Hauteur du géopotentielle à 500 hPa
HCP	Haut-Commissariat au Plan
hPa	Hectopascal
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IOM	*International Organization for Migration* L'Organisation Internationale de la Migration
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change* Groupe d'Experts Intergouvernemental sur les Cangements Climatiques
LST	*Land Surface Temperature* Température de surface terrestre
MAP	Agence Marocaine de Presse
MAPM	Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime
Mb	millibar
ML	*Machine Learning* Apprentissage Automatique
MLR	*Multiple Linear Regression* La régression Linéaire Multiple
MSS	*Multi-Spectral Sensor* Capteur Multispectral
NDVI	*Normalized Difference Vegetation Index* Indice de Végétation par Différence Normalisée
NOAA	*National Oceanic and Atmospheric Administration* Administration Nationale des Océans et de l'Atmosphère
OEESM	Organisation Européenne pour l'Exploitation des Satellites Météorologiques (EUMETSAT)
OLI	*Operational Land Imager*Imageur Terrestre Opérationnel
ORMVAG	Office Régional de Mise en Valeur du Gharb
PDAIRE	Plan Directeur D'aménagement Intégré des Ressources en Eau
PIB	Produit Intérieur Brut
PRAG	Programme de Recherche sur l'Atmosphère Globale
PTI	Première Tranche d'Irrigation
RDI	*Reconnaissance Drought Index* Indice de Sécheresse de Reconnaissance
RF	*Random Forest* Forêt Aléatoire
RMSE	*Root-Mean-Square Error* Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne
SAU	Superficie Agricole Utile

SCP	Société Chérifienne des Pétroles
sc-PDSI	*Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index* Indice de Gravité de la Sécheresse Palmer auto-calibré
SDI	*Streamflow Drought Index* Indice de Sécheresse Fluviale
SE	Spectre Électromagnétique
SLP	*Sea Level Pressure* Pression au Niveau de la Mer
SMCI	*Soil Moisture Condition Index* Soil Moisture Condition Index
SPEI	*Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index* Indice Standardisé Précipitations–Évapotranspiration
SPI	*Standardized Precipitation Index* Indice de Précipitations Normalisé
SST	*Sea Surface Temperature* Température de Surface de la Mer
STI	Seconde Tranche d'Irrigation
TCI	*Temperature Condition Index* Indice de Condition de Température
TIRS	*Thermal InfraRed Sensor* Capteur Infrarouge Thermique
TM	*Thematic Mapper* Cartographe Thématique
TTI	Troisième Tranche d'Irrigation
TUC	Temps Universel Coordonné
UNODRR	*United Nations Office for Disaster Risk Reduction* Bureau des Nations Unies pour la Réduction des Risques de Catastrophe
USGS	*United States Geological Survey* Service Géologique des États-Unis
VCI	*Vegetation Condition Index* Indice de l'État de la Végétation
VH	*Vegetation Health* Santé de la Végétation
VHI	*Vegetation Health Index* Indice de Santé de la Végétation
WMO	*World Meteorological Organization* Organisation Météorologique Mondiale
ZCIT	Zone de Convergence Intertropicale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les interactions dynamiques entre l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et les écosystèmes terrestre et marin déterminent le climat global à la surface de la Terre (Pla *et al.,* 2009 ; Bonan & Doney 2018). L'accumulation croissante de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et l'augmentation des concentrations de particules d'aérosols sont désormais reconnues comme ayant des effets détectables sur le système climatique mondial (Ripple *et al.,* 2022). La communauté scientifique estime que les changements dans la composition de l'atmosphère dus à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (principalement le dioxyde de carbone "CO_2", le méthane "CH_4" et l'oxyde nitreux "N_2O"), les changements dans l'occupation des sols et les activités agricoles sont responsables du réchauffement de la surface de la terre (Zhou & WANG 2011 ; Mikhaylov *et al.,* 2020 ; Tran *et al.,* 2020). Bien qu'il y ait encore des débats dans cette communauté pour savoir si le changement climatique est causé par les activités humaines ou s'il résulte de la variabilité naturelle du climat (cycles de Milankovitch), l'opinion scientifique point du doigt les changements dans la composition de l'atmosphère, attribuables aux activités humaines qui conduisent au réchauffement climatique (IPCC, 2022).

Cependant, le rapport du GIEC (2022) affirme que les émissions totales de gaz à effet de serre (GES) anthropiques ont continuellement augmenté de 1970 à 2019 avec la quantité la plus élevée étant notée entre 2010 et 2019. Le rapport note en outre que le rejet de CO_2 dans l'atmosphère par la combustion des énergies fossiles et les activités industrielles a contribué à environ 80 % des émissions totales de GES de 1970 à 2019, avec une augmentation similaire de la période 2000 à 2019 (GIEC, 2022). La hausse des températures réchauffe la surface continentale et les océans, entraînant une augmentation des températures de surface et des changements dans les régimes des précipitations (He & Lee 2016 ; NourEldeen *et al.,* 2020). Bien que les tendances et les schémas des projections des changements climatiques soient généralement cohérents, ils sont sujets à divers degrés d'incertitude en raison des limites de mesure et de la connaissance précise et détaillée de l'interaction entre les systèmes continentaux, océaniques et atmosphériques (Bader *et al.,* 2008).

Selon le rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les températures mondiales près de la surface de la terre, pendant les huit dernières années (2015-2022), ont été les plus chaudes jamais enregistrées au niveau mondial. Ainsi qu'en 2022, la température moyenne sur la planète était supérieure d'environ 1,15 °C (1,02 à 1,27 °C) à sa valeur préindustrielle (période comprise entre 1850 et 1900). Des preuves récentes et des prévisions issues des modèles informatiques indiquent que les changements climatiques s'accélèrent et conduiront à des effets néfastes de grande ampleur (GIEC, 2022). Les modèles climatiques mondiaux (MCG) prévoient une augmentation de la température moyenne mondiale comprise entre 1,5 et 5,8 °C d'ici la fin de 2100, qui est attribuée à la croissance démographique, à la consommation d'énergie et aux changements d'occupation du sol. Cependant, le changement des températures de surface ne sera pas régionalement uniforme. Tous les modèles s'accordent sur le fait que l'Arctique se réchauffera plus rapidement que le reste du globe et que le réchauffement moyen sera plus important à la

surface des continents qu'à la surface des océans. Certains des effets qui ont été largement discutés comprennent la fonte des neiges et le recul des glaciers, la sécheresse et la désertification, les inondations, les incendies fréquents, l'élévation du niveau de la mer, les changements d'espèces et l'augmentation des maladies (GIEC, 2001 ; 2007 ; 2014 ; 2022). Plus précisément, les chercheurs suggèrent qu'avec ces conditions de réchauffement, les modes de précipitations sont susceptibles de changer, avec des augmentations allant jusqu'à 20 % attendues dans certaines parties du globe, bien que les conditions de sécheresse et d'inondations s'aggravent, en particulier en Afrique (Balas *et al.,* 2007 ; Omondi *et al.,* 2013). Les changements de températures et de précipitations devraient également affecter la sécurité alimentaire, la disponibilité des ressources en eau et l'état sanitaire (FAO, 2008 ; GIEC, 2022). Par conséquent, les impacts socio-économiques sont susceptibles d'être importants. En général, les impacts de la variabilité climatique devrait avoir des conséquences mondiales énormes et dévastatrices, mais les impacts les plus néfastes devraient se produire dans les pays en développement en raison de leurs ressources limitées pour faire face et s'adapter aux conditions changeantes, dues à leur situation géographique (dans des environnements vulnérables et fragiles) et à leur dépendance excessive à l'agriculture, qui est un secteur très sensible au climat (Collier *et al.,* 2008 ; Sintayehu, 2018 ; GIEC, 2022). La vulnérabilité au changement climatique, à son tour, posera de multiples menaces à la croissance économique et à la réduction de la pauvreté en Afrique (GIEC, 2022).

L'Afrique est considérée comme la plus grande masse continentale tropicale sur terre, divisée par l'équateur dans les deux hémisphères. En raison de sa vaste masse continentale, qui s'étend d'environ 35°N à 35°S, les régimes climatiques varient entre des régimes équatoriaux humides, des régimes arides et semi-arides aux climats de type méditerranéen (Collier *et al.,* 2008). Le changement climatique devrait rendre certaines régions plus humides (comme les parties orientales de l'Afrique), tandis que d'autres régions comme les parties sud et nord de l'Afrique deviendront plus sèches (Collier *et al.,* 2008).

Le climat en Afrique est influencé par quatre grands moteurs mondiaux, qui sont la zone de convergence intertropicale (ZCIT), El Niño-Oscillation australe (ENSO), les modèles de circulation dans l'océan Indien, l'océan Atlantique et la Méditerranée (Camberlin, *et al.,* 2001 ; Collier *et al.,* 2008 ; Hakam *et al.,* 2022a). En outre, le climat de l'Afrique est considérablement affecté par la présence de grands contrastes topographiques et l'existence de grandes surfaces d'eau tels que des lacs et des rivières. Le réchauffement affectera les interactions entre ces divers facteurs, provoquant des phénomènes météorologiques extrêmes telles que des sécheresses, des inondations et des tempêtes de vent (Collier *et al.,* 2008). À titre d'exemple, les fluctuations et la variabilité accrues des précipitations dans de nombreuses régions d'Afrique, y compris la région du Sahel, les parties orientale et méridionale de l'Afrique, ont été associées aux conditions de température changeantes dans l'océan Pacifique (ENSO) (Obasi, 2005 ; Haszpra *et al.,* 2020), et l'apparition récente de conditions de sécheresse dans les régions tropicales et subtropicales de l'Afrique de l'Est

serait causée par l'augmentation des températures de surface de la mer dans le Sud-Ouest de l'océan Indien (Funk *et al.,* 2005).

La température a augmenté d'environ 0,7°C au cours du 20e siècle, et certains modèles de projection prévoient un réchauffement accru à travers le continent, allant de 0,2°C par décennie (scénario bas) à plus de 0,5°C par décennie (scénario élevé) (GIEC, 2022). Le taux de réchauffement au XXe siècle a été d'environ 0,05 °C par décennie (GIEC, 2007). Alors que les changements futurs des précipitations en Afrique sont moins bien définis. Hulme *et al.,* (2001) et Henson (2011) suggèrent que le réchauffement entraînera une augmentation des précipitations autour de la région équatoriale de l'Afrique de l'Est. Alors que, les précipitations pendant la saison pluvieuse peuvent augmenter de 5 à 20 %, bien que les conditions de sécheresse puissent également être exacerbées de 5 à 10 % pendant les saisons sèches. Bien que les tendances au réchauffement sur le continent africain semblent être les mêmes, le changement climatique sur un grand continent comme l'Afrique ne sera pas toujours uniforme ; au contraire, différentes zones subiront des impacts différents du changement climatique dans le temps et dans l'espace. Cependant, il existe un accord général selon lequel de nombreux pays africain sont vulnérables aux effets du changement climatique en raison de leur dépendance à l'agriculture pluviale et aux ressources naturelles (GIEC, 2020). Selon le rapport du GIEC, l'agriculture contribue à environ 70 % du PIB de certains pays africains (GIEC, 2007). Cependant, le changement et la variabilité climatiques devraient réduire les rendements de l'agriculture pluviale jusqu'à 50 % d'ici 2030 pour certains pays d'Afrique. D'autres pertes agricoles sont attendues dans des régions telles que le Sahel, l'Afrique australe et l'Afrique du Nord, liées aux changements de la durée de la saison de croissance, aux sécheresses et aux inondations.

En Afrique du Nord, et plus particulièrement dans la région du Maghreb qui est déjà sèche, la variabilité climatique ajoute une pression sur les communautés au Maroc, en Algérie et en Tunisie, qui comptent environ 91,2 millions d'habitants (World Bank, 2020a). Ces trois pays partagent un certain nombre de caractéristiques géographiques. Les montagnes de l'Atlas traversent le Maroc, le Nord de l'Algérie et la Tunisie, reculant vers le Sud dans un paysage de steppe avant de rencontrer le désert du Sahara, qui marque les régions méridionales des trois pays. Les vallées des montagnes de l'Atlas et les zones côtières méditerranéennes et atlantiques sont les principales sources de terres agricoles dans la région du Maghreb.

L'agriculture reste un élément important des économies nord-africaines, en plus des industries pétrolières et gazières (en Algérie), du tourisme (principalement au Maroc et en Tunisie) et de l'industrie manufacturière. Surtout au Maroc et en Tunisie, l'agriculture s'est considérablement développée et a été le moteur clé de la croissance économique et de l'emploi (Houdret *et al.,* 2017). Au Maroc, en Tunisie et en Algérie, l'agriculture contribue respectivement pour 12,5, 10 et 11,8% au produit intérieur brut (PIB) de ces pays (World Bank, 2020b). De plus, le secteur est un

employeur clé dans certains pays, employant respectivement près de 35 et 13 % de la population au Maroc et en Tunisie et 9,9 % de la population en Algérie (FAO, 2020). La sécurité alimentaire de ces pays est donc fortement liée à la performance du secteur agricole, et les impacts du changement climatique sur celui-ci pourraient avoir des conséquences importantes sur la disponibilité des denrées alimentaires, l'emploi rural et la stabilité économique.

Dans notre pays, la politique de sécurité alimentaire vise à garantir la satisfaction des besoins alimentaires nationaux et à maintenir la souveraineté alimentaire, qui a été remise en question pendant la crise de la pandémie Covid-19. L'objectif principal est d'atteindre l'autosuffisance agricole, même si l'importation de produits agricoles reste une option pour compenser les déficits. Cette politique vise également à réduire les déficits de la balance alimentaire et commerciale, tout en tenant compte des contraintes liées aux ressources en eau limitées, aux potentialités agro-climatiques et aux besoins croissants de la population.

Le défi pour le Maroc est de fournir au marché local en temps voulu et à moindre coût d'importation, tout en promouvant une agriculture durable dans un contexte climatique incertain, en prenant en compte les impacts de la sécheresse et du changement climatique, ainsi que les ressources en eau limitées et les besoins croissants de la population. Il est essentiel d'anticiper et de planifier les importations en cas de production insuffisante pour la consommation intérieure ou pour le stockage des semences (Jarlan, 2016). La prévision saisonnière précoce, précise et fiable des rendements des cultures est un outil approprié pour la prise de décision, car elle peut aider les décideurs et les gestionnaires à renforcer la sécurité alimentaire dans ces situations (Johnson *et al.,* 2016 ; Filippi *et al.,* 2019 ; Kogan, 2019).

QUESTIONS DANS UN CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Le Maroc se trouve dans une zone géographique intermédiaire où siège la compétition entre les systèmes dépressionnaires tempérés et l'anticyclone subtropical des Açores qui conditionne l'occurrence d'événements météorologiques. C'est une zone de transition entre les deux grands climats généraux que sont le climat tempéré d'une part et les climats désertiques ou tropicaux d'autre part. De point de vue climatique, le Maroc dispose de deux grandes zones climatiques ; les régions nord, sous influence d'un climat à la fois méditerranéen et atlantique avec beaucoup de nuances climatiques entre les régions côtières, l'intérieur et les montagnes de l'Atlas et les régions sud, à l'inverse, soumises à l'influence d'un climat semi-aride à aride, voire désertique avec des précipitations erratiques et complexes à dominance tropicale. En outre, le climat au Maroc peut être influencé par plusieurs oscillations ou télécorrélations atmosphériques (téléconnéxions) qui sont des variations périodiques des conditions climatiques à l'échelle mondiale. Ces téléonnxions atmosphériques peuvent varier dans le temps et dans l'espace, et leur influence sur le climat du Maroc peut être complexe. La compréhension de ces téléconnexions et de leur impact sur le climat du Maroc, en particulier les précipitations, est importante pour mieux suivre les variations climatiques et pour aider à la gestion des ressources en eau, de l'agriculture, des risques climatiques et d'autres secteurs clés de l'économie marocaine. En effet, plusieurs études ont examiné l'influence de ces derniers sur les précipitations au Maroc telle que l'oscillation Nord Atlantique (ONA) (Delannoy, 1998 ; Driouech, 2010 ; Filahi *et al.,* 2016 ; Driouech, *et al.,* 2021). Selon certaines études, les phases positives de l'ONA, caractérisées par une pression atmosphérique plus basse sur l'Islande et plus élevée sur les Açores, peuvent être associées à des précipitations accrues au Maroc (Sebbar *et al.,* 2014 ; Zamrane, 2016). Cela est dû à des changements dans la circulation atmosphérique qui peuvent entraîner une augmentation de l'humidité provenant de l'océan Atlantique, ce qui peut favoriser des conditions propices aux précipitations dans certaines régions du Maroc. Cependant, il convient de noter que l'impact des oscillations atmosphériques sur les précipitations au Maroc peut varier en fonction de la saison, de la région et d'autres facteurs climatiques et météorologiques. Des études plus approfondies sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et les interactions complexes entre les oscillations atmosphériques et les précipitations au Maroc. Une meilleure compréhension de ces mécanismes peut aider à améliorer les prévisions climatiques et à anticiper les périodes de précipitations réduites qui peuvent contribuer à la survenue de sécheresses.

La sécheresse est considérée également comme un phénomène naturel qui englobe divers processus météorologiques, hydrologiques et biophysiques avec des implications socio-économiques. Elle se caractérise par un déficit de précipitations par rapport aux valeurs normales, et peut se produire dans des régions à fortes ou faibles précipitations, ainsi que dans différents types de climats (Mishra & Singh, 2010). Lorsqu'elle persiste pendant une saison entière ou plus, cette insuffisance peut entraver la capacité à répondre adéquatement aux besoins des sociétés humaines

et de l'environnement (WMO, 2006). Au niveau mondial, les conséquences de la sécheresse peuvent causer jusqu'à 80% de pertes de rendement dans le monde (FAO, 2017). Selon les recherches de Kogan *et al.,* (2020), les zones touchées par la sécheresse montrent une tendance nettement positive, en particulier depuis le début des années 2000, et la production de céréales peut être réduite de 10 à 35% en fonction de l'intensité de la sécheresse (Kogan, 2019).

Dans un monde devenu plus vulnérable par l'extension et l'intensification des cultures agricoles, il est crucial d'anticiper et de gérer efficacement les périodes de sécheresse. Face à ce phénomène complexe, le développement d'indices de sécheresse en tant qu'outils d'aide à la décision est essentiel pour mieux faire face à cette problématique. La première étape pour atténuer les impacts de la sécheresse consiste à surveiller attentivement son évolution. Il est donc crucial de développer un système d'alerte précoce pour le suivi de la sécheresse et d'évaluer ses liens avec les rendements des cultures (Vicente-Serrano *et al.,* 2006). Les premiers systèmes de surveillance de la sécheresse reposaient principalement sur des données météorologiques, utilisant des indices tels que l'indice de précipitations normalisé (SPI - *Standardized Precipitation Index*) et l'indice d'évapotranspiration normalisé (SPEI - *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*). Cependant, la limitation de ces indices réside dans la faible densité des stations météorologiques dans certaines régions du monde, notamment dans les pays en développement, rendant difficile leur utilisation à grande échelle. Pour surmonter cette limitation, des indices de sécheresse dérivés de données de télédétection, qui sont maintenant largement disponibles dans le monde entier, ont été utilisés pour surveiller l'intensité, la durée et l'étendue spatiale de la sécheresse. Les données de télédétection fournissent des informations sur la santé de la végétation à travers des indices de végétation optiques tels que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*), la température de surface terrestre déduite des données infrarouges thermiques (LST – *Land Surface Temperature*), et l'humidité du sol estimée à partir d'observations micro-ondes actives ou passives (SM – *Soil Moisture*). La plupart des indices de sécheresse dérivés de la télédétection sont basés sur des anomalies normalisées de ces produits (Kogan, 1997). Parmi ces indices, l'indice de condition de la végétation (VCI - *Vegetation Condition Index*) basé sur le NDVI et l'indice de condition thermique (TCI - *Temperature Condition Index*) basé sur la LST sont largement utilisés pour surveiller la sécheresse à l'échelle régionale ou mondiale. De plus, des indices basés sur l'humidité du sol, tel que l'indice d'humidité du sol (SMCI - *Soil Moisture Condition Index*), ont également été proposés (Zhang & Jia, 2013). Outre ces outils d'évaluation et de quantification des effets de la sécheresse sur l'agriculture, la prévision précoce des rendements des cultures reste également un outil efficace et nécessaire pour renforcer la sécurité alimentaire. Les deux approches les plus utilisées pour la prévision du rendement des cultures sont : les modèles empiriques basés sur la régression et les modèles de croissance des cultures alimentés par les prévisions météorologiques, comme décrit dans les travaux de Basso & Liu, (2019).

Les modèles de croissance des cultures sont capables de décrire les processus physiques et

physiologiques clés, en prenant en compte les interactions complexes entre la culture, le sol, la météo et les pratiques de gestion (Whisler *et al.,* 1986). Ainsi, ils peuvent fournir une estimation satisfaisante du rendement des cultures à la fin de la saison de croissance, à condition que les données et les paramètres d'entrée soient renseignés avec précision. Cependant, l'utilisation de ces modèles pour prédire le rendement pendant la saison de croissance est limitée par l'incertitude des conditions météorologiques entre la date de prévision et la date de récolte (Lawless & Semenov, 2005). De plus, la demande élevée en données et paramètres d'entrée tels que le climat spatialisé, la pédologie, les informations sur le type et la variété de culture, les pratiques de gestion, la date de semis, etc., est difficile à satisfaire ou à évaluer avec précision à grande échelle (Fraisse *et al.,* 2001).

En revanche, les modèles empiriques sont basés exclusivement sur les données, ce qui les rend simples et nécessitant moins de paramètres que les modèles de croissance des cultures. Par conséquent, ils sont largement utilisés dans le cadre de la prévision opérationnelle des rendements des cultures. Ces modèles reposent sur l'utilisation de certaines variables ou indicateurs qui sont des marqueurs des conditions environnementales (telles que les données agrométéorologiques et/ou télédétectées) et sont utilisées comme variables indépendantes pour prédire le rendement (Balaghi *et al.,* 2008 ; Johnson, 2014 ; Kogan *et al.,* 2013 ; Meroni et al., 2016 ; Salman & Al-Karablieh, 2001). La performance de ces modèles dépend fortement de la quantité et de la qualité des données disponibles (Martinez *et al.,* 2009). Toutefois, avec l'augmentation récente de la quantité et de la qualité des données observées, les modèles empiriques basés sur la régression présentent généralement des performances satisfaisantes (Kogan *et al.,* 2013 ; Mathieu & Aires, 2018). D'un point de vue méthodologie, la plupart des études antérieures citées sont basées sur la régression linéaire multiple alors que les liens entre les rendements et les prédicteurs potentiels sont probablement non linéaires. L'apprentissage automatique est devenu un outil important d'aide à la décision pour la prévision du rendement des cultures (van Klompenburg *et al.,* 2020). Récemment, plusieurs études ont examiné les performances d'algorithmes d'apprentissage automatique (*machine learning*) tels que la forêt aléatoire (RF - *Random Forest*) et le réseau neuronal artificiel (ANN - *Artificial Neural Network*) pour la prévision des rendements à différentes échelles en utilisant des données multi-sources et elles ont constaté que les méthodes non linéaires ont une meilleure performance pour la prévision des rendements que la régression linéaire multiple, en raison de la non-linéarité entre le rendement des cultures et ses prédicteurs potentiels. (Johnson *et al.,* 2016 ; Mateo-Sanchis *et al.,* 2019 ; Abbas *et al.,* 2020 ; Cao *et al.,* 2020 ; Feng *et al.,* 2020 ; Kamir *et al.,* 2020 ; Kang *et al.,* 2020).

Comprendre les impacts de variabilité climatique sur différents secteurs (tels l'agriculture et l'approvisionnement en eau) peut conduire à des plans de développement plus flexibles pour s'adapter à ces changements et atténuer leurs impacts. C'est une étape importante qui mérite d'être étudiée. Ainsi, pour un pays comme le Maroc, dans lequel une majorité de sa population est

engagée dans des activités agricoles, le manque de compréhension des impacts du changement climatique est un problème très important et doit être résolu. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail de thèse, qui vise à quantifier l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau et l'agriculture, en se concentrant sur le bassin Bas Sebou. Ce bassin, situé au Nord-Ouest du Maroc, est une région agricole de premier ordre, contribuant de manière significative à la production agricole nationale, notamment dans les cultures céréalières, les agrumes, les légumes et le sucre. Cependant, ce bassin est confronté à d'importants défis en raison des changements climatiques, notamment la variabilité des précipitations, l'augmentation des températures, le stress hydrique, la perte de biodiversité et les impacts socio-économiques. Ces défis nécessitent des actions pour maintenir la productivité et la durabilité de cette région agricole dans un contexte climatique en constante évolution, nécessitant ainsi la mise en place d'actions appropriées pour y faire face et assurer un développement durable.

De tout cela cinq questions primordiales se posent et dont les réponses en étapes seront évoquées ci-après en chapitres.

- Comment les circulations atmosphériques et océaniques à grande échelle pourraient-elles affecter le climat dans le bassin Bas Sebou **?**
- Quels sont les outils efficaces pour suivre et évaluer les différents aspects de la sécheresse **?**
- Comment les sécheresses évoluent dans le temps et dans l'espace **?**
- Quelle est la relation entre la sécheresse agricole et les rendements céréaliers **?**
- Comment prédire précocement les rendements céréaliers **?**

APPROCHES

Afin d'évaluer l'impact de la variabilité climatique, il est indispensable de prioriser l'étude des précipitations reconnues comme la principale source qui régule la distribution de l'eau douce dans le bassin Bas Sebou. Au cours des dernières années, le bassin Bas Sebou a été confronté à des variations significatives dans son régime de précipitations, sous l'influence de divers facteurs. Parmi ceux-ci, la géographie, la topographie, la télécorrélation atmosphérique (téléconnexion), la température de surface des océans, les courants marins, les zones de convergence et de divergence atmosphériques, ainsi que d'autres phénomènes météorologiques et climatiques. Pour bien mener ce travail, nous avons effectué une analyse des tendances des précipitations, afin d'étudier la variation des tendances et identifier les déterminants significatifs influençant les précipitations dans le bassin Bas Sebou. Les techniques statistiques Mann-Kendall (MK), Mann Kendall Partiel (MK-P), l'analyse des fonctions orthogonales empiriques (FOE) et l'analyse en composantes principales (ACP) sont utilisées pour identifier les déterminants potentiels. Ensuite, les données maillées à haute résolution des variables de circulation atmosphérique et océanique telles que la température de surface de la mer (SST - *Sea Surface Temperature*), la pression au niveau de la mer (SLP – *Sea Level pressure*) et la hauteur du géopotentielle à 500 hPa (GPH-500 - *Geopotential Height at 500 hPa*), ont été étudiées afin d'obtenir les modèles FOE raffinés et améliorer la signification des résultats.

En prenant en considération l'influence du contexte climatique à grande échelle sur les précipitations, il est essentiel de connaître l'importance des sécheresses et de leurs impacts sur le bassin Bas Sebou. Il est donc primordial de se doter d'outils efficaces afin de détecter et de faire le suivi des conditions de sécheresse. Il existe déjà certains outils pour quantifier les périodes sèches tels que les indices de sécheresse. Ces indices sont généralement basés sur des données climatiques fournies par un réseau de stations météorologiques. Néanmoins, un indice de sécheresse adapté à une région peut ne pas être appliqué spécifiquement à d'autres régions en raison de la complexité inhérente des phénomènes de sécheresse et/ou des différences de conditions hydroclimatiques. Sur la base de la disponibilité des données, quatre indices de sécheresse, à savoir, l'indice de précipitation standardisé (SPI - *Standardized Precipitation Index*), l'indice standardisé d'évapotranspiration des précipitations (SPEI - *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*), l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI - *Reconnaissance Drought Index*) et l'indice de gravité de la sécheresse Palmer auto-calibré (sc-PDSI - *self-calibrated Palmer Drought Severity Index*) ont été sélectionnés pour évaluer leur performance lors des sécheresses historiques, dans le but d'identifier l'indice ou les indices de sécheresse appropriés pour la zone d'étude.

En utilisant les résultats obtenus, les indices choisis seront ensuite utilisés pour une évaluation approfondie de l'évolution spatiotemporelle de la sécheresse météorologique. Ces indices permettront d'analyser en détail comment la sécheresse évolue dans l'espace et dans le

temps, en identifiant les régions les plus touchées et les périodes les plus critiques. De plus, ces indices seront utilisés pour caractériser la sécheresse météorologique, en comprenant ses manifestations, ses causes et ses conséquences sur les ressources en eau et l'agriculture. En outre, l'utilisation de ces indices permettra d'étudier également la relation entre la sécheresse météorologique et la circulation atmosphérique à grande échelle. Les oscillations atmosphériques à grande échelle qui prévalent dans le bassin Bas Sebou peuvent influencer la survenue et l'intensité de la sécheresse.

Les informations obtenues grâce à cette évaluation mettent en évidence également la vulnérabilité de l'agriculture dans le bassin Bas Sebou face à la sécheresse météorologique, ce qui nécessite de prendre des mesures pour améliorer la gestion des ressources en eau et développer des stratégies d'adaptation et d'atténuation de la sécheresse, telles que l'utilisation des pratiques agricoles résilientes à la sécheresse, la gestion efficace de l'eau d'irrigation, la diversification des cultures, la promotion de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la sensibilisation des agriculteurs aux pratiques agricoles durables. Les indices basés seulement sur la température et les précipitations présentent cependant certaines limites, notamment en raison du réseau d'observation peu représentatif et des coûts associés au suivi des données. Il est donc essentiel de mettre en place de nouvelles approches d'évaluation des conditions climatiques et environnementales afin de maintenir une surveillance efficace des impacts néfastes de la sécheresse, en particulier sur l'agriculture pluviale qui est cruciale pour la production des principales cultures céréalières du bassin Bas Sebou, tels que le blé et l'orge. À cette fin, la relation entre la sécheresse agricole et le rendement céréalier dans le bassin Bas Sebou a été étudiée.

L’imagerie satellitaire offre de nouvelles possibilités à cet égard. Certains capteurs, comme par exemple les capteurs Landsat et AVHRR de NOAA, permettent de dériver la température de surface et certaines caractéristiques de la végétation avec une résolution spatiale plus fine et en tout point du territoire. Ils ont aussi l’avantage de fournir des données journalières continues à l’échelle régionale et continentale. À partir de ces éléments de réflexion, l’indice de santé de la végétation (VHI - *Vegetation Health Index*) pourrait être l’indice satellitaire le plus adapté, car il combine deux composants : l’indice de condition de la végétation (VCI - *Vegetation Condition Index*) et l’indice de condition thermique (TCI - *Temperature Condition Index*). Le premier composant caractérise les conditions d’humidité, généralement basé sur des informations provenant des bandes, visible et proche infrarouge, du spectre électromagnétique. Tandis que le deuxième composant repose sur des informations provenant de la bande infrarouge thermique. Une modélisation de l’état de changement de la santé de la végétation a été menée afin d'explorer son évolution dans le temps (1984-2016) à l'échelle du pixel dans le bassin Bas Sebou. Ainsi, une analyse des tendances par pixel permettrait d'obtenir des informations détaillées sur les changements des paramètres conditionnant la santé de la végétation. Ensuite, la relation entre les indices de sécheresse et le rendement des céréales a été évaluée. Finalement, nous nous sommes

focalisés sur l'évaluation et quantification de la capacité des indices de sécheresse météorologiques (SPI et SPEI) et satellitaires (VCI, TCI et VHI) à expliquer les facteurs de variabilité des rendements céréaliers.

En exploitant les résultats de l'étude réalisée par Hakam *et al.,* (2023), il a été développé des modèles empiriques de la prévision précoce du rendement des céréales à l'échelle provinciale dans le bassin Bas Sebou. Ces modèles sont basés sur des données multi-source : les indices de sècheresse dérivés de la télédétection (VCI, TCI, SMCI) et les indices dérivés des données météo (température de l'air, précipitations). Différents algorithmes d'apprentissage automatique (*machine learning*) pour développer les modèles de prévision ont été choisis, en plus de l'approche linéaire de la régression linéaire multiple (MLR - *Multiple Linear Regression*), il a été utilisé les approches non-linéaires tels que la forêt aléatoire (FR - *Random Forest*) et le réseau neuronal artificiel (ANN - *Artificial Neural Network*). Dans cette étude, nous avons conçu et appliqué plusieurs expériences avec les méthodes empiriques mentionnées ci-dessus. La première expérience a été conçue pour déterminer la meilleure combinaison des données, comme prédicteurs du rendement qui permet d'obtenir une meilleure prévision du rendement final. La deuxième expérience visait à évaluer la performance des modèles développés avec la meilleure combinaison, pour la prévision précoce, au début de l'hiver et les semaines de printemps qui correspondent respectivement à 2, 3 et 4 mois avant la récolte.

STRUCTURE DE LA THÈSE

- **Le premier chapitre** est consacré aux différents travaux et données en relation avec les changements ou variabilités climatiques au Maroc et particulièrement le Nord du Maroc où se situe le bassin Bas Sebou, objet d'étude.
- **Le deuxième chapitre** du fait que l'approche doit être basée sur une pluridisciplinarité, une base de données concernant les données propres au bassin Bas Sebou est évoquée. Dans ce chapitre les formations géologiques, géomorphologiques, pédologiques et végétales sont bien présentées suivant une logique nouvelle permettant de comprendre le bassin Bas Sebou. Avec les données hydro-climatiques et les données de surface dont l'aspect socio-économique constitue une base de données référentielle pour toutes les études ultérieures dont celle-ci.
- **Le troisième chapitre** se concentre sur l'influence de la circulation océanique et atmosphérique à grande échelle sur le climat du bassin Bas Sebou, en particulier sur les précipitations. Il décrit la variation et l'importance dans la tendance des précipitations causée par l'emplacement des indices climatiques dû à la circulation atmosphérique et océanique à grande échelle et aux variables climatiques, telles la température de surface de la mer, la pression au niveau de la mer et la hauteur géopotentielle à un niveau atmosphériques significatif (500 hPa).
- **Le quatrième chapitre** aborde la nécessité de disposer d'outils efficaces pour surveiller et évaluer la sécheresse. Cela implique l'utilisation de divers indices de sécheresse basés sur les données de précipitations et de température. Ces indices sont comparés pour évaluer leur capacité à fournir une description unifiée des différents aspects d'un même événement de sécheresse, ainsi que leur performance dans la surveillance de la sécheresse météorologique, agricole et par extension hydrologique.
- **Le cinquième chapitre** vise à étudier l'évolution spatiotemporelle de la sécheresse météorologique en utilisant les indices sélectionnés dans le chapitre précédant. Ce chapitre a pour but d'analyser en détail l'évolution de la sécheresse météorologique dans l'espace et dans le temps, en identifiant les régions les plus touchées et les périodes les plus critiques. Ces indices sont également utilisés pour caractériser la sécheresse météorologique, en comprenant ses manifestations, ses causes et ses conséquences sur les ressources en eau et l'agriculture. De plus, a été examinée la relation entre la sécheresse météorologique et la circulation atmosphérique à grande échelle, notamment les oscillations atmosphériques dans le bassin Bas Sebou, qui peuvent influencer la survenue et l'intensité de la sécheresse.
- **Le sixième chapitre** intègre l'état végétatif dans le bassin Bas Sebou pour une éventuelle corrélation avec la présence et le degré de la sécheresse. L'objectif de ce chapitre est de surveiller l'impact de la sécheresse sur l'état de la végétation en utilisant principalement des données satellitaires et climatiques. De plus, et encore par beaucoup de précision, les rendements des cultures céréalières ont été mis en considération dans l'évaluation des relations qui peuvent exister entre la sécheresse et l'agriculture.

- **Le septième chapitre** exploitant les résultats obtenus dans les chapitres précédents, il était impératif de développer des modèles empiriques de prévision précoce du rendement des céréales à l'échelle provinciale du bassin Bas Sebou. Ces modèles sont basés sur des données satellitaires et climatiques. Différents algorithmes d'apprentissage automatique ont été choisis pour développer les modèles de prévision, en plus de l'approche de la régression linéaire multiple (MLR - *Multiple Linear Regression*), les approches non-linéaires sont aussi utilisées tels la forêt aléatoire (RF - Random forest) et le réseau neuronal artificiel (ANN - *Artificial Neural Network*).
- **Conclusions et perspectives :** les différents résultats acquis à travers les différentes étapes de la thèse sont succinctement évoqués dans une logique répondant à la fois à l'objectif bien établi en préalable, à la méthodologie et à la cohérence de la structure de la thèse. Vues l'importance stratégique dans l'économie agricole du bassin Bas Sebou et les résultats obtenues le long de ce parcours, les perspectives évoquées propres au bassin Bas Sebou ou concernant les régions avoisinantes du pourtour méditerranéen ont pris un caractère d'imposition.

Les références et les annexes sont incluses à la fin de la thèse.

CHAPITRE I

CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU MAROC

I. Changements des extrêmes climatiques 16
II. Effets sur les températures et les précipitations 16
III. Effets sur l'agriculture 19
IV. Effets sur les ressources en eau 20
V. Effets sur les infrastructures 22
VI. Effets sur la biodiversité 22
VII. Conclusion 24



CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU MAROC

Partout dans le monde, la variabilité climatique est de plus en plus répandue. Des températures records sont enregistrées d'année en année. De fréquentes vagues de chaleur et de graves inondations ont été observées au cours des dernières décennies. Ces perturbations atmosphériques qui balayent la planète provoquent des drames humains et affecteront l'agriculture, et donc l'économie des pays. Face à cette situation, la préoccupation est de prévoir l'impact du changement climatique qui peut être attendu afin de pouvoir construire un développement social et économique approprié. Le Maroc n'est pas à l'abri, non plus, d'événements météorologiques extrêmes. La vulnérabilité du Maroc aux extrêmes climatiques est aggravée par de multiples contraintes biophysiques (désertification, diminution des ressources hydriques, dégradation des écosystèmes), réduisant les moyens d'existence de la population et limitant leurs capacités d'adaptation. Les communautés rurales risquent de voir leurs moyens d'existence se dégrader sous l'effet du changement climatique et de la baisse de la productivité végétale et animale qui constituent le plus souvent leurs seules sources de revenus.

Toutes les régions du Maroc ont subi les effets des changements climatiques dont l'intensité varie d'une région à l'autre. Ce vecteur différentiel dépend de la zone géographique, de l'éloignement de l'océan Atlantique, de la position latitudinale, de l'influence saharienne et de l'effet de la Méditerranée. Les études sont nombreuses touchant plus ou moins l'impact des changements climatiques sur tous les secteurs en relation directe ou indirecte avec les paramètres climatiques. Le climat et ses changements au sein du bassin Bas Sebou, pourrait constituer une référence pionnière dont la projection tout azimut dans le territoire marocain pourrait accomplir les objectifs dans le domaine

La littérature scientifique sur la variabilité climatique et ses impacts au Maroc, ou plus largement en Afrique du Nord, est relativement abondante. Les thématiques traitées sont nombreuses : évolution du climat moyen, des événements climatiques extrêmes, impacts sur les ressources en eau superficielles ou profondes, l'agriculture, la santé, les écosystèmes ou encore le tourisme et l'énergie. Quelques rapports de synthèse sont également disponibles, en particulier celui de l'UNESCO (2010) sur le Maghreb, celui de la Banque mondiale sur l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient (2014), celui de l'IRES sur le Maroc (2011), et celui de l'ESCWA (2017) pour l'Afrique du Nord et le Moyen Orient. Sauf les différents rapports l'IRES, qui remontent déjà à quelques années, ces différents rapports ne sont donc pas focalisés sur le Maroc.

Dans ce contexte, l'étude climatique en suivant les changements climatiques historiques et leurs impacts apparait une évidence au Maroc. Les conditions et la disponibilité des données ne permettent pas d'élargir l'étude au-delà du bassin Bas Sebou.

I. Changements des extrêmes climatiques

Selon les conclusions du rapport d'évaluation du GIEC (AR5), les experts s'attendent à ce que le changement climatique provoque des événements météorologiques extrêmes plus intenses, tels que les sécheresses, pluies diluviennes et des ouragans plus fréquents (Boucher *et al.,* 2013). Ces derniers influencent sur les aléas physiques, mais aussi sur la capacité des communautés à réagir aux catastrophes.

En effet, la température est associée à plusieurs phénomènes météorologiques extrêmes tels que les vagues de chaleur et les vagues de froid qui ont un impact sur l'environnement physique et les écosystèmes. Le rapport du GIEC répertorie les changements régionaux observés dans les extrêmes de température et de précipitations depuis 1950 (IPCC, 2012) et, en général, les analyses des extrêmes de température montrent des changements compatibles avec le réchauffement climatique.

De même, il existe une forte association entre les précipitations et les sécheresses ou les inondations. De nombreuses études rapportent une augmentation du nombre d'événements de fortes précipitations dans plusieurs régions méditerranéennes, même dans celles où les précipitations diminuent (Gao *et al.* 2006 ; Giorgi & Lionello, 2008). Les inondations et les sécheresses sont peut-être les principaux problèmes associés au changement climatique au Maroc. L'adaptation à ces aléas nécessite des changements tant dans les infrastructures que dans les stratégies (Hitz, 2004). Plusieurs événements causant des pertes humaines et des dommages économiques au cours des dernières décennies, comme en 1995 (vallée de l'Ourika), 2002 (Mohammadia, El Jadida, Taza, Tétouan, Settat, Berrechid), et 2009 (Rabat, Kénitra, Tanger, Nador, Casablanca, Khénifra, Tétouan, Agadir, Essaouira) (Bouaicha & Benabdelfadel, 2010 ; Tramblay *et al.,* 2012).

En termes de sécheresse, le Maroc a également connu une série d'années de sécheresse : 1944-1945, 1982-1983, 1994-1995, 1998-2000, 2006-2007 et 2015-2016. Bien que la sécheresse puisse survenir dans tous les types de climat, les régions semi-arides, comme plusieurs régions du Maroc, sont les plus vulnérables car elles connaissent déjà des déficits hydriques réguliers dus à des précipitations variables. De tous les aléas météorologiques, c'est probablement le plus lent à se développer, le plus long et le moins prévisible. Le nombre d'années sèches, avec des précipitations inférieures à 400 mm, a augmenté depuis le début des années 1980 au Maroc. La fréquence des années sèches a quintuplé, passant de 1 année sèche sur 15 années normales durant les années 30, 40, 50, 60 et 70, à 1 année sèche sur 3 durant les 3 dernières décennies (Jlibene, 2011).

II. Effets sur les températures et les précipitations

Les observations de température et précipitation présentées dans le rapport du GIEC de 2022

montrent une augmentation significative des températures en Afrique du Nord (**Figure 1**). Au Maroc, on retrouve clairement l'empreinte du réchauffement global, avec une augmentation de l'ordre de +2 °C à +3 °C en moyenne annuelle entre 1787 et 2020 (**Figure 2**). L'augmentation saisonnière des températures au Maroc est un phénomène qui peut être observé dans certaines régions du pays pendant les mois d'été, généralement entre juin et septembre (**Figure 3**). Cela est principalement dû à la position géographique du Maroc, situé dans la région du Maghreb en Afrique du Nord, qui connaît un climat méditerranéen semi-aride.

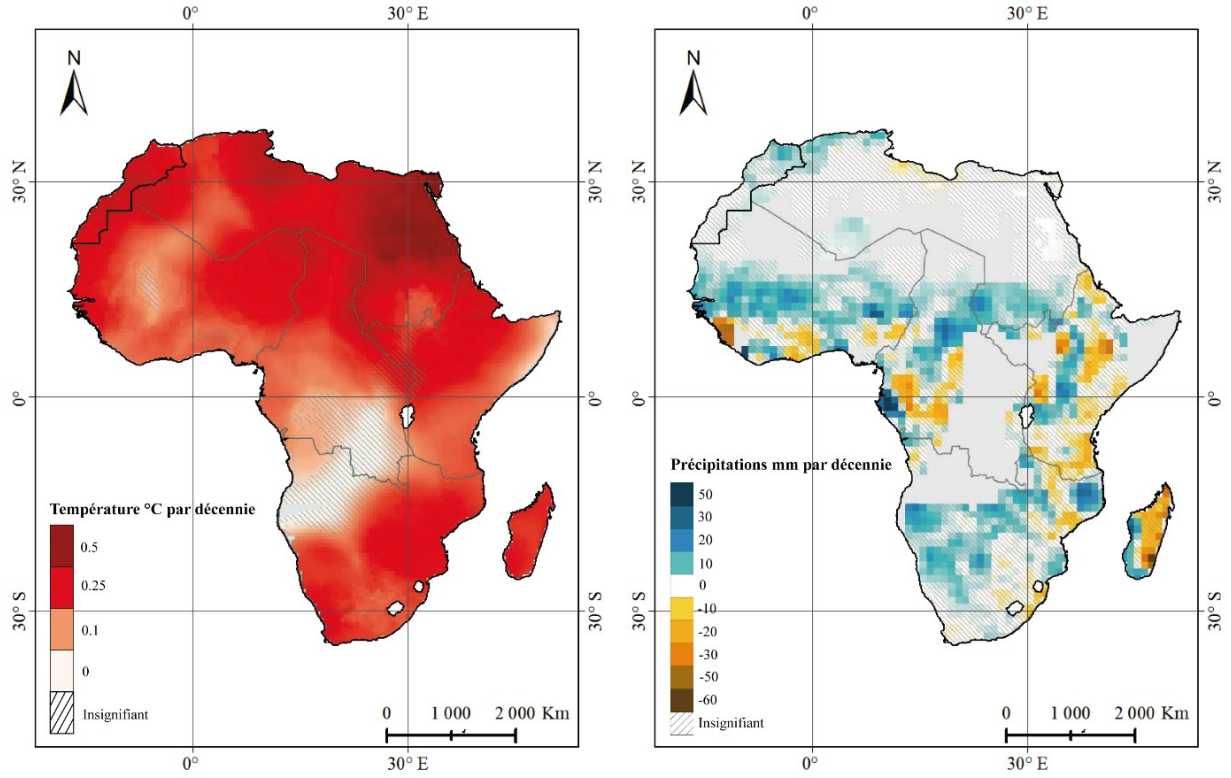


Figure 1: Tendances moyennes observées de la température moyenne en °C par décennie (gauche) et des précipitations moyennes en mm par décennie pour la période 1980–2015 (droite). Les régions sans hachures indiquent des tendances statistiquement significatives au cours de cette période et les régions en gris indiquent des données insuffisantes. (Source : Gutiérrez *et al.,* 2021)

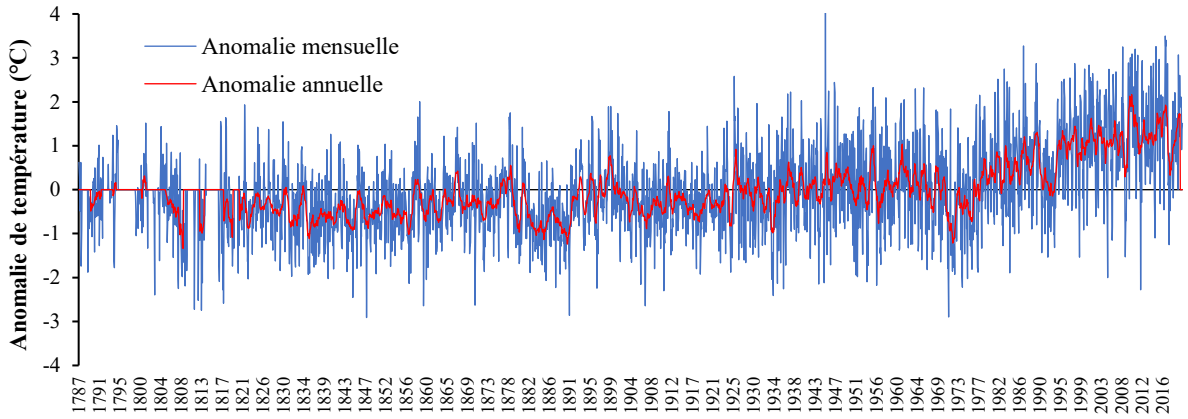


Figure 2 : Tendances des anomalies des températures au Maroc pour la période 1787 – 2020. (Source : *Berkeley Earth's Global Temperature Report,* 2022)

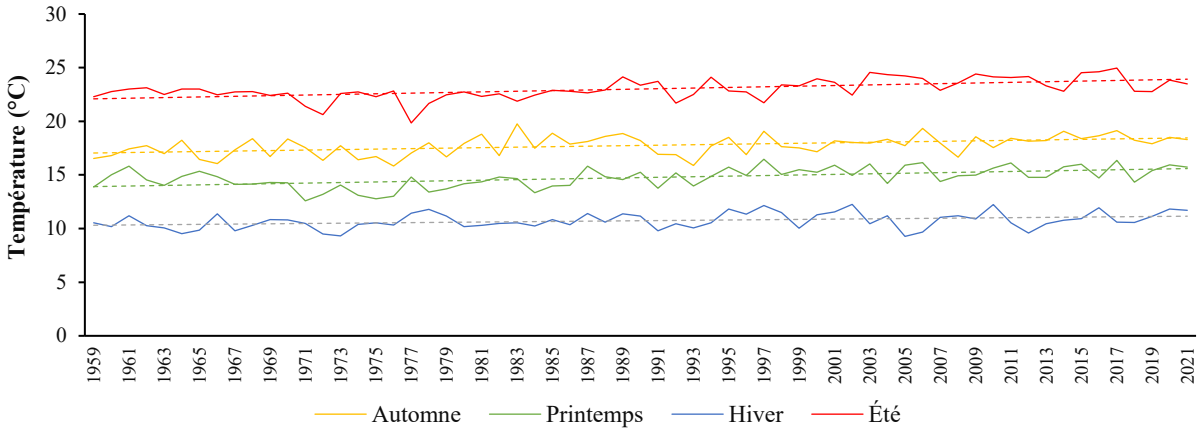


Figure 3: Évolution des températures moyennes saisonnières au Maroc. (Source : CS3 climate data store, 2022)

Cependant, la détection des tendances pluviométriques statistiquement significatives n'est évidente que dans quelques régions (**Figure 1**) ; dans certaines régions, différents ensembles de données sur les précipitations observées ne sont pas en accord avec la direction des tendances pluviométriques (Panitz *et al.,* 2013 ; Sylla *et al.,* 2013). L'incertitude des tendances pluviométriques observées résulte d'un certain nombre de sources, notamment la forte variabilité interannuelle et décennale des précipitations, les différentes méthodologies utilisées pour élaborer les produits pluviométriques et le manque ou la mauvaise qualité des données des stations pluviométriques.

En général, les précipitations annuelles moyennes ont diminué sur la majeure partie du pays (Donat *et al.,* 2014a ; Ouatiki *et al.,* 2019 ; Salhi *et al.,* 2019 ; Belcaid, & El Ghini, 2020), avec un retour progressif à des conditions normales ou plus humides au Maroc depuis 2008 (Nouaceur & Murărescu, 2016). Depuis les années 1960, les jours avec plus de 10 mm de précipitations ont diminué et le nombre de jours secs consécutifs a augmenté dans les parties occidentales de l'Afrique du Nord et les fortes pluies et inondations ont augmenté (Donat *et al.,* 2014). À l'échelle nationale, le déclin du cumul des précipitations durant la saison humide (septembre à avril) est estimé en moyenne à -26% entre 1961 et 2005 (Driouech & Mokssit, 2010). La diminution est plus marquée en fin de saison (février à avril), tandis que la tendance serait plutôt à la hausse en début de saison mais cette dernière évolution n'est pas significative sur le plan statistique. En même temps, la sécheresse semble devenir plus persistante en fin de saison pluvieuse, avec un allongement d'environ 13 jours de la période maximale de jours consécutifs secs.

Une étude récente (Filahi *et al.,* 2016) basée sur les données de 20 stations météorologiques couvrant la période 1970 à 2012 illustre le caractère très hétérogène des changements de précipitations. La majorité des stations montre une diminution des précipitations annuelles, notamment au Nord-Ouest, où se trouvent les plus grands barrages (**Figure 4**).

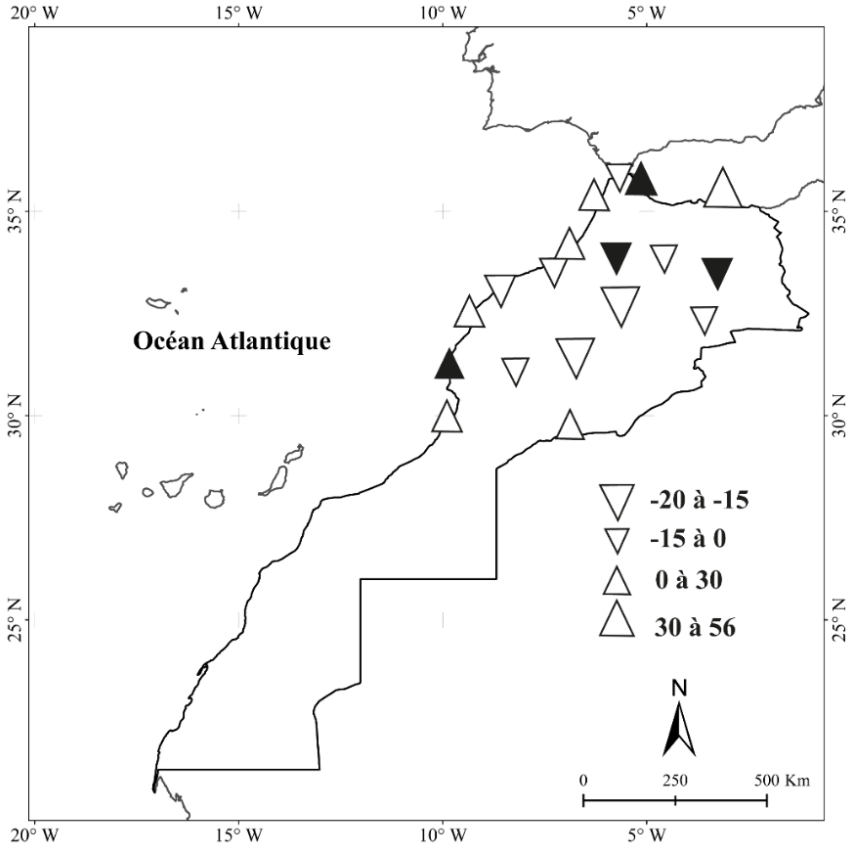


Figure 4 : Tendances des précipitations totales(mm/décennie) entre 1970 et 2012. Les triangles vers le haut (le bas) représentent une augmentation (diminution). Les triangles noirs correspondent aux tendances significatives. (Source : Filahi *et al.,* 2016)

III. Effets sur l'agriculture

Au Maroc l'agriculture est le principal secteur économique, employant environ 60% de la population et contribuant à environ 13% ou plus du produit intérieur brut (PIB) comme la plupart des pays d'Afrique du Nord (Harbouze *et al.,* 2019). Ainsi, l'agriculture contribue au développement en tant qu'activité économique, en tant que moyen de subsistance et en tant que fournisseur de services écosystémiques (World Bank, 2017). Ce secteur est également chargé d'assurer la sécurité alimentaire pour les populations rurales et urbaines (Mrabet, 2007). On s'attend à ce que les changements actuels et futurs prévus dans les conditions climatiques aient des effets profonds sur le secteur agricole, affectant ainsi la disponibilité d'aliments bon marché et de haute qualité.

En effet, le Maroc est un pays qui est très vulnérable aux changements climatiques et l'augmentation de la température affectera et modifiera l'intensité des précipitations, les taux d'évaporation, le ruissellement et le stockage de l'humidité du sol (Milly, 1994), ce qui affectera négativement les rendements des cultures. L'augmentation de la température et de la sécheresse

stressera les cultures en limitant la transpiration en entraînant une augmentation de la température des plantes, ce qui affectera la floraison, la pollinisation et le développement des grains des cultures les plus sensibles aux conditions de stress hydrique et thermique. Ces cultures comprennent le blé, l'orge, l'arachide, le maïs et les arbres fruitiers (Korres *et al.,* 2016 ; Moore *et al.,* 2021). En effet, dans des conditions de sécheresse intense et prolongée, certaines régions peuvent devenir non adéquates aux activités agricoles. Cela entraînera une réduction des terres agricoles et/ou une réduction de la durée de la saison de croissance, ainsi que l'arrêt de la production de certaines cultures vivrières et des pénuries alimentaires (Collier *et al.,* 2008), et la recherche d'autres cultures vivrières alternatives. Selon El Kenawy *et al*., (2016), la baisse attendue des précipitations au Maroc transformera les terres en zones semi-arides et arides. Une étude faite par Amiri *et al.,* (2021), d'évaluation de la relation entre les rendements céréaliers et les consommations avec un scénario moyen d'augmentation des émissions mondiales d'ici 2034, a révélé que la production des céréales diminuera avec l'augmentation de la température et la diminution précipitations, ce qui pourrait ne pas satisfaire la population croissante.

IV. Effets sur les ressources en eau

Les changements climatiques ont des effets significatifs sur le débit des cours d'eau et les masses d'eau au Maroc. En général, ces effets se manifestent par une augmentation de la variabilité du débit, une diminution de la disponibilité des ressources en eau, une augmentation des événements extrêmes (sécheresses et inondations) et une augmentation de l'acidification et de la salinisation des eaux (Ladouki *et al.,* 2008). Les ressources en eau superficielle sur l'ensemble du pays sont évaluées en année moyenne à 18 milliards de m^3, fluctuant selon les années de 5 à 50 milliards de m^3 (Bouaicha, & Benabdelfadel, 2010). La grande disparité régionale des précipitations induit donc une grande variabilité spatiale des écoulements d'eau de surface. Les quatre bassins hydrauliques du Nord-Ouest et de Sebou qui couvrent 7,4 % de la superficie de pays, produisent 51 % des ressources en eau de surface (**Figure 5**).

La hausse des températures et la diminution des volumes de précipitations devraient réduire la recharge actuelle et future de nombreux fleuves et cours d'eau au Maroc (Mahe *et al.,* 2013) en raison de l'augmentation de l'évaporation, qui affectera de nombreux systèmes d'irrigation. De nombreux cours d'eau au Maroc sont éphémères, coulant pendant et peu après la saison des pluies. Une baisse des précipitations accompagnée de conditions de sécheresse prolongées fera baisser les niveaux d'eau dans les réservoirs, les lacs et les étangs, augmentera l'épuisement des eaux souterraines par évapotranspiration, affectant ainsi la qualité de l'eau (par exemple, concentration en sel, augmentation de la température de l'eau, pH de l'oxygène dissous, turbidité) et contribuant à l'affaissement des terres (Ladouki *et al.,* 2008). La baisse de la disponibilité de l'eau affectera les activités d'irrigation, non seulement en raison de la demande accrue d'eau domestique et d'irrigation, mais aussi de la concurrence accrue entre l'agriculture et les demandes urbaines, ainsi

que les utilisateurs industriels (GIEC & Pachauri, 2014). Actuellement, un tier des habitants des zones rurales au Maroc n'ont pas accès à l'eau potable propre et salubre (Simms et al., 2005), et le changement climatique va aggraver le problème. Par exemple, la sécheresse devrait présenter d'importants problèmes d'eau en raison des fluctuations périodiques des débits de l'Oued Sebou et Bouregreg (Mahe *et al.,* 2013). De même, des études ont montré à la fois des changements à long terme et des fluctuations rapides des niveaux d'eau des lacs du Moyen Atlas (Adallal *et al.,* 2019 ; Hamdani, & Baali, 2020) et des débits réduits des Oueds en raison de la variabilité des précipitations, ce qui présente des défis pour les activités d'irrigation et d'autres projets dépendants de l'eau (Kessabi *et al.,* 2022). La diminution de l'eau causée par la diminution des précipitations et l'augmentation de la température entraînera des impacts économiques telles que les pénuries d'eau, la faible production agricole et la production hydroélectrique variable (Orindi & Murray 2005).

En général, les effets du changement climatique sur les ressources en eau marocaines sont amplifiés par la croissance rapide de la population, l'urbanisation, l'augmentation de l'agriculture irriguée, la surexploitation des eaux souterraines et la dégradation des bassins versants.

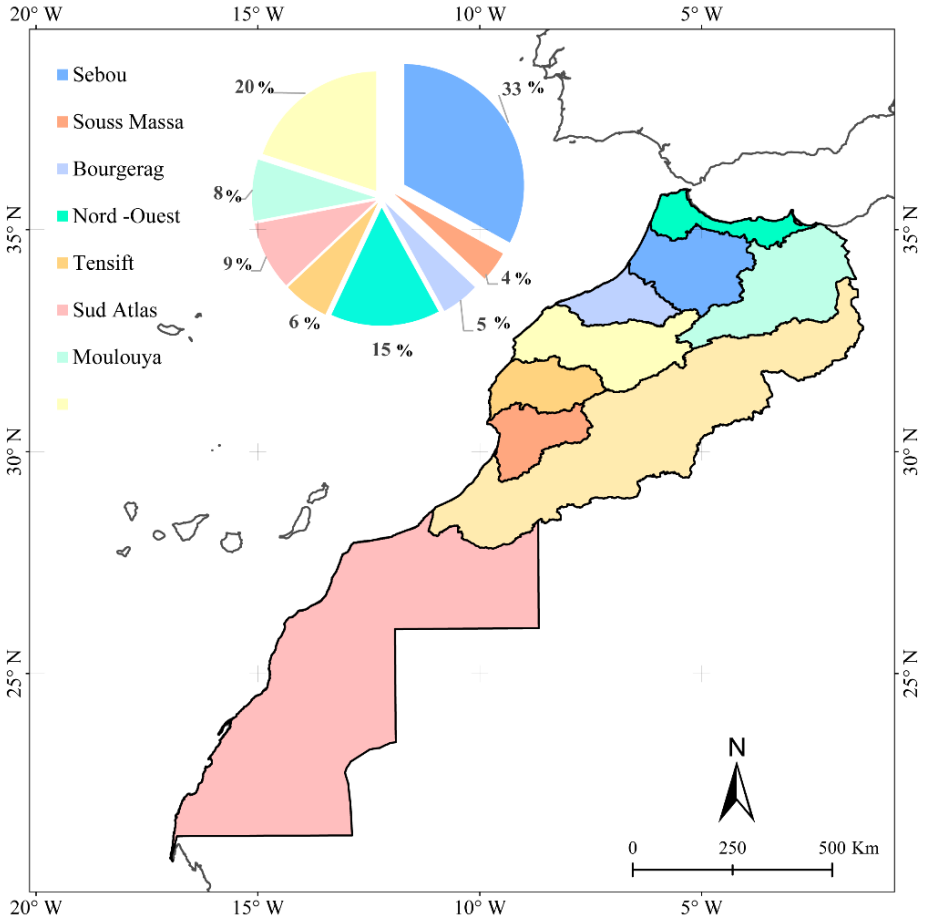


Figure 5: Répartition des ressources en eau de surface mobilisable. (Source : ABHS, 2022)

V. Effets sur les infrastructures

Le changement climatique a des impacts sur les infrastructures, qui peuvent être endommagées ou détruites en raison de phénomènes météorologiques extrêmes tels que des inondations, des glissements de terrain ou des tempêtes de vent. Les preuves scientifiques montrent que ces événements météorologiques extrêmes deviennent plus fréquents en raison des émissions de gaz à effet de serre causées par l'activité humaine (Furniss *et al.,* 2019).

Les impacts du changement climatique sur les infrastructures au Maroc sont importants et peuvent inclure des perturbations dans les réseaux de transport et des dommages aux bâtiments, aux ponts et aux barrages, ainsi que des risques pour la sécurité des personnes (HCP, 2021). Les infrastructures d'approvisionnement en eau sont également gravement affectées par le changement climatique, avec des pénuries d'eau dans certaines régions et des problèmes de qualité de l'eau. En outre, les infrastructures sont souvent conçues en fonction des conditions climatiques passées, ce qui peut les rendre mal adaptées aux conditions climatiques futures. Par exemple, les canaux d'irrigation peuvent être conçus pour des niveaux d'eau qui ne correspondent plus aux niveaux réels en raison des changements climatiques (Liverani *et al.,* 2013).

Le Maroc a entrepris des efforts pour renforcer les infrastructures contre les impacts du changement climatique, notamment en améliorant la résistance des ponts, des routes et des barrages aux inondations et aux glissements de terrain (HCP, 2021). Le pays a également lancé des projets de construction de nouvelles infrastructures, telles que des stations de traitement de l'eau, qui visent à améliorer l'approvisionnement en eau et la qualité de l'eau (MAP, 2017).

Cependant, il reste encore beaucoup à faire pour protéger les infrastructures du Maroc contre les impacts du changement climatique. Les autorités doivent continuer à renforcer la résilience des infrastructures existantes et intégrer les préoccupations liées au changement climatique dans la planification et la construction de nouvelles infrastructures. Il est également essentiel de sensibiliser davantage le public aux risques associés aux impacts du changement climatique sur les infrastructures et de renforcer la capacité des communautés à faire face à ces risques.

VI. Effets sur la biodiversité

Le Maroc est un pays qui est déjà vulnérable aux changements climatiques en raison de sa géographie et de sa dépendance à l'agriculture. Ces changements, et en particulier l'élévation des températures, ont une incidence sur les périodes de reproduction et/ou la migration de certaines espèces, la durée des phases de croissance, la fréquence des infestations parasitaires et l'apparition de nouvelles maladies (Perez, 2007). Les changements prévus risquent donc d'engendrer des modifications de la répartition des espèces et des densités de populations, par un déplacement des

habitats (e.g. migration vers le pôle ou en altitude pour les espèces à affinités froides). Ainsi un changement dans la composition de la majorité des écosystèmes actuels est probable. De même les risques d'extinction d'espèces, et en particulier celles déjà vulnérables, sont de nature à augmenter significativement, en particulier pour les espèces dont l'aire de répartition climatique est restreinte, celles qui ont des besoins très spécifiques en matière d'habitat et/ou les petites populations naturellement plus vulnérables face à une modification de leurs habitats (Perez, 2007). Enfin l'introduction de nouvelles espèces exotiques pourrait être facilitée, phénomène dont les conséquences à long terme sont difficiles à prévoir (Guenette *et al.,* 2010).

Les preuves scientifiques montrent que les espèces animales et végétales au Maroc sont affectées par les changements de température, de précipitation et d'humidité, ce qui peut entraîner des changements dans les habitats naturels et les interactions entre les espèces (IPCC, 2007 ; Aoubouazza *et al.,* 2013). Les écosystèmes naturels telles que les forêts, les montagnes et les zones humides sont particulièrement vulnérables aux impacts du changement climatique au Maroc. Des études ont montré que les changements climatiques ont entraîné une diminution de la diversité des espèces dans certaines zones et une modification de la composition des écosystèmes (Heller & Zavaleta, 2009). Par exemple, les changements dans les régimes de précipitation ont entraîné une réduction de la couverture forestière dans certaines régions (Hammi *et al.,* 2007), tandis que les températures plus élevées ont favorisé l'apparition de nouvelles espèces de plantes dans d'autres zones (Perez, 2007).

Directement ou indirectement, l'élévation du niveau de la mer, le réchauffement et la modification du régime des précipitations devraient grandement modifier les écosystèmes côtiers et plus largement l'écosystème au Maroc : les espèces forestières les moins tolérantes à ces changements devraient connaître des modifications de leurs aires de répartition avec un déplacement vers le Nord de leurs limites latitudinales (Moukrim *et al.,* 2022). Les ripisylves et les marais sont appelées à se réduire avec des menaces de disparition de la biodiversité qui leur est inféodée (Lefebvre *et al.,* 2019 ; Nogueira *et al.,* 2022). Les agrosystèmes sont également menacés par les évènements climatiques imprévisibles dont la fréquence est appelée à augmenter et la tendance au déficit hydrique et des ressources en eau de manière plus générale (Tabet-Aoul, 2008 ; Boselli *et al.,* 2020 ; Ait-El-Mokhtar *et al.,* 2022). Sur un plan plus strictement côtier, les zones humides littorales et les embouchures de cours d'eau seront également affectées par l'élévation du niveau de la mer : en fonction de leur configuration elles auront tendance soit à se restreindre soit à se replier vers l'intérieur (Tekken *et al.,* 2009). Les côtes meubles auront également tendance à reculer ou alors à disparaître sous l'effet de l'érosion découlant de l'élévation accélérée du niveau de la mer (Snoussi, 2009 ; Kasmi *et al.,* 2020). Lors de cette phase transitoire d'élévation accélérée du niveau de la mer, les organismes les moins mobiles seront les plus lourdement impactés. À l'opposé les organismes mobiles, notamment les poissons et les oiseaux d'eau devraient pouvoir s'adapter. Les aspects liés à la résistance et la résilience des écosystèmes, des habitats et des espèces

demeurent pour la plupart peu connus (Bazairi *et al.,* 2009).

Pour faire face aux impacts du changement climatique sur la biodiversité, le Maroc a déployé plusieurs efforts pour promouvoir la conservation des espèces et des écosystèmes, notamment la création du Parc national de Toubkal en 1942 pour préserver la biodiversité montagnarde et la réintroduction du bouquetin dans les montagnes de l'Atlas, la promotion de l'agriculture biologique, le lancement du Plan national de la biodiversité en 2016, qui vise à protéger la biodiversité du Maroc et à promouvoir son utilisation durable. La mise en œuvre de projets de conservation pour les espèces menacées, tel que le projet de réintroduction du gazelle dorcas et du mouflon à manchettes dans leurs habitats naturels. En outre, le Maroc s'est engagé à atteindre les objectifs de l'Agenda 2030 pour le développement durable, qui comprennent la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité.

VII. Conclusion

La lutte contre les changements climatiques est devenue l'une des priorités nationales que les responsables devraient les intégrer dans les stratégies et les projets nationaux. Avec la démographie croissante, le Maroc en voie de développement a déjà mis en œuvre le plan du développement durable et le plan du Maroc vert qui devraient être intégrés dans un grand projet général de lutte contre les changements climatiques et leurs impacts en tenant compte de la particularité de chaque région pour assurer la protection des écosystèmes et le maintien de la biodiversité. Il s'agit en fait d'une politique ciblant à la fois l'hydrologie, l'hydrographie, les écosystèmes, les sols, les agrosystèmes, les ressources biologiques et les espèces du monde animal et végétal au sein des états d'occupation des sols actuels.

CHAPITRE II

PRESENTATION DU BASSIN BAS SEBOU

I. Localisation et justification du choix de bassin Bas Sebou 27
II. Aspects socio-économiques 28
III. Cadre naturel 29
III . 1. Géomorphologie 29
III . 2. Cadre géologique 39
III . 3. Principaux types de sol 54
III . 4. Principales formations végétales 55
III . 5. Agriculture 60
III . 6. Aménagements agricoles dans le bassin Bas Sebou 61
IV. Aspect climatique 62
IV . 1. Types de temps 62
IV . 2. Éléments du climat 72
V. Régimes hydrologiques 79
VI. Hydrogéologie 86
VII. Banque des données 92
VII . 1. Données météorologiques 92
VII . 2. Données de réanalyses 93
VII . 3. Vérification et contrôle des données météorologiques 95
VII . 4. Analyse critique des données météorologiques 96
VII . 5. Données liées aux interactions Océan-atmosphère à grande échelle (données de réanalyse) 102
VII . 6. Données agronomiques 104
VII . 7. Données satellitaires 104
VIII. Conclusion 108

PRESENTATION DU BASSIN BAS SEBOU

L'objectif de ce chapitre est de présenter le Bassin du Bas Sebou, un important bassin versant situé au Nord-Ouest du Maroc. Ce bassin joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau, l'agriculture, la production d'énergie hydroélectrique et la biodiversité de la région. En effet, le bassin du Bas Sebou couvre une superficie de plus de 7900 Km^2 et abrite plusieurs villes importantes telles Kénitra, Sidi Kacem et Sidi Slimane. Le régime hydrologique du bassin est influencé par le climat méditerranéen, qui se caractérise par des hivers humides et des étés secs. Cependant, le bassin Bas Sebou est confronté à plusieurs défis, notamment la dégradation de la qualité de l'eau, la surexploitation des ressources en eau et la perte de la biodiversité. Dans ce chapitre, nous examinerons les caractéristiques géographiques et hydrologiques du bassin du Bas Sebou.

Après avoir décrit la zone d'étude, il est nécessaire d'établir une base de données spatio-temporelles numériques pour une gestion efficace des informations géospatiales-temporelles. Cela implique la collecte, la compilation, la vérification, la numérisation et l'organisation des données spatiales provenant de différentes sources pour créer une base de données centralisée et cohérente. Ensuite, les données collectées ont été vérifiées afin d'assurer leur qualité et leur précision. Les données peuvent être vérifiées en comparant les informations avec d'autres sources ou en effectuant des relevés sur le terrain. Les données ont été ensuite numérisées et stockées dans une base de données géoréférencées, avec des métadonnées pour faciliter la recherche et la récupération des informations.



I. Localisation et justification du choix de bassin Bas Sebou

Le bassin Bas Sebou constitue la partie la plus avale du bassin versant du Sebou, situé au Nord-Ouest du pays, entre les latitudes 33°76'N et 35°03'N et les longitudes 5°59'W et 6°75'W avec une superficie de 7900 Km^2 (**Figure 6**). Il est limité au Nord par le bassin versant de Loukous, à l'Est par les collines prérifaines, au Sud par le bord de la Meseta marocaine (Maamora) et à l'Ouest par l'Océan Atlantique.

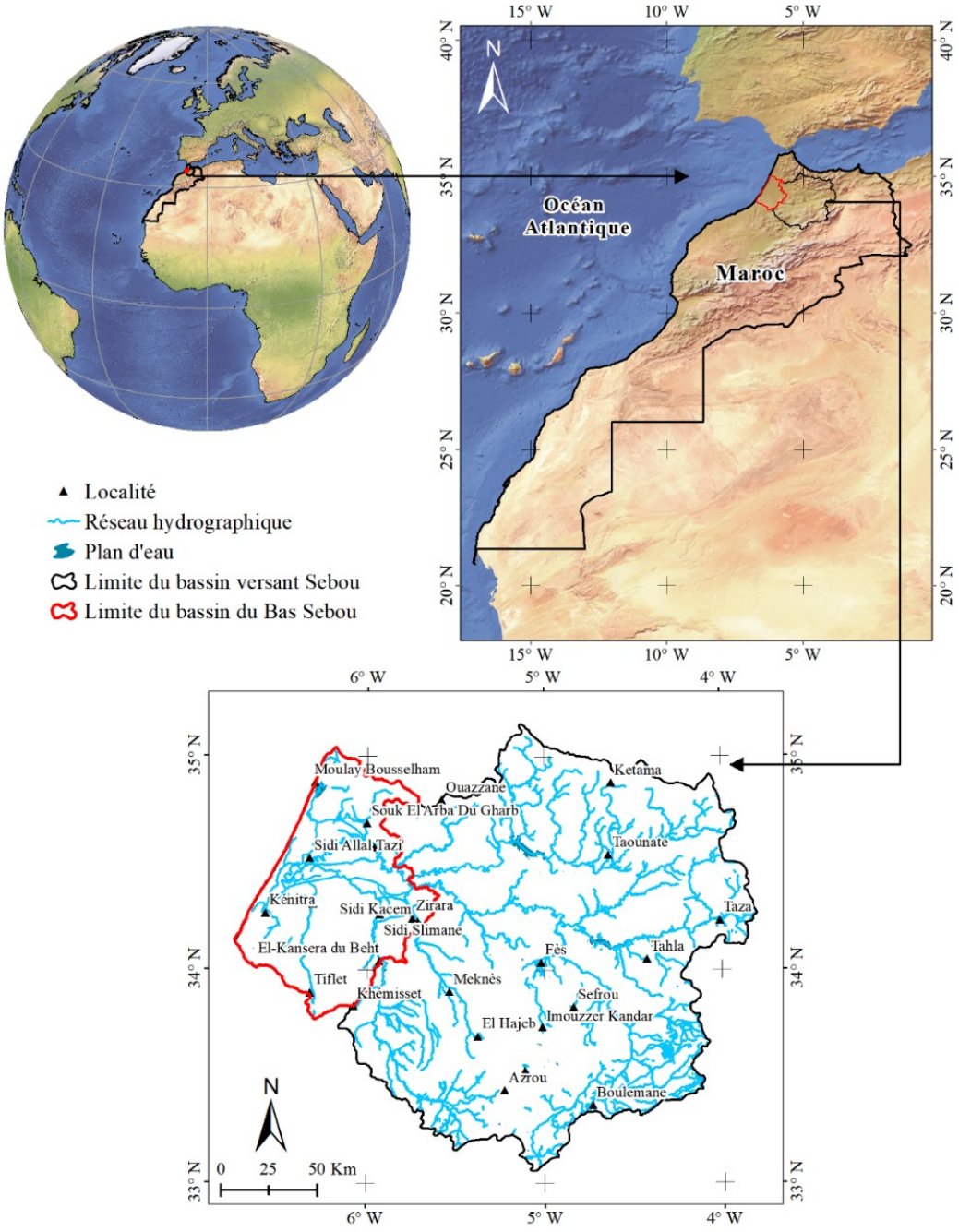


Figure 6: Localisation géographique du bassin Bas Sebou.

Depuis plusieurs décennies, le bassin Bas Sebou connait de nombreuses mutations liées aux effets négatifs du changement climatique, les températures moyennes ont connu une augmentation estimée à plus de 1°C avec une tendance accentuée pendant les 40 dernières années et les précipitations ont suivi une tendance générale à la baisse, avec des régimes de plus en plus irréguliers. Ces changements devraient s'amplifier au cours des prochaines décennies (World Bank, 2020a). Outre la variation de pluies d'une année sur l'autre, celles-ci sont mal réparties dans le temps et dans l'espace, causant de mauvaises récoltes et parfois des inondations. La saison des pluies se raccourcit peu à peu et ne dure aujourd'hui que 3 à 4 mois, avec une croissance végétative effective seulement sur les mois de printemps. Un nouveau type de pression semble possible, à savoir l'exacerbation d'épisodes violents de pluie. Cela signifie que même si la quantité de précipitations qui tombe chaque année diminue, chaque épisode de pluie peut être plus courte et plus intense que par le passé, provoquant de graves inondations avec de graves dommages aux infrastructures et à l'agriculture qui constitue la principale activité économique de la région. En effet, le secteur agricole, du fait de sa place prépondérante dans l'utilisation des ressources hydriques, sera le secteur le plus menacé par la baisse prévue des précipitations, tant pour les cultures pluviales que pour les cultures irriguées.

Au-delà de ce contexte agro-climatique difficile, un autre critère primordial nous est très vite apparu, manifesté par la création de l'un des plus grandes zones industrielles du pays, lancée en 2012 à Sidi Yahia El-Gharb sous le nom d'Atlantic Free Zone. D'une superficie globale de 345 hectares, Atlantic Free Zone est dédiée principalement au secteur automobile et électronique avec un potentiel humaine près de 21000 salariés. Ce qui explique en grande partie la forte prévalence des populations locales aux migrations saisonnières comme définitives, notamment des jeunes, ce qui pourrait à son tour affecter l'activité agricole, qui dépend principalement de la population de la région. C'est donc pour toutes ces raisons agro-climatiques et socio-économiques de ce territoire que nous avons décidé de sélectionner comme zone d'étude.

II. Aspects socio-économiques

II . 1. Population

Le bassin Bas Sebou compte plus de 1 211 372 habitants dont 691 706 ruraux, soit 56 % de la population. Cette population se répartie dans deux villes principales, Kenitra et Sidi Kacem (chefs-lieux de leurs provinces respectives) et plus de 1000 douars. Sur le plan humain, le bassin Bas Sebou est caractérisé par une population jeune (32,4% de la population est âgé de moins de 15 ans). Celle-ci constituera, à moyen terme, la population active potentielle (HCP, 2013).

La population est répartie en trois grandes catégories, vis-à-vis de l'activité économique : les actifs occupés, les chômeurs et les inactifs. Reflétant en fait le déséquilibre économique entre les grands centres urbains à forte densité d'habitants et les autres régions rurales.

La structure de l'emploi selon les secteurs d'activité fait apparaître la prédominance de l'agriculture en matière de création d'emplois dans la région (55,2 %) et l'importance montante des services (31,1%) (HCP, 2013). Le secteur agricole constitue l'un des atouts majeurs de l'activité économique de la population, mais il reste très vulnérable aux aléas climatiques. L'exode est une des caractéristiques de la géographique humaine du bassin Bas Sebou.

II . 2. Économie

Sur le plan économique, le bassin Bas Sebou dispose de potentialités diversifiées qui peuvent être mobilisées pour un développement économique et social. Au niveau agricole, le secteur jouit d'une gamme variée de sols à haute qualité, de ressources abondantes en eau, de la disponibilité de la main d'œuvre et de la proximité de l'Europe et des grands centres de consommation. Tous ces facteurs font de l'agriculture la première branche d'activité dans la région.

L'industrie, bénéficie d'atouts importants pouvant aider au développement du secteur, notamment celui de l'industrie de transformation. Parmi ces atouts, l'existence d'une infrastructure variée (port, zones industrielles...) renforcée par une desserte ferroviaire à double voie et un réseau routier très dense. S'ajouter à cela, une gamme très variée de produits agricoles qui servent de matières premières pour les unités de l'agro-industrie.

III. Cadre naturel

III . 1. Géomorphologie

L'évolution morpho-structurale pendant le Plio-quaternaire du bassin Bas Sebou est à l'origine de sa subdivision en trois grandes régions. La plaine centrale d'une planéité presque complète, les bordures continentales (Haut-Gharb, Pays Cherarda et Maamora) où juxtaposent en proportions variables les vallées et terrasses, les surfaces planes du Quaternaire ancien qui prédominent à Maamora, les collines de couleur rouge aux formes structurales répandues dans le Haut-Gharb et le Pays Cherarda, et la bordure littorale (le Sahel) où se relaient les alignements dunaires de Quaternaire récent.

III . 1. a. Plaine centrale

La plaine apparait comme une cuvette sans relief à pentes généralement douces inclinées vers son centre, avec une élévation entre 4 et 25 m. Elle est sillonnée par les entailles du cours de l'Oued Sebou qui pendant les crues hivernales entraine la formation de marais temporaires.

Les dépôts fluviatiles actuels ou subactuels de nature silteuse s'étalent tout au long des lits des Oueds. D'ailleurs, les formations soltaniennes et rharbiennes constituent le fond argileux de la plaine (Aberkan, 1989 ; Cirac, 1985). Toutefois, dans les dépressions, les formations récentes sont

recouvertes de dépôts argileux jaunes provenant des crues des Oueds.

Un certain nombre d'unités géomorphologiques peut être distinguées dans cette plaine :

- dépressions (Merja) qui sont des plaines d'inondations devenant en hiver des marécages avant leur assainissement (1930-1960) ;
- plaine plate à altitude légèrement plus élevée ;
- zones des levées naturelles tout le long des principaux Oueds ;
- glacis du Zrar qui s'élève en pente douce vers le Sud-Est.

Les principaux Oueds coulent entre des levées naturelles de nature limoneuse, à une altitude supérieure à l'ensemble de la plaine, de sorte que les affluents du cours inférieur de l'Oued Sebou (Beht, R'Dom, Tiflet, etc…) ne pouvant percer ce bourrelet de berge, parviennent difficilement à le joindre apprès avoir creusé des lits artificiels (canaux d'assainissement pour l'irrigation).

Le régime hydrique des Oueds suit les irrégularités saisonnières de la pluviosité, si bien que les débits de crues conjointes atteignent jusqu'à 3500 m^3/s et provoquent la submersion d'un maximum de 135.000 ha (10 mars 2010) (**Figure 7**) (ABHS, 2010b). Depuis 1933, il y a eu 44 crues d'importance variable causant d'importants dégâts aux cultures, cheptels mais aussi infrastructures. Les débordements s'effectuent par des chenaux d'inondation à l'amont du rétrécissement du lit majeur du côté de la berge la plus basse, vers les Merjas qui fonctionnent comme des plaines d'inondation.

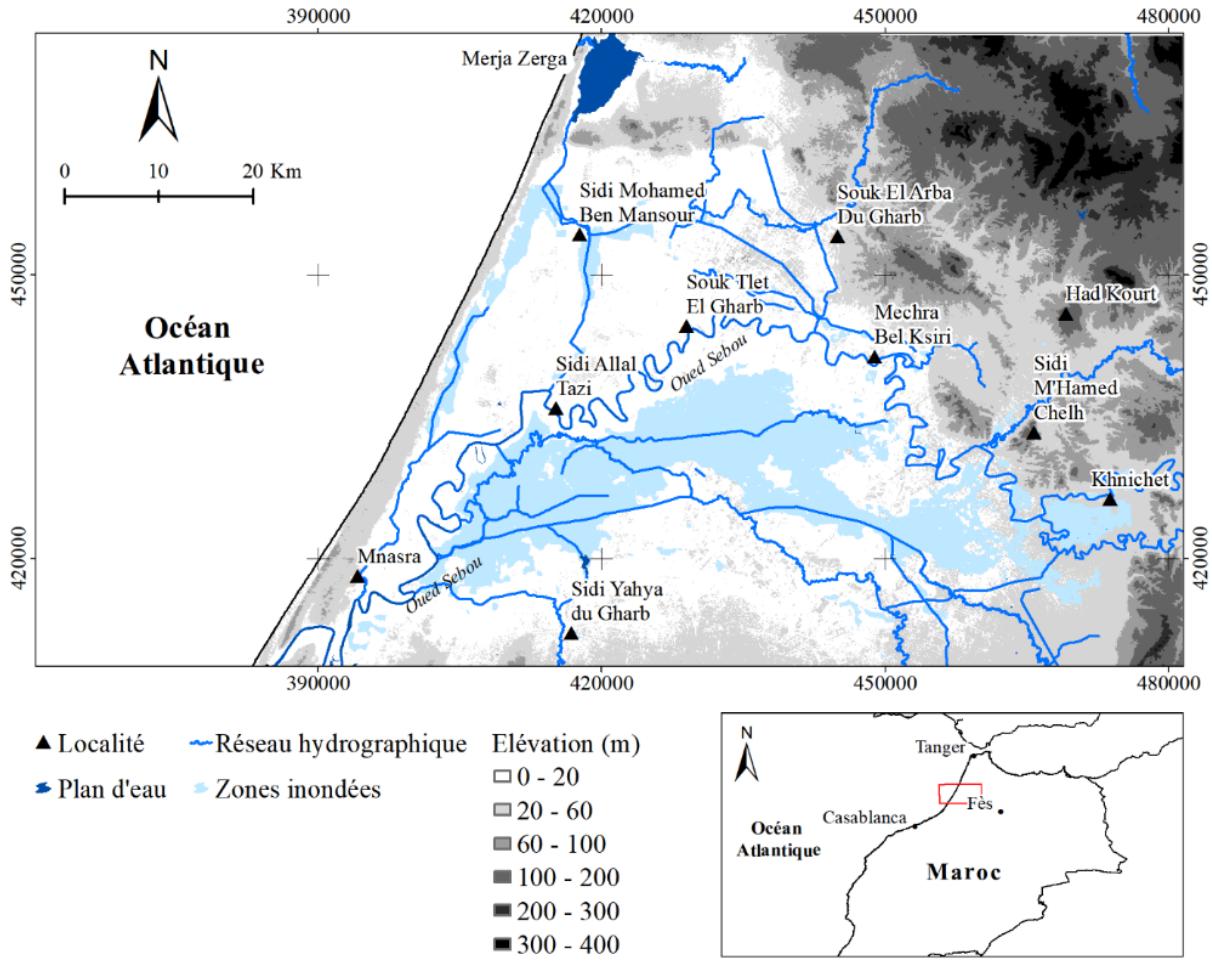


Figure 7: Carte des zones inondables inondations de la plaine centrale du bassin Bas Sebou, 10 mars 2010. (Source : CRTS, 2010)

III . 1. b. Littoral (SAHEL)

Le Sahel est la frange littorale, large de quelques kilomètres, où affluent les sables d'origine marine (Bouya, *et al.,* 2011). Vers la mer, il est limité par une côte remarquable par son tracé rectiligne et s'ennoie sous des sols de type *Tirs* de la plaine.

En général, le Sahel comporte deux types de paysages :

- plage sableuse bordée par un cordon de dunes vives ;
- plaine sableuse principalement dans le secteur central (vers l'intérieur).

Il est difficile de reconstituer la chronologie de la formation du Sahel en raison de l'absence de tout dépôt de plage postérieur au Calabrien (lumachelles de Lalla Zahra et du Fouarat) et la rareté des industries préhistoriques (Le Coz, 1964). Les critères d'identification et de détermination de ces complexes dunaires dont les principaux sont le principe de la superposition, la position des niveaux pédologiques et la structure sédimentaire des dépôts sachant que plusieurs facteurs

interfèrent dans leur mise en place (effets marins, éoliens et pédologiques). Les dunes s'agencent en cordons dunaires parallèles aux traits moyens de la mer, dans les zones à caractères morphologiques identiques, de plus en plus anciens vers le continent.

La coupe dans le Sahel entre Kénitra et Mehdia (**Figure 8**), montre quatre séries dunaires : dune blanche ou vive, dune grise, complexe dunaire moyen à intercalations de sols rouges relativement consolidés, complexe dunaire ancien à sols rougeâtres très consolidés (Ionesco, 1957).

- La dune blanche est formée de sables mobiles.
- La dune grise constituée principalement de sable d'une couleur sombre, brunâtre ou gris foncé recouverte par un matorral à genévrier rouge. En effet, la coloration témoin du degré de la pédogenèse permet de distinguer les deux séries dunaires et attribuer un âge rharbien ou mieux mellahien.
- Le complexe dunaire moyen est reconnu par la friabilité des bancs gréseux et la couleur rouge des sols intercalaires et supérieurs attribués au Soltanien (fini-Wurm) ou à la régression post-oulijienne.
- Le complexe dunaire ancien se distingue surtout par la forte consolidation de certaines couches gréseuses (**Figure 8**). L'un de ces éléments appelé niveau supérieur sur la rive droite du Sebou, montre la succession suivante (Le Coz, 1964) : à la base un sable gris jaunâtre avec des couches gréseuses passant progressivement à une brèche épaisse se terminant par une croûte et décomposée souvent en lapiès à colonnes remplis par un sol sablo-argileux très rouge parfois consolidé puis une brèche épaisse (0.5 à 0.80 m), de couleur rosâtre moins consolidée, avec des lapiès à colonnes remplis de sable jaune recouvrant le tout.

La disposition des quatre séries dunaires varie sensiblement du Sud au Nord du bassin Bas Sebou et la subsidence qui est à l'origine de la formation de la plaine se traduit dans le littoral (Sahel) par une organisation morphologique originale. Les alignements dunaires s'enfoncent progressivement vers l'axe de la cuvette (les plus anciennes remplacées par les plus récentes). Ce phénomène de relai et de recouvrement fait que le littoral est formé de matériaux de plus en plus jeunes à mesure qu'on se rapproche du centre de la plaine.

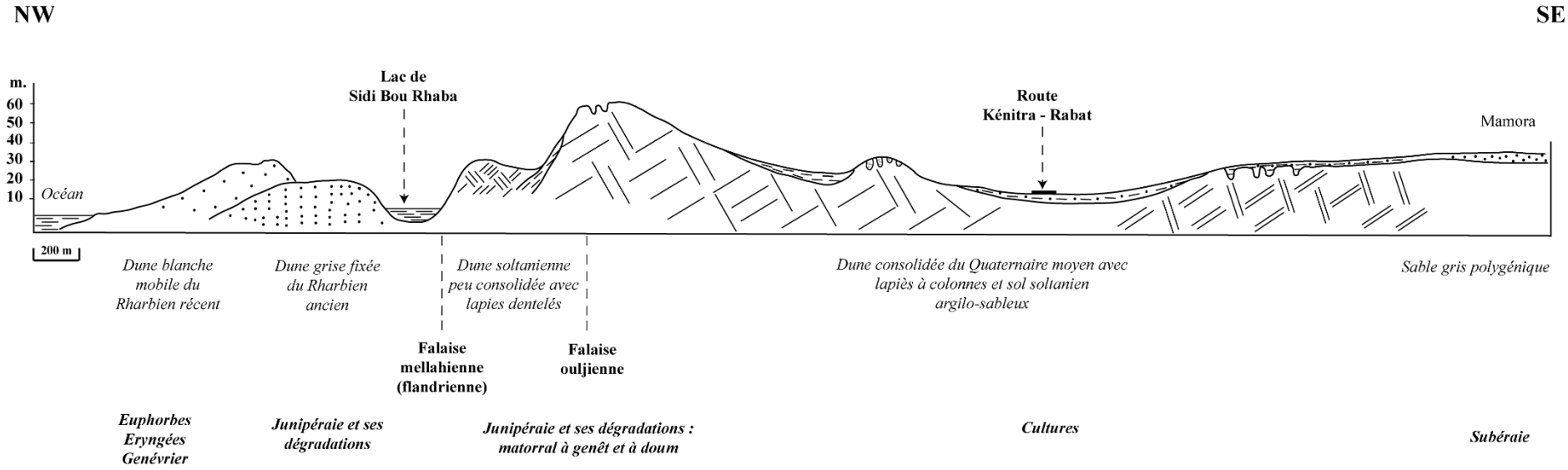


Figure 8: Disposition schématique des complexes dunaires du bassin Bas Sebou. (D'après Inesco, 1957)

III . 1. c. Bordures continentales

Les bordures du bassin Bas Sebou présentent une triple distinction entre le relief qui l'entoure, au Sud, dans la Maamora, le voisinage du socle de la Meseta est responsable d'une topographie calme, d'allure tabulaire et dont les seuls accidents sont les creux des vallées ou quelques ondulations dunaires. Au Nord, dans le Haut Gharb, l'influence rifaine introduit une grande diversité morphologique. À l'Est, pays Cherarda se trouve au contact des systèmes rifain et atlasique, ce qui lui vaut avec les rides prérifaines des reliefs qui simulent la montagne.

i. Haut Gharb

Le Haut Gharb forme un palier intermédiaire entre la partie centrale du bassin Bas Sebou formée d'accumulations des formations superficielles des plaines et le Rif où la tectonique a pu marquer une profonde sculpture par l'intermédiaire de l'érosion. Cette zone de transition contient des surfaces subhorizontales du Quaternaire ancien ou récent, des collines argileuses et la dentelure de crêtes qui annoncent la montagne voisine (**Figure 9**).

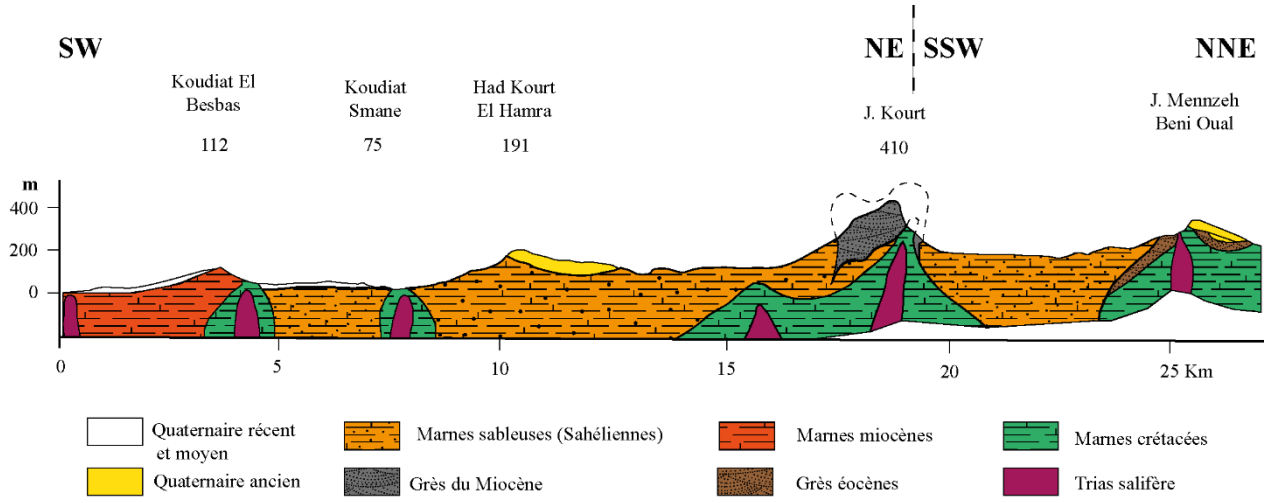


Figure 9: Coupe géologique à travers le Haut Gharb central et Had Kourt. (Source : Le Coz, 1964 d'après les documents de SCP)

Le substrat de la région est constitué par l'enchevêtrement des nappes prérifaines où les marnes et marno-calcaires secondaires (Crétacé) et tertiaires (Eocène, Miocène inférieur) sont percées de venues diapiriques du Trias. Les couches du Miocène supérieur, sédimentées dans de larges golfes, discordantes sur ce substrat, sont faites de marnes qui surmontent parfois des conglomérats.

Enfin, après des épisodes locaux de sédimentation pliocène, se sont épandues les nappes détritiques continentales villafranchiennes constituées de conglomérats épais siliceux d'origine

rifaine liés par des sables argileux. Les derniers mouvements tectoniques, post-villafranchiens ont ployé ces séries en vastes synclinaux généralement NW-SE (Le Coz, 1964).

L'érosion a également formé un pays de collines assez monotones dont les pentes convexes sont parfois démantelées par le ravinement et la solifluxion combinés. Les vallées sont largement développées, souvent bordées de niveaux d'érosion ou de remblaiement qui s'abaissent vers la plaine. Cependant, les flancs des synclinaux villafranchiens plus indurés ont mieux résisté et constituent des crêtes et formes monoclinales de Had-Kourt (**Figure 9**).

ii. Pays Cherarda

La partie orientale du bassin Bas Sebou constitue plus encore que la région de Had-Kourt un « *Haut-pays* ». Vue de la basse plaine voisine, la topographie prend des allures de petites montagnes (Tselfat) dont les altitudes dépassent 800 m (**Figure 10**). À l'intérieur de l'arc des rides prérifaines, les collines miocènes elles-mêmes donnent lieu à un paysage d'une plus grande ampleur qu'à Had-Kourt, avec des cotes supérieures et des vallées plus enfoncées. Cependant au milieu de ce relief, le plateau perché d'El Gaada annonce le Saïss et montre que le pays Cherarda est une zone de transition entre la plaine et les plateaux de la région Fès-Meknès (**Figure 11**). Ce caractère est encore souligné par certains aspects de l'érosion qui portent l'empreinte d'un climat à nuance déjà continentale (Le Coz, 1964).

III. Rides prérifaines du pays Cherarda

Le Pays Cherarda n'empiète que sur la partie septentrionale de des deux rides, avec d'une part de Taslaft et de l'autre part de Bou Draa (**Figure 10**).

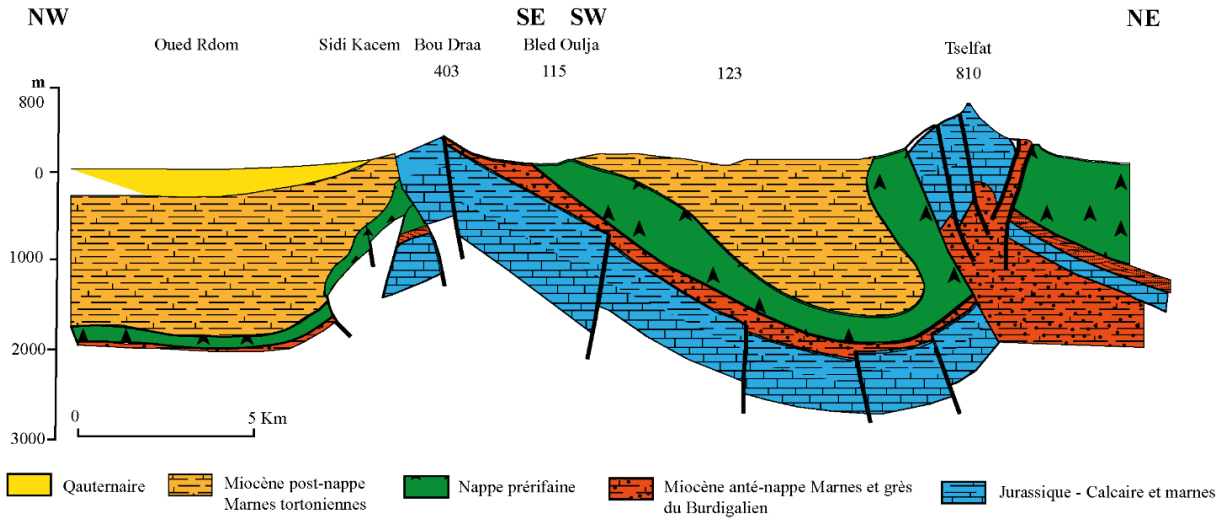


Figure 10: Coupes géologique à travers le pays Cherarda. (Source : Le Coz, 1964 d'après les documents de SCP)

La ride du Tselfat est beaucoup plus complexe ; selon Le Coz (1964) tout se passe comme si, au phénomène général du chevauchement vers l'extérieur de la virgation, s'était superposé un éclatement de la tête des plis allant jusqu'au renversement des éléments les plus internes sur l'arrière-pays. On peut voir également dans cette structure un véritable accident (diapir) ayant littéralement percé la nappe prérifaine. Levy & Tilloy, (1952) mettent des hypothèses sur la nature de ce phénomène complexe comme si un obstacle dans l'avant-pays immédiatement adjacent, l'intensité de la force tangentielle ayant appliqué les parties profondes du pli contre cet avant-pays.

La ride de Bou Drâa résulte d'une activité tectonique aussi complexe que le Tselfat, mais dans un style différent (**Figure 10**). Il consiste essentiellement en un pli faillé chevauchant vers l'Ouest par l'intermédiaire du Salifère. Il s'incline vers l'Est en pente douce dans les molasses helvétiennes qui empâtent les grès du Burdigalien. Au-dessus de la plaine la retombée est plus brutale, avec la répétition des corniches abruptes dans le Burdigalien faillé.

iv. Plateau d'El Gaada

Le plateau d'El Gaada est le reste d'une cuvette synclinale que l'érosion a perchée au-dessus des Oueds Rdom et Kroumane où les dépôts sont typiquement régréguiens (**Figure 11**). Ces faciès sont généralement constitués d'une croûte superficielle compacte en haut, des cailloux essentiellement gréseux ou calcaires et des silts calcaires reposant sur le Miocène (Le Coz, 1964).

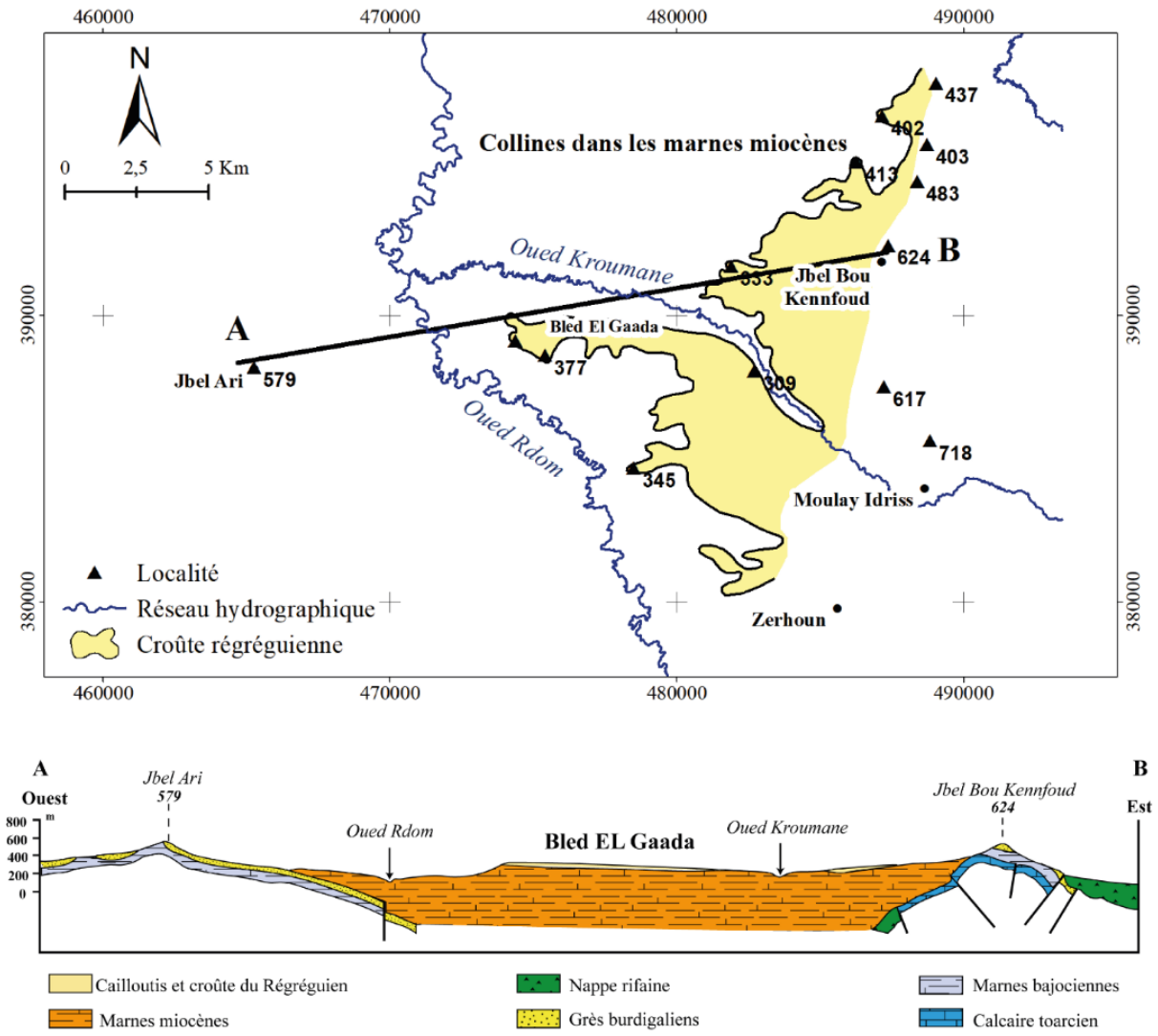


Figure 11: Coupe géologique à travers le plateau d'El Gaada. (D'après Le Coz., 1964)

La situation du pays Cherarda, à 100 km de la mer et dans les dépressions situées derrière les crêtes du Bou Draa au Sud de la ville de Sidi Kacem et du Jbel Haricha au Nord de la ville de Sidi Kacem lui confèrent un climat sec. Il s'agit d'une zone bien marquée par ses substrats topographiques, lithologiques et d'exposition permettant d'instaurer des formes d'érosion diverses et beaucoup plus approfondies.

v. Glacis du Zrar

Le mot de Zrar est l'altération du terme berbère Azarhar (bas-pays), qui désigne un ensemble de plateaux et de plaines compris entre le Beht et le Rdom (plaine du Gharb). Le Zrar est un plan incliné qui descend sur une dizaine de kilomètres en pente régulière coupée de quelques ondulations, du pied du Jbel Outita et des collines, à l'altitude de 130 m à 150 m, jusqu'aux bords de la route Sidi Slimane – Sidi Kacem (RN 4), vers 40 m (**Figure 12**). Il correspond au Quaternaire

très ancien (Régréguien) masqué par un sol épais (0.5 à 1 m parfois) argileux de couleur rougeâtre (*Hamri*). Contrastant avec la Maamora, c'est une région de grande culture où la céréaliculture et les vignobles constituent les cultures principales.

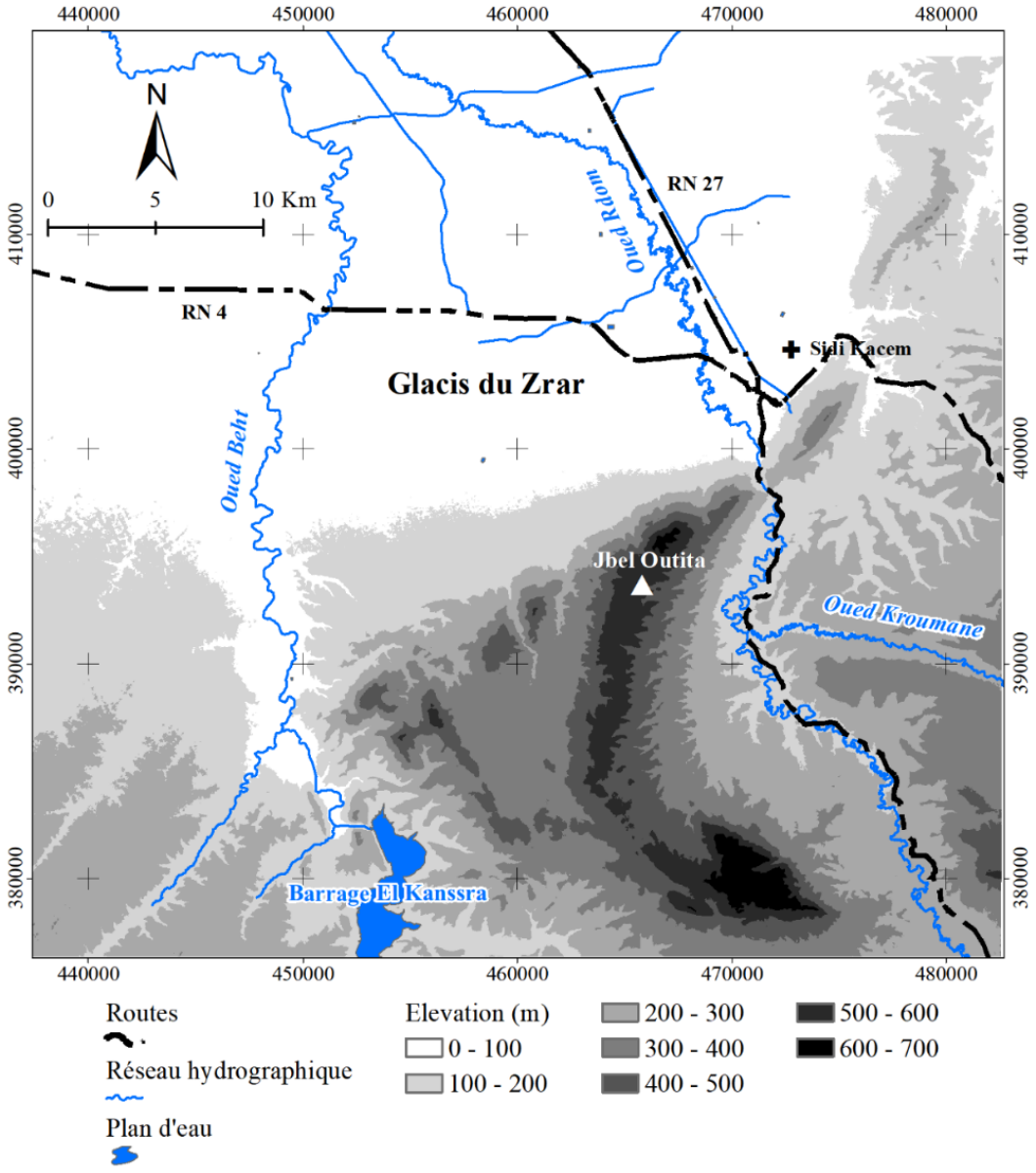


Figure 12: Carte de situation de la région Glacis du Zrar.

III . 1. d. Maamora

Entre le plateau Zemmour au Sud, la plaine centrale du Gharb au Nord, la vallée du Beht à l'Est et le Sahel dunaire à l'Ouest, la Maamora constitue une évidente unité naturelle. Son originalité se marque par la forme d'un plateau ondulé s'abaissant du SE vers le NW. La géologie est matérialisée par des affleurements quaternaires anciens, qui sont recouverts par des sols brunifiés et drainés par un réseau d'allure étonnamment géométrique (**Figure 13**).

La plongée de la Maamora vers le Gharb ne laisse affleurer le Paléozoïque qu'à l'extrême bordure sud de la région, vers Tiflet. Ailleurs, l'entaille des Oueds fait apparaitre le Miocène (marnes tortoniennes) et surtout le Pliocène (sables et grès). À partir du Pliocène, le littoral s'est déplacé vers l'Ouest en restant parallèle à son tracé actuel (**Figure 18**). Ces régressions successives furent jalonnées par des dépôts de rivage comportant en proportions variables des lumachelles, des cailloutis et des formations sableuses de puissance variable mais pouvant atteindre une vingtaine de mètres ; argiles sableuses rouges de Maamora. En ce qui concerne l'hydrographie de la Maamora, le parallélisme des vallées du Sud-Ouest au Nord-Est, d'une façon parallèle à la côte actuelle peut résulter de plusieurs phénomènes aussi bien géologiques que morphologiques.

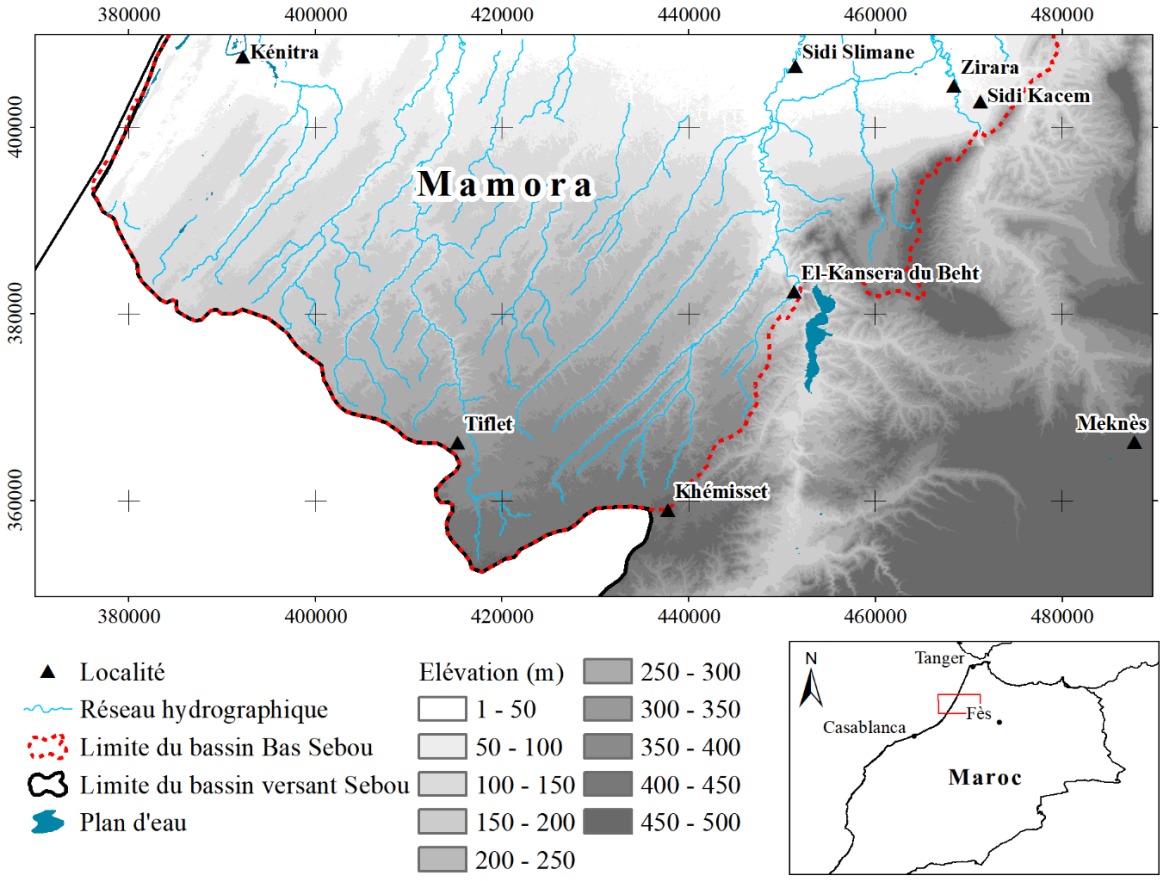


Figure 13 : Situation géographique de la région de Maamora.

III . 2. Cadre géologique

Le bassin Bas Sebou occupe des parties de deux grands ensembles structuraux, la Mesta et le Rif, arc plissé de la famille alpine. La zone de faiblesse du point de vue tectonique qui marque leur contact est le siège d'une subsidence qui s'est prolongée jusqu'à l'époque historique. Le comblement du bassin sédimentaire s'est effectué au Tertiaire par des sédiments marins, marnes et sables, et par des dépôts continentaux à partir du Villafranchien (Le Coz, 1964).

III . 2. a. Maamora et ses bordures

La Maamora est une vaste plate-forme qui s'étale depuis l'Océan Atlantique, entre la ville de Rabat et Kénitra, jusqu'à 70 km vers l'intérieur du pays, limitée au Sud par la vallée du Bou-Regreg et au Nord par la plaine du Gharb (**Figure 14**). Dans sa partie occidentale, elle est constituée d'une succession de rides dunaires et de dépressions allongées selon un axe NE-SW, parallèlement au littoral (Texier *et al.,* 1993).

Les données des sondages effectuées par la société chérifienne des pétroles (S.C.P) du bassin du Gharb et de la région de Maamora, indiquent qu'une unité détritique répandue du Crétacé supérieur recouvre le socle ou la couverture triasique (**Figure 15**). Les formations du Crétacé présentent des conglomérats riches en quartz du Cénomanien-Turonien, des grès grossiers et des marnes sableuses (Flinch, 1993). Localement, recouvertes de marnes et de calcaires avec des calcaires blancs dolomitiques et oolithiques, des marnes vertes et des calcaires marneux avec des restes de lignite. Des marnes turoniennes affleurent à Oued Mellah, au Sud-Est de Rabat (Gigout, 1951 ; Michard, 1976).

Le coquinoïde basal messinien et le grès jaune bioclastique, le calcaire sablo-calcaire et la marne, appelés Mollasses de base, recouvrent en discordance les formations géologiques paléozoïques, ou localement triasique, du flanc Nord de la Meseta marocaine (**Figure 16**) (Wernli, 1977). Dans la région de Maamora, cette unité a une épaisseur constante. Le grès est riche en Pectens, Bryozoaires, Échinodermes et Ostracodes (Flinch, 1993) et la présence de dents de mammifères indique une proximité continentale (Feinberg, 1986). La partie supérieure de la coupe est fortement bioturbée. L'unité gréseuse est surmontée d'une unité corallienne appelée « banc à coraux » (Chevalier, 1962). Le banc à Coraux est recouvert de marnes bleues pélagiques du Messénien et Pliocène inférieur (Wernli 1977, 1979) (**Figure 7**). Dans la Maamora, les marnes basales datent du Tortonien supérieur. Ces dépôts pélagiques enregistrent la profondeur du bassin liée à la création de l'avant-fosse et représentent l'avant-fosse profonde. Des marnes sableuses grises glauconitiques du Pliocène supérieur recouvrent la section marneuse pélagique. Un intervalle carbonaté conglomératique et bioclastique, appelé « dalle moghrébienne », définit la base de la transgression moghrébienne (**Figures 14 et 15**) (Choubert, 1965). Les grès quartzitiques bruns et les conglomérats à strates croisées sus-jacents à la dalle moghrébienne représentent le premier remplissage fluvial de l'avant-fosse dans la Maamora (**Figure 14**). De vastes gisements de conglomérat fluvial et alluvial villafranchien et de grès affleurent au contact de la Meseta soulevée au Sud et au Nord et à l'Est de la Nappe prérifaine.

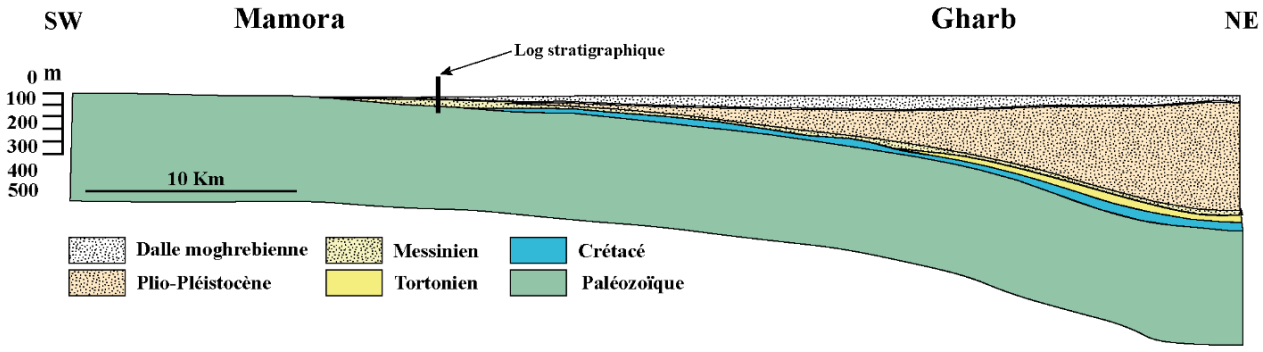


Figure 14: Coupe géologique à travers la Maamora et le bassin du Gharb. (D'après Flinch, 1993)

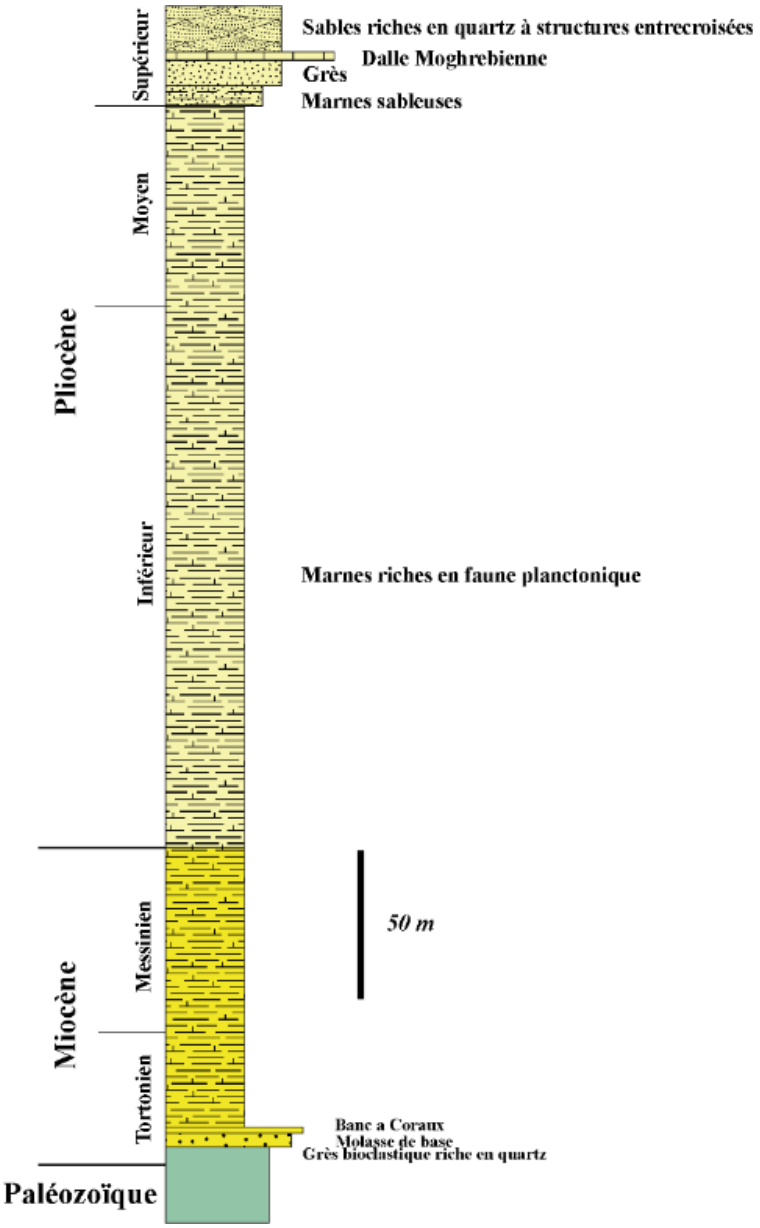


Figure 15: Log stratigraphique de la région de Maamora. (D'après Wernli, 1988 et Flinch, 1993

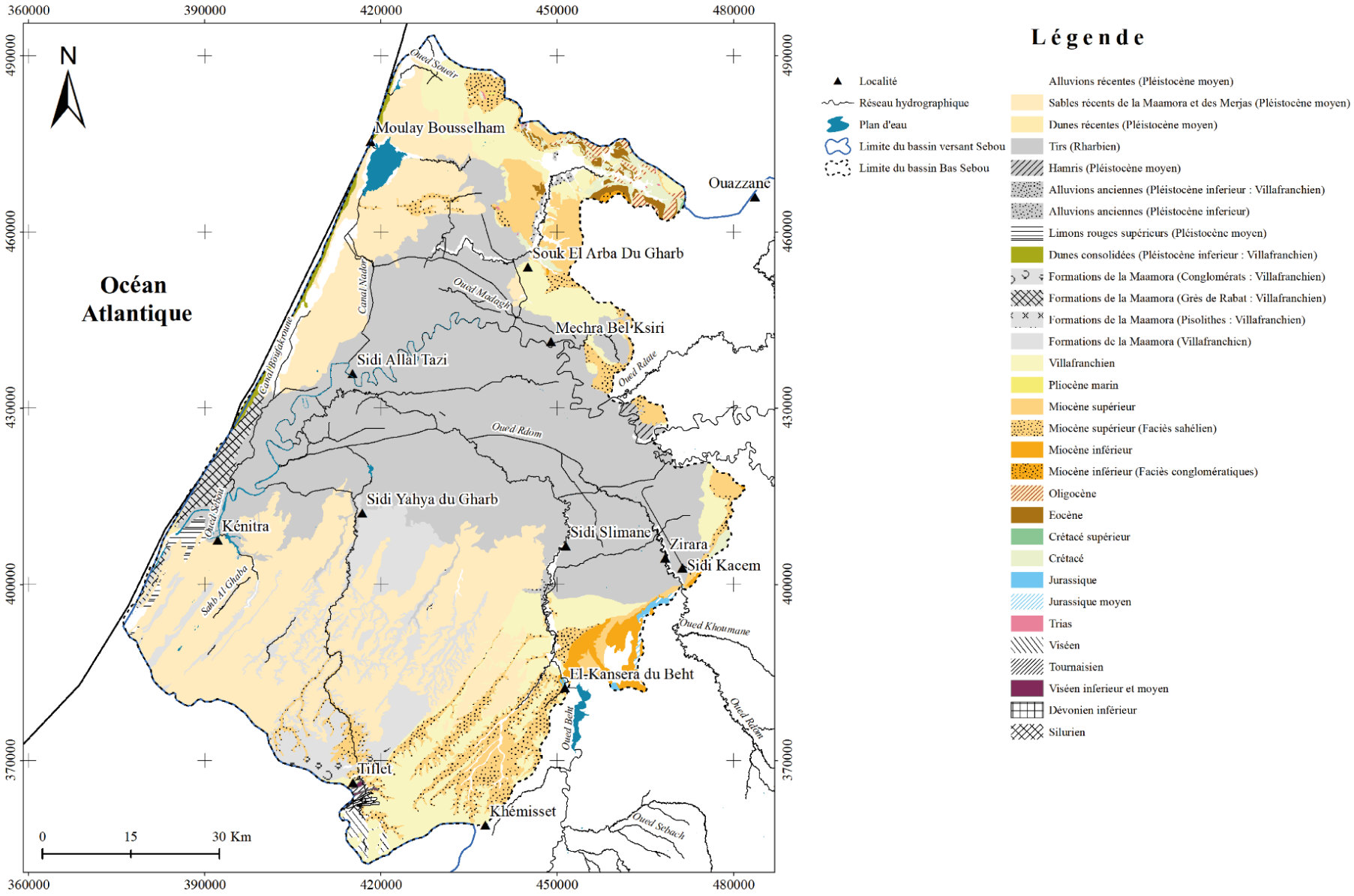


Figure 16 : Formations géologiques du bassin Bas Sebou. (Source : la carte géologique du Maroc (1951)

III . 2. b. Rides prérifaines

Les rides prérifaines expriment à la fois un ensemble de volumes montagneux en formes de plis souvent escarpés ou un ensemble de reliefs tantôt collinéen tantôt tabulaire (Daguin, 1926). Structurellement, cette région est située à la limite de deux domaines différents : le Rif au Nord et le Moyen Atlas au Sud. Parmi les éléments constitutifs sont surtout secondaires et tertiaires.

Le Lias inferieur représenté en particulier par une épaisse strate de calcaire à faciès sub-récifal avec des niveaux oolithiques. Le Bajocien inférieur et le Bathonien constitués de grès du Zerhoun dont les faciès de sables, de micro-brèches et de calcaires détritiques sont à mettre en relation avec la présence du massif granitique du Gharb oriental ; après une lacune stratigraphique s'étendant au Jurassique supérieur, le Crétacé est représenté dans les rides internes par des couches alternatives de marnes et de calcaires (Le Coz, 1964).

Concernant le Tertiaire, ces rides apparaissent comme une virgation double du deuxième genre engagée entre deux môles résistants qui semblent devoir être, au Nord, le prolongement du massif primaire de Tiflet, et au Sud, les éléments septentrionaux du Maroc central paléozoïque. D'après Le Coz (1964), la mise en place de ces rides semble être le résultat de trois phases orogéniques d'importances inégales telles que la phase orogénique postérieure au Dogger et antérieure au Cénomanien, la phase orogénique anté-miocène et la phase orogénique miocène.

III . 2. c. Nappe prérifaine

La nappe prérifaine a été la première nappe de charriage reconnue au Maroc (Gentil, 1912a b, 1918ab). Elle affleure aux limites septentrionale et orientale de la plaine et dans tout le Haut-Gharb. La stratigraphie de la nappe prérifaine est obscurcie par une tectonique compressive complexe, la resédimentation et les faunes remaniées courantes qui rendent difficile l'identification stratigraphique (Flinch, 1993). La présence de fossiles crétacés remaniés ainsi que de sédiments triasiques et miocènes pose des problèmes bio-stratigraphiques difficiles (Feinberg, 1986). La nappe prérifaine est constituée de sédiments triasiques à miocènes délimités par des contacts stratigraphiques et/ou tectoniques (**Figure 17**). La stratigraphie de la nappe prérifaine est basée sur très peu d'affleurements localisés dans les zones entourant le bassin du Rharb et sur des puits d'exploration localisés. Sa description stratigraphique basée sur les données de surface (Tilloy 1955a, b, c, d ; Feinberg, 1986) et les informations des puits d'exploration effectués par la S.C.P même s'il n'y a pas d'ordre stratigraphique discernable en raison de l'imbrication et de la tectonique, les sédiments impliqués sont représentés dans la **figure 17** et **le tableau 1**.

Tableau 1: Stratigraphie de la nappe prérifaine. (D'après Tilloy, 1955 et Feinberg, 1986)

Age	Lithologie	Épaisseurs	Limites
Miocène moyen	Marne sableuse et grès intercalés occasionnellement avec des lits calcaires.	200-300 m	Transition
Miocène inférieur	Grès et marne interstratifiés intercalés occasionnellement avec des niveaux marno-calcaires.	100-300 m	Transition
Oligocène supérieur	Marne interstratifiée et grès turbiditique intercalés occasionnellement avec des niveaux de brèche et des lits de calcaire.	150-200 m	Transition
Oligocène inférieur			
Éocène supérieur	Calcaire et grès interstratifiés	400 m	Transition
Éocène moyen	Marno-silteux et grès interstratifiés avec conglomérats et olistostromes.	450-500 m	Transition
Éocène inférieur	Marne blanche et marne-calcaire grise à silex nodulaire.	200-300 m	Transition
Paléocène supérieur			
Paléocène inférieur			
Crétacé supérieur	Marne verte magnésienne à foraminifères planctoniques.	?	
Crétacé inférieur	Une turbidite composée de carbonate de calcium (Calciturbidite) de l'Albien constituées de marnes et de calcaires marneux, marnes grises et calcaires marneux blancs du Néocomien à ammonites.	?	Tectonique ou diapirique
Trias	Marne vari-colore, souvent violette avec inter-stratification de sel et de gypse. Diabase et laves en cousinées occasionnelles.	?	

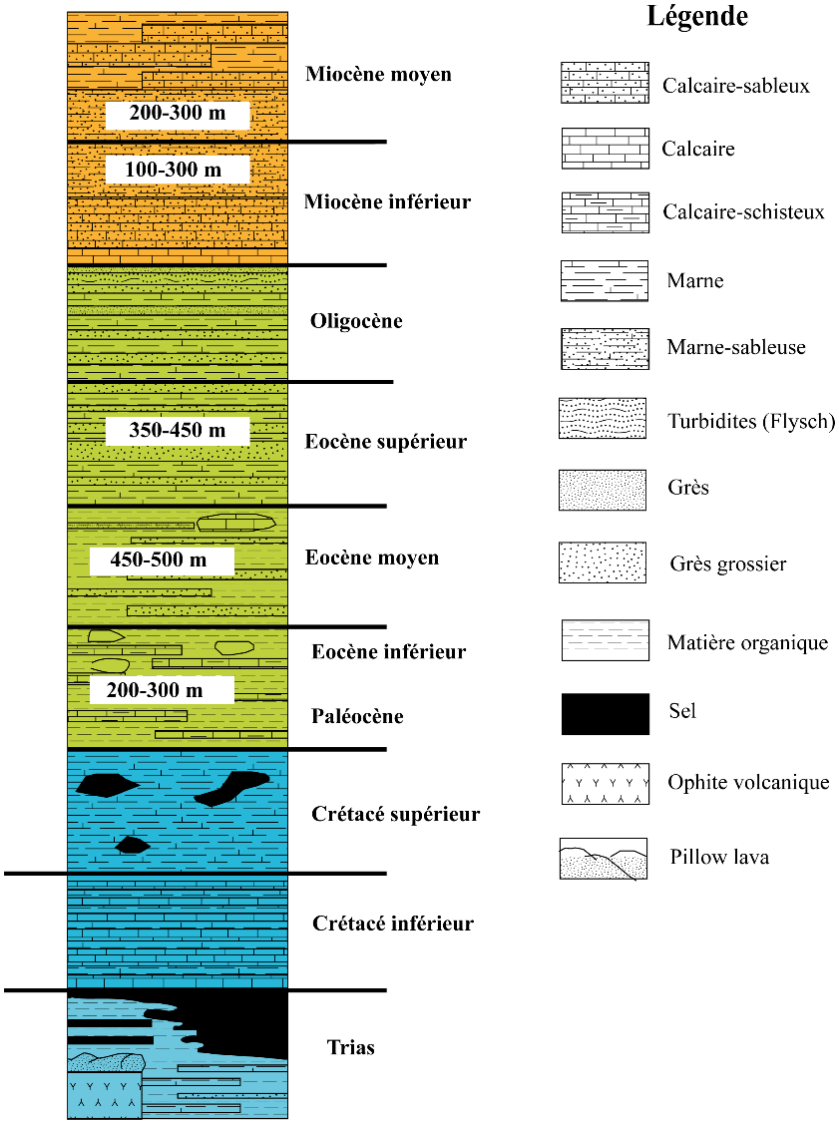


Figure 17: Stratigraphie synthétique de la nappe prérifaine basée sur la description de Tilloy, 1955 et Fienberg, 1986.

III . 2. d. Bassin miocène du Gharb

Une individualité bien précise du bassin Bas Sebou commença au milieu du Tertiaire avec la formation du bassin miocène du Gharb. En effet, le Couloir sud-rifain à l'Ouest qui assurait la communication entre la Méditerranée et l'Atlantique prit la forme d'une cuvette dont le centre devait se trouver vers la ville de Mechra Belksiri. Les terrains miocènes qui recouvrent la nappe prérifaine, sont largement développés sur tout le pourtour du Gharb, série très épaisse allant de 3000 m au centre à moins de 100 m sur les bordures, suite à la subsidence et comporte des mollasses calcaires à la base, des marnes bleues tortoniennes avec passage au sommet à un faciès détritique gréseux et sableux marquant une régression (Le Coz, 1964).

III . 2. e. Golfe pliocène

Dans l'ensemble le tracé du rivage devint à partir du Pliocène parallèle à la côte actuelle, à une distance de 50 km à 60 km (Bourcart, 1931, 1936). Il y avait une exception à cette règle entre Tiflet au Sud et Larache au Nord, puisque la transgression pliocène a dessiné une large poche se terminant autour de Meknès et enveloppant la plaine du Gharb par Sidi Kacem, Khenichet, Souk Larbaa, Ouest d'Arbaoua et rive droite de Bas Loukkos (**Figure 18**) (Gigout, 1956). Les faciès caractéristiques du Pliocène marin sont représentés par des dépôts à caractères régressifs identifiés sur les bordures du bassin : au Nord, des lumachelles et conglomérats, à l'Est, des sables jaunes et au Sud-Est des sables et grès coquilliers (Combe & Thauvin, 1971). À la fin du Pliocène, la mer n'occupait plus dans le Gharb qu'un golfe qui sans cesse se rétrécit avec le temps. Les premières transgressions marines quaternaires (Calabrien – Sicilien) n'intéressaient plus qu'une étroite bande (20 Km au plus) parallèle à la côte actuelle.

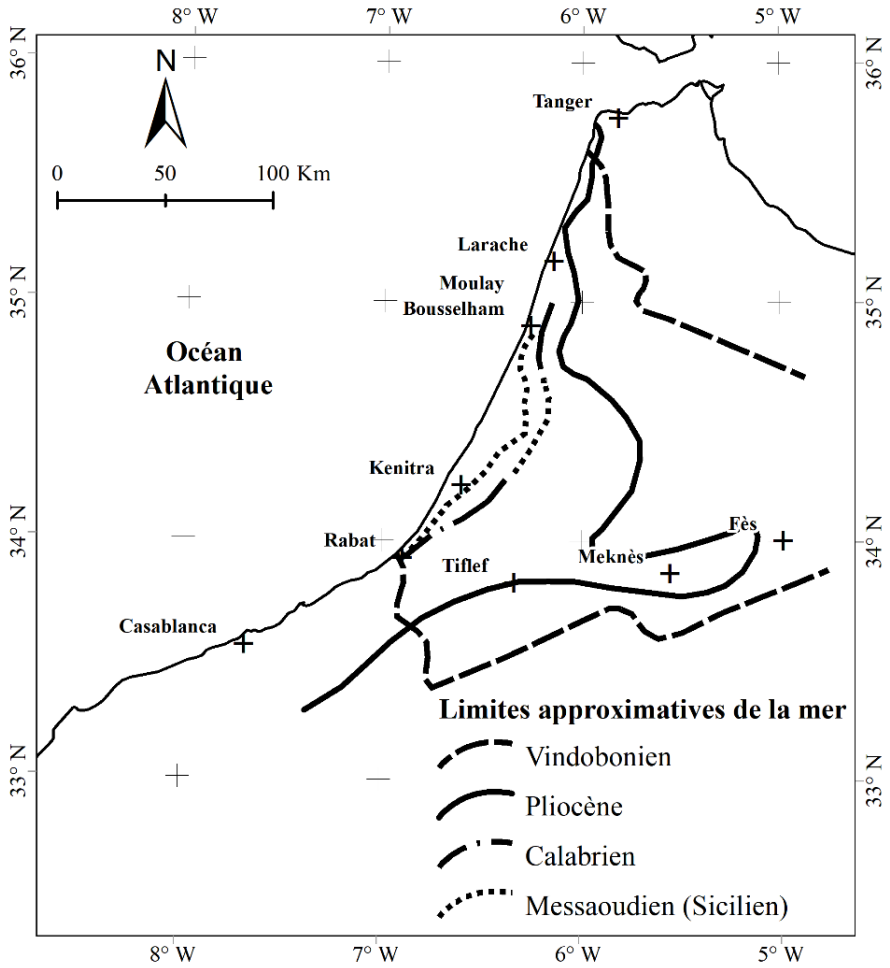


Figure 18: Tracés du littoral marin à partir du Miocène au niveau de Gharb. (D'après Gigout, 1956)

III . 2. f. Quaternaire du bassin Bas Sebou

Subsidence et remblaiement

Au Maroc, le Villafranchien constitue une époque charnière et fait suivre les phases de sédimentation marine du Tertiaire par une accumulation continentale. Il se termine par une phase orogénique responsable de la configuration actuelle du Maroc. À partir de cet étage, le bassin Bas Sebou a fonctionné en tant que cuvette subsidente à remplissage essentiellement continental (Michard, 1976 ; Cirac, 1985 ; Morel, 1987 ; Flinch, 1993 ; Flinch & Vail, 1998). En effet, si la mer pliocène a pu arriver, au Nord du Maroc jusqu'au-delà de Meknès, la transgression calabrienne qui s'intercale à l'intérieur du Villafranchien était de faible amplitude et n'a laissé que des dépôts marins (Coquina type de lumachelle et sables grossiers), identifiés au Nord du bassin Bas Sebou dans les collines de Lalla-Zahra et au Sud dans la vallée du Fouarat (Choubert & Ambroggi, 1953), qui disparaissent sous les alluvions (**Figure 18**). À partir des carottes effectuées par SCP à la fin des années 1960 et les travaux de Morel (1988) et Wernli (1988). La stratigraphie de la région de Lalla Zahra est peut-être résumée dans la **figure 19**.

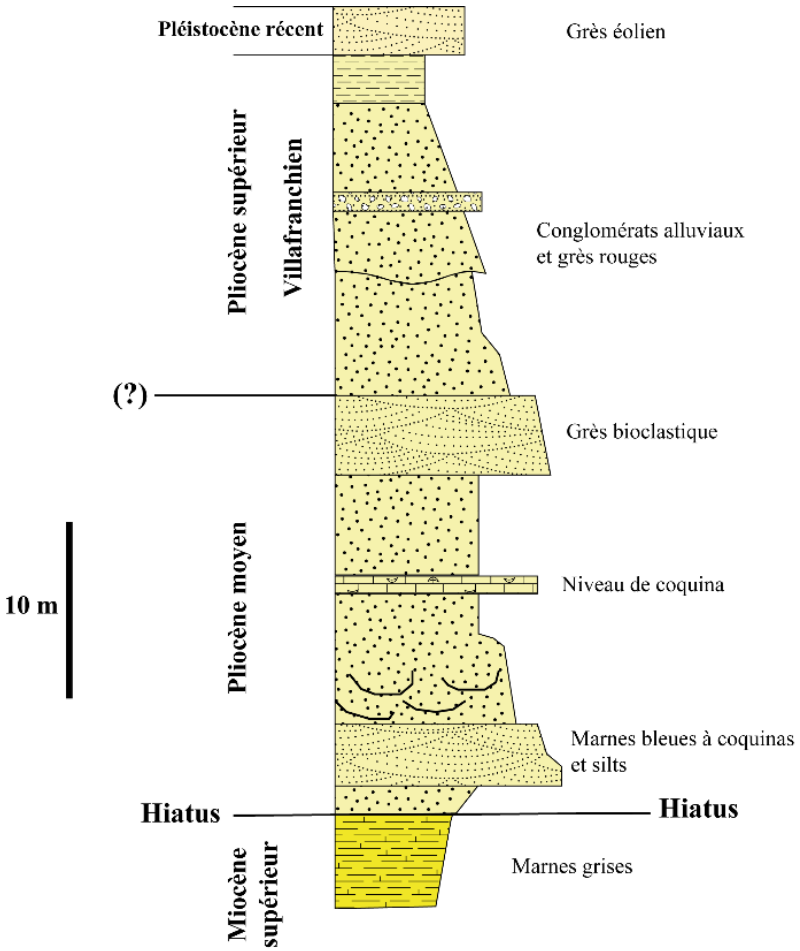


Figure 19: Stratigraphie au niveau des collines de Lalla Zahra. (D'après Wernli, 1988 et Morel, 1988)

i. Villafranchien

Les formations villafranchiennes sont des formations rouges connues dans les plaines et les plateaux atlantiques du Maroc (Bourcart, 1931). Ces dépôts occupent une place très importante dans le bassin Bas Sebou et sont désignés par formations de la Maamora. Elles sont constituées de dépôts rouges sableux et argileux et de conglomérats d'origine continentale.

En se basant sur les travaux faits sur le Quaternaire du Maroc (Beaudet *et al.,* 1967 ; Combe, 1975 ; Raynal *et al.,* 1986 ; Saaidi, 1988 ; Aberkan, 1989), particulièrement celui du bassin du Rharb (Biberson *et al.,* 1956 ; Dresch & Le Coz, 1960 ; Aberkan, 1989 ; Kili *et al.,* 2006), l'analyse litho-stratigraphique des séries révélées par les coupes a permis l'établissement de la stratification suivante, de la base au sommet : formation jaune argilo-sableuse puis une formation verticolore à lits alternés de teinte orange, jaune, blanche avec de nombreuses taches blanches et des couches gréseuses et enfin des sables de la Maamora de couleur grise.

Ces formations se trouvent parfois très largement étalées sur tout le pourtour du bassin Bas Sebou (Le Coz, 1964). Au Nord, elles se poursuivent dans le bassin du Loukkos et au-delà de Larache (Gigout, 1956). Vers l'Est, elles ont été décrites dans le Saiss par Taltass, (1953) ; Boumir, (1990) ; Dridri, & Fedan, (2001). Au Sud de la Maamora, elles sont conservées sur le plateau des Shoul et dans le synclinal de Maaziz-Romani. Ces formations villafranchiennes se distinguent par leur couleur rouge qui résulte de la concentration en fer sous un climat humide et chaud.

ii. Régréguien

Le Régréguien un étage bien défini postérieur au Villafranchien typique ou supérieur au Moulouyen et antérieur au Salétien ; il a été façonné durant un pluvial post-Moulouyen et anté-Salétien (Choubert, 1959). Dans le bassin Bas Sebou, cet étage se présente avec un type de dépôts très particulier constitué d'une masse épaisse de cailloutis enrobés dans un ciment calcaire très friable, une accumulation calcaire avec quelques cailloux épars et une croûte calcaire lamellaire en surface (Le Coz, 1964).

La présence du calcaire suppose un climat à faible pouvoir dissolvant, différent du climat rubéfiant, et se distingue par des températures plus basses avec un potentiel d'humidité élevée. En effet, le Régréguien fait référence à la transmission des périodes fraiches du Quaternaire moyen et la présence de la croûte lamellaire en surface marque le passage à une phase d'aridité, car elle n'aurait pu se maintenir avec un écoulement semblable à celui qui avait transporté les cailloutis sous-jacents (Le Coz, 1964).

iii. Salétien

Sur la rive droite de l'Oued Beht, la terrasse salétienne apparait la plus élevée dont la composition est caillouteuse à gros éléments de quartzites de forme diverse avec une couleur rouille (**Figure 20 et 21**). Ce dépôt supérieur, par sa situation au-dessus du Régréguien et par sa ressemblance avec celui qui se situe aux abords de Salé, est bien attribuable au Salétien (Le Coz, 1964). Les terrasses salétiennes sont assez rares dans le bassin Bas Sebou parce qu'étant les plus anciennes et détruites par les érosions ultérieures. Elles sont cependant rattachées aux deux langues caillouteuses qui se dessinent dans le remblaiement profond de la plaine, aux débouchés, l'une de l'Ouergha-Sebou et l'autre de l'Oued Beth (**Figure 21**).

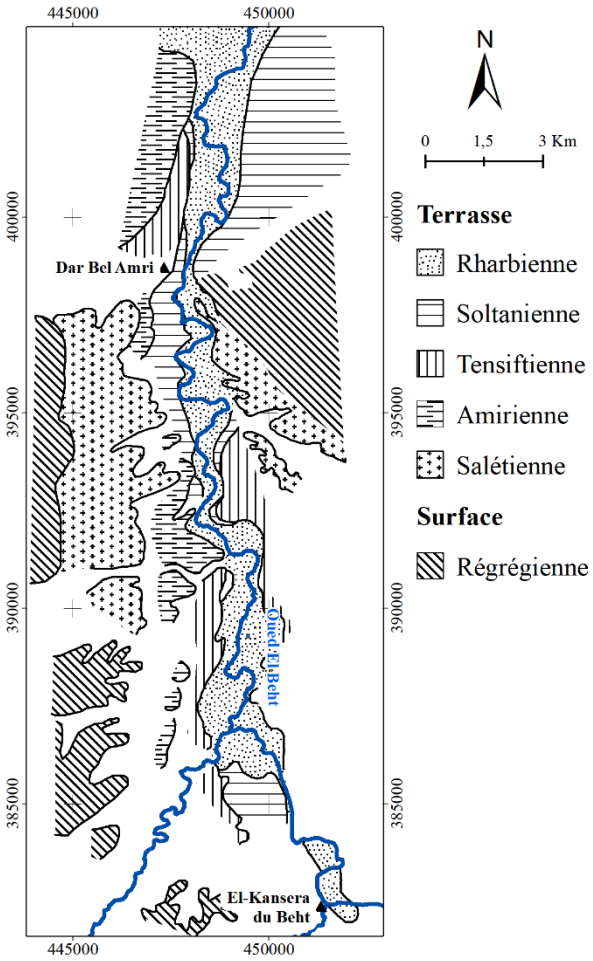


Figure 20: Terrasses du Beht. (D'après Le Coz, 1964)

iv. Amirien

Sur la rive gauche du Beht, existe un niveau de terrasse dominant l'Oued Beht en versant abrupt (**Figure 21**). Le dépôt comporte les éléments suivants : à la base un conglomérat à éléments

bien roulés, des silts calcaires blanchâtres pulvérulents, à la partie supérieure, silts rosâtres à poupées calcaires surmontés d'un sol limoneux rouge.

Les silts amiriens portent une place importante dans l'ensemble du remplissage de la plaine intérieure entre les dépôts plus sableux de la fin du Pléistocène inférieur et les dépôts caillouteux du début du Pléistocène supérieur (Kili. *et al.,* 2006) et contribuent à individualiser, au centre de la plaine, d'une nappe phréatique située à faible profondeur et d'une autre profonde toujours en charge et souvent artésienne (Monition, 1962).

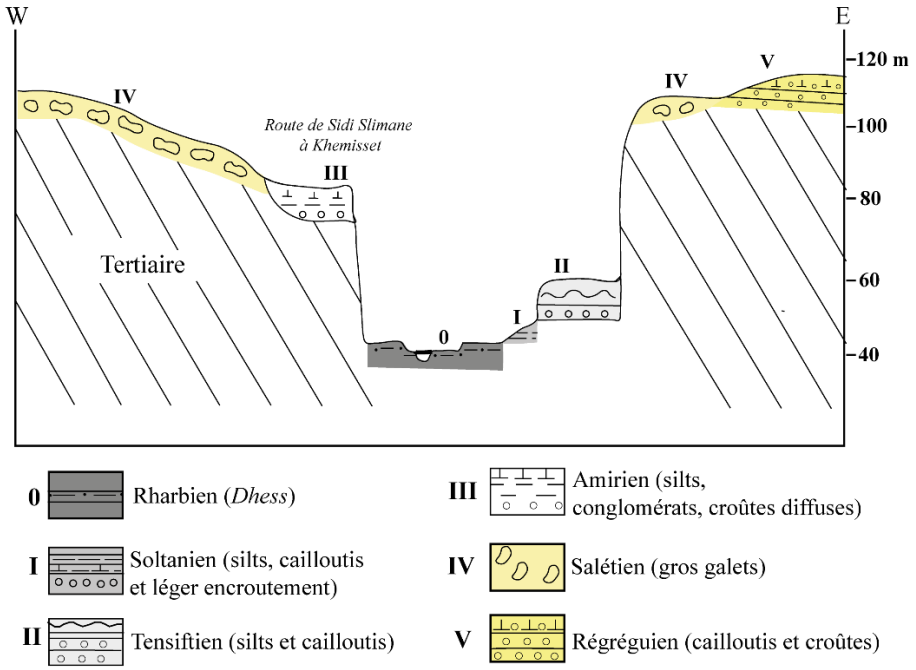


Figure 21: Disposition des terrasses le long du Beht à son entré dans le Gharb. (D'après Le Coz, 1964)

v. Tensiftien

Le Tensiftien représenté par la terrasse la plus large du Beht, exceptée la basse terrasse rharbienne, prend des grandes dimensions sur la rive droite de l'Oued Beht (**Figures 20 et 21**). D'après la description de Le Coz (1964), sa composition est semblable à celle des terrasses amiriennes : une base caillouteuse mais rarement conglomératique, une masse grise sablo-silteuse (8 m) passant vers le haut à des silts jaunâtres avec des taches calcaires blanches surmontés d'une croûte diffuse et d'un sol argileux rouge. En effet, les terrasses tensiftiennes sont assez largement représentées le long de la plupart des Oueds du bassin Bas Sebou par rapport aux terrasses amiriennes.

vi. Soltanien

Cette terrasse constitue la dernière phase du Quaternaire moyen, équivalent de la Glaciation de Würm d'Europe (**Tableau 2**). Elle représente des dépôts largement étalés par rapport aux étages précédents. Les coupes des dépôts soltaniens montrent généralement la superposition de quatre éléments comme l'indique l'entaille dans la berge du Beth (**Figure 21**) (Le Coz, 1964) : 1° des cailloutis témoignant d'un écoulement actif ; 2° des silts argileux qui résultent d'une phase climatique plus douce ; 3° un petit niveau riche en calcaire passant même à des éléments de croûte ; 4° des silts plus sableux comportant quelques cailloutis correspondant à une certaine reprise de l'activité érosive et ayant subi par la suite une pédogénèse marquée par la rubéfaction et l'enrichissement en argile.

vii. Rharbien

La grande extension du Rharbien est la principale originalité morphologique du bassin Bas Sebou. Il a été défini comme le demi-cycle récent (post-pluvial = post-würm) (**Tableau 2**) caractérisé par des formations de silts grises des basses plaines alluviales, les Tirs et les Rmel avec des industries néolithiques (Choubert *et al.,* 1956).

Dépôts Rharbiens (*Rmel*, *Tirs* et *Dess*)

Le Rmel est un mot arabe qui signifie le sable ; il désigne les sols sableux non consolidés avec des situations diverses, sur les dunes récentes comme sur les formations villafranchiennes. Cependant, le Rmel ne peut être considéré comme des formations caractéristiques du Rharbien issu d'une pédogenèse à différents âges.

Les Tirs considérés comme critère de l'étage Rharbien et comprennent une grande variété de sols, liée à la différence d'origine des sédiments et à des degrés d'hydromorphie différents :

- Les Tirs noirs sont composés d'argiles lourdes, brun-gris foncé. On les divise en deux groupes, selon leur hydromorphie, elle même fonction des différents facteurs (pente, altitude, relative profondeur de la nappe).
- Les Tirs gris de Merjas se sont développés sur des alluvions récentes argileuses, dans des bas-fonds où les inondations séjournent encore récemment, et où actuellement un engorgement hivernal dû aux pluies et aux faibles possibilités de ruissellement. Ces sols ont les caractéristiques essentielles des tirs avec une structure moins marquée. La structure superficielle instable est détruite par les premières pluies, et le sol forme une croûte compacte en surface.

Les Dess sont des sols jeunes, peu évolués, provenant de dépôts alluvionnaires récents

caractéristiques du Rharbien (**Figure 21 et Tableau 2**). Ils ont une teneur en argiles assez faible, une forte teneur en limons et une teneur en calcaire faible. Cette teneur en calcaire marque une légère augmentation en profondeur (Ringuelet, 1957).

Ce sont des sols des levées naturelles des rivières. Les Dess légers contiennent entre 0 et 150 cm un ou plusieurs horizons sableux et présentent des lits alternés de silts et de sables correspondant aux divagations des rivières et des chenaux d'inondation. Les Dess lourds, situés plus loin des zones d'écoulement sont constitués de limons mélangés aux sables limoneux et parfois aux argiles. Leurs éléments sont plus fins. Ils sont situés dans les dépressions, entre les anciens lits et rivières (Ringuelet, 1957).

Tableau 2: Tableau synthétique du Quaternaire du Gharb et ses corrélations. (D'parés Choubert, 1959)

Étages continentaux		**Industries**	**Principaux faciès littoraux dans le Gharb**	**Principaux faciès continentaux dans le Gharb**
Maroc	**Europe**			
Rharbien récent	Actuel	Historique Protohistorique et Néolithique	Dune blanche vive	*Dess* sableux (*Mtill*) *Dess* lourd
Rharbien ancien			Dune grise fixée	Levées ou basses terrasses grises des Oueds **(0)**. *Tirs* dans les lieux humides.
Soltanien	Würm	Capsien Atérien Acheuléen final	Dune peu consolidée Falaise +8 m Dune consolidée	Sol rouge sur toute la périphérie de la plaine. Basse terrasses **(I)**
Tensiftien	Riss	Acheuléen évolué	Dune consolidée	Terrasses moyennes **(II)** à sol rouge et feuillets de croûtes.
Amirien	Mindel	Acheuléen ancien		Terrasses moyennes **(III)** à poupées calcaires et sol grumeleux rouge-ocre.
Salétien	Günz	Olduvaïen		Cailloux grossiers et sol rouge : -en épandages sur les bords nord et est de la plaine. -en lambeaux de hautes terrasses **(IV)** le long des principaux Oueds.
Régréguien	Danuble	Pebble-culture		Cailloux arrondis et croûtes calcaires en : -épandages (Zrar). -en lambeaux de surface (Haut-Gharb). -en très hautes terrasses **(V)**.
Moulouyen		Pebble-culture		Cailloux plats et sables rouges Formation rouge argilo-sableuse : Maamora et soubassement des niveaux ci-dessus.
Villafranchien inférieur				Formation rouge-jaunâtre argilo-sableuse : Maamora et soubassement des niveaux ci-dessus.
	Pliocène			

Note : Les numéros en latin gras sont attribués à **la figure 21.**

III . 3. Principaux types de sol

Les potentialités du sol sont définies par la profondeur, le degré de développement du profil, la texture, la richesse en éléments organiques et l'absence de pollution. Elles peuvent être affectées par destruction directe, compactage et accumulation de polluants.

Grace à ses potentialités agricoles, les études pédologiques effectuées dans le bassin Bas Sebou sont assez nombreuses (Aubert, 1950 ; ORMVAG, 1994). Ces études ont permis de comprendre les particularités des sols de la zone en question, de dresser une carte pédologique des sols rencontrés et de connaître leurs caractéristiques morphologiques et analytiques. Les études de l'INRA ont été basées sur l'analyse des profils verticaux exécutés sur une profondeur de plus de 2 mètres. Elles ont montré l'existence de 6 grands groupes de sols décrits ci-dessus (**Figure 22**).

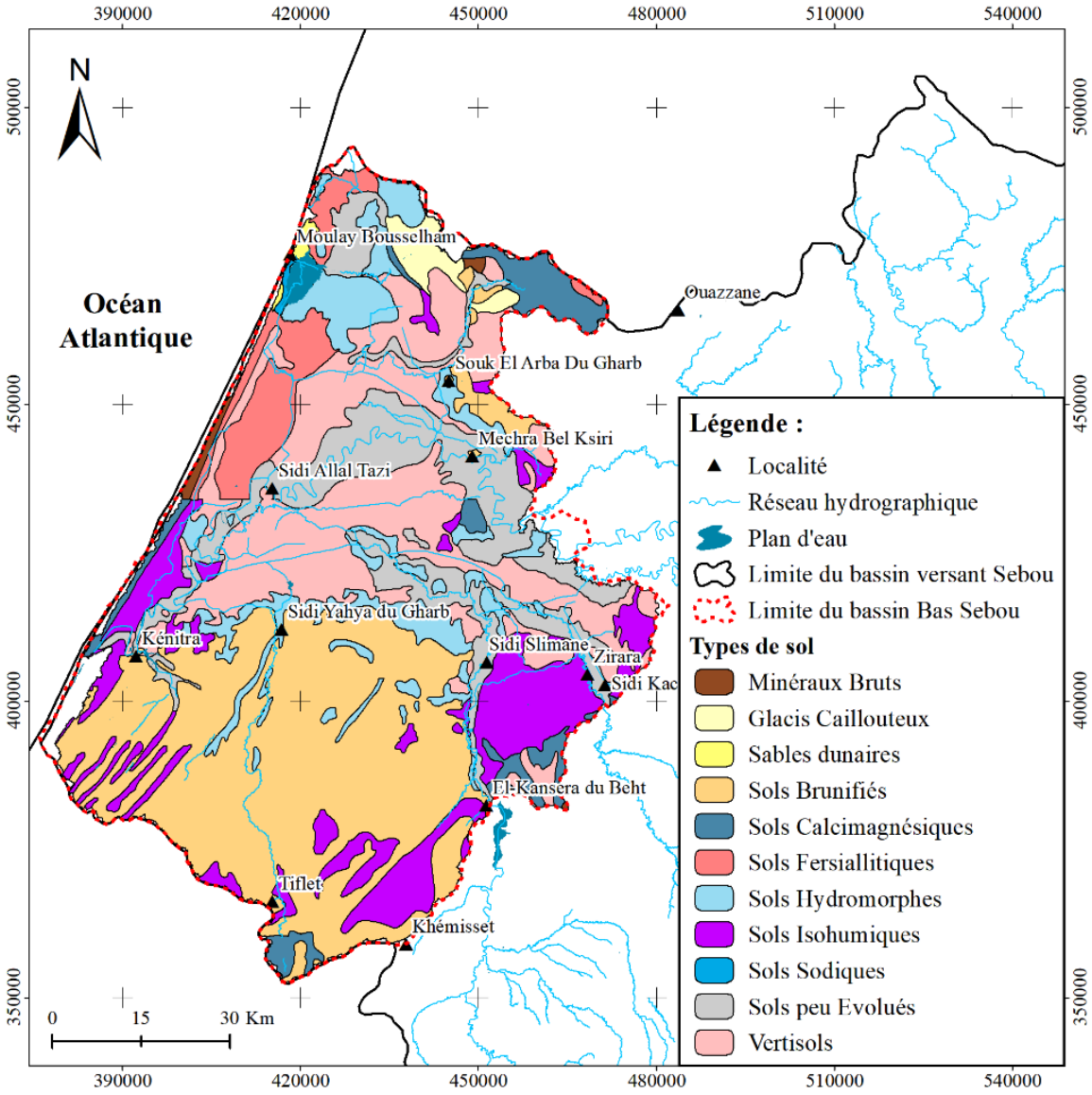


Figure 22: Carte pédologique du bassin Bas Sebou. (Source : INRA, 2022)

- **Sols brunifiés :** sont des sols rencontrés dans le périmètre de la Maamora et la partie nord de la forêt. L'épaisseur de l'horizon superficiel sableux dépasse 2 m et présente une coloration brunâtre.
- **Sols calcimagnésiques :** sont des sols essentiellement développés dans la partie nord-est du bassin Bas Sebou. Ils présentent une composition carbonatée (calcium et magnésium) et considérés comme sols carbonatés, développés dans le périmètre des nappes de charriages pré-rifaines (entre Ouazzane et Jorf El Melha).
- **Sols hydromorphes :** sont des sols qui se trouvent dans les dépressions et les bordures des Merjas. Celles-ci présentent des caractères d'hydromorphie ancienne et des fluctuations de niveaux de la nappe libre proche de la surface au cours des périodes pluvieuses. Ce sont des sols moyennement organiques subissant actuellement une hydromorphie au cours de la période pluvieuse.
- **Sols peu évolués (*Dess*)** : sont des sols d'apport fluviatile et qui se situent sur les pentes de raccordement entre les levées naturelles des Oueds et les basse plaines d'inondation. Ces sols ont des textures variées vue les apports en sédiments fluviatiles superposés. Ils sont le plus souvent calcaires (Billaux & Bryssine, 1967).
- **Sols à sesquioxydes :** sont des sols qui couvrent les zones relativement basses et les légères dépressions. Ces sols sont développés sur des alluvions argileuses des zones de dépressions. Ils présentent une texture de type argileux de faible perméabilité qui provoque des engorgements en eau plus ou moins prolongés au cours des périodes pluvieuses, ce qui laisse apparaître des nappes d'eau perchées locales.
- **Vertisols (*Tirs*) :** sont des sols trop fertiles situés de part et d'autre de la vallée de l'Oued Sebou. Ils occupent une grande superficie aussi bien dans la province de Kénitra que dans celle de Sidi Kacem. Ce sont des sols à structure arrondie et angulaire.
- **Minéraux bruts :** sont des sols d'apport éolien se situent au niveau des cordons dunaires caractérisés par une couleur grise.

III . 4. Principales formations végétales

Le bassin Bas Sebou est actuellement presque entièrement cultivé. La végétation naturelle n'existe donc que là où l'homme n'a pas pu exploiter la terre, sur le substratum rocheux, dans les Merjas et où le domaine forestier est protégé par la loi du Dahir du 10 octobre 1917 sur la conservation et l'exploitation des forêts. Les principaux paysages végétaux seraient : la bordure côtière, les bordures septentrionale et méridionale (forêts), les Merjas et la plaine centrale.

- **La bordure côtière :** la végétation est de type méditerranéen, bien qu'elle soit localement dépendante des conditions stationnelles. Elle est constituée d'espèces qui se sont adaptés, avec le temps, au climat méditerranéen à deux saisons contrastées et se présente actuellement sous forme de matorral naturel (Juniperus phœnicea lycia) accompagné de Doum et d'Asphodèle (**Figure 23**).

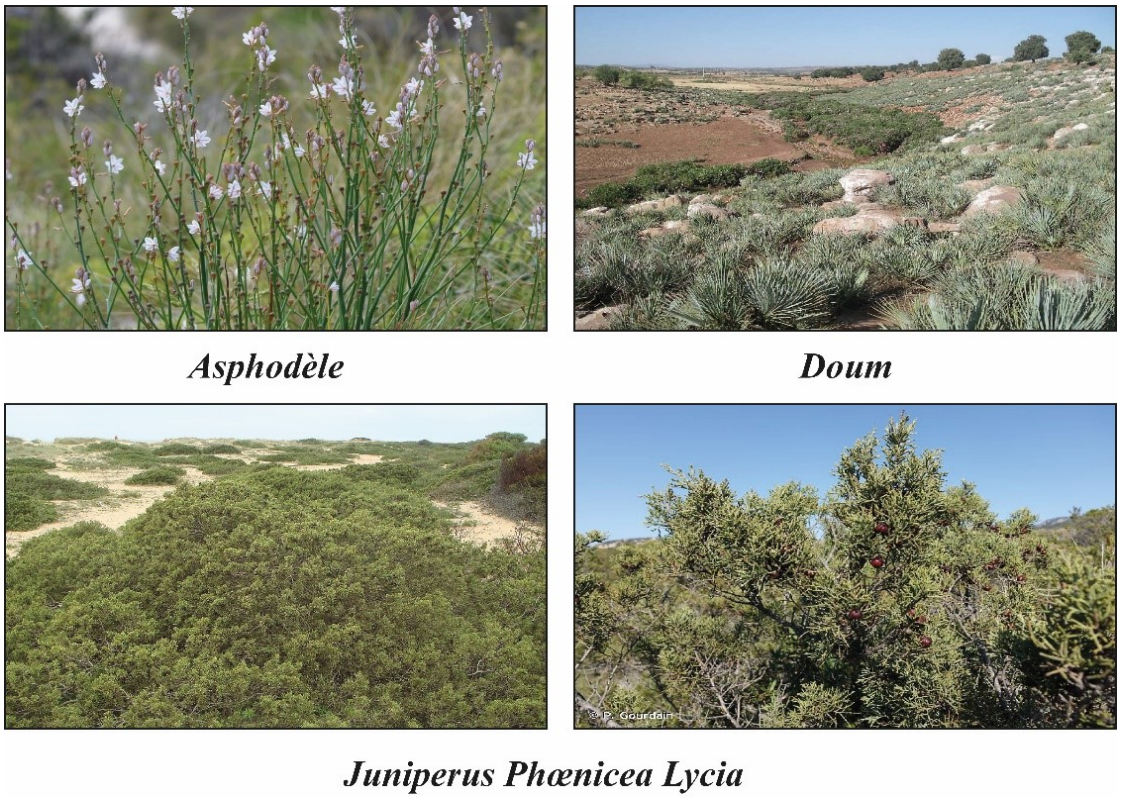


Figure 23 : Principales formations végétales observées dans la bordure côtière du bassin Bas Sebou.

- **Les bordures septentrionale et méridionale :** ces bordures sont recouvertes de forêts de Chêne-liège sur substratum villafranchien et d'Oléastre (*Oléa Europaea*) et de Lentisique (*Pistacia Lentiscus*) sur substratum argileux. Les subéraies du Nord sont beaucoup plus humides et comportent en outre *Arbustus Unedo* et *Quercus faginea* (**Figure 24**).

La suberaie méridionale, la Maamora, est la plus vaste forêt de chêne-liège au Maroc (**Figure 24 et 27**). Son nom signifie « la fructifère » et proviendrait de la qualité exceptionnelle des glands doux de ses chênes. Du moins, ce qu'il en reste actuellement car cette forêt a régressé et une partie a été reboisée en Eucalyptus, avec plus ou moins de succès.

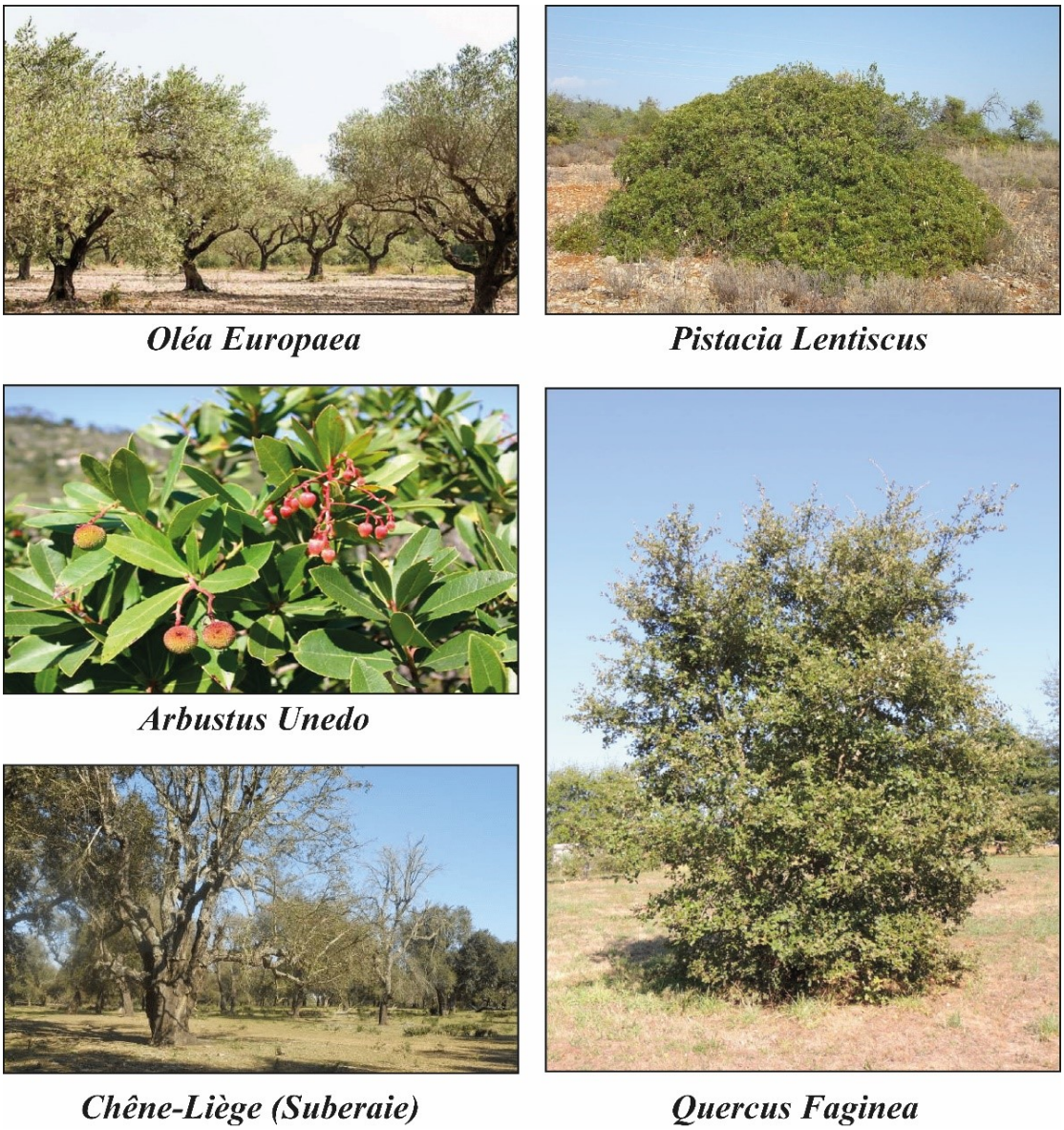


Figure 24 : Principales formations végétales observées dans la bordure septentrionale et méridionale du bassin Bas Sebou.

- **La plaine centrale et les Merjas :** Reconstituer la végétation d'origine de la plaine centrale est difficile en raison de sa dégradation. La végétation restante est largement composée d'ombellifères comme *l'Ammi visnaga* et de chardons tels que le *Scolymus macalatus*, qui peuvent atteindre une hauteur de 2 à 3 mètres et offrir un abri à de nombreux moineaux. Toutefois, les agriculteurs abattent ces formations épaisses de chardons en les écrasant sous de lourdes poutres tirées par des tracteurs afin de protéger leurs récoltes de l'appétit vorace des oiseaux.

La végétation des Merjas, de type hygrophile et hydrophile, est généralement organisée en auréoles concentriques. En partant du centre vers l'extérieur, on observe généralement la succession est suivante (**Figure 25**) :

1. groupement des plages inondé seulement au cœur de la saison pluvieuse, avec *Plantago*

Coronopus et *Hordeum maritimum ;*

2. groupement des plages peu inondé, composés d'espèces essentiellement vivaces, avec les chiendents (*Panicum repens* et *Cynodon Dactylon*) ;
3. ceinture extérieure à graminées annuelles, avec géranimus et asphodèles.

Recoupant ces niveaux avec des densités variables, on trouve également *Juncus acutus*, connu sous le nom *Smar* et le grand roseau ou *Diss* (*Ampelodesmos tenax*). Ces deux plantes, qui peuvent parfois former d'épaisses formations végétales, présentaient un intérêt économique particulier pour la population de la région dans le cadre de leurs pratiques traditionnelles (**Figure 26**).

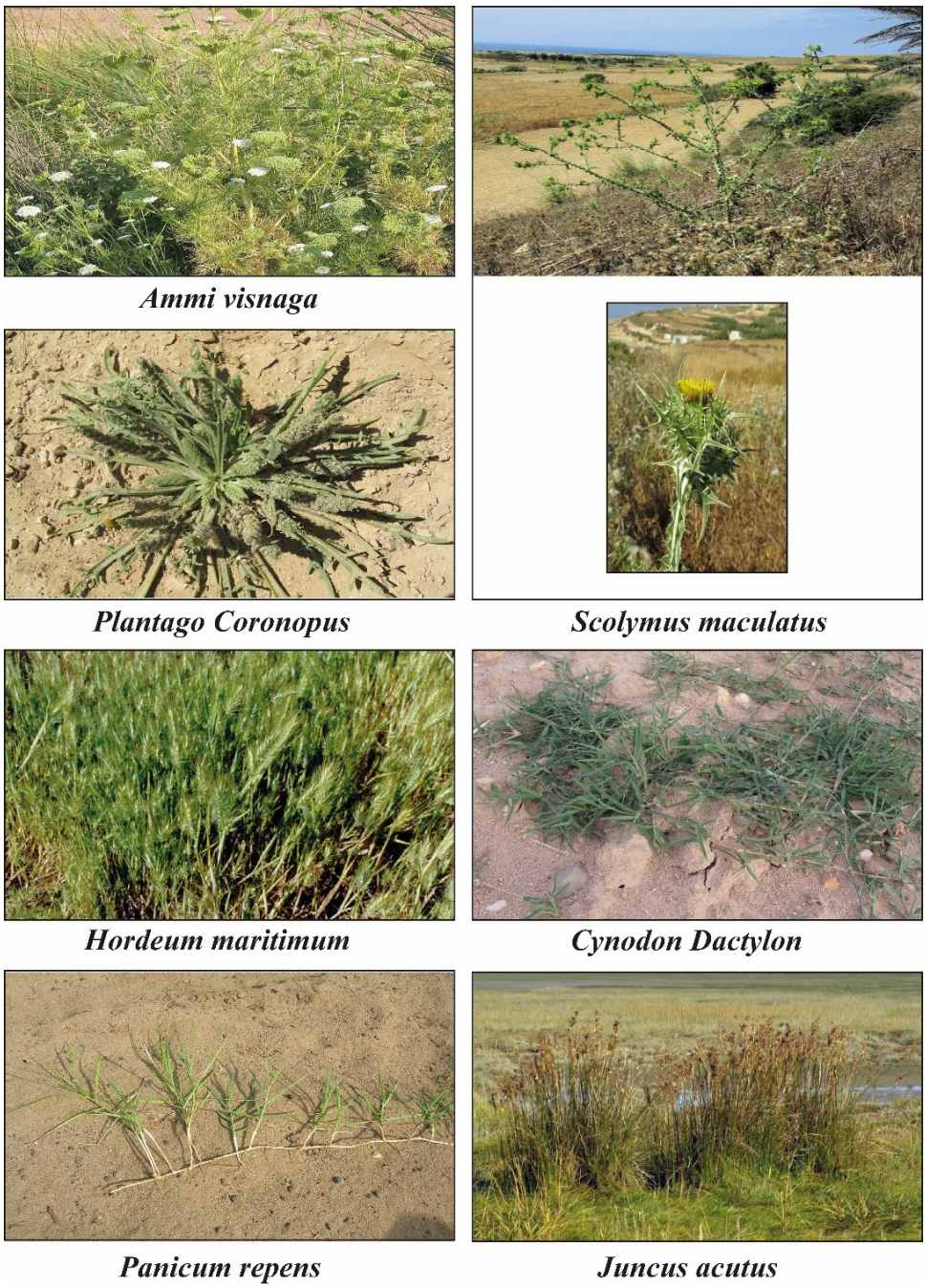


Figure 25: Principales formations végétales observées dans la plaine centrale et les Merjas du bassin Bas Sebou.

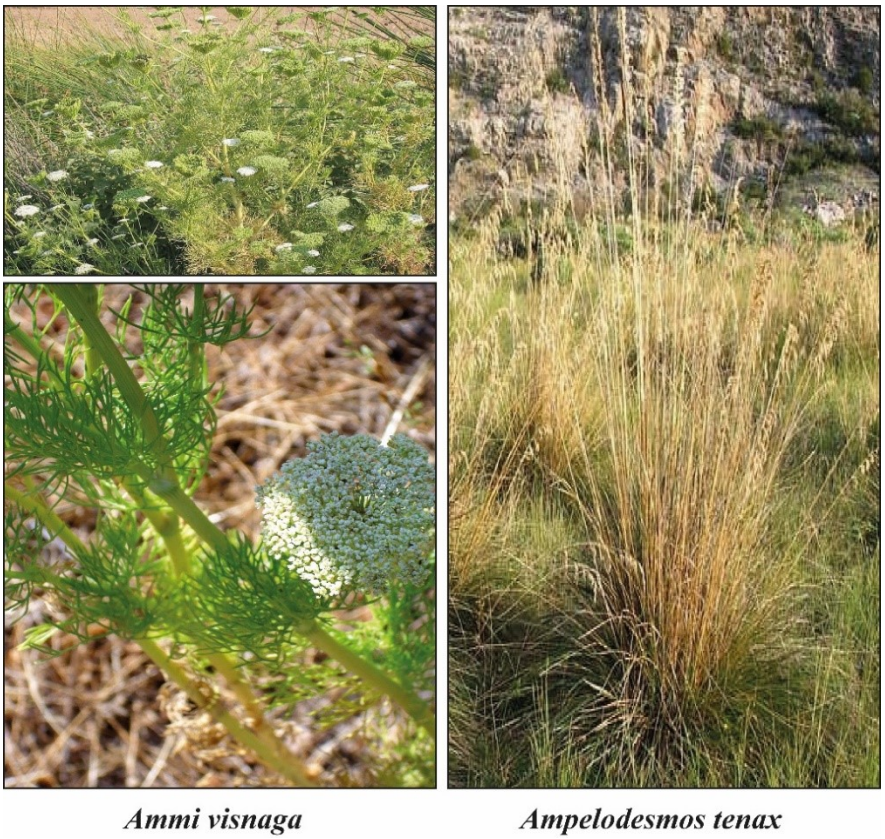


Figure 26 : Principales formations végétales observées dans la plaine centrale du bassin Bas Sebou.

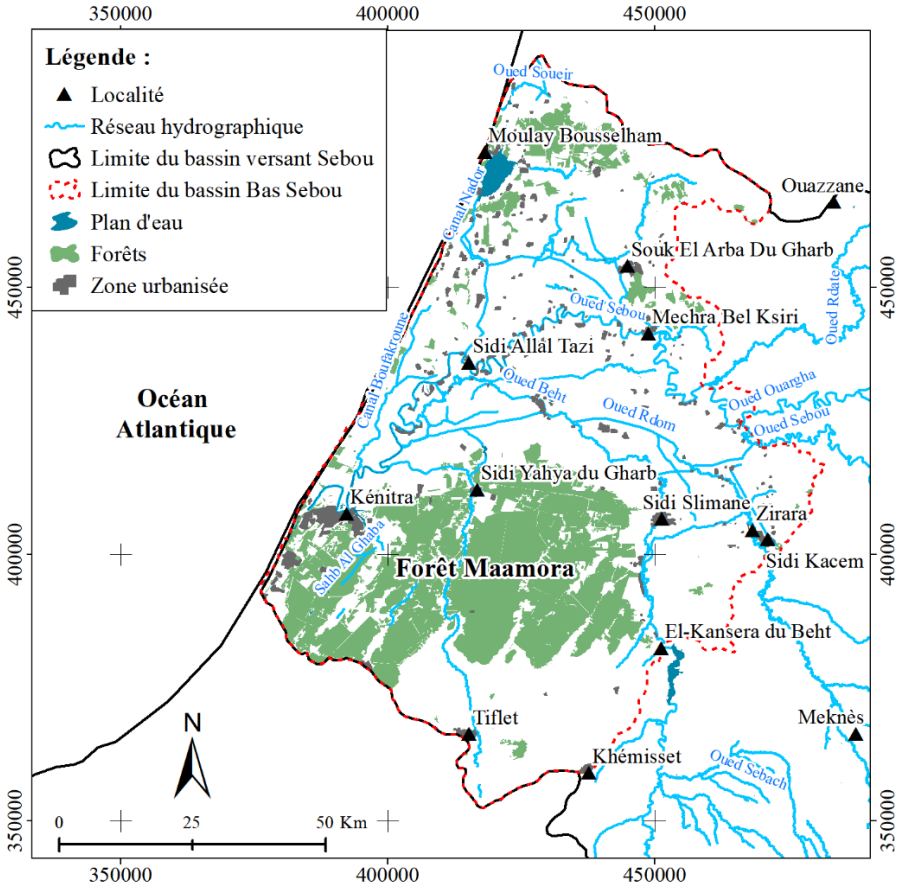


Figure 27 : Couverture forestière dans le bassin Bas Sebou.

III . 5. Agriculture

Le bassin Bas Sebou occupe une position géographique stratégique caractérisée par sa proximité de l'Europe et des grands centres de consommation (Rabat, Casablanca…). Il constitue également un réservoir de main-d'œuvre qualifiée et bénéficie d'un encadrement technique des agricultures de haut niveau et d'une importante infrastructure routière et ferroviaire permettant d'assurer en toute quiétude le transport des produits agricoles. Ce bassin couvre une superficie agricole utile (SAU) d'environ 564.200 ha soit, 7% de la SAU nationale, dont plus de 50% sont irrigables. Avec 107.400 ha irrigués, la région constitue le périmètre d'irrigation le plus étendu du pays, soit 21,7% de la superficie nationale irriguée. Les parcours et l'inculte couvrent respectivement une superficie de 116. 100 ha et 77.244 ha. C'est une région agricole, où se pratiquent les principales cultures traditionnelles, les maraîchères et les cultures industrielles comme le riz et les agrumes (**Figure 28**).

Ainsi, pour la céréaliculture, ce type de culture couvre en moyenne une superficie de 238.000 ha avec un rendement moyen de 13,7 Qx/ha. Quant à la superficie réservée aux cultures 1égumineuses, elle est, en moyenne, de 17.000 ha durant la même période.

Le tournesol est considéré comme la principale culture oléagineuse occupant la seconde place après les céréales avec une occupation du sol variant de 50.000 ha à 70.000 ha selon les compagnes et un rendement moyen de 6,4 Qx/ha. D'autres cultures oléagineuses comme l'arachide, le lin, et le colza, sont aussi pratiquées dans la région.

Les cultures industrielles qui se composent essentiellement de la betterave à sucre (15.500 ha environ avec un rendement de 277,3 Qx/ha) et la canne à sucre (8.300 ha et un rendement de 687 Qx/ha), se pratiquent sur une superficie de 34.500 ha, soit 46,6% du total national.

Parallèlement, les cultures sous serres ne cessent de se développer comme les bananes, les fraises, les melons, les cornichons et les concombres. Quant à l'arboriculture, elle se pratique sur une superficie de 44.400 ha avec une prédominance des agrumes qui occupent une superficie de 18 400 ha environ. Cependant, et suivant les disponibilités en eau d'irrigation, la riziculture est pratiquée sur une superficie de 8 000 ha, le rendement moyen à l'hectare est de l'ordre de 50 qx/ha.

Les cultures fourragères quant à elles, couvrent une superficie d'environ 17.000 ha qui permettent une production annuelle de 560.000 tonnes à raison d'un rendement moyen de 33 t/ha.

Donc, le secteur agricole du bassin Bas Sebou occupe une place de choix dans son économie. Mais, malgré l'effort déployé à savoir la mécanisation, la sélection des semences, l'usage de nouvelles techniques de labour etc…, les rendements par type de culture restent, d'une manière générale, liés et influencés par les conditions climatiques.

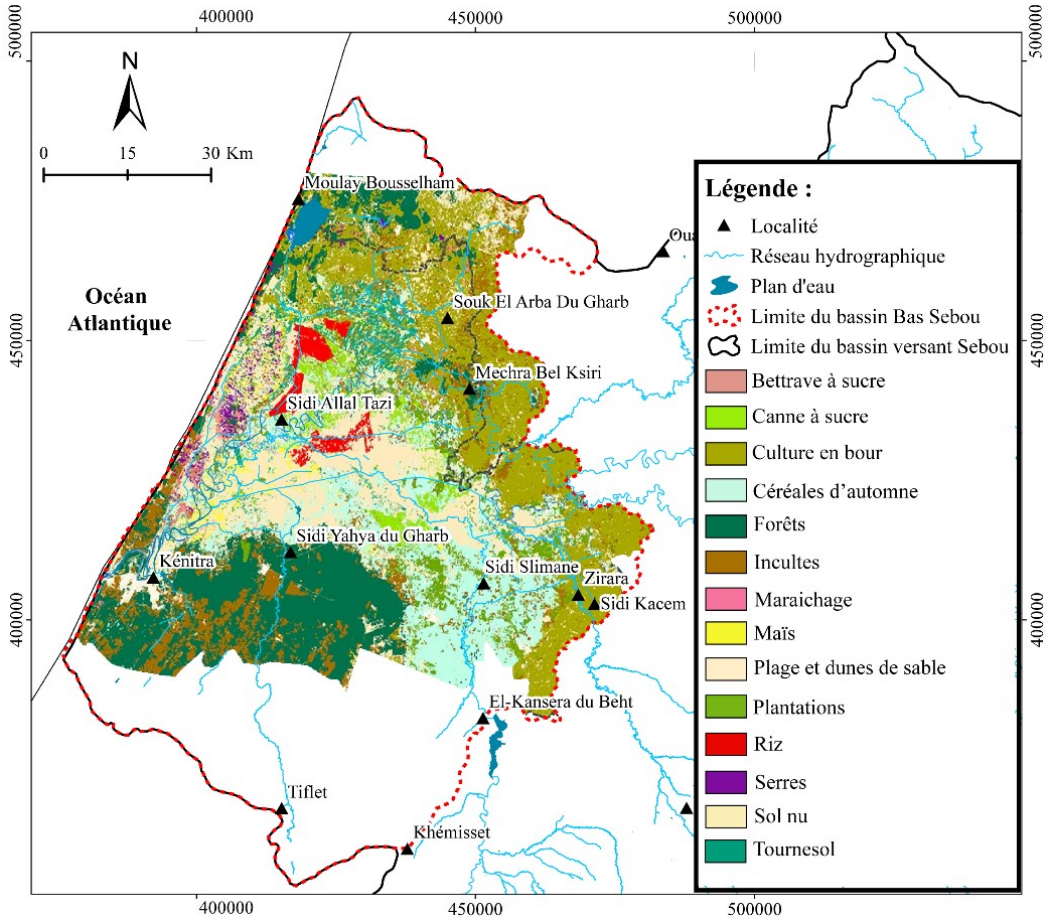


Figure 28 : Carte d'occupation des sols et les principaux types de culture dans le bassin Bas Sebou ; élaborée à partir des images Spot 6 et 7. (Source : CRTS & ORMVAG, 2022)

III . 6. Aménagements agricoles dans le bassin Bas Sebou

La superficie agricole utile (SAU) du bassin Bas Sebou couvre une superficie géographique de 388.000 ha. Le projet Sebou 1963-1968 avait identifié un potentiel de 250.000 ha de terres aménageables en grande hydraulique (périmètre irrigué). La superficie équipée actuellement est d'environ 114.000 ha répartie comme suit : le gravitaire (94.000 ha), l'aspersion (20.000 ha), la submersion (12.000 ha) et la basse pression avec irrigation gravitaire à la parcelle (3.000 ha) (ORMVAG, 2021).

Le périmètre irrigué est subdivisé en 4 tranches d'aménagement et qui sont comme suit (**Figure 29**) :

- la première tranche d'irrigation (PTI, 38 000 ha), équipée entre 1972 et 1979. Cette tranche est située sur les levées des berges de la rive droite du Sebou et sur la rive droite du Beht ;
- la seconde tranche d'irrigation (STI, 36 000 ha), située sur la rive droite du Sebou ;
- la troisième tranche d'irrigation (TTI) : secteurs actuellement équipés sont ceux de la partie est de cette tranche (10 000 ha).

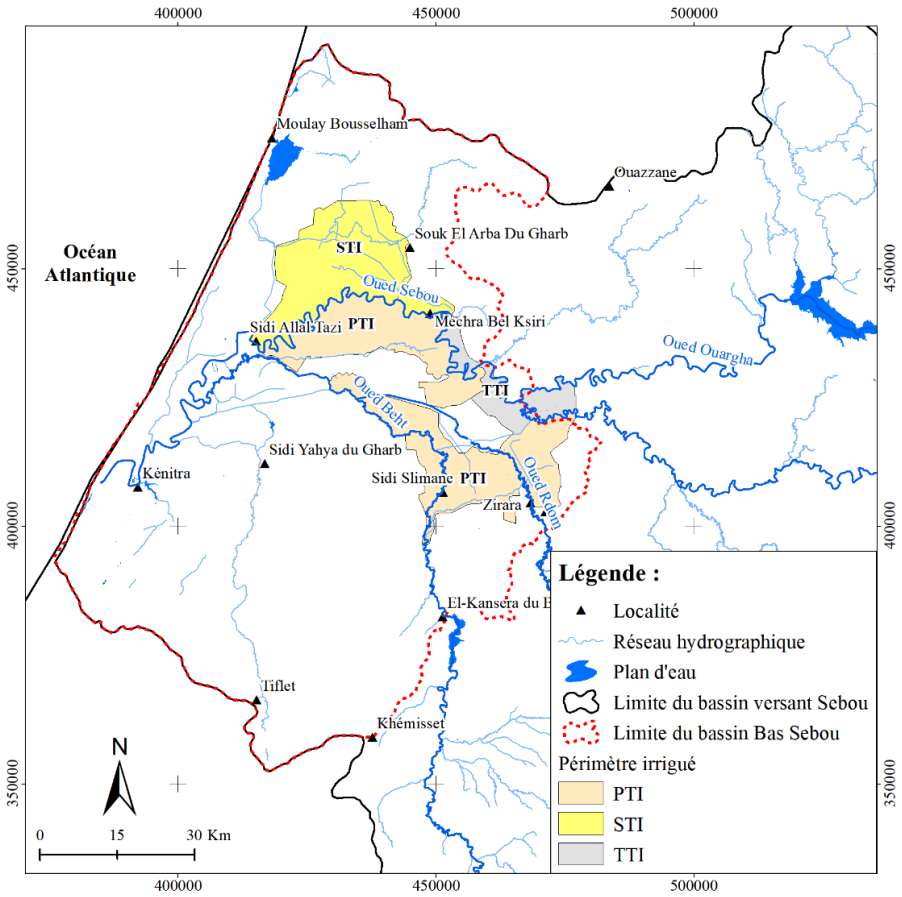


Figure 29: Zones aménagées du périmètre irrigué du bassin Bas Sebou. (Source : ORMVAG, 2021)

IV. Aspect climatique

IV . 1. Types de temps

Le climat du Maroc est caractérisé par une succession de deux ambiances climatiques. Les beaux jours, avec un air calme, un ciel clair, une température dépassant 20°C, remplissant l'été, constituent l'essentiel des moyennes saisons et se trouvent au cœur de l'hiver. Les périodes de mauvais temps avec de la fraicheur et des averses ne se prolongent que sur quelques semaines entre novembre et avril. En effet nous avons ramené les types de temps les plus caractéristiques du bassin Bas Sebou, en les regroupant en deux grandes catégories, anticycloniques et cycloniques.

IV . 1. a. Type anticyclonique d'hiver

Particulièrement fréquent en automne et en hiver, ce type se manifeste surtout de novembre à mars. De hautes pressions règnent sur l'Europe centrale, en liaison avec les hautes pressions eurasiatiques. L'anticyclone des Açores, qui a gagné l'Afrique du Nord-Ouest, s'est joint à celui du continent (**Figure 30A**). Les dépressions et le front polaire sont rejetés aux hautes latitudes, sur la face Nord-Ouest de cette masse anticyclonique. Les vents soufflent du N, du NO, du NE et l'air sec et froid envahit tout le Maroc, repoussant l'air tropical. D'où une chute générale de températures atteignant plusieurs degrés. Exemple : le 30 décembre 2020 les

hautes pressions d'Europe et de l'Afrique du Nord donnant à Kénitra un ciel clair, un vent nul et des températures extrêmes de 7°C et 13°C (**Figure 30A**) (ORMVAG, 2021).

Cependant les conséquences de ce temps ne sont pas partout les mêmes, du fait que la faiblesse des vents dynamiques peut faciliter le jeu des brises de mer. On s'en aperçoit en comparant l'état du ciel et l'humidité des deux stations, Kénitra et Sidi Slimane le 30 décembre 2020 (**Figure 30B**). Dans l'intérieur du bassin Bas Sebou, le ciel est clair et on ne rencontre qu'exceptionnellement les nuages (stratus et cumulus). L'humidité est également assez faible (30 %). Mais au littoral, station Kénitra, sans qu'intervient pourtant un système nuageux, le ciel est passablement couvert avec une couverture nuageuse de 18 % et une humidité de 66 %. On s'explique ces faits en considérant que nous sommes dans la période où la différence de température entre l'eau marine et l'air atteint son maximum. Le courant froid reçoit un degré suffisant d'humidité sur la mer et se trouve réchauffé par le bas quand il atteint la terre. L'instabilité de la stratification thermique détermine alors de forts mouvements ascendants et descendants au-dessus desquels apparaissent les cumulus et stratus. D'ailleurs, ce temps se termine assez vite, en général, par la formation ou l'intensification d'une dépression venue de l'Ouest ou du Nord-Ouest, et provoquant un adoucissement de température.

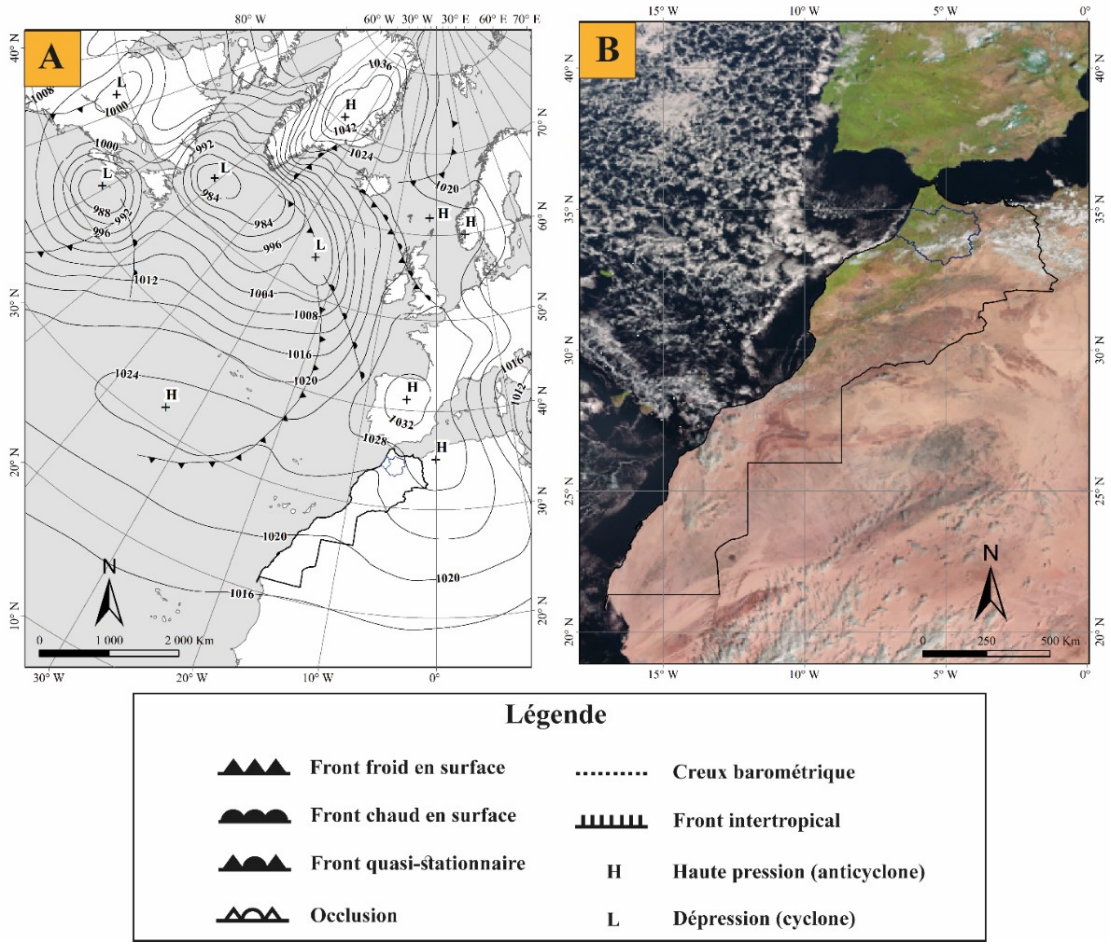


Figure 30 : (A). Régime anticyclonique d'hiver capté le 30/décembre/2020. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Vue aérienne durant le régime anticyclonique d'hiver captée le même jour à 09h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (OEESM) EUMETSAT, 2022).

IV . 1. b. Types cycloniques du front polaire

Ces types de temps sont les plus fréquents au cours de l'année. Ils sont caractéristiques du mauvais temps hivernal et correspondent à deux situations barométriques différentes, la première entraîne un flux à dominante d'Ouest, le deuxième conduit surtout un flux de Nord.

IV . 1. c. Type occidental (flux d'Ouest)

Les perturbations venues de l'Ouest qui battent régulièrement l'Europe occidentale intéressent fréquemment, pendant la saison froide, le Nord du Maroc. Ce type de temps s'encadre dans une période mauvais temps. Profitant de la disjonction des deux centres de haute pression, continental et maritime, un ensemble de cyclones polaires est arrivé du Nord-Ouest (**Figure 31A**). Dans cette situation, les lignes de flux cycloniques à 500 hPa, abordent l'Afrique du Nord avec une direction zonale. Il s'agit alors d'un courant rapide très déporté vers le Sud et de grande longueur d'onde. Une situation semblable s'est réalisée au cours du mois de novembre 2020 **(Figure 31B)**, entrainant sur tout le bassin Bas Sebou des pluies abondantes ; 106 mm à Kénitra et 59 mm à Sidi Slimane (ORMVAG, 2021).

IV . 1. d. Type septentrionale (flux de Nord)

Cette situation est liée à une forte circulation méridienne en latitude. L'amplitude des ondulations du jet augmente brusquement jusqu'à rupture du front polaire. Sur l'Europe occidentale se creuse une vallée barométrique dont la pointe intéresse l'Afrique du Nord et notamment le Maroc et dirige vers le Sud un flux d'air polaire ou arctique (**Figure 32A**). Ces poussé froides sont nettement marquées au niveau des isobares 500 mb (**Figure 32B**) où se dessine une forte cellule dépressionnaire de forme allongée. Les conséquences de ce dispositif sont une baisse accentuée de la température et une pluviosité intense en rapport avec des nuages très épais et très bas.

Ce type de temps s'est trouvé passer dans le Nord du Maroc à la fin du janvier 2020 (**Figure 32B**). Un fort anticyclone (1028 mb) centré sur l'Atlantique dirigea sur le Maroc un flux de Nord à Nord-Est froid et instable qui provoqua une chute brusque de la température (à Kénitra le 30 janvier, maximum 15°C, minimum 11°C ; le 31 maximum 12°C, minimum 9°C) (ORMVAG, 2021). Par la suite, la masse d'air froide perdait de son homogénéité et de sa vigueur (vent du Nord à Nord-Est) en poussant vers le Sud. Le front polaire qui la limitait se décomposa en une série de fronts en vagues dont certains se bloquèrent sur le relief du Haut Gharb. Il en résulta de faibles averses, 1 mm, le 31 janvier à Kénitra.

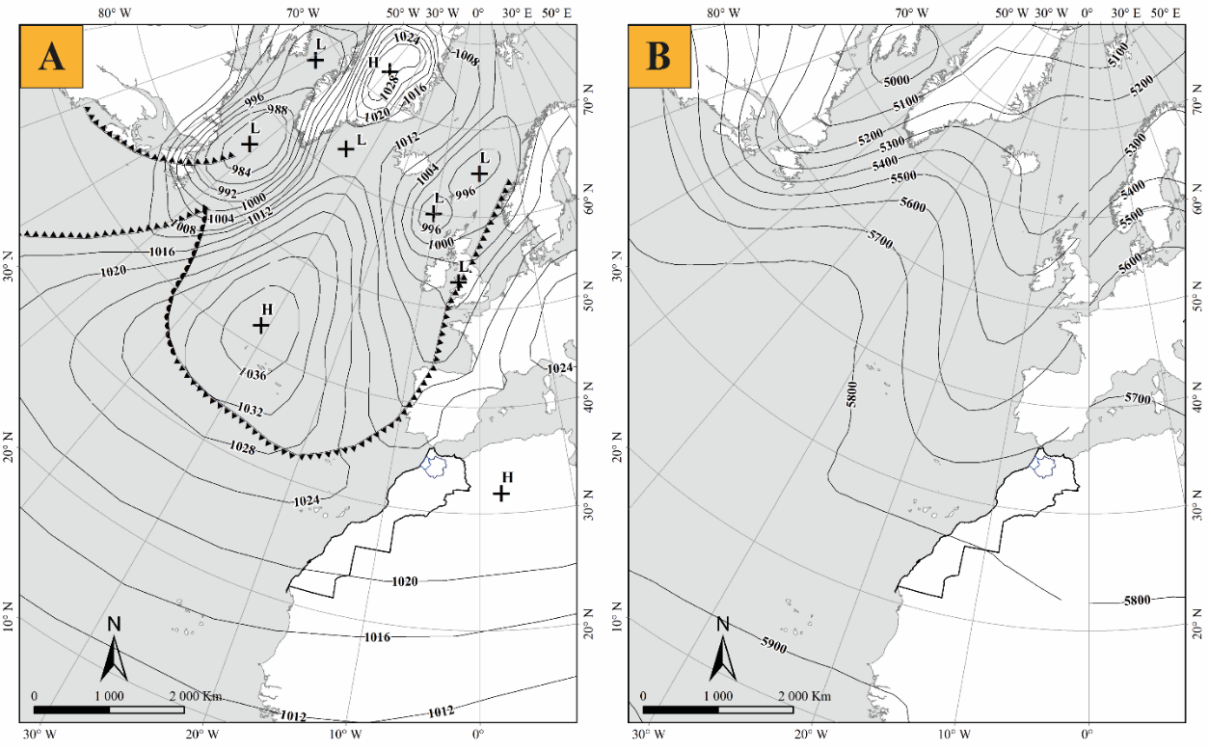


Figure 31 : (A). Régime cyclonique d'hiver (type occidental) capté le 25/novembre/2020. (Source : Wtterzentrale, 2022) ; **(B).** Hauteur du géopotentiel à 500 mb durant le régime cyclonique d'hiver de type occidental du même jour. (Source : Wetterzentrale, 2022).

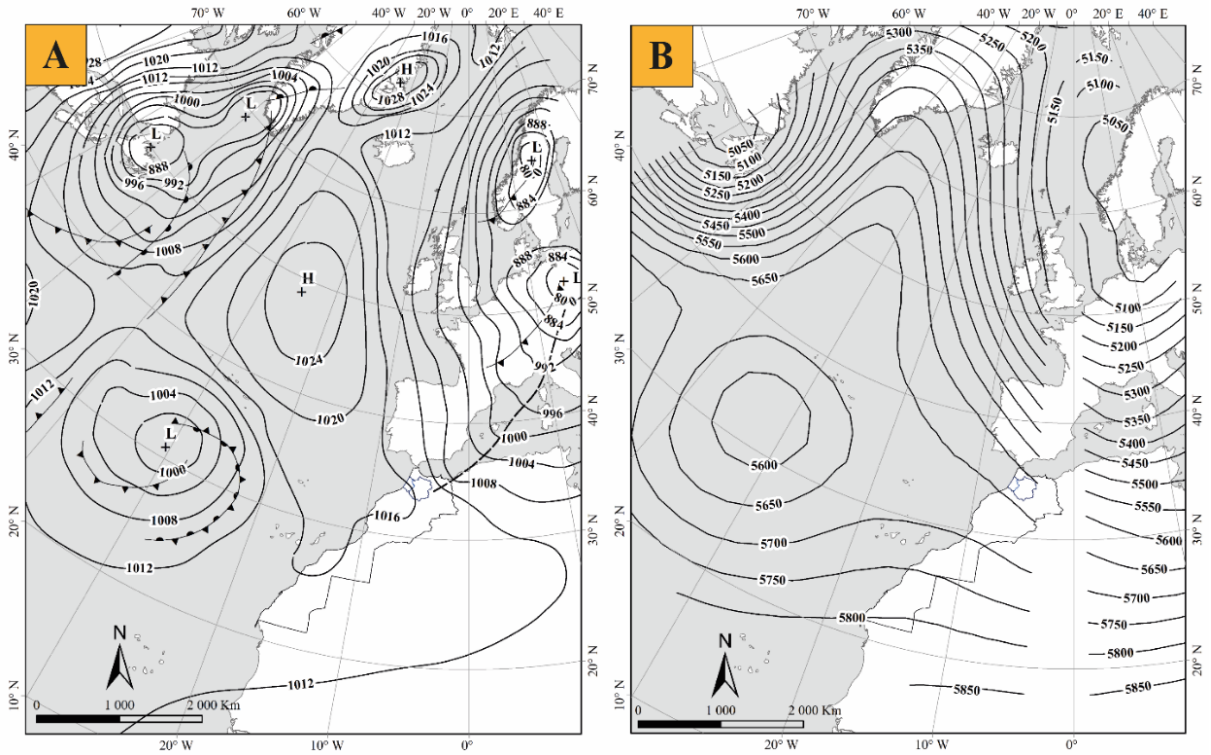


Figure 32 : (A). Régime cyclonique d'hiver à flux de Nord capté le 30/janvier/2020. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Hauteur du géopotentiel à 500 mb durant le régime cyclonique d'hiver à flux de Nord du même jour. (Source : Wetterzentrale, 2022).

IV . 1. e. Types de temps d'été

L'été marocain est décrit comme une période de beau temps sec et chaud ; il est expliqué habituellement par la remontée vers le Nord des hautes pressions (anticyclones) subtropicales. Son caractère le plus original est évidement la sécheresse. La saison d'été (estivale) ne commence vraiment que lorsque les pluies s'arrêtent, c'est à dire lorsque les perturbations polaires perdent de leur activité et de leur fréquence. Ce phénomène se produit le plus souvent pendant la première quinzaine de juin, néanmoins cela peut se produire dès la mi-mai ou seulement à la fin de juin. De même, l'été se termine lorsque les perturbations actives reprennent ; celles du front polaire ou souvent celles du front des alizés (pendant la deuxième quinzaine de septembre). La saison estivale dure donc assez longtemps, trois mois en moyenne, du 15 juin au 15 septembre.

i. Temps chaud anticyclonique

Il se produit lorsque l'anticyclone des Açores se trouve sur le Maroc ou à son voisinage vers les latitudes 30° et 35° parallèles, sur Madère par exemple. Cette situation est peu fréquente en été parce que les hautes pressions sont normalement au Nord à cette saison. Les perturbations du front polaires sont alors rejetées sur l'Europe du Nord-Ouest. Le gradient est faible et les masses d'air (air polaire ancien à caractère maritime le long de la côte et à caractère continental dans l'intérieur) sont quasi stagnantes (**Figure 33**).

Durant ce temps, le ciel est clair sur l'ensemble du pays. Seule la région littorale, jusqu'à 40 à 50 Km de la côte, connait parfois des brouillards nocturnes et matinaux. La région côtière connait également des brises, mais seule la brise de mer est bien marquée et le vent est très faible dans l'intérieur. Le temps est chaud avec une amplitude thermique faible sur la côte mais assez marquée dès qu'on s'en éloigne : à Kénitra la température oscille entre 21 et 28°C, à Sidi Slimane entre 22°C et 37°C (ORMVAG, 2021).

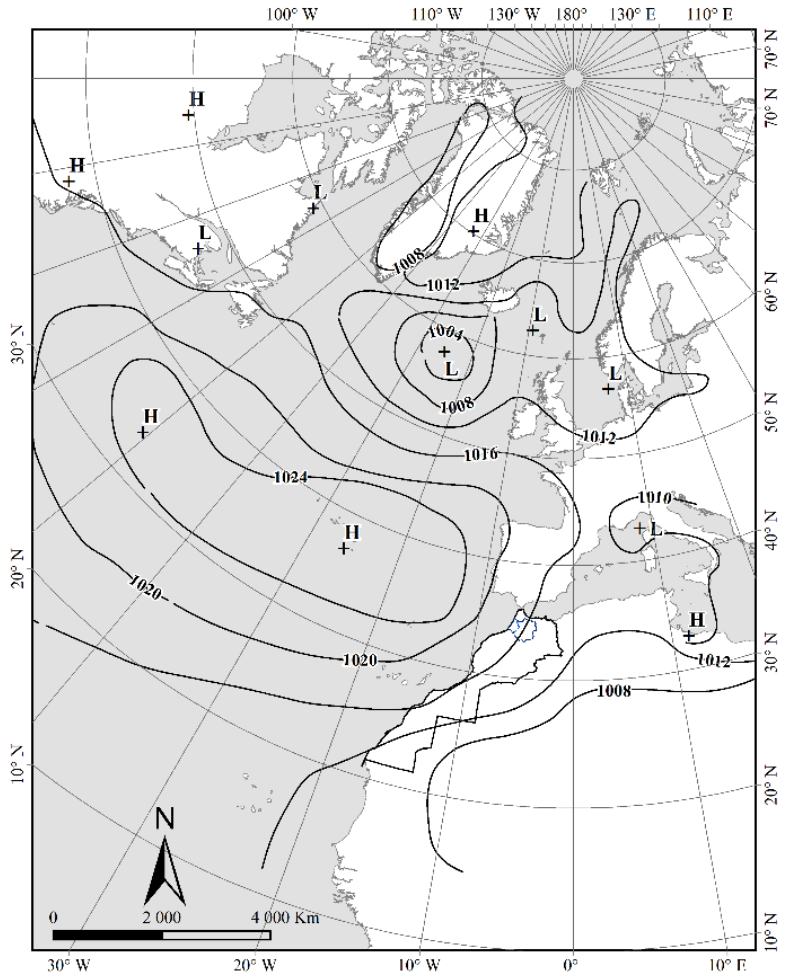


Figure 33 : Type de temps chaud anticyclonique capté le 24/juillet/2020. (Source : Wetterzentrale, 2022)

ii. Beau temps relativement frais de Nord-Est

Il se produit lorsque la dorsale anticyclonique s'étend de Madère ou des Açores jusqu'à l'Espagne ou la France (**Figure 34A**). Le courant perturbé est alors rejeté vers les iles Britanniques ou la Scandinavie. Le Maroc, sur la face Sud-Est de l'anticyclone, est soumis à un flux de Nord-Est d'air polaire plus ou moins continentalisé et plus ou moins réchauffé. C'est le type de temps le plus agréable de l'été marocain. Les amplitudes thermiques sont plus marquées que dans le cas précèdent par ce que l'air est plus sec : sur la côte 23°C à 31°C ; dans la région intérieure (Sidi Slimane), 22°C à 42°C. Le ciel est clair sur l'ensemble du bassin Bas Sebou mais il y a aussi parfois des brouillards sur la région côtière, qui se forme dans la nuit et se dissipent dans la matinée (**Figure 34B**).

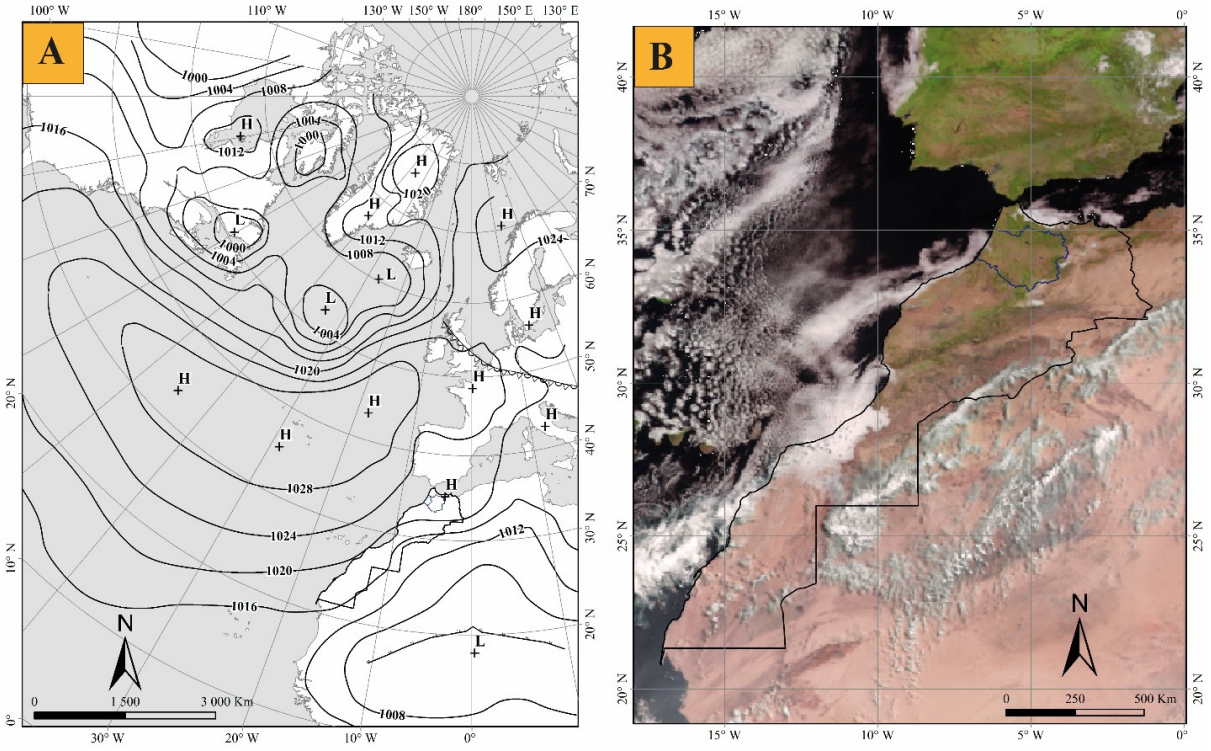


Figure 34 : (A). Régime de Nord-Est capté le 06/juin/2022. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Vue aérienne durant le régime de Nord-Est captée le même jour à 10h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques EUMETSAT (OEESM), 2022).

iii. Beau temps d'Est très chaud : Chergui

Il se produit lorsque la dorsale anticyclonique est franchement au Nord du pays, sur le parallèle 40° (Açores et Espagne) ou le parallèle 45° (France). Le Maroc, alors nettement au Sud de l'anticyclone, est dans un courant d'Est (**Figure 35**), lent, plus ou moins épais, qui apporte de l'air saharien dans les régions occidentales du Maroc : c'est le Chergui. Cet air tropical continental vient du Sahara, la chaleur devient alors très forte : 40°C à 42°C, parfois 45°C, voire dans les cas extrêmes 50°C. Ces températures excessives s'observent aussi bien sur la côte que dans les régions intérieures du bassin Bas Sebou.

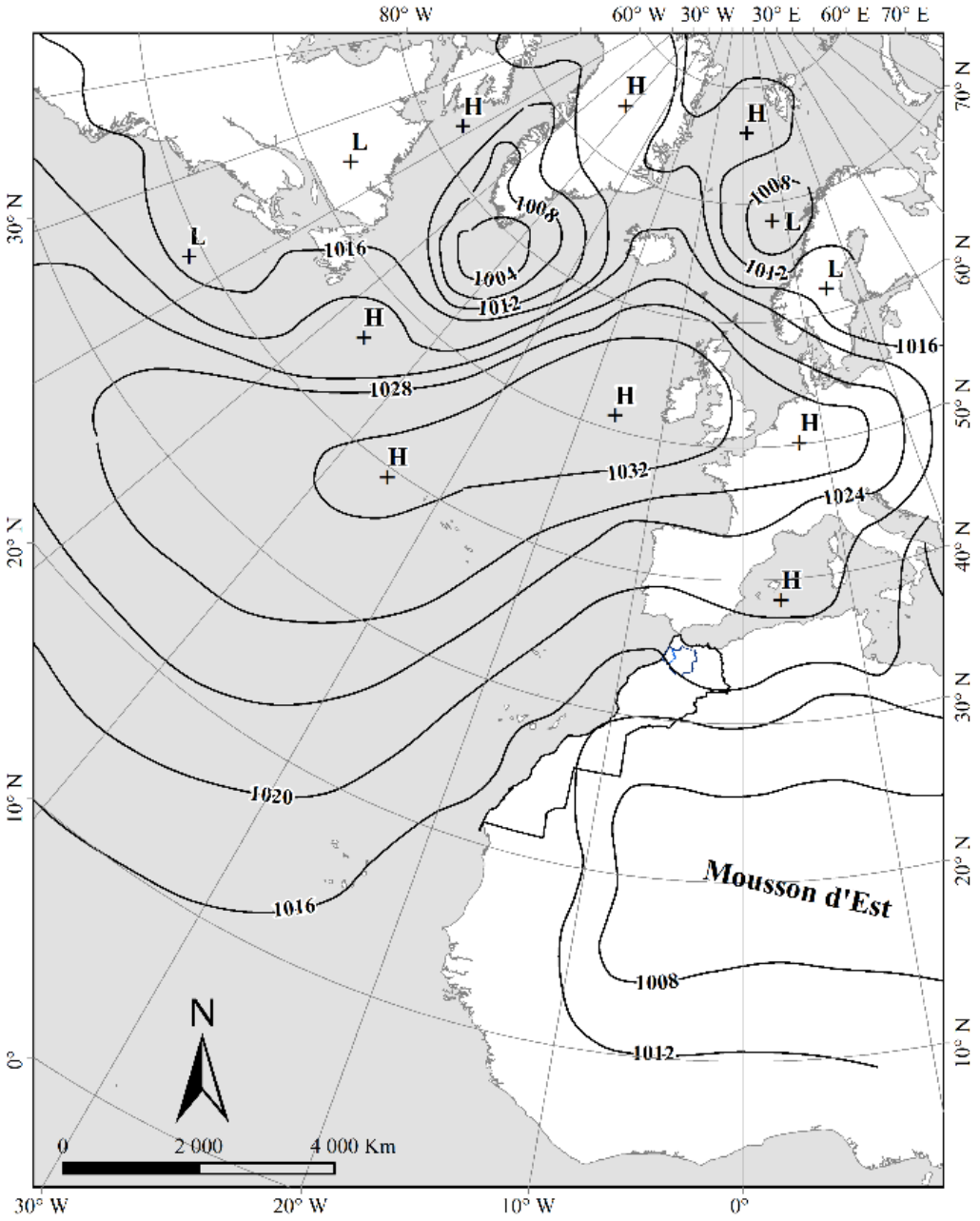


Figure 35 : Régime d'Est (Chergui) capté le 09/juillet/2022. (Source : Wetterzentrale, 2022)

IV . 1. f. Types cycloniques d'été

i. Temps chaud et orageux du front des alizés

Fréquent en été, c'est un type de temps qui dure assez longtemps car son évolution est lente. Les hautes pressions, centrées sur les Açores, s'étendent plus ou moins en direction du Nord de l'Espagne ou de la France. Le Maroc se trouve alors sur la face Sud-Est de l'anticyclone, le plus souvent dans un large thalweg barométrique qui prolonge vers le Nord de la dépression saharienne. On observe également une dépression ou bien un couloir dépressionnaire entre l'anticyclone des Açores et l'anticyclone Saharo-libyen. C'est dans ce couloir ou se déplace lentement le front quasi-stationnaire marocain (**Figure 36A**).

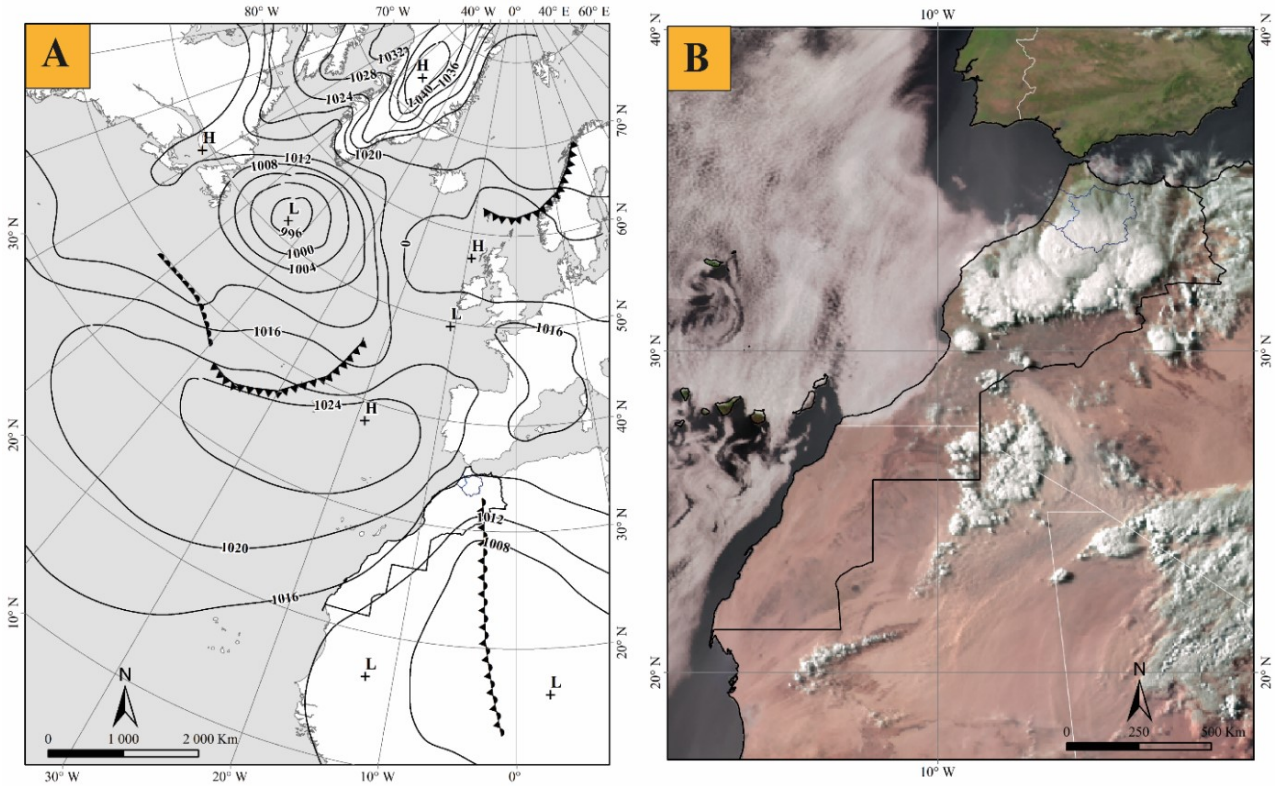


Figure 36 : (A). Régime orageux du front des Alizés capté le 05/juin/2022. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Vue aérienne durant le régime orageux du front des Alizés captée le même jour à 08h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques EUMETSAT (OEESM), 2022 modifiée).

ii. Temps légèrement perturbé

Il s'agit de perturbations qui, en hiver, donnent un très mauvais temps, mais qui, en été, sont faiblement actives (**Figures 37B et 37D**) ; l'air tropical est évolué et sa température n'est pas alors très différente de celle de l'air maritime. Les situations perturbées sont variées. Les deux plus fréquentes sont les flux de Nord et de Nord-Ouest qui amènent des fronts froids sur le Maroc ou des cyclogenèses au voisinage du Maroc.

Les flux d'air polaire de Nord et de Nord-Ouest se produisent lorsque la dorsale anticyclonique se retire vers les Açores. Une dépression sur l'Europe ou l'Atlantique envoi jusqu'au Maroc des vagues d'aires polaires (**Figure 37A**).

Les cyclogenèses de l'été sont faibles. Elles se produisent sur des bulles d'air froid expulsées par le front polaire, alors que la dorsale anticyclonique s'est étendue de nouveau vers l'Espagne ou la France. Ces cyclogenèses ont lieu le plus souvent sur le Portugal ou le Golf du Cadix, plus rarement sur Madère ou les Canaries (**Figure 37C**).

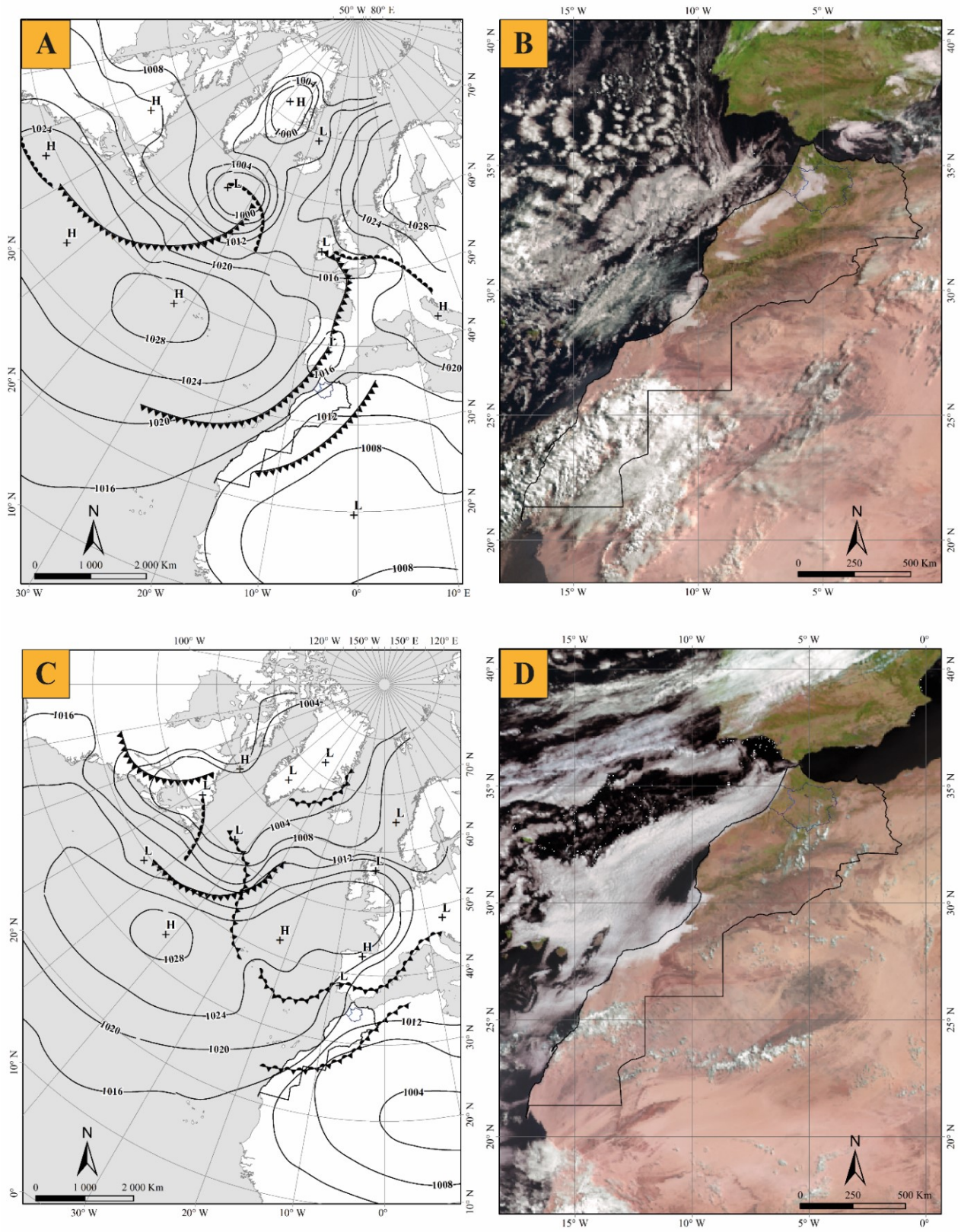


Figure 37 : (A). Régime légèrement perturbé à flux polaire de Nord et Nord-Ouest capté le 03/juin/2021. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(B).** Vue aérienne durant le régime perturbé à flux polaire de Nord et Nord-Ouest captée le 03/juin/2021 à 11h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques EUMETSAT (OEESM), 2022) ; **(C).** Régime à faible cyclogenèse au voisinage du Maroc capté le 07/juillet/2021. (Source : Wetterzentrale, 2022) ; **(D).** Vue aérienne durant le régime à faible cyclogenèse au voisinage du Maroc captée le 07/juillet/2021 à 09h du matin. (Source : Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques EUMETSAT (OEESM), 2022).

IV . 2. Éléments du climat

IV . 2. a. Précipitations

La plus grande partie du bassin Bas Sebou reçoit annuellement un taux pluviométrique compris entre 400 et 600 mm. Des taux plus élevés dans l'Ouest (jusqu'à 600 mm), plus faible dans l'Est (moins de 400 mm) témoignent d'une réelle inégalité géographique dans la distribution des pluies, tandis que les rythmes pluviométriques propres à chaque station météorologique (Kenitra et Sidi Slimane) sont marqués par une double irrégularité : annuelle et périodique.

i. Irrégularité annuelle

Le climat méditerrané est caractérisé par une opposition saisonnière entre la saison froide et pluvieuse et la saison chaude et sèche. Les graphiques relatifs aux stations météorologiques de Kénitra et Sidi Slimane traduisent bien ce phénomène et mettant en évidence un maximum de saison froide, un minimum accentué de saison chaude (**Figure 38**).

ii. Maximum pluviométrique de la saison froide

Les mois de la saison froide reçoivent 485 mm soit 83.6 % du total annuel (580 mm). Plus précisément les mois de la saison de l'automne totalisent 46 % des précipitations annuelles. Les 3 mois de janvier, février et mars avec respectivement 81, 72 et 61 mm sont moins arrosés que novembre et décembre (101 et 108 mm). Le mois de mars avec une moyenne de 61 mm, marque une courte recrudescence de la pluviométrie.

La moyenne annuelle des jours de précipitions est de 59, soit un peu plus de 1 jour sur 6, et de 5, 6 jours par mois (**Tableau 3**). Au cours de la saison froide, la moyenne atteint entre 6 (octobre) et 8 (décembre) et il ne pleut qu'un jour sur quatre mais parfois les précipitations sont violentes et prolongées. La pluviométrie moyenne enregistrée entre septembre et la première décade de mars 2010 a atteint 746 mm. Cette pluviométrie est la plus importante de toutes les précipitations annuelles depuis les années 40. Depuis 1916, les pics annuels sont enregistrés en 1936 avec 841 mm et en 1940 avec 827 mm (**Figure 39**).

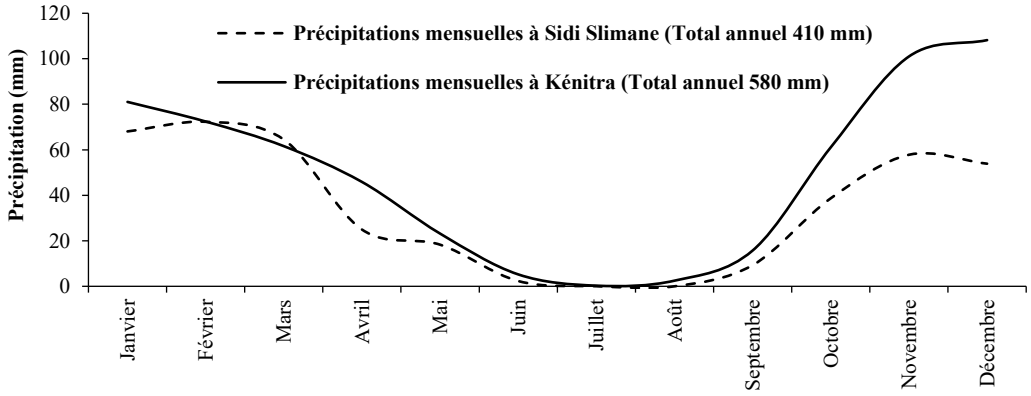


Figure 38: Moyennes des précipitations mensuelles à Kénitra et à Sidi Slimane pour la période 1933-2017. (Source : ORMVAG)

Tableau 3: Moyennes mensuelles et annuelles du nombre de jours de précipitations. (Source : ORMVAG)

Station	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Kénitra	6	5.4	5.4	4.5	2.7	0.6	0.1	0.3	1.5	5.6	6.1	6.4	44.6
Sidi Kacem	6.7	6.4	6.6	5.9	4.2	1.1	0.2	0.6	2.3	5.5	6.8	6.9	53.2
Sidi Slimane	6.5	6.1	6.2	5.5	3.8	1	0.2	0.5	2.1	5.3	6.6	6.6	50.4
Lalla Mimouna	7.4	7.1	6.7	6.6	3.9	0.9	0.2	0.4	2.1	6.4	7.9	8.3	57.9

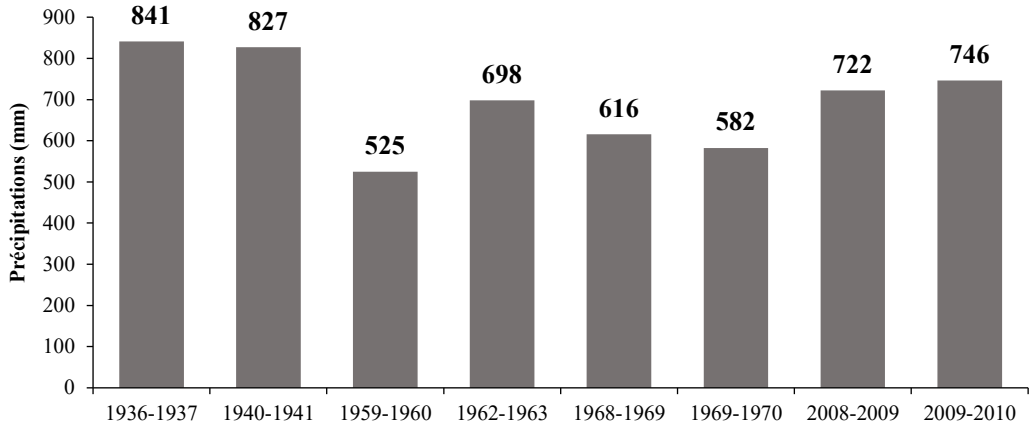


Figure 39: Pics des précipitations enregistrées dans la station de Kénitra depuis l'année 1936. (Source : ORMVAG)

iii. Minimum pluviométrique de la saison chaude

Les quatre mois de l'été reçoivent des précipitations infimes : 9 mm en juin, 1 mm en juillet, 1 mm en août, 12 mm en septembre, sont pratiquement secs avec des moyennes décadaires de 0 à 2 mm. Même en période orageuse, cette pluie d'été revêt rarement la forme de grosses averses : la quantité moyenne de pluie par jour pluvieux n'est que de 1 mm en juillet et août.

iv. Irrégularité périodique

Les apports pluviométriques annuels de Kénitra varient du triple : 1065 mm en 2010, 334 mm en 2016 (**Figure 40**). Les études faites pour déceler un éventuel cycle dans la succession des années sèches et humides dans le bassin Bas Sebou ont conclu au contraire que leur alternance obéit à d'autres règles que celle du hasard (Hakam *et al.*, 2022a).

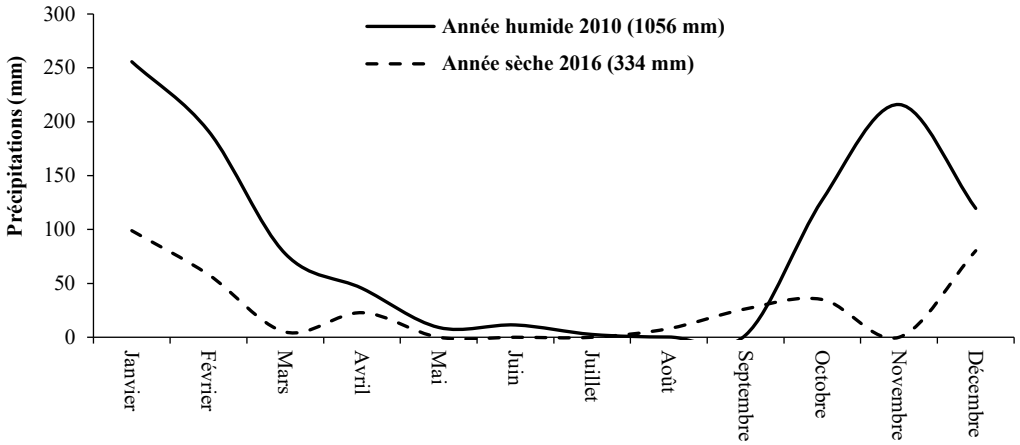


Figure 40: Extrêmes pluviométriques annuelles à Kénitra. (Source : ORMVAG)

v. Irrégularité géographique

La carte de distribution des précipitations dans le bassin versant de Sebou fait apparaitre une double dégradation de l'humidité : du Nord vers le Sud et de l'Ouest vers l'Est (**Figure 41**). Ces deux se combinent pour dessiner une frange humide au Nord (Rif) avec des précipitations comprises entre 600 et 800 mm sauf dans la partie orientale, moins arrosée tandis dans le coin Sud-Est de la plaine (Gharb) apparait un noyau de sécheresse dont l'axe est la vallée du Beht (El Kensera du Beht et Sidi Slimane) ; la pluviométrie ici est inférieure à 500 mm et même à 400 mm. Cette répartition est en liaison avec l'influence Océanique qui se dégrade d'Ouest en Est, avec la situation en latitude qui rend plus fréquent le passage des dépressions cycloniques vers le Nord, enfin avec la topographie : la pluviométrie s'accroit sur les contreforts du Rif et diminue dans les creux de la cuvette orientale de la plaine. Dans le Moyen Atlas, seuls les secteurs les plus élevés (Ifrane) ont une pluviométrie supérieure à 700 mm. Ainsi se manifeste une dissymétrie entre les bordures septentrionale et méridionale du bassin versant de Sebou.

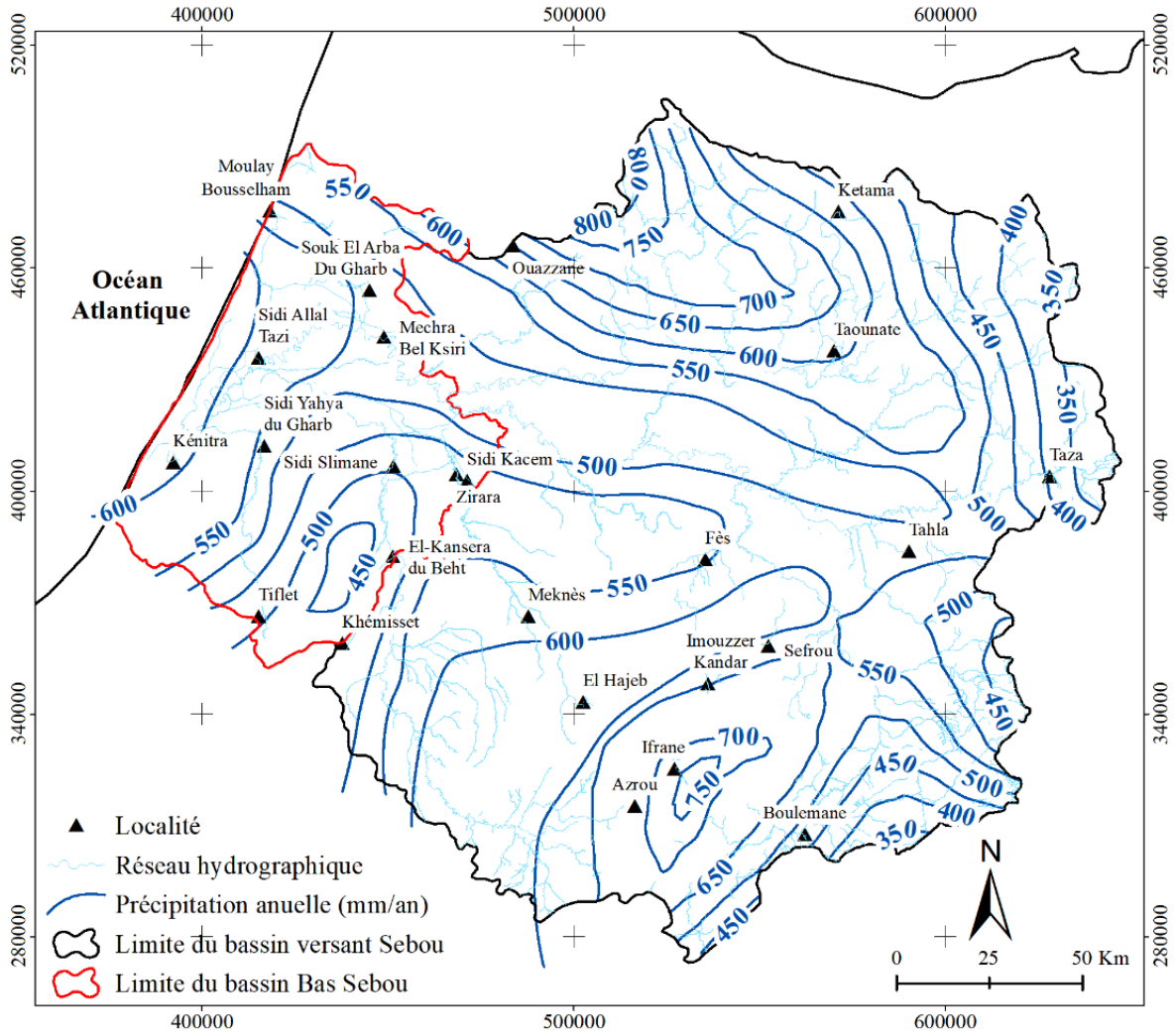


Figure 41: Carte pluviométrique dans le bassin versant de Sebou. (Source : ABHS, 2020)

IV . 2. b. Températures

L'influence de l'Océan Atlantique sur le régime thermique du Maroc occidentale est soulignée par l'allure de la carte des isothermes annuelles (**Figure 42A**). Cette carte montre également un quasi parallélisme des lignes isothermes avec le tracé de la côte ainsi que la température moyenne ne varie pas beaucoup du Nord au Sud, malgré une différence de latitude de plus de 5°. Cela est dû aux influences du courant froid (courant des canaries) qui baigne les cotes. Cette influence arrive à supprimer presque complètement l'influence de la latitude (Furnestin, 1959).

i. Anomalie froide de l'hiver

La carte des moyennes de températures minimales du mois le plus froid fait ressortir une véritable anomalie thermique hivernale du bassin Bas Sebou (**Figure 42B**). Une incurvation des isothermes donne au bassin du Bas Sebou une allure de poche, avec des températures de 6° dans la partie centrale contre 7°C ou 8°C sur les bords. Ces basses températures s'expliquent

en premier lieu par la position particulière vis-à-vis des mécanismes atmosphériques responsables des influences froids au Maroc. Discutés dans les sections précédentes, deux types de temps sont en cause : type cyclonique à flux de Nord ou type anticyclonique dans lequel les hautes pressions des Açores se soudent à celles de l'Europe. Dans les deux cas sa latitude septentrionale met le bassin Bas Sebou sous l'influence des invasions d'air polaire.

Par ailleurs, l'environnent géographique immédiat semble contribuer à exagérer les manifestations du froid. En effet, dans le premier cas, celui d'une aire cyclonique, la dorsale s'établit à l'Ouest du continent et dirige un flux d'air qui s'engouffre dans le large entonnoir de la plaine. Dans le deuxième cas, celui d'une aire stable de hautes pressions (anticyclonique), la forme en cuvette de la plaine en fait un réservoir d'air polaire.

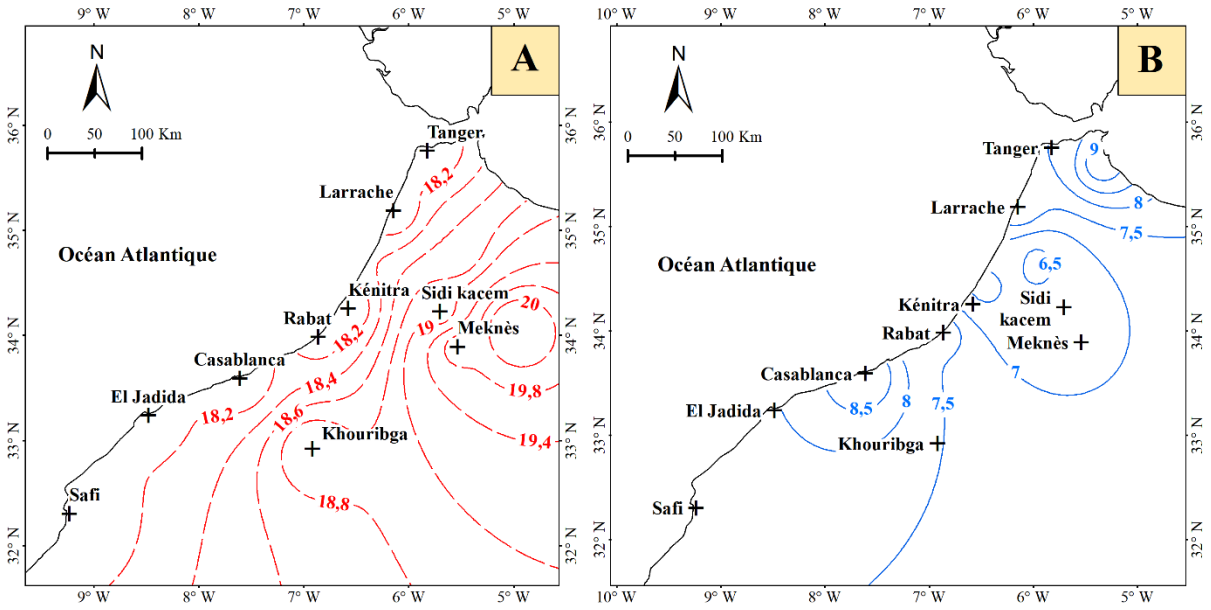


Figure 42: (A). Températures moyennes annuelles du Maroc occidental ; **(B).** Températures moyennes minimales du mois le plus froid de l'année (Janvier).

ii. Chaleurs estivales

L'été dans le bassin Bas Sebou est dans l'ensemble moins capricieux que les hivers. La permanence du régime anticyclonique entretient une remarquable égalité dans les températures entre juin et septembre et les belles journées se succèdent pendent cette saison sans interruption.

Les moyennes d'août : de 25°C pour tout le mois, 34°C pour les maximas, 18°C pour les minimas, traduisent cette quasi permanence de l'ensoleillement dont l'action est tempérée par le souffle des brises de mer et un léger voile de nuages. Les températures estivales peuvent cependant atteindre des degrés très élevés (**Figure 43**).

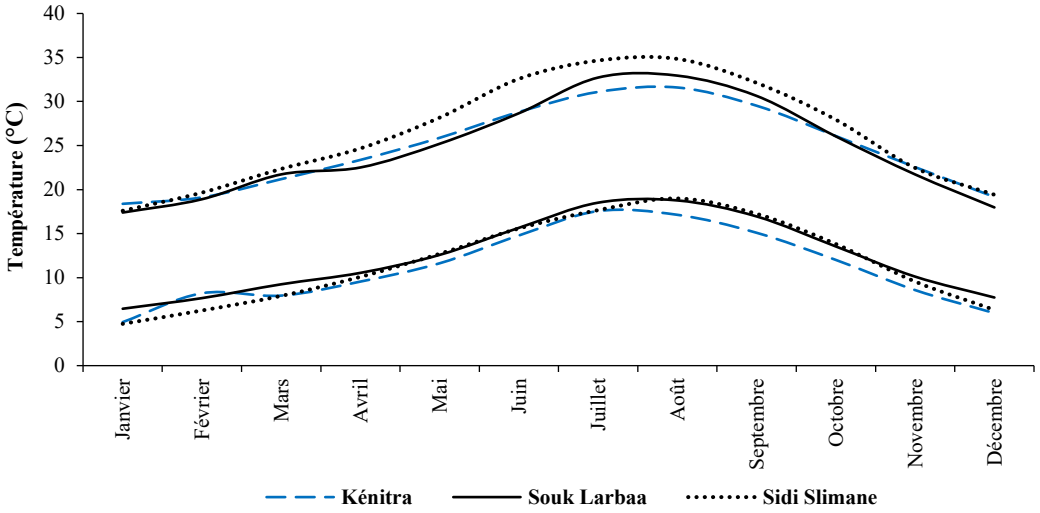


Figure 43: Moyennes mensuelles des températures maxima et minima à Kénitra, Souk Larbaa et Sidi Slimane. (Source : ORMVAG)

IV . 2. c. Insolation et brouillard

À cause de la situation en latitude du bassin Bas Sebou, l'insolation connait des différences saisonnières relativement atténuées (**Figure 44**). Sur un total de 3168 heures de présence du soleil au-dessus de l'horizon, 1338 heures, soit 42% du total, se produisent au cours du semestre d'hiver, contre 1830 heures, soit 57% au cours de la saison estivale (ORMVAG, 2021).

La ville de Kénitra connait le brouillard en moyenne de plus 66 jours par an, soit près d'un jour sur cinq (**Figure 45**). Cette fréquence est due au grand nombre de journées à air calme avec une vitesse de vent en général inférieure à 5 km/h. En effet, Quatre types de brouillard sont générés dans le bassin Bas Sebou tels que brouillards de rayonnement, de plan d'eau, de mélange et d'advection.

- **Brouillards de rayonnement :** Ils se produisent au cours des nuits claires de beau temps anticyclonique d'hiver, lorsque la brise de mer provoque une rentrée d'air maritime humide. Ils n'intéressent que la frange côtière sur une distance d'une trentaine de kilomètres. Ce type de brouillard apparait le plus souvent au cours de la nuit à l'approche du minimum de température et se dissipe assez vite après le lever de soleil.
- **Brouillards d'eau :** Ce type de brouillard est assez souvent réalisé sur les Merjas mais ils sont moins fréquents à cause d'assèchement des Merjas. Ils se produisent aussi après les périodes d'inondation.
- **Brouillards de mélange :** Ils se forment au contact de masses d'aire de différentes sources. En hiver surtout entre l'air tropical maritime et l'air polaire, en été surtout entre les airs polaire, polaire, maritime ou continental. Ce type de brouillard se produit surtout sur la frange côtière, parce que vers l'intérieur du bassin les masses d'air deviennent plus homogènes et sèches.
- **Brouillards d'advection :** Ce type est le plus fréquent et résulte du transport d'une masse

d'air d'origine tropicale (chaude et humide), sur une surface marine plus froide en l'occurrence le courant des Canaries. Ce brouillard est poussé vers le littoral par le vent d'Ouest de la circulation générale ou par la brise de mer.

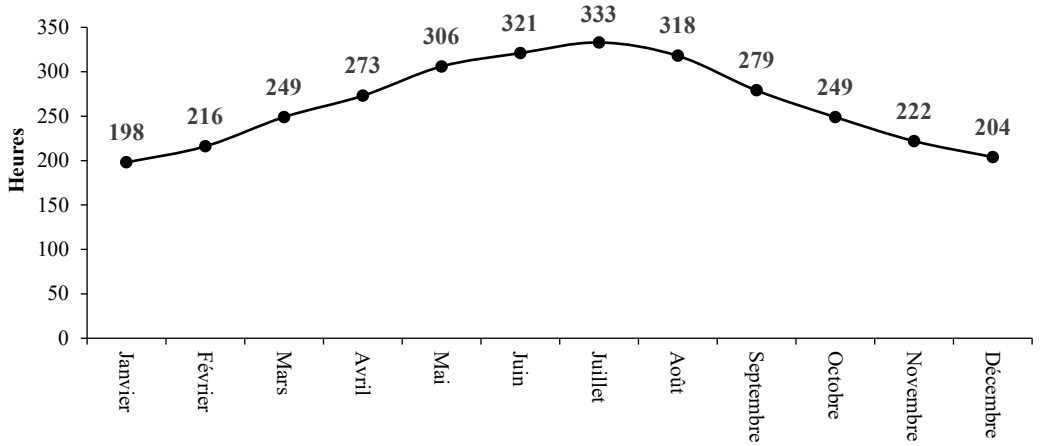


Figure 44: Moyennes des durées totales de la présence du soleil au-dessus de l'horizon. (Source : ORMVAG)

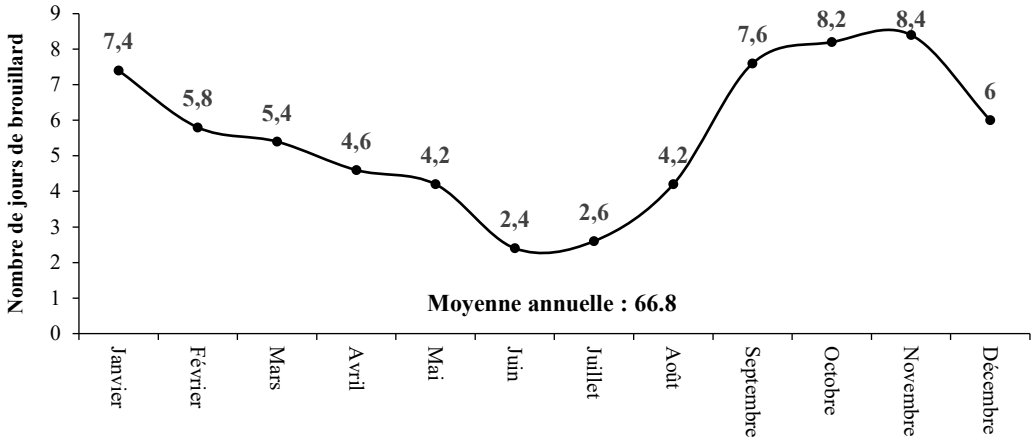


Figure 45: Moyennes de nombre de jours de brouillard à Kénitra. (Source : ORMVAG)

IV . 2. d. Vent

La rose des vents ci-dessous résumant les observations et fait ressortir le caractère Océanique du climat, soit 63% des vents sont de composante d'Ouest contre seulement 18% pour ceux qui viennent de l'Est (**Figure 46**). Par contre les flux du Nord (41%) et du Sud (37%) sont mieux équilibrés. La prédominance du flux d'Ouest et surtout du Sud-Ouest, indique que les facteurs liés à la circulation générale de l'atmosphère à Kénitra prévalent sur les conditions géographiques locales. Dans le bassin Bas Sebou, on assiste également des brises de mer appelés Gharbi (vent d'Ouest) et des vents chauds venant du continent appelés Chergui (vent d'Est).

Une brise de mer est un vent local qui existe sur le proche littoral. Elle souffle de la mer vers le littoral pendant la journée. Elle se produit souvent en été par type de temps anticyclonique lorsque, dans la journée, sur la surface terrestre surchauffée se crée un minimum barométrique local qui attire l'air plus frais de l'Océan et engendre un vent régulier (Huguet,

1996).

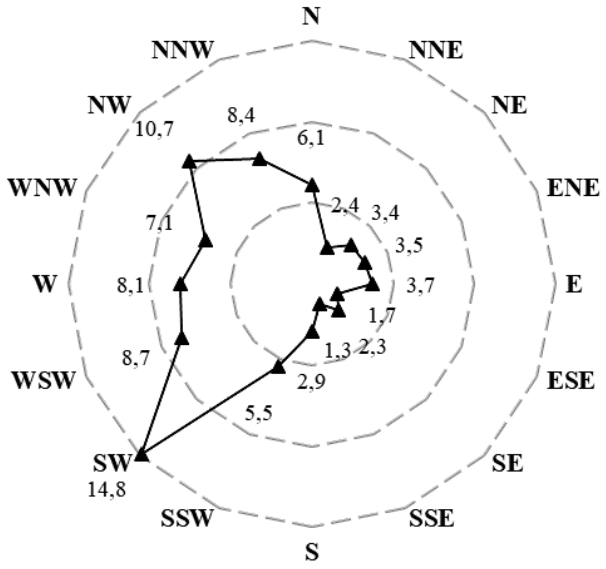


Figure 46: Rose des vents à la station de Kénitra. (Source : ORMVAG)

V. Régimes hydrologiques

Le bassin Bas Sebou est considéré comme déversoir des eaux du bassin versant de Sebou qui s'étend sur 38 950 Km^2 et intéresse trois grandes unités morphologiques du Maroc ; le Rif, le Moyen-Atlas et la Meseta.

Le réseau hydrographique du bassin versant de Sebou est représenté notamment par l'Oued Sebou et ses affluents (**Figure 47**). Il prend sa source, sous l'appellation d'Oued Gigou, dans le Moyen Atlas à 2030 m d'altitude. Il sillonne une longueur d'environ 500 km avant d'atteindre son exutoire dans l'Océan Atlantique à Mehdia, près de Kénitra. La situation septentrionale du réseau hydrographique et l'ampleur du volume montagneux qui l'encadre (altitudes maximales de 2450 m dans le Rif, 3190 m dans le Moyen-Atlas et 1600 m dans la Meseta) font que la pluviométrie y atteint des intensités exceptionnelles et le volume des eaux écoulé annuellement dépasse 4000 millions de m^3 en moyenne (ABHS, 2021).

Le régime de l'ensemble du réseau hydrographique est de type pluvial. L'influence du régime nival est peut-être négligeable. Il se manifeste par une certaine récession des débits au cœur de l'hiver et une augmentation des maximas de printemps à cause des chutes de pluies et une augmentation relative des températures qui accélère la fonte de neige.

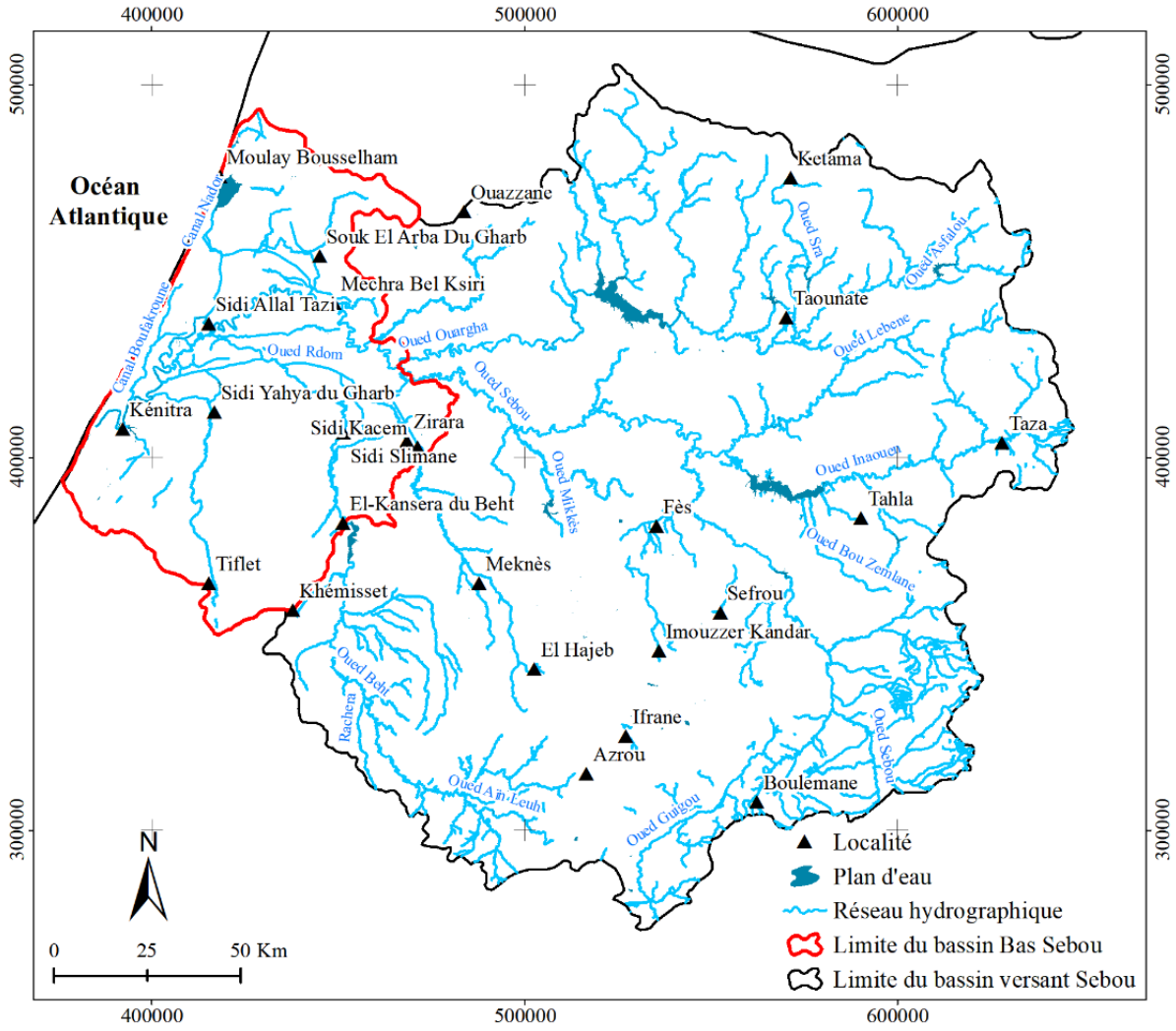


Figure 47 : Réseau hydrographique du bassin versant de Sebou.

V . 1. Oued Ouergha en amont du basin Bas Sebou

Le réseau supérieur de l'Ouergha, principal affluent du bassin versant du Sebou, draine une superficie de l'ordre de 7300 Km^2 (ABHS, 2022). Ce réseau est caractérisé par son orientation Ouest-Est, sur lequel viennent déboucher sur la rive droite des affluents de direction Nord-Sud, ceux de la rive gauche étant réduits à de courts ruisseaux (**Figure 48**). Il se situe dans la région centrale du Rif où la pluviométrie moyenne annuelle peut dépasser 1000 mm.

A la station de Jbel Outka, située au centre de la partie la plus active du bassin de l'Ouergha au point de vue hydrologique, à l'altitude de 1085 m, la pluviométrie moyenne annuelle est de 1619 mm, répartie comme suit (**Tableau 4**) :

Tableau 4 : Pluviométrie moyenne mensuelle à la station de Jbel Outka pour la période 1980-2017. (Source : ABHS)

Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
314	302	247	143	111	29	1	2	30	138	260	339

Seuls les cinq mois d'hiver, de novembre à mars, peut être atteint un cumul de précipitations de 1462 mm, tandis que les mois d'été, de juin à septembre, n'en retiennent que 62 mm. Ce régime pluviométrique provoque un ruissellement actif au cours de la saison froide à cause de la nature des terrains montagneuses caractérisés par des fortes pentes et un sous-sol imperméable. Donc le bassin du haut Ouergha est considéré comme l'un des mieux alimentés. En effet, cette forte alimentation et sa répartition inégale au cours de l'année donnent un caractère très variable au régime de l'Ouergha à son entré dans le bassin Bas Sebou. Les données d'observation fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou (ABHS) à travers la station de jaugeage de Khenichet à l'entrée du bassin Bas Sebou illustre cette variabilité (**Tableau 5**).

Tableau 5 : Débit moyens mensuels en m^3/s pour la période 1980-2017. (Source : ABHS)

Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
196	188	128	89.63	55.18	21.33	15.86	13.73	13.36	17.68	23.59	100.10

L'irrégularité du régime de l'Oued Ouergha se manifeste dans les aspects suivants :

Irrégularité saisonnière moyenne	
Débit moyen mensuel le plus faible 13,73 m^3/s (août)	Débit moyen mensuel le plus élevé 196 m^3/s (janvier)
Irrégularité périodique	
Débit annuel moyen minimum 4,79 m^3/s (2000/2001)	Débit annuel moyen maximum 346,7 m^3/s (2009/2010)
Irrégularité saisonnière absolue	
1,14 m^3/s en juin 2013	1357 m^3/s en février 2010

À l'origine de ces crues, on trouve toujours le passage des dépressions du front polaire qui provoquent des précipitations généralisées sur le Nord du Maroc et particulièrement sur les reliefs. À cet égard la crue de l'année hydrologique 2009-2010 est très significative (**Tableau 6**).

Tableau 6 : Débits moyens mensuels (m^3/s) observés à la station de Khenichet durant l'année hydrologique 2009-2010. (Source : ABHS, 2010)

Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août
48,8	59,5	56,0	120	858	1357	1216	203	62,0	46,5	121	77,5

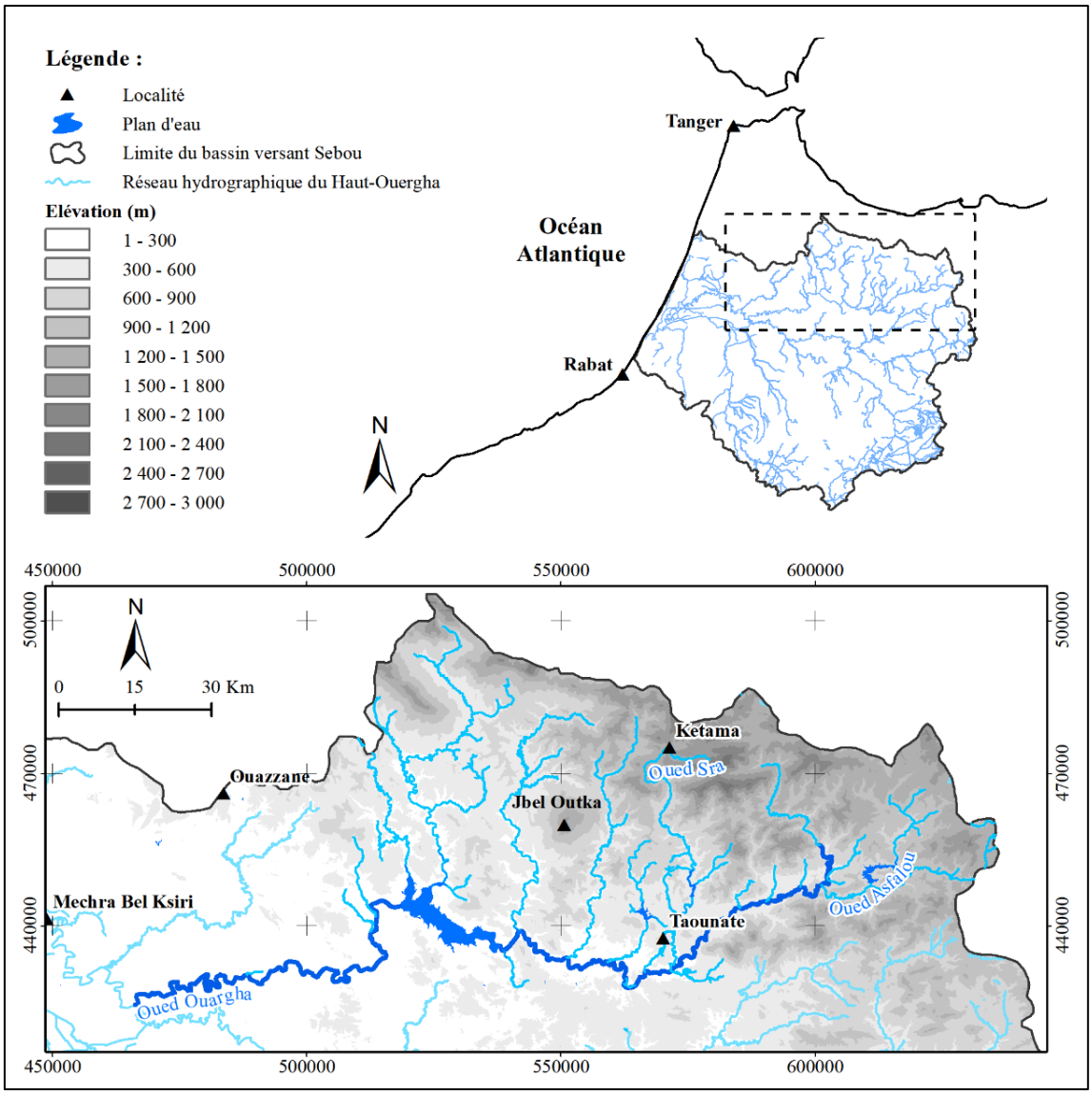


Figure 48 : Réseau hydrographique du Haut-Ouergha.

V . 2. Oued Sebou en amont du bassin Bas Sebou

Le régime de l'Oued Sebou, en amont du bassin Bas Sebou, est également irrégulier, mais offre néanmoins des extrêmes similaires à ceux de l'Ouergha. Les pentes plus faibles et la perméabilité des terrains ainsi que le régime pluviométrique moins brutal expliquent cette relative modération du ruissellement. En outre, on peut suggérer que le débit de l'Oued Sebou en amont du bassin est régularisé par les circulations karstiques qui se trouvent dans le Moyen Atlas. L'Oued Innaouen, qui avec son affluent Oued Leben, introduit également des perturbations dans le régime de l'Oued Sebou, en raison d'une pluviométrie moyenne qui se tient entre 600 et 1000 mm avec un ruissellement intense. En effet, l'hydrologie de l'Oued Sebou avant son entrée dans le bassin Bas Sebou peut être caractérisée par les observations fournies par la station de Azib Soltane (**Figure 49**).

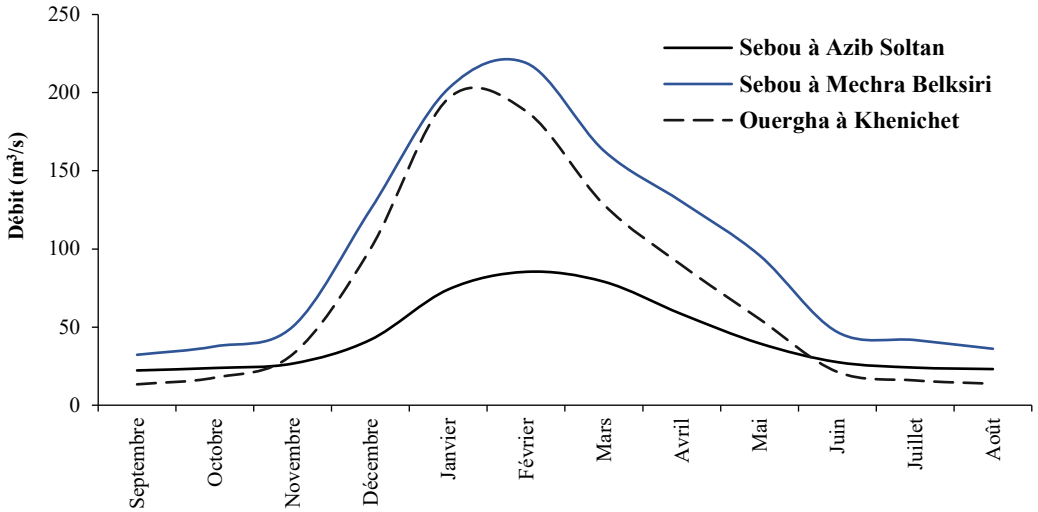


Figure 49: Débits mensuels moyens (m^3/s) de l'Ouergha à Khenichet, du Sebou à Azib Soltan et du Sebou à Mechra Belksiri pour la période 1984-2016. (Source : ABHS)

Irrégularité saisonnière moyenne	
Débit moyen mensuel le plus faible 23,12 m^3/s (juin)	Débit moyen mensuel le plus élevé 85,35 m^3/s (février)
Irrégularité périodique	
Débit annuel moyen minimum 8,03 m^3/s (1994-1995)	Débit annuel moyen maximum 195,26 m^3/s (1996-1963)
Irrégularité saisonnière absolue	
0,31 m^3/s en octobre 1994	663 m^3/s en janvier 1970

D'après les chiffres donnés, le régime de l'Oued Sebou semble être beaucoup moins intense que le régime de l'Oued Ouergha, qui devrait être considéré comme un élément perturbateur du réseau.

V . 3. Oueds secondaires

Si les inondations au niveau du bassin Bas Sebou sont provoquées essentiellement par les crues de l'Ouergha et du Sebou, les apports secondaires de certains affluents et ceux de l'Oued Mda ne doivent pas être négligés. L'influence des cours d'eau de la rive droite sont de moindre impact que ceux de la rive gauche.

L'Oued Rdat et l'Oued Mda développent leurs réseaux essentiellement dans les assises marneuses du Miocène et de la Nappe prérifaine. L'imperméabilité de ces roches, vite gorgées d'eau aux premières averses, donne aux deux Oueds un coefficient d'écoulement élevé lors des longues périodes pluvieuses.

Les affluents de la rive gauche du Sebou tiennent un plus grand rôle dans l'hydrologie du bassin Bas Sebou. Ce fait est dû non seulement à une extension supérieure de leurs bassins mais aussi aux conditions dans lesquelles ils débouchent dans le bassin Bas Sebou ; par la

convergence de leur cours moyen et par l'aspect tronqué de leur cours inférieur**.**

Avant la construction du barrage El Kansera, Oued Beht était l'élément le plus dangereux, la situation de son bassin dans des roches imperméables du Massif central, lui vaut un coefficient d'écoulement relativement élevé. Le barrage réduit considérablement les effets de ces débits sur le bassin Bas Sebou et en particulier la plaine.

L'Oued Rdom intervient de façons particulièrement graves lorsque son débordement se superpose à ceux de l'Oued Sebou moyen. En effet, le bassin versant du Rdom est caractérisé par des terrains perméables du fait de la nature des roches calcaires lacustres du Saiss, de la croûte régréguienne d'El Gaada et des marnes miocènes du pays Cherarda.

V . 4. Oued Sebou dans le bassin Bas Sebou

Le bassin Bas Sebou est traversé de l'Est à l'Ouest par l'Oued Sebou qui prend sa source dans le Moyen Atlas à 2030 m d'altitude et sillonne la plaine du Gharb sur une longueur de 225 km environ avant de se jeter dans l'Océan Atlantique à Mehdia. Le long de son parcours, l'Oued Sebou intercepte plusieurs affluents dont les plus importants sont les Oueds Inaouène, Lébène et surtout Ouergha sur la rive droite et les Oueds R'dom et Beht sur la rive gauche (**Figures 50**).

Le bassin Bas Sebou constitue un collecteur naturel des eaux de surface. Sa morphologie plate (la majorité de la plaine ayant une cote inférieure à 12 m) défavorise l'évacuation des eaux de crues des Oueds jusqu'à la mer. C'est ce qui rend cette zone fortement vulnérable aux risques d'inondations (**Figure 51**).

Ainsi l'Oued Sebou ne peut-il pas écouler les gros débits que son bassin supérieur lui envoie périodiquement et les débordements sont inévitables. L'eau débordée ne peut revenir par les mêmes voies au lit de l'Oued Sebou et s'étale largement dans la plaine, arrivant à couvrir plusieurs dizaines de milliers d'hectares et à stagner durant de longues semaines, voire des mois comme le cas de la dernière crue de 2010 (**Figure 7**). L'imperméabilité des tirs et sols argileux qui couvrent la quasi-totalité des bas-fonds de la plaine, favorise cette stagnation.

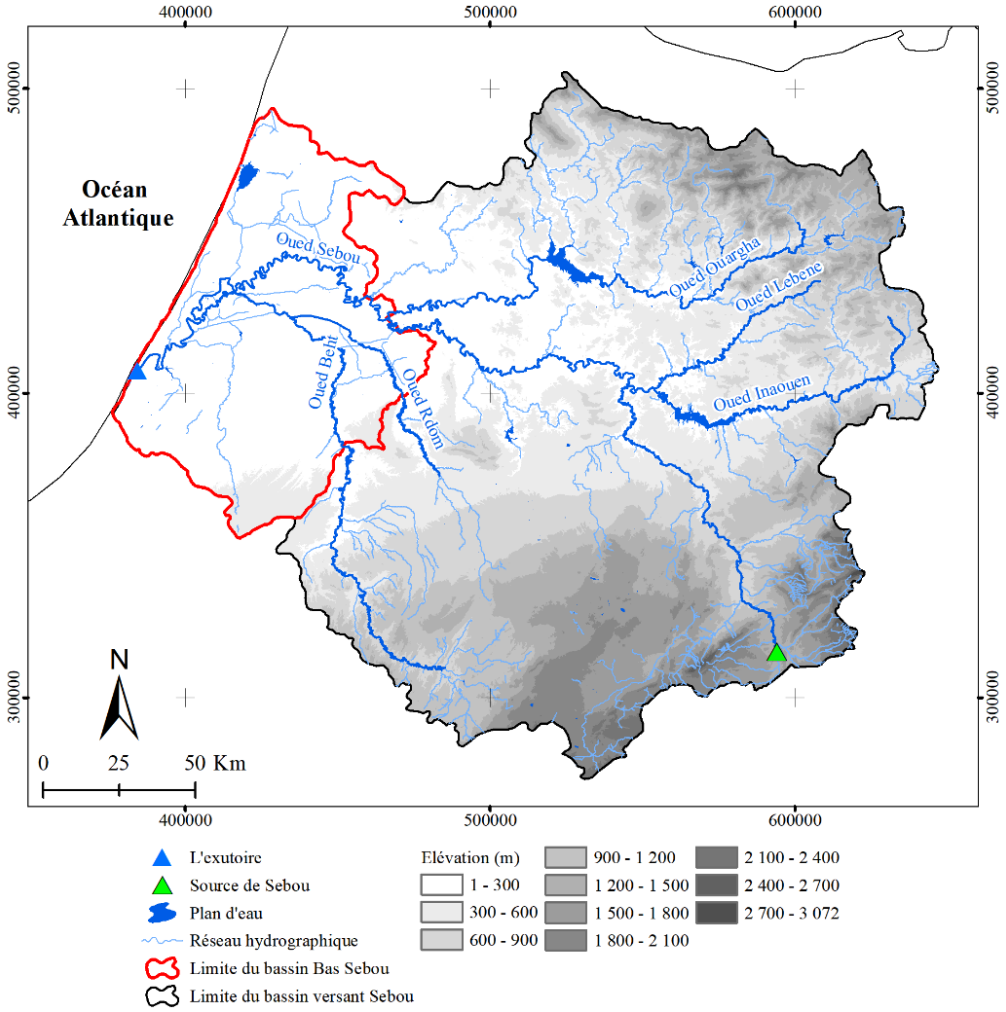


Figure 50: Principaux influents de l'Oued Sebou.

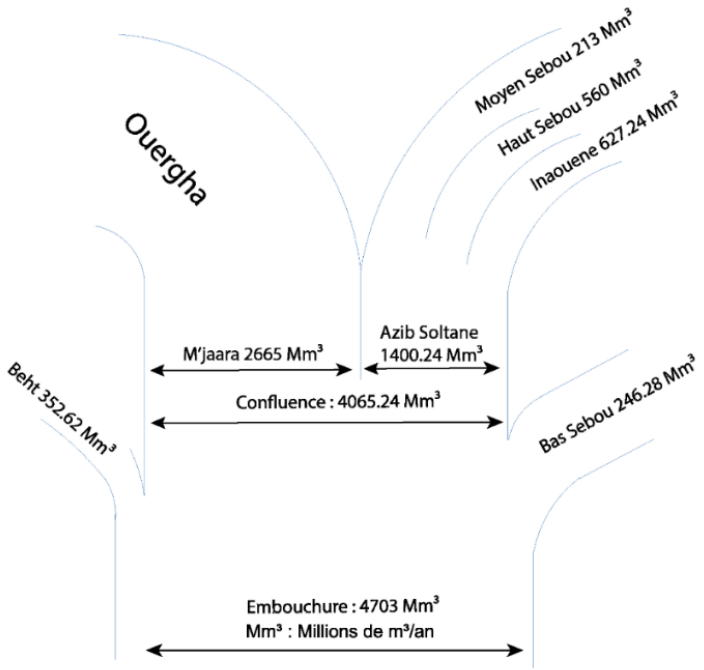


Figure 51: Répartition des apports annuels en eau de l'Oued Sebou par sous-bassins versants (1939/1940 à 2006/2007). (Source : ABHS)

VI. Hydrogéologie

Les ressources en eau souterraine du bassin versant de Sebou constituent une part importante du patrimoine hydraulique du pays et représentent environ 20 % du potentiel mobilisable du Maroc. Les ressources en eau souterraines sont contenues dans plusieurs nappes, dont les plus importantes sont (**Figure 52**) :

- Système aquifère du Saiss ;
- Complexe des nappes Maamora – Gharb ;
- Nappe du Drader Souiere
- Nappes du Moyen Atlas tabulaire ;
- Nappe de Bouagba ;
- Nappe du couloir Fès- Taza ;
- Nappes du Moyen Atlas plissé ;
- Nappe de Taza.

Ces ressources en eau souterraines contribuent au développement économique et social de la population, en assurant l'alimentation en eau potable (AEP) et industrielle d'une grande partie des centres urbains, du milieu rural et la satisfaction des besoins en eau des périmètres irrigués. L'alimentation en eau potable et industrielle (AEPI) des principales agglomérations du bassin (Fès, Meknès, Kénitra, Taza, Sidi Slimane et Sidi Kacem) est assurée essentiellement à partir des eaux souterraines (forages et captages des sources). Ces nappes productives sont vulnérables à la sécheresse, à la surexploitation et à la pollution. Bien gérées et protégées, elles représentent des atouts majeurs pour le développement socio-économique du bassin versant Sebou. Les données présentées par la suite ont leur origine dans le ActPDAIRE.

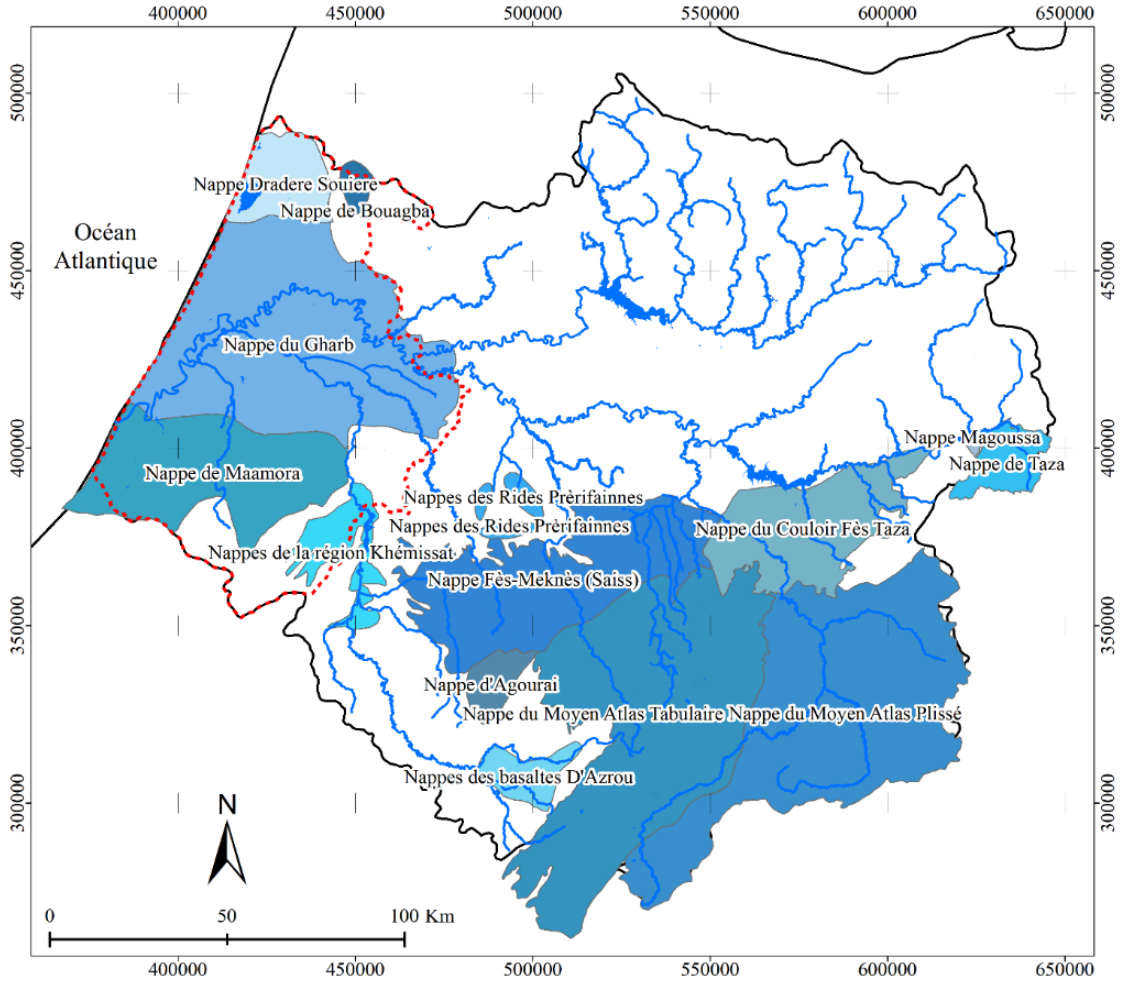


Figure 52 : Principales nappes phréatiques du bassin versant de Sebou. (Source : ABHS)

VI . 1. Nappe de Maamora

Le plateau de la Maamora contient une nappe libre importante qui s'étend sur une superficie d'environ 1820 Km². Ses limites naturelles sont constituées par l'Océan Atlantique à l'Ouest, l'Oued Beht à l'Est, les affluents des marnes miocènes au Sud. Au Nord, la nappe est délimitée par une ligne de mise en charge au niveau de laquelle elle se subdivise en nappe phréatique moins importante et peut exploitée, et une nappe profonde plus importante constituant le principal système aquifère de la plaine du Gharb.

La nappe de la Maamora s'écoule en éventail et présente trois directions d'écoulement (**Figure 53**) :

- Vers le Nord où elle alimente la nappe du Gharb ;
- Vers la mer à l'Ouest ;
- Vers le Nord-Est ; elle s'écoule vers l'Est et drainée par Oued Beht.

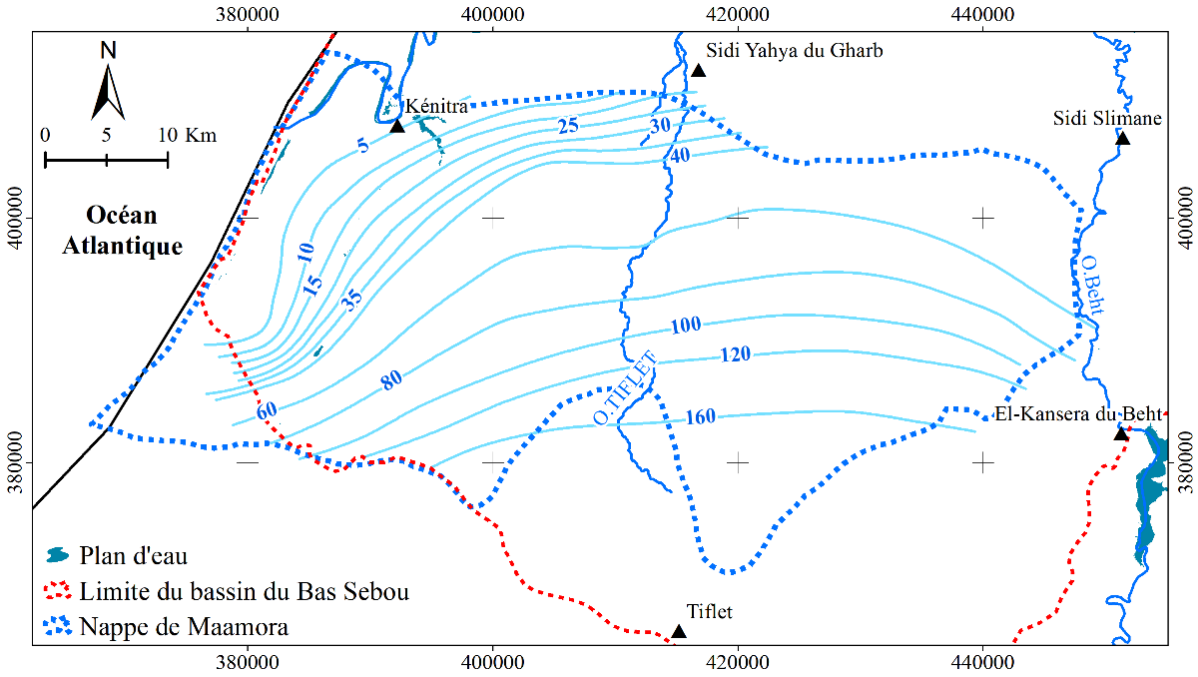


Figure 53 : Carte piézométrique de la nappe de la Maamora. (Source : PDAIRE, 2007)

La recharge de la nappe se fait essentiellement par l'infiltration des eaux des précipitations. Les sorites de la nappe sont constituées de l'écoulement vers l'Océan, l'écoulement vers le Gharb, le drainage par des Oueds et les prélèvements. Les termes du bilan de la nappe sont résumés dans le tableau ci-après (**Tableau 7**). Le bilan de la Maamora est déficitaire, confirmé par la baisse des niveaux piézométriques surtout dans la partie centrale.

Tableau 7 : Bilan de la nappe de la Maamora. (Source : PDAIRE, 2007)

Entrées	**Mm³/an**
Infiltration des eaux de pluie	150
Retour des eaux d'irrigation	10
Total entrées	160
Sorties	**Mm³/an**
Drainage par l'Oued Beht	7
Déversement vers le Gharb	38
Écoulement vers la mer	10
Prélèvements AEP	42
Prélèvements par l'industrie	25
Prélèvements agricoles	50
Total de sorties	172
Bilan	-12

VI . 2. Nappe du Gharb

Le bassin de Gharb renferme un important complexe aquifère, limité au Sud par la plaine de Maamora ; au Nord par le bassin de Dradère-Souière ; à l'Ouest par l'Océan Atlantique et à l'Est par les affleurements conglomératiques constituant les limites du bassin. Ce bassin dispose

d'une structure en dépression favorisant le drainage et le stockage des eaux souterraines avec des conditions de réalimentation favorable selon les conditions climatiques favorables.

Ce complexe est formé par deux unités aquifères : une nappe superficielle libre et une nappe profonde semi captive :

- L'aquifère supérieur est constitué par la formation silto-argileuse du Quaternaire. Il s'agit d'un aquifère très médiocre qui peut devenir localement très productif en raison de l'intercalation de lentilles sableuses plus perméables.
- L'aquifère profond repose directement sur le substratum général du système aquifère (marnes du Mio-Pliocène). Il s'agit de terrains d'âge Plio-Quaternaire présentant de bonnes caractéristiques hydrodynamiques.

Au contact de la nappe de la Maamora, l'écoulement est du Sud vers le Nord avec un important gradient hydraulique. Le sens de l'écoulement devient progressivement de l'Est vers l'Ouest avec un gradient hydraulique plus faible (**Figure 54**).

L'alimentation de la nappe se fait essentiellement par l'infiltration des eaux des précipitations (80 Mm³/an), le retour des eaux d'irrigation (46 Mm³/an), le déversement de la nappe de la Maamora (38 Mm³/an) et les apports des Oueds (60 Mm³/an).

Les sorties de la nappe se font par les prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP) (16 Mm³/an) et l'irrigation (232 Mm³/an) et l'écoulement vers l'Océan (13 Mm³/an). Le tableau ci-dessous récapitule les principaux éléments du bilan de la nappe (**Tableau 8**). Ce dernier est négatif avec un déficit de l'ordre de 37 Mm³/an, près de 90 % des sorties sont issues des prélèvements agricoles.

Tableau 8 : Bilan de la nappe du Ghab. (Source : PDAIRE, 2007)

Entrées	**Mm³/an**
Infiltration des eaux de pluie	80
Infiltration par lits des Oueds	60
Alimentation par la Maamora	38
Retour des eaux d'irrigation	46
Total entrées	224
Sorties	**Mm³/an**
Écoulement vers l'Océan	13
Prélèvements AEP urbain	14
Prélèvements AEP rural	2
Prélèvements agricoles	232
Total de sorties	261
Bilan	-37

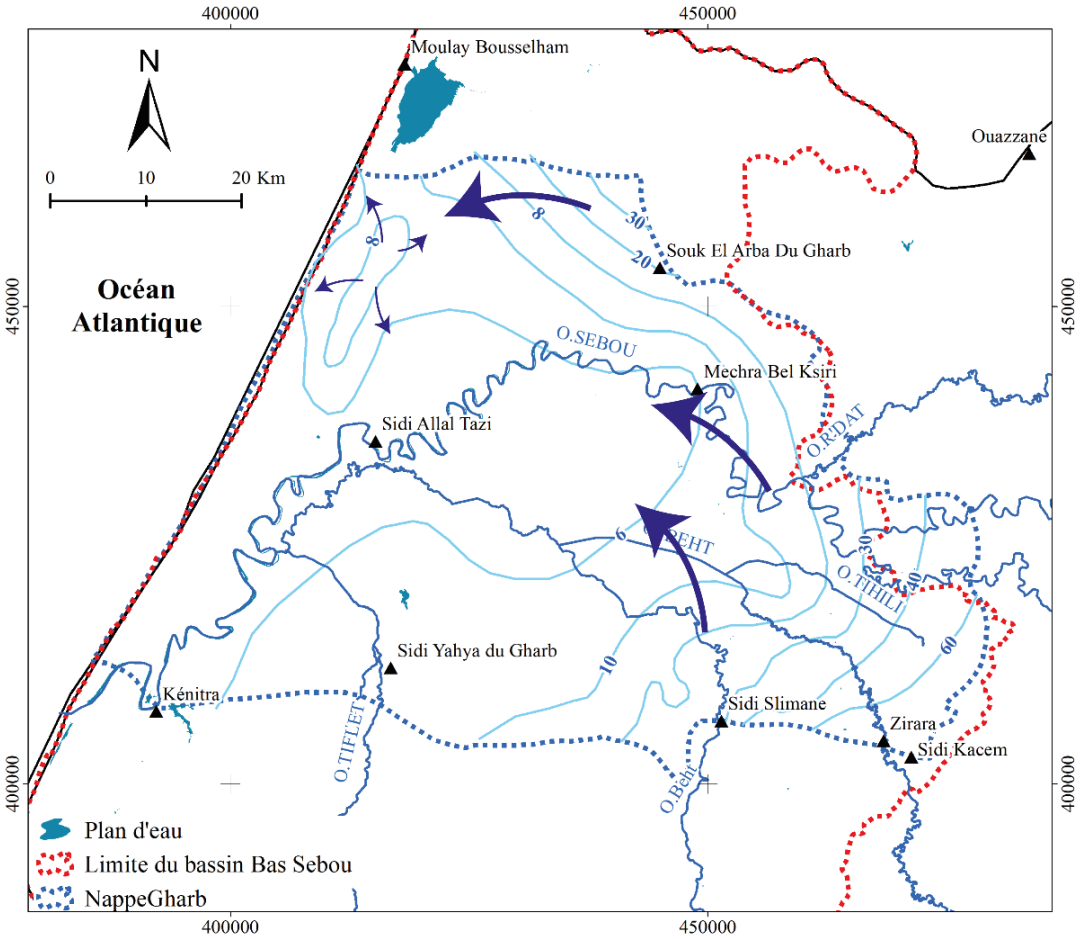


Figure 54: Carte piézométrique de la nappe du Gharb. (Source : PDAIRE, 2007)

VI . 3. Nappe de Dradère-Souiere

L'aquifère de Dradère- Souiere est le prolongement naturel vers le Sud de la nappe de R'mel. Il s'agit d'un aquifère libre généralisé localement en charge, constitué principalement des lumachelles, sables fins et grès du Pliocène, surmontés par des sables plus ou moins argileux du Quaternaire.

L'écoulement général de la nappe se fait (**Figure 55**) :

- du Nord (Chouafaa) vers le Sud (rive droite de l'Oued Dradère), l'Ouest (Merja Zerga) et le Sud-Ouest (Océan Atlantique) ;
- du Sud (collines de Lalla Mimouna) vers le Nord (rive gauche de l'Oued Dradère), l'Ouest (Merja Zerga) et l'Est (Oued Bouhrira) ;
- de l'Est vers le Sud-Est (rive gauche de l'Oued Dradère et ses affluents Bridia, Zarmane et Besbas).

La région de Chouafaa contient un important dôme piézométrique (dépassant 80 m) à l'origine d'une divergence des lignes piézométriques vers les autres régions avoisinantes : Merja El Haloufa et Zerga, la rive droite de l'Oued Dradère et l'Océan Atlantique.

L'Oued Dradère constitue une zone de divergence des lignes de courant (zone de drainage importante de la nappe), provenant de part et d'autre de ses deux rives.

Les cotes piézométriques minimales (inférieure à 10 m) sont situées le long du tronçon aval du lit de l'Oued Dradère, au voisinage de la Merja Zerga et le long de la bordure atlantique.

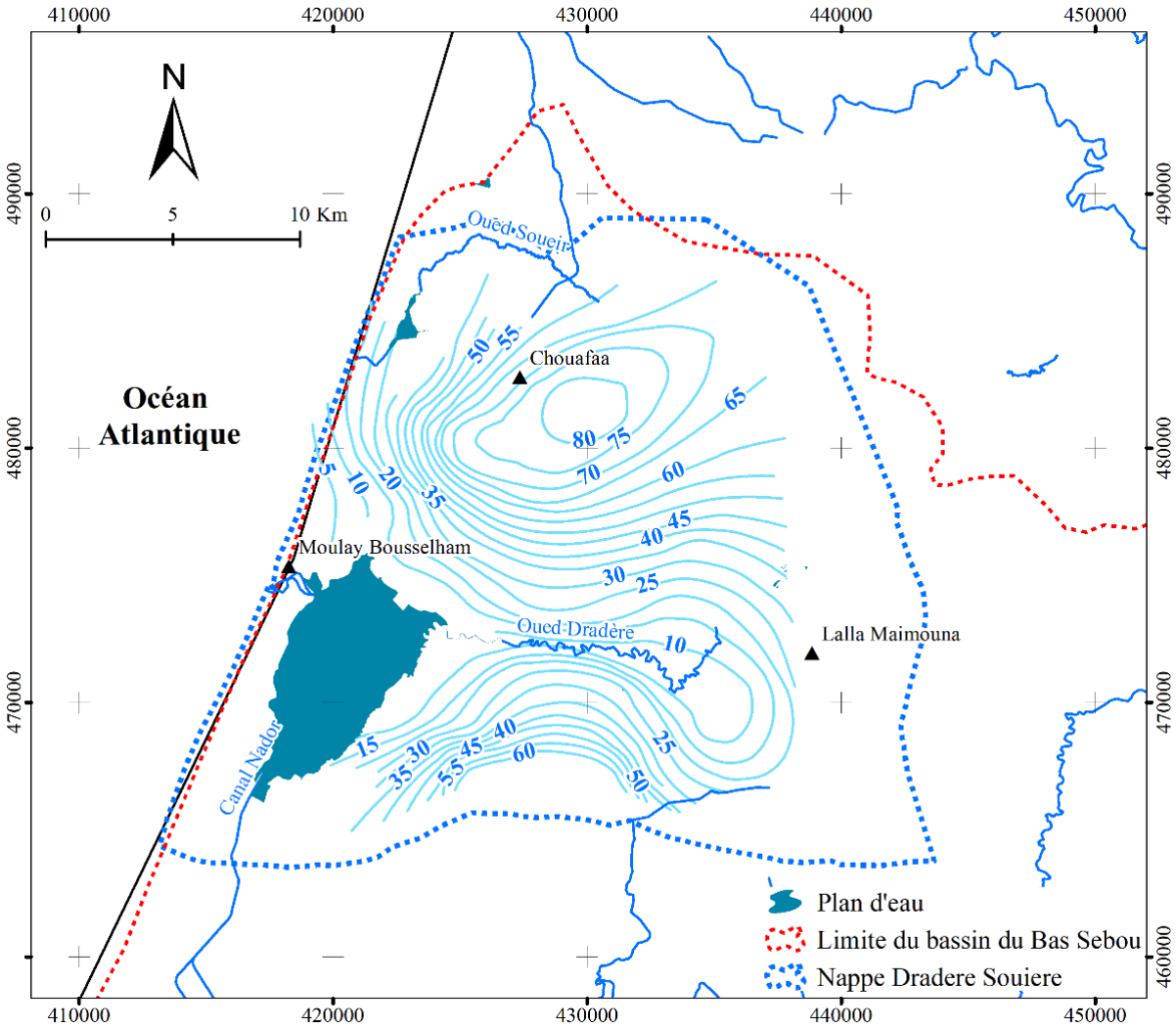


Figure 55 : Carte piézométrique de la nappe du Dradère-Souiere. (Source : PDAIRE, 2007)

Tableau 9 : Bilan de la nappe du Dradère-Souiere. (Source : PDAIRE, 2007)

Entrées	**Mm³/an**
Infiltration des eaux de pluie	103
Entrées au niveau des limites	7
Retour des eaux d'irrigation	1
Total entrées	111
Sorties	**Mm³/an**
Écoulement vers l'Océan	13
Prélèvements AEP urbain et rural	1
Drainage de l'Oued Souière	9
Drainage des sources de l'Oued Dradère	10,7
Prélèvements agricoles	21
Écoulement vers l'Océan	22
Écoulement vers les Merja Zerga et Halloufa	47,3
Total de sorties	111
Bilan	0

VII. Banque des données

L'acquisition de données n'est pas une tâche aisée, surtout dans les pays en développement comme le Maroc où les informations sur le milieu sont souvent inexistantes ou insuffisantes. Cela amène à souligner le long travail de recherche, de collecte et de compilation des informations entreprises pour ce travail. Les données de base disponibles dans cette étude sont de différentes sources selon leurs utilités.

VII . 1. Données météorologiques

VII . 1. a. Séries mensuelles de référence (données observées)

Les séries mensuelles de référence sont un jeu de données d'observations au pas de temps mensuel de précipitations et température, couvrant la période entre 1912 et 2017 (**Annexes 1 à 11**). Ce jeu de données contient 7 stations de précipitations dont 4 stations de températures (**Figure 56**). Leur répartition spatiale couvre l'ensemble du bassin Bas Sebou. Les observations météorologiques de précipitations et de températures employées proviennent de la base de données de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb (ORMVAG) et de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS).

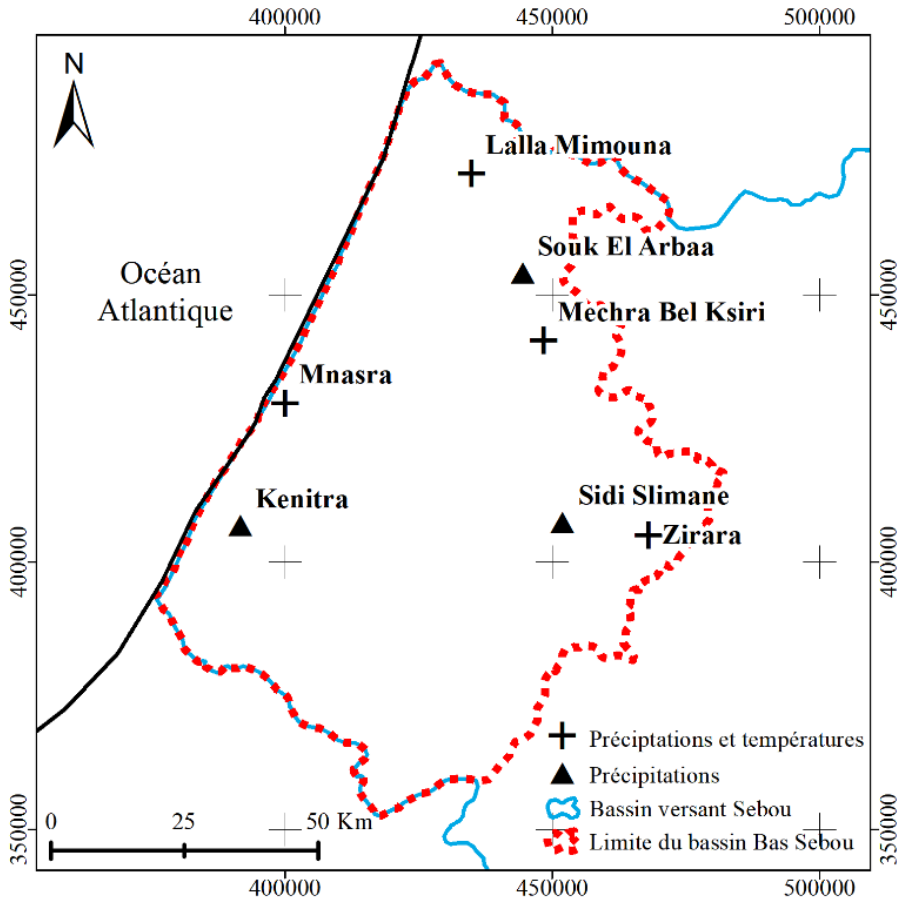


Figure 56: Situation des stations météorologiques retenues.

VII . 2. Données de réanalyses

Les réanalyses climatiques sont très bénéfiques pour l'analyse climatique par leurs nombreuses variables physiquement cohérentes et par leurs utilités à des fins multiples, telle l'étude du climat actuel et sa variabilité. Généralement, une réanalyse est un système qui inclut les observations disponibles et les utilise dans un modèle de prévision numérique du temps, généralement en mode rétrospectif. Néanmoins, pratiquement toutes les réanalyses présentent des incohérences. Ces incohérences peuvent apparaître en raison de nouvelles observations ou de nouveaux systèmes d'observation qui sont inclus pour produire la condition initiale. Pour cette raison, la réanalyse n'a jamais été conçue comme une série chronologique homogène à long terme, mais plutôt comme la meilleure analyse possible pour chaque pas de temps (Thorne & Vose, 2010). Un résumé complet des processus physiques, de la paramétrisation et des difficultés de la prévision numérique du temps serait disponible (Bauer *et al.*, 2015).

Aujourd'hui, plusieurs institutions météorologiques fournissent des réanalyses climatiques sous forme d'ensembles de données mondiaux ou régionaux. Le Centre européen de prévision météorologique à moyen terme (ECMWF- *European Center for Medium Range Weather Forecasting*) a fourni plusieurs réanalyses climatiques, en commençant par la première expérience mondiale du programme de recherche sur l'atmosphère globale (PRAG), suivie par

ERA-15, ERA-40 et ERA-Interim. Récemment, la cinquième génération d'ERA-5 a été publiée, fournissant des données d'une heure à une résolution spatiale de 0,25°, suivie d'ERA-5Land qui fournit des variables de surface et proches de la surface à 0,1°.

Ici, les données de réanalyses utilisées sont en provenance du *ECMWF Reanalysis* (ERA5-Land) (Mañoz Sabater, 2019). Ce produit est fourni à un pas de temps horaire sous la base du fuseau horaire (TUC - Temps Universel Coordonné) avec une résolution spatiale de 9 km (0.1°) (**Figure 57**). Les principales caractéristiques sont montrées dans le **tableau 10**. ECMWF travaille conjointement avec le service Copernicus sur le changement climatique (C3S - *Copernicus Climate Change Service*) pour le développement de ces produits. Leur accessibilité se fait d'ailleurs via le *C3S Data store* au *https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home*. Les variables utilisées sont la température de l'air au sol, l'évaporation potentielle et les précipitations totales.

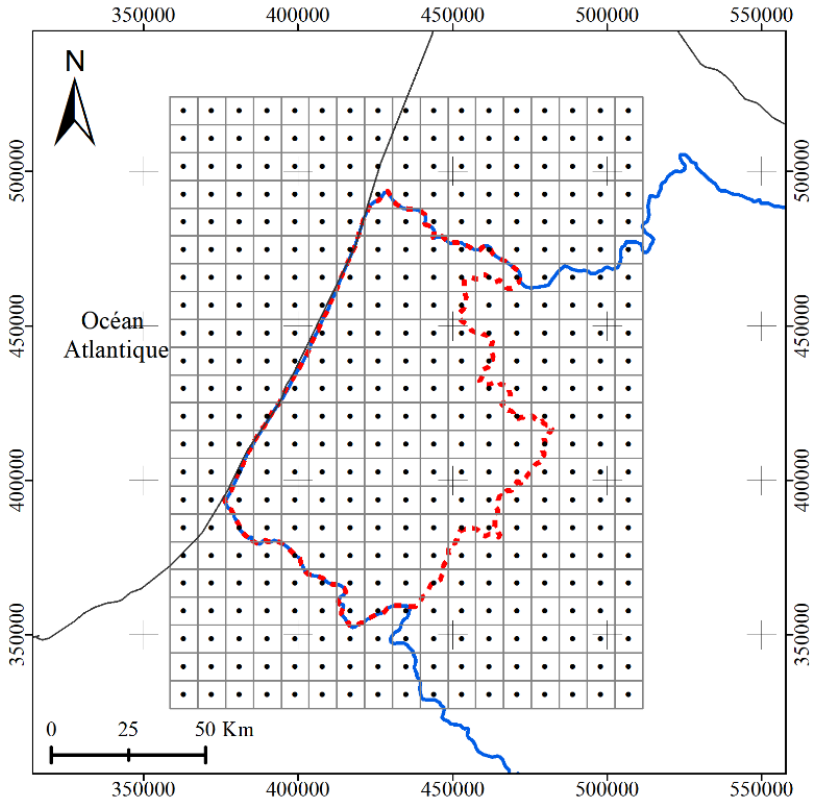


Figure 57: Grille de résolution spatiale des données de réanalyses ERA5-Land utilisées.

Tableau 10: Caractéristiques principales de ERA5-Land.

	ERA5-Land
Résolution spatiale	0,1° par 0,1°
Domaine spatial	Global (au-dessus de la terre, excluant les grandes étendues d'eau).
Résolution temporelle	Horaire
Domaine temporel (début)	1950
Domaine temporel (fin)	En continu, délai de 2-3 mois

VII . 3. Vérification et contrôle des données météorologiques

Pour réaliser une étude climatique fiable, il est nécessaire de s'assurer au préalable de la qualité des données climatiques des stations retenues et d'éviter l'utilisation de séries de données hétérogènes et/ou manquantes. Afin d'avoir un moyen de comparaison fiable pour regrouper un ensemble de stations présentant des données de bonne qualité, il est nécessaire de s'appuyer sur certains critères tels que :

- Continuité des séries des stations retenues sur une période suffisamment longue ;
- Homogénéité des séries ;
- Stations issues de réseaux professionnels ;
- Représentativité des stations pour toutes les régions géographiques du bassin Bas Sebou.

Pour étudier la variabilité du climat, 7 stations d'observation sont choisies qui mettent à disposition des données de bonne qualité et sur une durée prolongée et continue. Elles sont aussi spatialement, les plus représentatives des différentes zones climatiques du bassin Bas Sebou. Il est à signaler que ce choix a été basé suivant les critères employés par Mokhtari *et al.,* (2014) pour l'étude de Spatialisation de l'indice de continentalité thermique K' au Maroc. Cet indice, varie entre 15 et 88 en allant du climat purement Océanique au niveau des régions côtières avec des valeurs de K' entre 17 et 25 aux climats typiquement continentaux avec des valeurs de K' pouvant atteindre plus de 80 au niveau de l'extrême Sud-Est du Pays (**Figure 58**) (Gorczinski, 1920 ; Daget, 1977).

La figure 58 montre que la répartition spatiale des stations retenues couvre tous les degrés de l'indice de continentalité thermique (K') dans le bassin Bas Sebou, de l'Ouest vers l'Est. La plupart des stations sont situées dans les régions où l'indice de continentalité thermique est entre 37 et 50. Seule la station de Zirara qui se situe dans les régions là où l'indice de continentalité thermique est fort (K' > 50). Les stations à climat Océanique (K' < 25) sont au niveau de Kénitra et Mnasra.

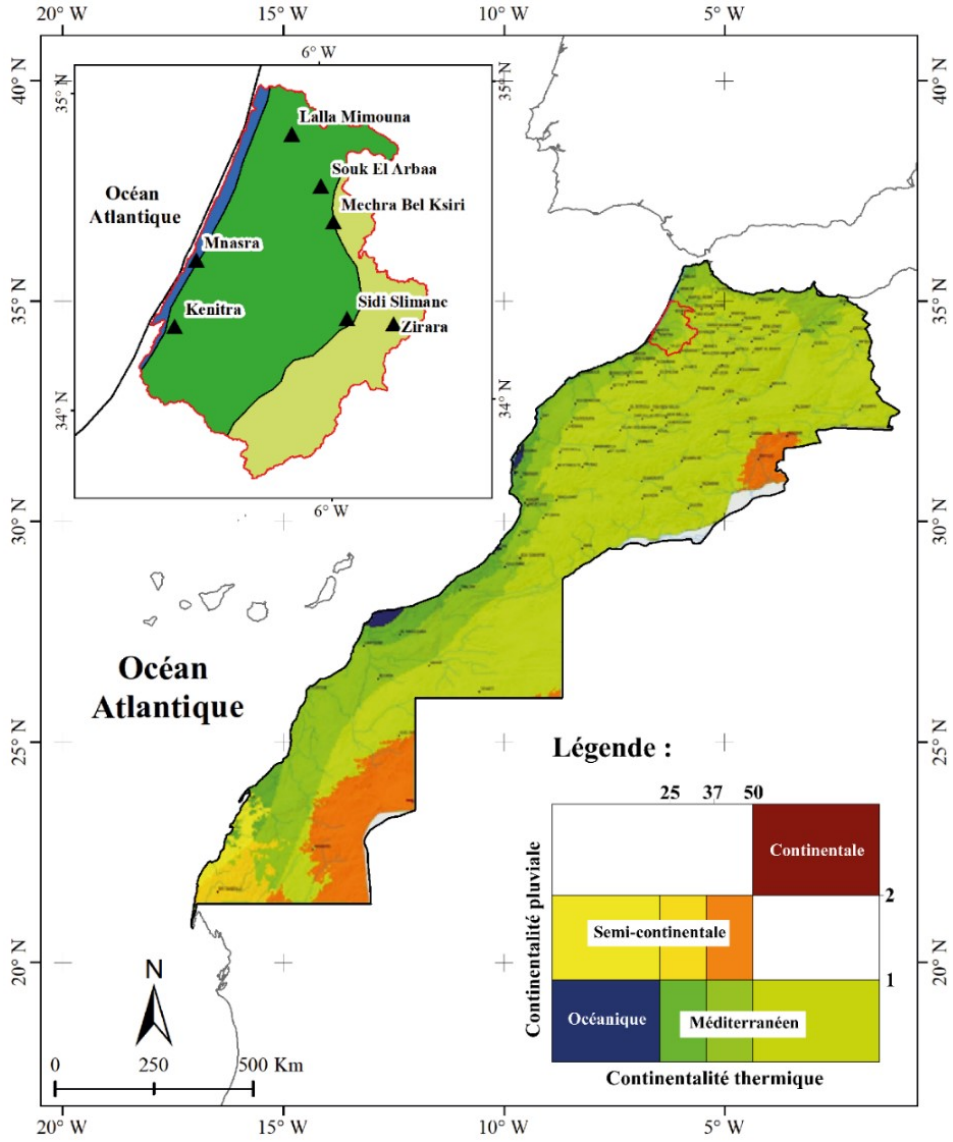


Figure 58 : Carte de répartition spatiale de continentalité selon la classification de Daget, 1977.

VII . 4. Analyse critique des données météorologiques

Les études sur la variabilité climatique doivent s'appuyer sur des séries exemptes de données manquantes et d'hétérogénéité (Bigot, 2002). Cette affirmation constitue la base de la crédibilité de toute analyse de la variabilité climatique. Puisqu'il n'existe pas de séries de données totalement fiables et continues, une partie de l'incertitude restera toujours dans la quantification du changement climatique. Pour réduire ces problèmes, les statistiques permettent de construire des outils capables de combler des lacunes et des observations et de vérifier la fiabilité des données. Ainsi, la validation statistique des séries chronologiques est donc le préalable fondamental pour établir des recherches objectives à partir des bases de données climatiques fournies par divers organismes.

VII . 4. a. Critique des données observées

i. Lacunes des données observées

Le taux de remplissage des bases de données présente souvent des problèmes qu'il faut combler artificiellement : la reconstruction se fait par différents procédés basés sur des lois mathématiques et des relevés de stations voisines.

Statistiquement, les méthodes de comblement permettent de mettre à la place des valeurs manquantes des estimations présentant des qualités et des indices de confiance (Laborde, 2002). D'un point de vue spatial, ces méthodes qui reposent sur le caractère a priori semblable de la pluviométrie dans un espace proche de la station de référence comportent des risques puisque, au gré de la topographie et de la nature des masses d'air, la proximité géographique n'est pas forcément le critère le plus pertinent à prendre en compte (Cantat & Brunet, 2001).

Cependant, quel que soit l'amélioration des sciences et des techniques statistiques sophistiquées, aucun procédé ne pourra jamais retrouver exactement les valeurs manquantes ou erronées. Pour garantir le minimum d'incertitudes lors de l'interprétation des séries, il est donc nécessaire d'utiliser des séries chroniques certifiées, enregistrées dans des stations stables du point de vue protocoles de mesures et des conditions d'observation (matériel homologué, absence de déplacement des postes, préservation des conditions de sites).

Dans le bassin Bas Sebou, l'utilisation des longues séries chroniques pose des problèmes en raison du grand nombre de données manquantes (taux de remplissage et interruption des mesures) et de différents matériels de mesure. Pour illustrer ces restrictions, voici l'exemple des sept stations d'observation du bassin Bas Sebou (**Figure 59**) :

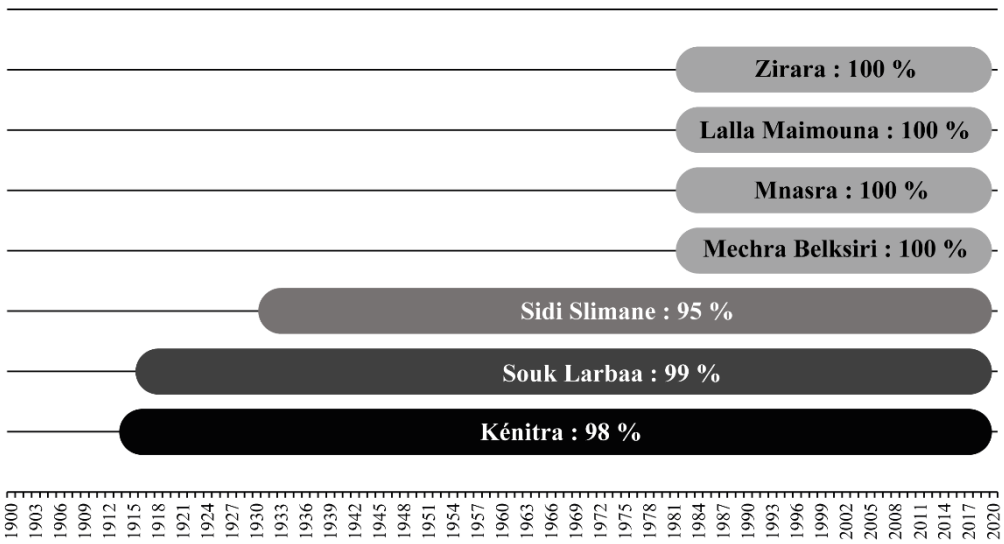


Figure 59: Historique des 7 stations météorologiques dans le bassin Bas Sebou entre 1916 et 2017 (durée et taux de remplissage (%) des bases de données).

Même s'il existe des stations continues et plus anciennes comme la station de Kénitra, installée depuis 1916 mais avec 2 % de données manquantes, toutefois ses données sont privilégiées car la présence permanente du personnel qualifié et le contrôle des facteurs environnementaux assurent à priori une plus grande représentativité et une meilleure homogénéité.

Pour combler les valeurs manquantes, la méthode de Laborde & Mouhous, (1998) a été appliquée. Elle consiste à remplacer la valeur manquante par la valeur calculée à l'aide, de régressions simples ou multiples, entre la série expliquée et la ou les séries explicatives. Si la série présentait une année complète de données manquantes, les valeurs saisonnières sont prises en compte, tandis qu'avec trois années continues de lacunes, les valeurs annuelles sont calculées et avec plus de 5 ans consécutifs de lacunes, la série serait écartée.

ii. Tests statistiques d'homogénéisation

Pour produire une base de données continue, en raison des lacunes et changements de postes évoqués précédemment, un traitement des données est nécessaire. Avant d'interpréter les données, il convient de tester leur homogénéité. Dans notre cas, deux méthodes ont été utilisées, la méthode classique des doubles cumuls et le test d'homogénéité de *Pettitt* à un intervalle de confiance 95 % (Wang *et al.,* 2007). L'ajustement des séries non homogènes a été effectué par le logiciel *AnClim* (Stèpànek, 2005)

iii. Test d'homogénéité : doubles cumuls

La méthode dite doubles cumuls, consiste à mettre en corrélation les totaux annuels cumulés de la station de référence avec ceux de la station à contrôler. La station de référence étant celle qui possède la série d'observation la plus homogène et la plus fiable. Cette méthode utilisée, dont le principe consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées à deux stations l'une est la station témoin (X), supposée correcte, l'autre est la station (Y) de contrôle et sous les mêmes conditions climatiques (degré de continentalité thermique K').

Pour chaque station un graphique est tracé avec des points constitués par les couples de cumuls progressifs :

$$\sum_1^j X_i \sum_1^j Y_i \qquad \textbf{(1)}$$

Où j variant de 1 à n, dans l'ordre chronologique (n étant la taille des échantillons concomitants de X(i) et de Y(i)). Lorsque la courbe moyenne ajustée aux points, présente une cassure nette, on peut localiser en ce point une cassure datée. D'autre part, on considère une variation climatique quand une rupture qui est vérifiée dans les stations voisines, alors qu'un changement qui ne se manifeste que dans la station choisie, est considéré comme une hétérogénéité dans la série. Ceci nous permettra de considérer certaines cassures comme une variation climatique.

Les stations choisies comme stations de référence sont celles qui présentent un taux de remplissage élevé (100%) et ont leurs propres caractéristiques d'enregistrement (**Figure 59**). **Le tableau 11** représente les stations à contrôler avec leurs stations de référence selon leurs conditions climatiques (K').

Après le contrôle des séries pluviométriques des stations à contrôler, le test du double cumul montre que toute les stations présentent une homogénéité dans leurs séries (**Figure 60**).

Tableau 11: Listes des stations homogénéisées.

Station à tester	Station de référence	Degré de continentalité (K')
Kénitra	Mnasra	< 25
Sk Larbaa	Mechra Belksiri	37 < K' < 50
Sidi Slimane	Zirara	> 50

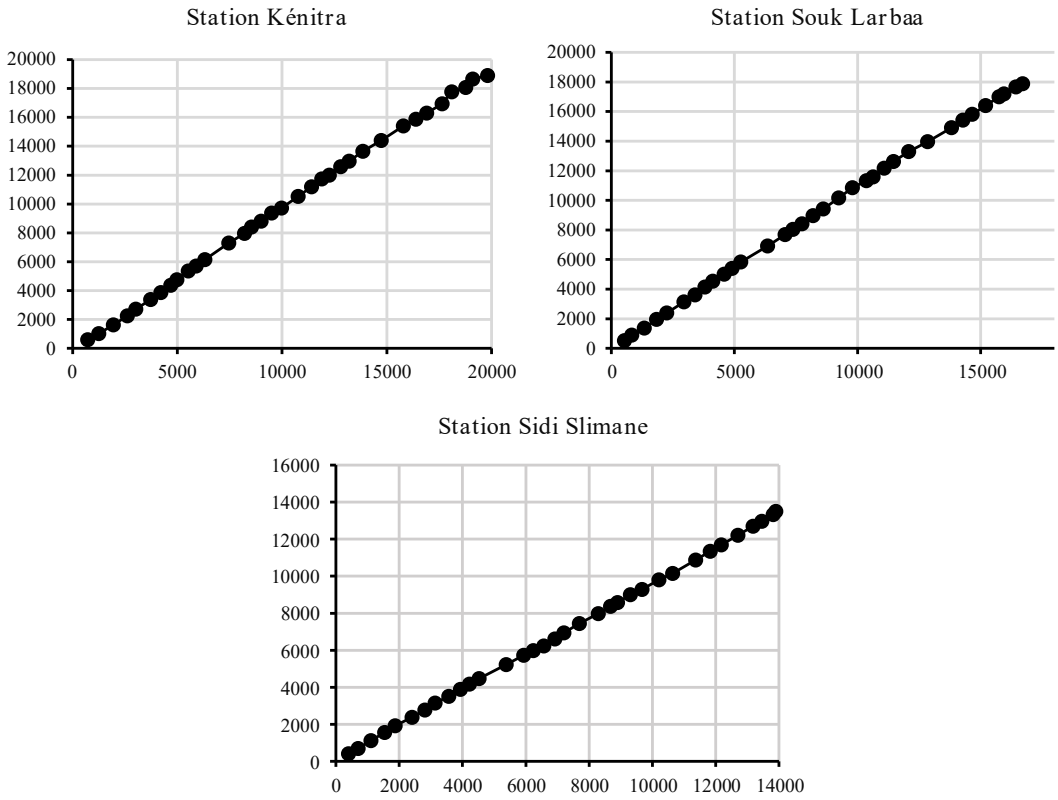


Figure 60: Méthode « Double cumul » pour les stations à tester.

iv. Test d'homogénéité : test de Pettitt

Pour confirmer les résultats obtenus par la méthode de double cumul, l'approche de *Pettitt* qui est non paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney a été appliquée. Ainsi, l'absence de rupture dans la série X(i) de taille N constitue l'hypothèse nulle (pas de cassure au sein de la série). La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques X(i) = 1 à t et t + 1 à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ définie par :

$$U_{t.N} = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=t+1}^{N} D_{ij} \quad \textbf{(2)}$$

Où D_{ij} = sgn (Xi- Xj) avec sgn(d) = 1 si x > 0 ; 0 si d = 0 et -1 si d < 0, avec (d = X_i- X_j).

Il a été choisi de représenter les résultats du test comme statistiquement significatifs à un niveau de signification de 95 %. **Le tableau 12** représente l'occurrence des années de rupture en distinguant les ruptures dues à l'hétérogénéité des séries pluviométriques, ou à une augmentation brutale ou dues à une diminution brutale de la série pluviométrique moyenne annuelle de part et d'autre de la date de rupture. Il en ressort que ce sont les mêmes résultats obtenus par la méthode de double cumul qui sont obtenus par le test de *Pettitt*. Les années de rupture que montre ce test sont dues à une variation climatique selon les archives climatiques du bassin Bas Sebou.

Tableau 12: Test d'homogénéité de *Pettitt* à un intervalle de confiance de 95 %.

Station	Année de rupture	*p-value*	Caractéristique
Kénitra	2008	0.369	Homogène
Sidi Slimane	2015	0.555	Homogène
Souk Larbaa	1996	0.566	Homogène
Lalla Maimouna	2011	0.434	Homogène
Mechra Belksiri	2015	0.618	Homogène
Zirara	2015	0.494	Homogène
Mnasra	2015	0.618	Homogène

VII . 4. b. Critique des données de réanalyses (ERA5- Land)

Les performances des données de réanalyse corrigées des biais et des données spatialement interpolées, calculées à partir de capteurs au sol par validation croisée, ont été évaluées, en prenant comme références les observations météorologiques extraites des stations d'observation (**Figure 61**).

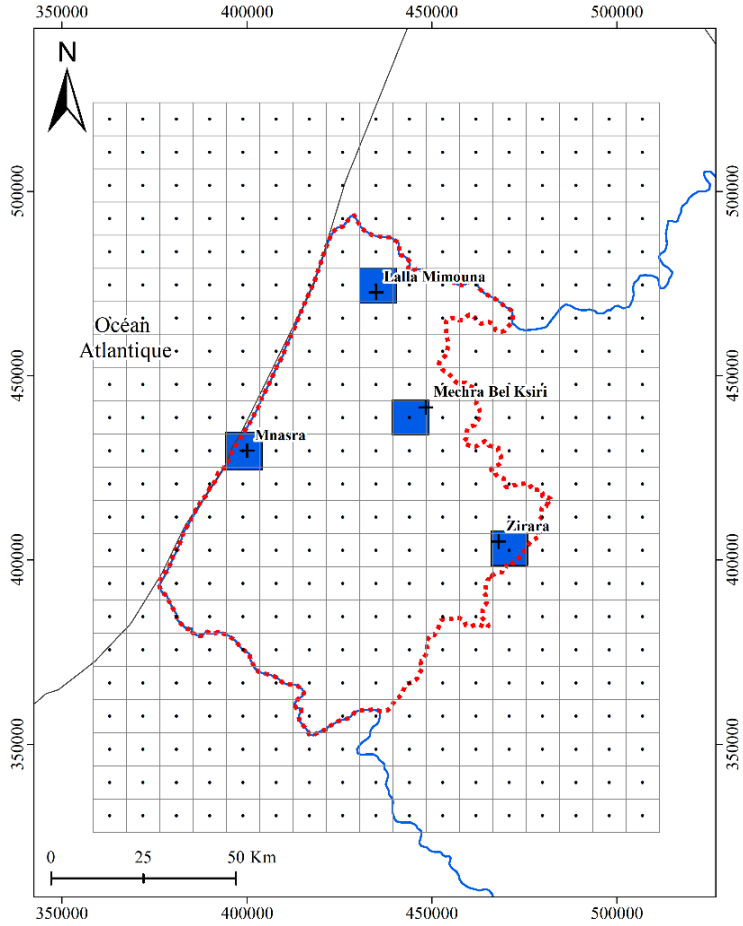


Figure 61: Les pixels sélectionnés de la base de données ERA5-Land selon la localisation géographique des stations existants dans le bassin Bas Sebou.

De même, pour ce qui concerne l'évapotranspiration de référence, la référence a été supposée être l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée avec l'équation de *Thornthwaite* (Thornthwaite, 1948) en utilisant les données météorologiques extraites des capteurs au sol comme variables d'entrée. Cet ETP de référence a été, respectivement, comparé à l'ETP calculé en utilisant les données météorologiques de réanalyse corrigées des biais et les données météorologiques comme entrée.

Les performances ont été évaluées en calculant le BIAS, qui a été utilisé comme indicateur de précision des données et l'écart quadratique moyen (RMSE), qui donne un aperçu à la fois de l'exactitude et de la précision des données. Ces deux indicateurs statistiques ont été calculés comme suit :

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_p^i - X_b^i)}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_p^i - X_b^i)^2}{n}} \quad (4)$$

Où X_p^i et X_b^i sont, respectivement, la variable pour laquelle l'évaluation de la performance est souhaitée et les variables correspondantes prises comme référence, au $i^{ème}$ mois ; n désigne

le nombre de mois examinés. Plus le BIAS diffère de zéro, moins l'estimation est précise. Plus la RMSE est élevée, moins l'exactitude et la précision des estimations sont importantes.

Les performances statistiques ont été présentées au moyen de BIAS et de RMSE, telles que définies dans les équations ci-dessus, où X_p^i sont les valeurs de réanalyse mensuelles corrigées du biais pour la variable d'intérêt et X_b^i sont les observations météorologiques mensuelles des stations d'observation. **Le tableau 13** montre les différences entre les indicateurs de performance calculés de chaque ensemble de données de réanalyse et d'observation, fournissant des informations sur la commodité d'utiliser des ensembles de données de réanalyse par rapport aux données météorologiques observées. Les données de référence pour les calculs du BIAS et du RMSE restent les observations météorologiques mensuelles des stations telles les stations de Mnasra, Mechra Belksiri, Lalla Mimouna et Zirara.

D'après les résultats obtenus dans le **tableau 13**, il ressort que la réanalyse et les données observées montrent des précisions généralement similaires dans les estimations de température, de précipitation et d'évapotranspiration potentielle (ETP) en termes de BIAS. RMSE montre également des précisions généralement favorables. En résumant les principaux résultats illustrés au **tableau 13**, le BIAS de température varie dans la région de 0,2 °C à 0.5 °C, avec un RMSE moyen de 0.38 °C et un RMSE maximum de 0.5 °C. Le BIAS des précipitations varie de 0.44 mm à 0.88 mm, avec une RMSE moyenne égale à 2.43 mm et une RMSE maximale égale à 3 mm. Le BIAS de ETP varie de 0.4 mm à 0.1 mm, avec un RMSE moyen égal à 0.5 mm et un RMSE maximum à 0.87 mm.

Tableau 13: Différences entre les indicateurs statistiques (BIAS et RMSE) des données de réanalyse (ERA5 land) et d'observation.

	Précipitation (mm)		Température (°C)		ETP (mm)	
Station	**BIAS**	**RMSE**	**BIAS**	**RMSE**	**BIAS**	**RMSE**
Mnasra	0,88	3	0,35	0,5	0,33	0,4
Mechra Belksiri	0,44	2	0,22	0,2	0,1	0,2
Lalla Maimouna	0,66	2,85	0,15	0,4	0,32	0,56
Zirara	0,5	1,9	0,33	0,45	0,4	0,87

VII . 5. Données liées aux interactions Océan-atmosphère à grande échelle (données de réanalyse)

Pour comprendre la variabilité climatique actuelle, il est important de remonter le plus loin possible dans les observations du système terrestre. Cependant, les observations ont toujours été inégalement réparties et sujettes aux erreurs. Même à l'ère de la technologie satellitaire, les observations ne peuvent à elles seules fournir une image complète et précise de l'état des systèmes terrestres dans le monde à un moment donné. La réanalyse comble les lacunes dans l'ensemble de données de surveillance et d'une manière cohérente, réduisant ainsi les faux signaux de changement. Des variables climatiques Océaniques et atmosphériques telles que la température de surface de la mer (SST – *Sea Surface Tempearture*), la pression au niveau

de la mer (SLP – *Sea Level Pressure*) et la hauteur du géopotentiel à 500 hPa (GPH-500 - *Geopotential Height at 500 hPa)* ont été utilisées pour évaluer la relation entre les interactions Océan-atmosphère et la variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou (**Figures 62, 63 et 64**). Les données maillées de la température de surface de la mer (SST) (1° × 1°) ont été téléchargées à partir du *Met Office Hadley Center* (*https://climatedataguide.ucar.edu/climatdata/sstdata-hadisst-v11*) (**Annexe 15**), tandis que celles de SLP et GPH-500 (2,5 ° × 2,5 °) ont été téléchargées à partir du site web de la division des sciences physiques de la NOAA-ESRL (*https://www.esrl.noaa.gov*) (**Annexe 16**).

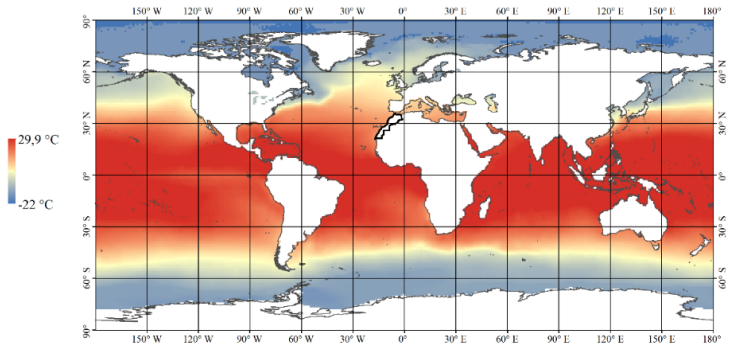


Figure 62: État de la température de la surface de la mer moyenne (SST) pour le mois de décembre 2017. (Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html*)

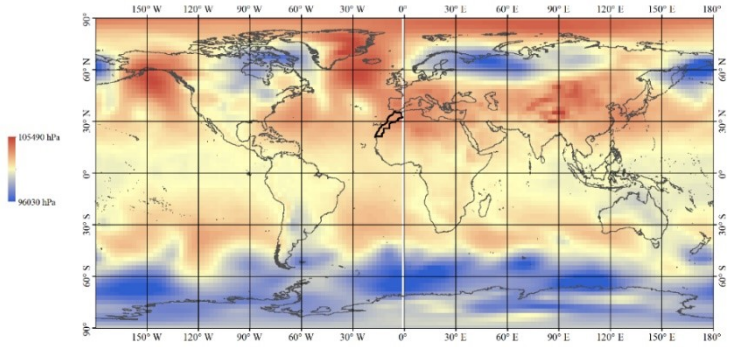


Figure 63: État de la pression au niveau de la surface de la mer moyenne (SLP) pour le mois de janvier 2017. (Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html*)

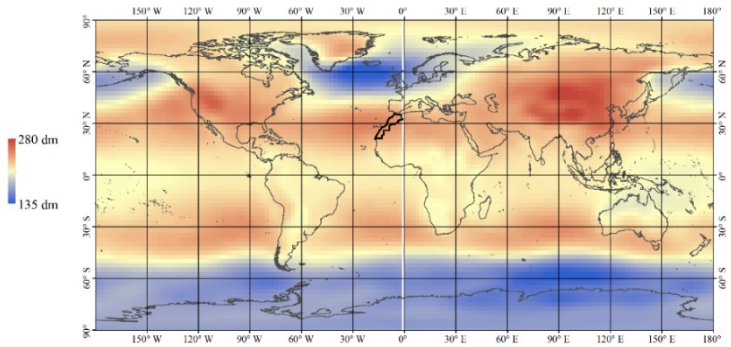


Figure 64: État de la hauteur du géopotentiel à 500 hPa moyenne (GPH-500) pour le mois de janvier 2017. La variation dans la carte est l'altitude en décamètre (dm) à laquelle on atteint 500 hPa par rapport au niveau moyen des mers. (Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html*)

VII . 6. Données agronomiques

Sachant que le risque de sécheresse agricole affecte particulièrement l'agriculture pluviale, sachant que les cultures céréalières représentent la majorité de cette agriculture dans le bassin Bas Sebou. C'est pour cela que les cultures céréalières ont été choisies comme culture de référence pour évaluer l'effet des sècheresses sur l'agriculture.

Les données de production annuelle (tonne ; t) et de superficie récoltée (hectare ; ha) de blé dur, de blé tendre et d'orge ont été obtenues auprès des services statistiques du Ministère de l'agriculture et ORMVAG. La série chronologique des productions céréalières en tonnes par hectare (t/ha) représente le rapport annuel de production (t) à la superficie récoltée (ha) pour chaque province du bassin Bas Sebou pour la période 1984-2020 (**Annexe 12 et 13**).

VII . 7. Données satellitaires

La télédétection optique a été utilisée comme technique physique pour suivre l'état de la végétation. Nous rappelons que la télédétection est définie comme un ensemble de techniques utilisées pour décrire l'état d'un phénomène et tirer des informations sur l'état des surfaces par des mesures effectuées à distance. Ces informations sont obtenues par le signal électromagnétique émis par un objet ou une surface dans un domaine de fréquence / longueur d'onde (**Figure 65**). Les capteurs satellites ont pour rôle de mesurer ce signal réfléchi par une surface donnée et de le transmettre à des stations au sol.

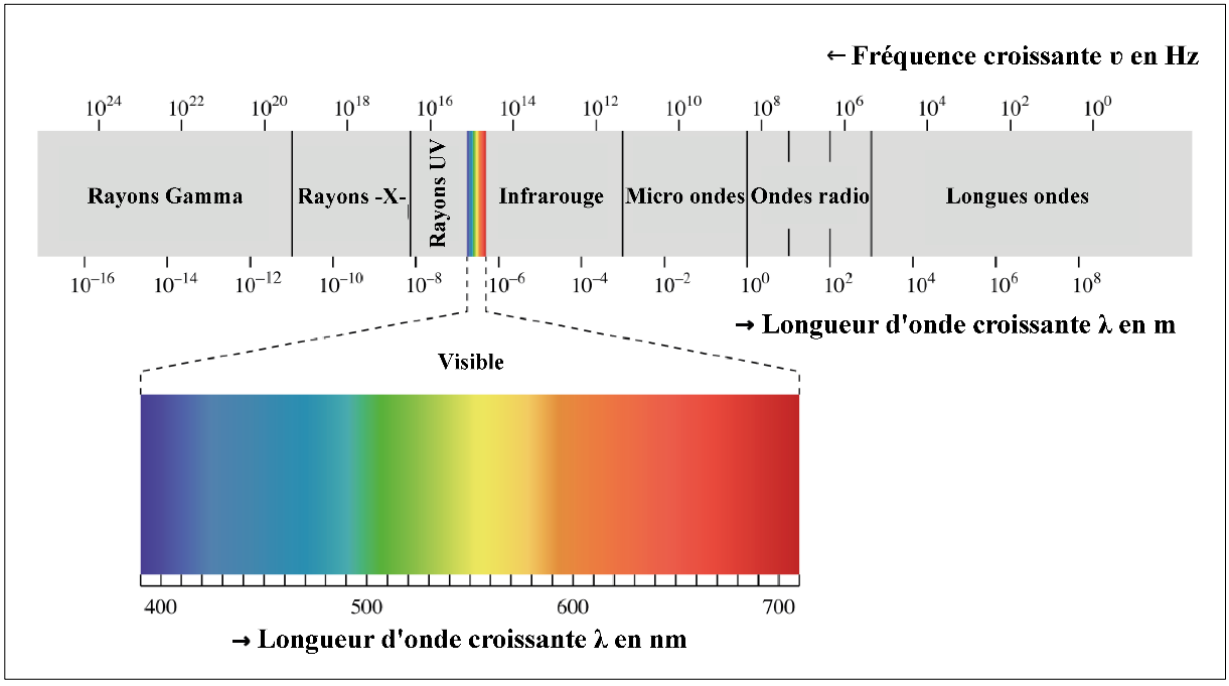


Figure 65: Spectre du rayonnement.

Deux capteurs ont été utilisé pour suivre l'état de la végétation : Ceux qui fournissent des images à moyenne résolution spatiale tel que Landsat, et ceux qui fournissent des images à

basse résolution spatiale tel que NOAA-7, 9, 11, 14, 16, 18 et 19. Les caractéristiques respectives de ces capteurs sont rappelées dans cette section afin de pouvoir expliquer notre choix pour cette étude. Les capteurs à haute résolution spatiale capturés par les satellites commerciaux n'ont pas été utilisés dans cette étude en raison de leur coût.

VII . 7. a. Capteurs à haute résolution spatiale

Le Landsat est le premier capteur spatial d'observation de la terre destiné à des fins civiles. Il est développé au milieu des années 1960 par l'agence spatiale américaine, la NASA à l'instigation de l'institut des études géologiques américain (USGS - *United States Geological Survey*). Huit satellites Landsat sont lancés entre 1972 et 2013 et un neuvième le 27 septembre 2021. Les trois premières missions de Landsat étaient équipées par des capteurs à résolution hectométrique (*Multi-Spectral Sensor* - MSS). À partir de 1982, les missions effectuées par Landsat 4, était équipée par des capteurs TM (*Thematic Mapper*) qui utilisent sept bandes spectrales dont six dans le visible et le proche et moyen infrarouge. Ensuite, Landsat 7 qu'est équipée d'un capteur ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) possédant une bande panchromatique complémentaire à la résolution de 15 m. Enfin, Landsat 8 s'agit du huitième satellite du programme Landsat et le septième à atteindre l'orbite avec succès. Il assure l'acquisition continue et la disponibilité des données Landsat utilisant une charge utile à deux capteurs, le *Operational Land Imager* (OLI) et le capteur infrarouge thermique (TIRS - *Thermal InfraRed Sensor*). Ces caractéristiques sont présentées dans **les tableaux 14, 15, 16 et 17**.

Tableau 14: Caractéristiques des capteurs Landsat. (Source : *http://landsat.gsfc.nasa.gov/*)

	Landsat 4	**Landsat 5**	**Landsat 7**	**Landsat 8**
Lancement	16 Juillet 1982	01 mars 1984	15 avril 1999	11 février 2013
Fin de mission	15 Juin 2001	05 juin 2013	7 février 2017	Jusqu'aujourd'hui
Altitude	705 Km	705 Km	705 Km	705 Km
Orbite	Quasi-polaire héliosynchrone	Quasi-polaire héliosynchrone	Quasi-polaire héliosynchrone	Quasi-polaire héliosynchrone
Champ de vue	185 Km	185 Km	185 Km	185 Km
Résolution moyenne	20 - 500 m	20 - 500 m	15 - 30 m	15 - 30 m

Tableau 15: Bandes spectrales des capteurs Landsat 4-5 TM. (Source : *http://landsat.gsfc.nasa.gov/*)

Bande	**Bandes spectrales**	**Longueur d'ondes**	**Résolution spatiale**
1	Bleu	0.45 - 0.52 µm	30
2	Vert	0.52 - 0.60 µm	30
3	Rouge	0.63 - 0.69 µm	30
4	Proche-infrarouge	0.76 - 0.90 µm	30
5	Moyen Infrarouge	1.55 - 1.75 µm	30
6	Infrarouge-thermique	10.40 - 12.50 µm	120
7	Moyen Infrarouge	2.08 - 2.35 µm	30

Tableau 16: Bandes spectrales du capteur Landsat 7 ETM. (Source : *http://landsat.gsfc.nasa.gov/*)

Bandes	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale
1	Bleu	0.45 - 0.52 µm	30
2	Vert	0.52 - 0.60 µm	30
3	Rouge	0.63 - 0.69 µm	30
4	Proche-infrarouge	0.76 - 0.90 µm	30
5	Moyen Infrarouge	1.55 - 1.75 µm	30
6	Infrarouge thermique	10.40 - 12.50 µm	120
7	Moyen Infrarouge	2.08 - 2.35 µm	30
8	Panchromatique	0,52 - 0,90 µm	15

Tableau 17: Bandes spectrales du capteur Landsat 8 OLI. (Source : *http://landsat.gsfc.nasa.gov/*)

Bandes	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale
1	Aérosol	0,435 - 0,451 µm	30 m
2	Bleu	0,452 - 0,512 µm	30 m
3	Vert	0,533 - 0,590 µm	30 m
4	Rouge	0,636 - 0,673 µm	30 m
5	Proche infrarouge	0,851 - 0,879 µm	30 m
6	Moyen Infrarouge 1	1,566 - 1,651 µm	30 m
7	Moyen Infrarouge 2	2,107 - 2,294 µm	30 m
8	Panchromatique	0,503 - 0,676 µm	15
9	Cirrus	1,363 - 1,384 µm	30 m
10	Infrarouge thermique 1	10,60 - 11,19 µm	100 m
11	Infrarouge thermique 1	11,50 - 12,51 µm	100 m

VII . 7. b. Capteurs à moyenne résolution spatiale

L'imagerie satellite à moyenne et basse résolutions spatiales est utilisée de manière régulière depuis bientôt une trentaine d'années pour étudier la biosphère terrestre. Les capteurs sont des outils irremplaçables et constituent une importante source d'informations pour mieux comprendre le fonctionnement de la biosphère, la répartition des types de végétation, ainsi que sa variabilité saisonnière et interannuelle et même à plus court terme. La fréquence de passage des satellites basse résolution, comme les NOAA-AVHRR qui couvrent pratiquement toute la surface de la Terre au moins une fois par 24 heures, permet de cartographier des variations à court terme de la végétation à l'échelle planétaire. Sur une période de quelques jours, la plupart des zones peuvent être vues en conditions claires, et il est possible de construire des cartes de végétation hebdomadaires comme utilisées dans les chapitres suivants.

Les satellites de la NOAA sont considérés comme des satellites météorologiques. À bord de ces satellites se trouve le capteur primaire AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). Celui-ci est utilisé pour la météorologie et pour l'observation à petite échelle de la surface de la Terre. Le capteur AVHRR capte le rayonnement électromagnétique du visible, proche-infrarouge, du moyen-infrarouge et de l'infrarouge-thermique. La fauchée au sol mesure 3000 km. **Le tableau 18** suivant décrit les bandes AVHRR, leurs longueurs d'onde, leurs

résolutions spatiales (au nadir) et leurs applications générales.

Ce type de capteur est utilisé en général pour la cartographie de la végétation à haute résolution temporelle, l'estimation des rendements agricoles ou la surveillance des incendies de forêt. Les cartes d'indices de végétation réalisées à partir des données NOAA-AVHRR sont généralement des synthèses hebdomadaires (**Figures 66 et 67**) (**Annexe 14**).

Tableau 18: Bandes spectrales du capteur NOAA-AVHRR.

Bandes	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale	Application
1	Rouge	0,58 - 0,68 µm	1.1 Km	Surveillance des nuages, de la neige et de la glace
2	Proche-infrarouge	0,725 - 1,1 µm	1.1 Km	Surveillance de l'eau, de la végétation et de l'agricole
3	Moyen-infrarouge	3.55 – 3.93 µm	1.1 Km	Température de la surface des Océans, volcans et feux de forêts
4	Infrarouge-thermique	10.3 - 11,3 µm	1.1 Km	Température de la surface des Océans et humidité du sol
5	Infrarouge-thermique	11,5 - 12,5 µm	0.1 Km	Température de la surface des Océans et humidité du sol

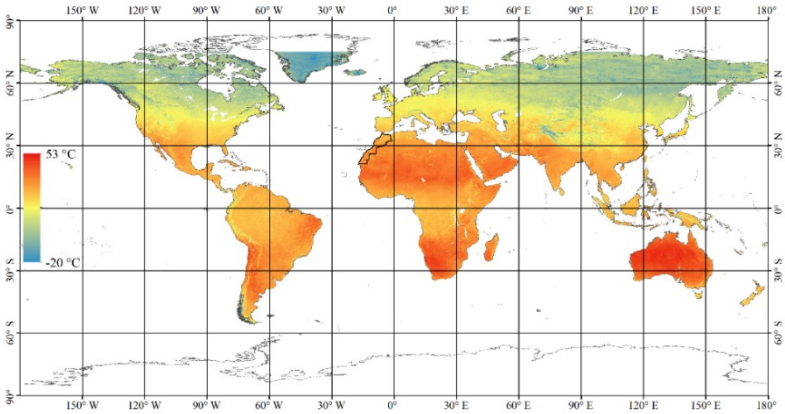


Figure 66: État de température à la surface du sol pour la première semaine de janvier 2020 obtenue par le capteur NOAA-AVHRR.
(Source : https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/data/Blended_VH_4km/geo_TIFF/)

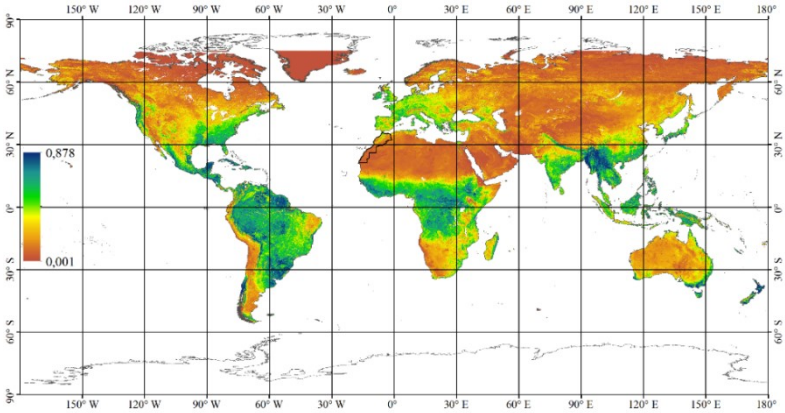


Figure 67: État de NDVI utilisé pour la première semaine de janvier 2020 obtenue par le capteur NOAA-AVHRR.
(Source : https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/data/Blended_VH_4km/geo_TIFF/)

VIII. Conclusion

L'esquisse du contexte géographique et hydro-climatique du bassin Bas Sebou souligne la diversité des différents éléments qui le composent marquée principalement par une variété de conditions hydro-climatiques. Il s'agit en effet des conditions humides à l'Ouest et des conditions semi-arides à l'Est (l'intérieur du bassin), avec des cours d'eau connaissant, parfois, des fluctuations importantes dans leur écoulement. Ce caractère hydro-climatique qui prévaut revêt un caractère très préoccupant. Les effets de la variabilité spatio-temporelle des pluies, et par là même des autres ressources en eau, ont pris, en particulier dans les régions bordant l'intérieur du bassin, une tournure catastrophique en affectant durement l'économie de celles-ci et en menaçant directement la vie des populations. Les implications de la variabilité du climat sur celle des ressources en eau et particulièrement les eaux souterraines, sont fortes et les répercussions de celle-ci touchent à leur tour de très nombreux secteurs d'activité : agriculture, santé, alimentation en eau potable, etc… Les interrelations et la diversité des éléments constituant le paysage du bassin Bas Sebou proviennent de l'influence du climat, lequel présente aussi une importante variabilité qui constitue une contrainte pour la population dont l'économie est essentiellement basée sur l'agriculture.

À ce propos, une base de données météorologique et hydrométrique liée aux stations de mesure sur une période allant de 1916 à 2017 a été créée à partir des données collectées et des analyses réalisées (sept postes pluviométriques et quatre stations météorologiques). Parallèlement, une base de données numériques et spatialisées, gérée par le Système d'Information Géographique (SIG), a été construite et intègre des données thématiques comme la limite du bassin versant, le réseau hydrographique, les données de surface, les données de végétation, ainsi que les données de réanalyses des séries chronologiques comme celles des pluies mensuelles, des ETP mensuelles et des températures mensuelles. Cette base de données, qui offre une couverture spatiale et temporelle satisfaisante, donne l'opportunité d'analyser et de préciser les manifestations de la variabilité du climat dans le bassin Bas Sebou.

Grâce à cette base de données, il sera possible de déterminer les impacts de la variabilité climatique sur les ressources naturelles, les écosystèmes, les activités économiques, et les populations locales du bassin Bas Sebou. Les risques associés aux événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses et les inondations pourront être mieux compris à l'aide des résultats obtenus, et des stratégies d'adaptation pour faire face à ces risques pourront être formulées.

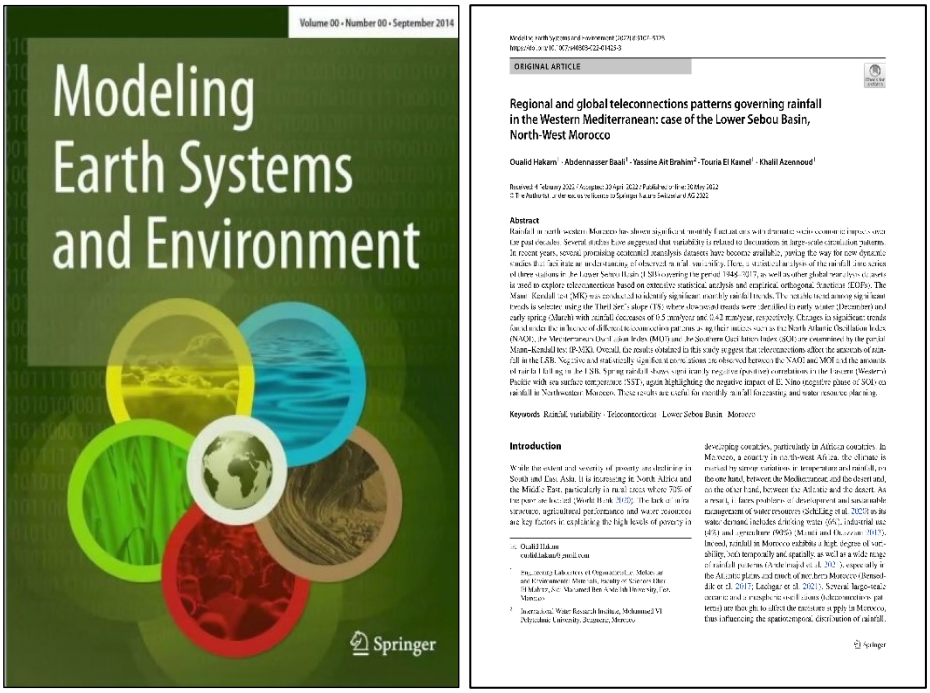
CHAPITRE III

VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS DANS LE BASSIN BAS SEBOU

I. Introduction 112
II. Méthodologie....113
II . 1. Sources et traitement des données 113
II . 2. Analyses statistiques....117
III. Résultats et discussions 121
III . 1. Tendances spatiales et temporelles des précipitations....121
III . 2. Influence des indices climatiques sur les tendances des précipitations....121
III . 3. Influence des indices climatiques sur la variabilité des précipitations....123
III . 4. Liens entre les indices climatiques et la variabilité des précipitations en mars....123
III . 5. Liens entre les indices climatiques et la variabilité des précipitations en décembre....132
V. Conclusion....141

CHAPITRE III
VARIABILITÉ DES PRÉCIPITATIONS DANS LE BASSIN BAS SEBOU

La variabilité des précipitations est le sujet principal de ce chapitre. Comme évoqué dans le chapitre précédant, la quantité d'eau disponible dans le bassin Bas Sebou est limitée, ce qui peut affecter la production agricole, l'approvisionnement en eau potable et les activités économiques. En fait, les précipitations sont la principale source d'eau sur Terre. Cependant, la quantité et la distribution des précipitations varient considérablement selon les régions et les saisons. Certaines régions reçoivent des quantités importantes de précipitations tout au long de l'année, tandis que d'autres connaissent des périodes prolongées de sécheresse. Celles-ci sont contrôlées par plusieurs facteurs, à la fois naturels et anthropiques. Donc, il est important de comprendre ces différents facteurs pour prédire et comprendre les régimes de précipitations dans le bassin Bas Sebou, ainsi que pour élaborer des stratégies de gestion de l'eau efficaces et durables. Dans ce chapitre, l'objectif est d'évaluer la variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou en utilisant des analyses statistiques avancées des séries chronologiques de précipitations de trois stations pluviométriques sur une période allant de 1948 à 2017. En plus de cela, d'autres ensembles de données de réanalyse de la circulation atmosphérique et océanique ont été utilisés pour explorer les principaux modes qui contrôlent la distribution spatio-temporelle des précipitations. Les traitements statistiques et les modélisations utilisés dans cette étude permettent de mieux comprendre la variabilité des précipitations dans la région et les facteurs qui la contrôlent. Les résultats obtenus pourront ainsi aider à améliorer les prévisions météorologiques et à mieux anticiper les effets du changement climatique sur les précipitations dans le bassin Bas Sebou. Les résultats obtenus dans ce chapitre sont publiés dans la revue *Modeling Earth Systems and Environment*. (Hakam et al., 2022a).



Hakam, O., Baali, A., Ait Brahim, Y., El Kamel, T., & Azennoud, K. (2022). Regional and global teleconnections patterns governing rainfall in the Western Mediterranean: Case of the Lower Sebou Basin, North-West Morocco. Modeling Earth Systems and Environment, 8(4), 5107-5128. DOI : https://doi.org/10.1007/s40808-022-01425-3

Résumé

Les précipitations dans le Nord-Ouest du Maroc ont montré des fluctuations mensuelles significatives avec des impacts socio-économiques dramatiques au cours des dernières décennies. Plusieurs études ont suggéré que la variabilité est liée aux fluctuations des schémas de circulation à grande échelle. Ces dernières années, plusieurs ensembles prometteurs de données de réanalyse centennale sont devenus disponibles, ouvrant la voie à de nouvelles études dynamiques qui facilitent la compréhension de la variabilité observée des précipitations. Ici, une analyse statistique des séries chronologiques de précipitations de trois stations du bassin Bas Sebou couvrant la période 1948-2017, ainsi que d'autres ensembles de données de réanalyse globales, est utilisée pour explorer les télécorrélations atmosphériques et océaniques (téléconnexions) sur la base d'une analyse statistique approfondie et de fonctions orthogonales empiriques (FOE). Le test de Mann-Kendall (MK) a été effectué pour identifier les tendances significatives des précipitations mensuelles. La tendance notable parmi les tendances significatives est sélectionnée en utilisant la pente de Theil Sen (TS) où des tendances à la baisse ont été identifiées au début de l'hiver (décembre) et au début du printemps (mars) avec des diminutions de précipitations de 0,5 mm/an et 0,42 mm/an, respectivement. Les changements dans les tendances significatives trouvées sous l'influence de différents modèles de téléconnexion utilisant leurs indices tels que l'indice d'oscillation Nord-Atlantique (iONA), l'indice d'oscillation Méditerranéenne (iOM) et l'indice d'oscillation Australe (iOA) sont déterminés par le test de Mann-Kendall partiel (MK-P). Dans l'ensemble, les résultats obtenus dans cette étude suggèrent que les téléconnexions affectent les quantités de précipitations dans le bassin Bas Sebou. Des corrélations négatives et statistiquement significatives sont observées entre le iONA et le iOM et les quantités de précipitations tombant dans le bassin Bas Sebou. Les précipitations printanières montrent des corrélations significativement négatives (positives) dans l'Est (Ouest) du Pacifique avec la température de surface de la mer (SST - *Sea Surface Temperature*), soulignant à nouveau l'impact négatif d'El Nino (phase négative du iOA) sur les précipitations dans le Nord-Ouest du Maroc. Ces résultats sont utiles pour la prévision mensuelle des précipitations et la planification des ressources en eau.

Mots-clés : Variabilité des précipitations, Téléconnexions, Bassin Bas Sebou, Maroc

Abstract

Rainfall in north-western Morocco has shown significant monthly fluctuations with dramatic socio-economic impacts over the past decades. Several studies have suggested that variability is related to fluctuations in large-scale circulation patterns. In recent years, several promising centennial reanalysis datasets have become available, paving the way for new dynamic studies that facilitate an understanding of observed rainfall variability. Here, a statistical analysis of the rainfall time series of three stations in the Lower Sebou Basin covering the period 1948–2017, as well as other global reanalysis datasets is used to explore teleconnections based on extensive statistical analysis and empirical orthogonal functions (EOFs). The Mann–Kendall test (MK) was conducted to identify significant monthly rainfall trends. The notable trend among significant trends is selected using the Theil Sen's slope (TS) where downward trends were identified in early winter (December) and early spring (March) with rainfall decreases of 0.5 mm/year and 0.42 mm/year, respectively. Changes in significant trends found under the influence of different teleconnection patterns using their indices such as the North Atlantic oscillation Index (NAOI), the Mediterranean oscillation Index (MOI) and the Southern oscillation Index (SOI) are determined by the partial Mann–Kendall test (P-MK). Overall, the results obtained in this study suggest that teleconnections affect the amounts of rainfall in the lower Sebou basin. Negative and statistically significant correlations are observed between the NAOI and MOI and the amounts of rainfall falling in the lower Sebou basin. Spring rainfall shows significantly negative (positive) correlations in the Eastern (Western) Pacific with sea surface temperature (SST), again highlighting the negative impact of El Nino (negative phase of SOI) on rainfall in Northwestern Morocco. These results are useful for monthly rainfall forecasting and water resource planning.

Keywords: *Rainfall variability · Teleconnections · Lower Sebou Basin · Morocco*

I. Introduction

Alors que l'étendue et la gravité de la pauvreté diminuent en Asie du Sud et de l'Est, elles augmentent en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, en particulier dans les zones rurales où se trouvent 70 % des pauvres (World Bank, 2020). Le manque d'infrastructures, de performances agricoles et de ressources en eau sont des facteurs clés pour expliquer les niveaux élevés de pauvreté dans les pays en développement, en particulier dans les pays africains. Au Maroc, pays du Nord-Ouest de l'Afrique, le climat est marqué par de fortes variations de températures et de précipitations d'une part entre la Méditerranée et le désert et d'autre part entre l'Atlantique et le désert. En conséquence, il est confronté à des problèmes de développement et de gestion durable des ressources en eau (Schilling *et al.,* 2020) car sa demande en eau comprend l'eau potable (6%), l'usage industriel (4%) et l'agriculture (90%) (Mandi & Ouassani, 2013). En effet, les précipitations au Maroc présentent un degré élevé de variabilité, à la fois temporelle et spatiale, ainsi qu'un large éventail de régimes pluviométriques (Abdelmajid et al. 2021), en particulier dans les plaines atlantiques et dans une grande partie du nord du Maroc (Benseddik *et al.,* 2017 ; Lachgar *et al.,* 2021). On pense que plusieurs oscillations océaniques et atmosphériques à grande échelle (téléconnexions) affectent l'apport d'humidité au Maroc, influençant ainsi la distribution spatio-temporelle des précipitations. L'étude climatique de la variabilité des précipitations dans un contexte global, en tenant compte des téléconnexions climatiques à distance, est devenue une priorité de recherche. Cela peut aider à expliquer les observations hydrométéorologiques et à prédire les scénarios futurs de variabilité des précipitations, ainsi qu'à prendre des mesures nécessaires et utiles pour les gestionnaires des ressources en eau. Les modèles de téléconnexions sont souvent utilisés en climatologie et en océanographie pour décrire les liens climatiques entre des régions géographiquement éloignées (de centaines à des milliers de kilomètres) (Nigam *et al.,* 2003). Ces régions représentent des centres d'action dont le comportement est synchronisé sur de longues périodes. Ainsi, un dipôle est caractérisé par deux régions opposantes de haute et de basse pression où les anomalies positives de pression de surface de la mer dans une région coïncident avec des anomalies négatives dans l'autre région (Kawale *et al.,* 2013).

Les sources des précipitations au Maroc peuvent être grossièrement classées en trois catégories : les précipitations provenant des systèmes météorologiques liés à l'activité extratropicale, les interactions tropicales-extratropicales (ITE) et en particulier dans les zones montagneuses et les orages locaux causés par le forçage orographique. Les téléconnexions suivantes entre la variabilité du climat mondial et les précipitations marocaines sont pertinentes. De nombreuses études ont démontré une relation étroite entre les précipitations au Maroc et les modèles de téléconnexion, en particulier l'oscillation Nord-Atlantique (ONA), qui est une oscillation atmosphérique avec deux centres d'action situés près de l'Islande et de l'Atlantique subtropical (Lamb & Peppler, 1987). Dans ce sens, il a également été possible d'établir une relation entre les précipitations au Maroc et la circulation atmosphérique dans l'océan Atlantique. L'ONA est généralement considérée comme la téléconnexion qui capte le mieux le comportement des précipitations sur une grande partie du pays pendant la saison hivernale

(Gadouali *et al.,* 2020 ; Driouech *et al.,* 2021) ; elle est aussi utilisée pour établir la distribution annuelle des précipitations (El Hamly & Sebbari 1998 ; Knippertz *et al.,* 2003).

L'ONA a également été associée à des épisodes de sécheresse et à des problèmes de réduction du débit des rivières et des niveaux de stockage des réservoirs (Vicente-Serrano *et al.,* 2011). Également remarquable dans les études précédentes sur le bassin méditerranéen, l'oscillation Méditerranéenne (OM), qui est définie comme la différence des hauteurs du géopotentiel normalisées à 500 hPa entre Alger et Le Caire (Conte *et al.,* 1989), joue un rôle important dans la modulation des précipitations dans le bassin méditerranéen (Mathbout *et al.,* 2020). De plus, il a été montré que ces deux téléconnexions sont fortement influencées par les systèmes cycloniques de l'Atlantique Nord-Est qui forcent la cyclogenèse méditerranéenne (Zeroual *et al.,* 2017), induisant une forte corrélation entre elles (Criado-Aldeanueva *et al.,* 2014). Plus loin de la région, dans l'océan Pacifique, certains effets de l'oscillation Australe (OA) sur les précipitations en Afrique du Nord-Ouest ont été constatés (Nicholson & Kim, 1997 ; Ward *et al.,* 1999 ; Donat *et al.,* 2014), y compris les graves conditions de sécheresse qui se sont produites au Moyen-Orient et en Afrique du Nord en 2015-2016 suite de l'effet d'El Niño, qui est considéré comme un mécanisme d'alerte précoce. Certaines études ont déterminé les principales régions d'influence au Maroc des différentes téléconnexions (Born *et al.,* 2010 ; Driouech et al. 2021), ainsi que pour le bassin méditerranéen (Mathbout *et al.,* 2020). Un bon exemple dans ce sens est le travail de Zamrane *et al.,* (2021), qui essaient d'établir le lien entre les modèles de téléconnexions (ONA, OM et OA) avec les précipitations dans le bassin versant du Sebou. Il est donc nécessaire d'explorer la téléconnexion des événements climatiques et de la circulation atmosphérique dans une région particulière. Le bassin Bas Sebou, situé en aval de ce dernier, n'a pas échappé à ces influences en marquant son histoire climatique par de nombreux événements extrêmes et des sécheresses d'ampleur variable, parfois interrompus par des épisodes de pluies torrentielles provoquant des inondations (Chadli *et al.,* 2016 ; Acharki *et al.,* 2019). Le bassin Bas Sebou abrite une activité économique basée sur l'agriculture (63% des terres sont dédiées à l'agriculture) (ORMVAG, 2020) et mérite beaucoup d'intérêt pour étudier son climat et ses prévisions futures. La recherche a été menée pour contribuer aux études de gestion agrométéorologique dans le bassin Bas Sebou. L'objectif de cette étude porte sur la modélisation de la variabilité des tendances pluviométriques sur la base des analyses statistiques et les fonctions orthogonales empiriques (FOE) pour la validation des résultats, en abordant plusieurs approches successives permettant sans doute d'abord de comprendre et ensuite de prévenir les sécheresses dans leur globalité.

II. Méthodologie

II . 1. Sources et traitement des données

II . 1. a. Données pluviométriques

Les données pluviométriques mensuelles en millimètres (mm/mois) ont été acquises auprès de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb (ORMVAG). Trois stations, à savoir Kenitra (Kt), Souk El Arbaa (SA) et Sidi Slimane (SS) à travers le bassin Bas Sebou

ont été choisies en fonction de la source authentique et de la disponibilité des données (**Figure 68**). La période de suivi des précipitations dans les trois stations météorologiques sélectionnées est de soixante-dix ans, de 1948 à 2017. Les données collectées par ORMVAG ont été converties en moyennes mensuelles et annuelles (**Tableau 19**). La partie ouest (littorale) du bassin Bas Sebou où se trouve la station de Kénitra (Kt) reçoit des niveaux élevés de précipitations (entre 570 et 600 mm/an) dus aux perturbations d'ouest, relativement fraîches. La partie intérieure (l'Est) englobe le reste du bassin où se trouvent les stations de Souk El Arbaa (SA) et Sidi Slimane (SS), plus sèche, avec une pluviométrie qui varie entre 400 et 600 mm/an (**Tableau 19**).

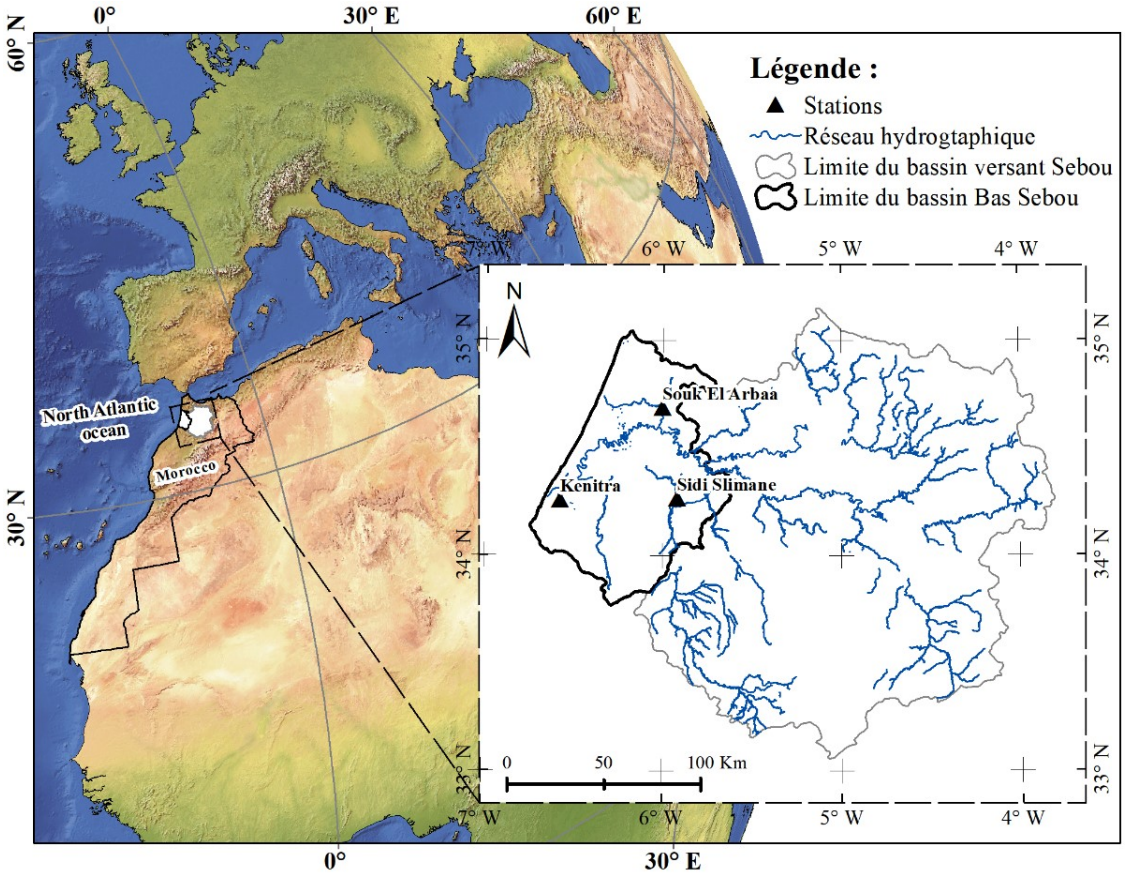


Figure 68 : Situation géographique et stations météorologiques sélectionnées dans bassin Bas Sebou.

II . 1. b. Indices climatiques

Les téléconnexions à grande échelle représentent le schéma spatial dans la stratosphère, montrant la circulation atmosphérique par rapport à la circulation océanique. Il s'agit du lien entre les variations climatiques dans des régions du monde très éloignées les unes des autres. Les téléconnexions sont persistantes et peuvent durer aussi bien sur une courte période que sur une longue période, par exemple d'une à deux semaines ou d'une période interannuelle à décennale. La représentation quantitative des schémas de circulation et de téléconnexion à grande échelle est basée sur des indices climatiques. Les indices climatiques des schémas de téléconnexion ONA, OM et OA dont on sait qu'ils ont affecté les précipitations dans le bassin

Bas Sebou sont pris en compte (Filahi *et al.,* 2015 ; Zamrane, 2016) (**Figure 69**). Les données des indices climatiques mensuels sont téléchargées à partir du site web de la Division des sciences physiques de la NOAA-ESRL (*https://www.esrl.noaa.gov*). Une brève description des indices climatiques est fournie ci-dessous, tandis que le domaine utilisé pour définir les modèles de téléconnexion est spécifié dans le **tableau 20** et la **figure 69**.

L'oscillation Nord-Atlantique (ONA) est le principal schéma synoptique de la circulation atmosphérique et de la variabilité climatique dans l'Atlantique Nord. L'oscillation Nord-Atlantique à grande échelle correspond à la masse atmosphérique entre l'anticyclone subtropical (anticyclone des Açores) et la dépression polaire (Islande) dans la région de l'Atlantique Nord (**Figure 69**). L'intensité de l'OAN est généralement exprimée par un indice (iONA) (Hurrell, 1995 ; Jones *et al.,* 1997) mesurant la différence entre la pression au niveau de la mer normalisée (SLP) enregistrée dans l'Atlantique aux hautes latitudes (Islande ; 65°N, -18°E) et aux basses latitudes (Açores ; 37°N, -25°E). La phase positive produit un fort courant (courant-jet) d'Ouest sur la région de l'Atlantique Nord, aussi couramment désigné par sa dénomination anglophone de *Jet stream*, entraînant des conditions froides sur l'Atlantique Nord-Ouest et des conditions chaudes sur l'Europe. L'Afrique du Nord, y compris le Maroc, connaît des précipitations inférieures à la normale. La phase négative de l'ONA, caractérisée par un faible gradient de pression et un affaiblissement des courants d'Ouest dans la région de l'Atlantique Nord, est associée à des températures froides sur l'Europe du Nord et à une augmentation des précipitations en Afrique du Nord.

L'oscillation Méditerranéenne (OM) est définie comme un comportement dipolaire de l'atmosphère entre les sous-bassins Est-Ouest de la Méditerranée (**Figure 69**). L'indice (iOM) mesurant l'intensité du dipôle est principalement défini comme la différence normalisée des hauteurs du géopotentiel à 500 hPa entre Alger (36,4°N, 3,1°E) et Le Caire (30,1°N, 31,4°E) (Conte *et al.,* 1989). Il s'agit d'un modèle de variabilité à basse fréquence produisant des anomalies barométriques, thermiques et pluviométriques opposées entre les extrêmes du bassin, influençant les précipitations dans le bassin méditerranéen (Dünkeloh & Jacobeit, 2003 ; Criado-Aldeanueva & Soto-Navarro, 2013). L'iOM peut être interprétée par deux hauteurs du géopotentiel opposées, dans son mode positif par un anticyclone en Méditerranée occidentale (Alger) et dans son mode négatif en Méditerranée orientale (Le Caire).

L'oscillation Australe (OA) a été introduite pour la première fois par Gilbert (1924) et Walker (1931) pour décrire l'ensemble complexe de relations climatologiques dans les océans Indien et Pacifique (**Figure 69**). La circulation Est-Ouest associée à l'oscillation Australe (OA) est appelée circulation de Walker. L'OA est un phénomène à l'échelle mondiale associé à d'importantes variations interannuelles de la température de surface de la mer (SST), des précipitations et de la force du vent dans une grande partie du Pacifique. L'indice d'oscillation Australe (SOI) est une mesure des fluctuations de la pression au niveau de la mer (SLP) entre l'Ouest (Darwin ; -12°N, 130°E) et l'Est (Tahiti ; -17°N, -150°E) du Pacifique tropical pendant les événements d'El-Niño et de La Niña.

Tableau 19: Précipitations moyennes dans le bassin Bas Sebou

Stations	Période	Hiver			Printemps			Été			Automne			Annuel
		Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	
Kt	1916-2017	108,2	81	72,4	61,6	45,9	23,2	5,2	0,3	2,5	15,7	61,1	101	578,2
SA	1918-2017	98,1	77,1	71,6	61,3	51,1	28,8	6,7	0,2	1,1	11,6	49,4	94,8	551,9
SS	1933-2017	69	63,1	56,3	53,6	41,6	24,4	6,3	0,8	0,5	9,3	42	68,2	434,9
Moyenne mensuelle des précipitations (mm)		91,7	73,8	66,8	58,8	46,2	25,5	6,1	0,4	1,4	12,2	50,8	88	521,7
Moyenne saisonnière des précipitations (mm)			77,4			43,5			2,6			50,4		

Tableau 20 : Description des indices climatiques.

Indices climatiques	Source	Domaine pour définir l'indice
Indice d'oscillation Nord-Atlantique (iONA)	*https://www.esrl.noaa.gov/*	Island : 65°N, -18°E Açores : 37°N, -25°E
Indice d'oscillation Méditerranéenne (iOM)	*https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/moi/*	Alger : 36,4°N, 3,1°E Le Caire : 30,1°N, 31,4°E
Indice d'oscillation Australe (iOA)	*https://www.esrl.noaa.gov/*	Darwin : -12°N, 130°E Tahiti : -17°N, -150°E

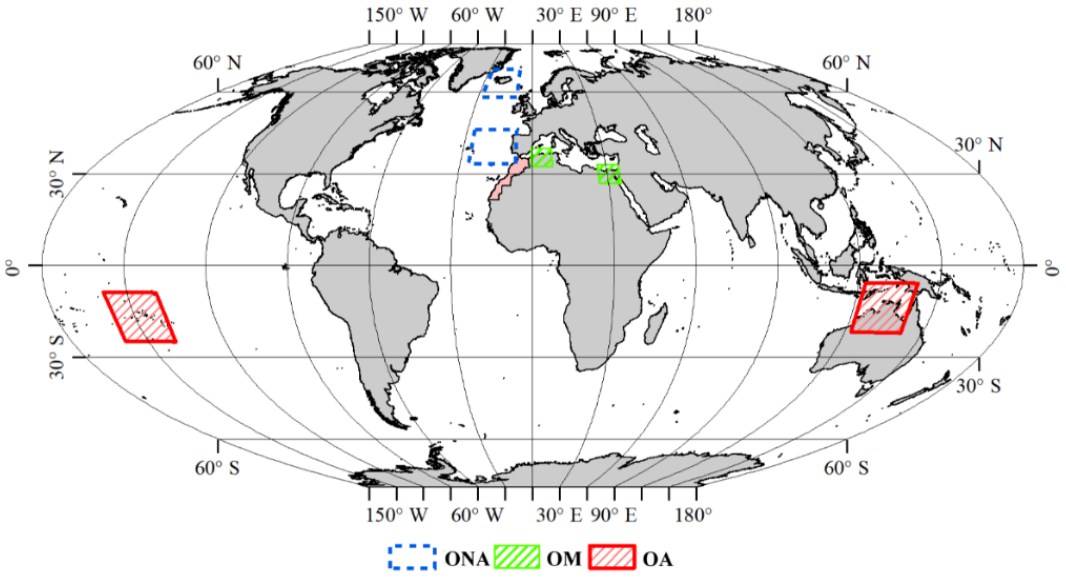


Figure 69 : Principales téléconnexions climatiques dominantes dans le bassin Bas Sebou.

II . 1. c. Variables de la circulation atmosphérique et océanique (données de la réanalyse)

Pour comprendre la variabilité actuelle du climat, il est important de remonter le plus loin possible dans les observations du système terrestre. Cependant, les observations ont toujours été inégalement réparties et sujettes à des erreurs. Même à l'ère des satellites, les observations ne peuvent à elles seules fournir une image complète et précise de l'état des systèmes terrestres à un moment donné. La réanalyse comble les lacunes des observations et le fait de manière cohérente, minimisant ainsi les faux signaux de changement. Dans cette étude, les variables climatiques océaniques et atmosphériques telles que la température de surface de la mer (SST),

la pression au niveau de la mer (SLP) et les hauteurs du géopotentiel à 500 hPa (GPH-500) ont été utilisées pour déterminer les cartes des fonctions orthogonales empiriques (FOE) et leur relation avec la variabilité des précipitations. Les données maillées de la température de surface de la mer (SST) (1°×1°) sont téléchargées à partir du Met Office Hadley Center (*https://climatedataguide.ucar.edu/climatdata/sstdata-hadisst-v11*), tandis que les données maillées de la SLP et du GPH-500 (2,5°×2,5°) sont téléchargées à partir du site web de la division des sciences physiques du NOAA-ESRL (*https://www.esrl.noaa.gov*).

II . 2. Analyses statistiques

L'analyse des tendances a été réalisée à l'aide du test de Mann-Kendall sur les données pluviométriques mensuelles de chacune des trois stations, ce qui est recommandé pour les séries de données environnementales, climatiques ou hydrologiques (Pohlert, 2018 ; Driouech *et al.,* 2021). L'ampleur de la tendance (pente) est calculée à l'aide de la pente de Theil Sen (TS), car elle est moins sensible aux données manquantes et aux valeurs aberrantes et est recommandée pour les analyses métrologiques (Gujarati, 2009). Cette méthode est donc plus robuste que l'estimateur des moindres carrés. L'influence des indices climatiques sur les tendances pluviométriques de chaque station est évaluée par le test de Mann-Kendall partiel (MK-P). L'analyse empirique des fonctions orthogonales (FOE) et l'analyse en composantes principales (ACP) ont été effectuées pour calculer la variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou. Cette analyse fournit une méthode pratique pour étudier la variabilité maximale d'un ensemble de données bidimensionnelles (spatiales et temporelles) de longues séries temporelles sur de vastes zones. L'analyse de corrélation entre les précipitations et les indices climatiques, d'une part, les précipitations et les variables climatiques, d'autre part, a été réalisée par le test de corrélation de Pearson (Zhang *et al.,* 2017).

II . 2. a. Détection de tendances (test de Mann-Kendall)

Le test de Mann-Kendall (MK) est couramment utilisé pour détecter des tendances monotones dans un ensemble de données environnementales, climatiques ou hydrologiques (Pohlert, 2018 ; Baig *et al.,* 2021). L'un de ses avantages est qu'il ne nécessite pas que les données suivent une distribution normale. Elle se caractérise également par une faible sensibilité aux ruptures brutales dues à des séries temporelles inhomogènes (Gocic & Trajkovic, 2013). Son hypothèse nulle (H_0) est que les variables suivent une distribution aléatoire et qu'il n'y a pas de tendance claire.

Le test est basé sur la statistique (S) définie comme suit :

$$S = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=k+1}^{N} sng(x_j - x_k) \quad \textbf{(5)}$$

Où S est le nombre de différences positives moins le nombre de différences négatives, N est le nombre de points de données, x_j et x_k sont les valeurs mensuelles des mois j et k avec (j> k).

Noter ε=(x_j-x_k) ; $sng(\varepsilon) = \begin{cases} 1\ si\ \varepsilon > 0 \\ 0\ si\ \varepsilon = 0 \\ -1\ si\ \varepsilon < 0 \end{cases}$ **(6)**

Lorsque N > 10, la distribution de S est supposée être normalement distribuée avec une moyenne E (S) = 0 et une variance (var (S)) donnée par :

$$var\ (S) = \frac{N(N-1)(2N+5)-\sum_{k=1}^{n} t_k(t_k-1)(2t_k+5)}{18} \quad \textbf{(7)}$$

Où N est le nombre de données de la série, n est le nombre de groupes liés et t_k est le nombre de données dans le groupe d'ordre k. Les valeurs de S et var (S) sont ensuite utilisées pour calculer le test statistique standardisé Z-score selon la formule suivante :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{var(S)}} & if\ S>0 \\ 0 & if\ S=0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{var(S)}} & if\ S<0 \end{cases} \quad \textbf{(8)}$$

Une valeur positive (négative) de Z-score indique une tendance ascendante (descendante) et sa signification est comparée à la valeur critique α ou au niveau de signification du test.

II . 2. b. Pente de Theil Sen (TS)

La pente de Theil Sen (TS) est utilisée pour calculer l'ampleur de la tendance. Elle est plus robuste que la régression linéaire car elle limite l'influence des valeurs aberrantes et donne de meilleurs résultats même dans le cas de données normalement distribuées (Chervenkov & Slavov, 2019). Selon la méthode TS, la pente globale (S') est la médiane de N valeurs de la pente (S) et est donnée par :

$S' = \frac{S_{N+1}}{2}$, si N est impair ; **(9)**

$S = \frac{\frac{S_N}{2}+\frac{S_{N+2}}{2}}{2}$, Si N est pair **(10)**

Où S est la pente entre deux valeurs quelconques d'une série temporelle x. Pour une série temporelle x comportant n observations, il existe N=n×((n-1)/2) valeurs possibles de S qui peuvent être calculées comme suit :

$S = \frac{x_k-x_j}{k-j}$, où k ≠ j **(11)**

II . 2. c. Test de Mann-Kendall partiel (MK-P) pour évaluer l'influence des indices climatiques sur les tendances pluviométriques

L'influence des indices climatiques à grande échelle sur la série chronologique des précipitations est examinée par le test de Mann-Kendall partiel (MK-P) (Libiseller & Grimvall, 2002; Iqbal & Athar, 2018). Le MK-P est l'une des meilleures procédures qui effectuent simultanément l'ajustement pour les covariables (variables d'influence) et les tests de tendance. Dans cette étude, le test MK-P est utilisé pour évaluer les changements dans les tendances des précipitations en présence d'indices climatiques qui sont les covariables. Les tendances des précipitations (variable de réponse) peuvent être évaluées en présence des covariables pertinentes via le test MK-P lorsque l'effet de la variable explicative est supprimé (Libiseller & Grimvall, 2002). La statistique de test pour la variable réponse y, dont la covariable x est la variable explicative, est donnée par la formule suivante :

$$MK - P = \frac{S_y - \hat{\rho} S_x}{\sqrt{(1-\hat{\rho})n(n-1)(2n+5)/18}} \quad \textbf{(12)}$$

Où S_y est la statistique de Mann-Kendall de la variable de réponse, S_x est la statistique de Mann-Kendall de la variable explicative, ρ est la corrélation conditionnelle entre les statistiques MK S_x et S_y. La statistique MK-P est normalement distribuée avec une moyenne de 0 et un écart-type de 1.

II . 2. d. Détection des modèles de téléconnexions qui prédominent dans le bassin Bas Sebou (fonctions orthogonales empiriques et analyse en composantes principales)

L'analyse en composantes principales (ACP) permet d'obtenir des groupes de variables orthogonales (indépendantes), bien que de nombreuses variables physiques ne soient pas indépendantes. Les paramètres météorologiques, tels que les précipitations, sont par exemple influencés par des facteurs synoptiques et régionaux, ce qui entraîne un certain degré de similitude (non-orthogonalité) entre les régimes pluviométriques (Basalirwa, 1995 ; Usman *et al.*, 2021). Pour résumer l'analyse ACP, considérons n observations faites sur N variables (dans cette étude, N sont les données mensuelles des précipitations dans n stations). Ces observations peuvent être représentées dans un espace à n dimensions, où chaque axe représente la variable. Le but de l'analyse en composantes principales est de transformer ce système à n axes en un autre système ayant deux propriétés importantes. La première est que les nouveaux axes, appelés axes principaux, sont orthogonaux, ce qui implique que les projections des observations originales sur chacun de ces nouveaux axes, appelés composantes principales, forment des variables statistiquement indépendantes. La deuxième propriété est que les composantes principales sont classées par ordre d'importance décroissante, de sorte que chaque composante explique une part maximale de la variance des observations laissée inexpliquée par les composantes précédentes. L'analyse en composantes principales (ACP) est utilisée dans cette étude pour identifier les schémas de variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou.

L'analyse des fonctions orthogonales empiriques (FOE) constitue une méthode pratique pour l'étude bidimensionnelle de la variabilité spatiale et temporelle de longues séries de données sur de vastes zones. La première dimension est l'emplacement spatial dans lequel l'FOE est trouvée et la deuxième dimension est le temps, qui représente la dimension dans laquelle les réalisations de cette structure sont échantillonnées. Cette méthode a été appliquée à la climatologie et à la météorologie et est désormais largement utilisée pour mettre en évidence les mécanismes physiques potentiels liés à la variabilité du climat (Hannachi 2004 ; Kim *et al.,* 2015). L'analyse FOE est réalisée sur des variables climatiques telles que SST, SLP et GPH-500 afin de déterminer les indices climatiques influençant les schémas de téléconnexion à grande échelle. Les étapes du calcul sont les suivantes :

Le traitement des données sélectionnées sous forme d'anomalies pour obtenir la matrice $A_{m\times n}$. :

$$B_{m\times n} = \frac{1}{n} A \times A^T \quad \textbf{(13)}$$

Si $A_{m\times n}$ est anormal, $B_{m\times n}$ est une matrice de covariance. Si $A_{m\times n}$ est normalisé, $B_{m\times n}$ est une matrice de coefficient de corrélation.

La matrice des valeurs propres $E_{m\times m}$ et la matrice des vecteurs propres $V_{m\times m}$ doivent se rencontrer :

$$B_{m\times n} \times V_{m\times n} = V_{m\times n} \times E_{m\times n} \quad \textbf{(14)}$$

$$E_{m\times n} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_m \end{bmatrix} \quad \textbf{(15)}$$

Où $\lambda_1 > \lambda_2 > - - - > \lambda_m$. Chaque valeur propre correspond à un vecteur propre de colonne, c'est-à-dire à une FOE.

$$PC_{n\times m} = V^T_{n\times m} \times A_{n\times m} \quad \textbf{(16)}$$

Chaque ligne du PC représente la série temporelle du vecteur propre correspondant. L'erreur dans le vecteur propre au niveau de confiance de 95 % est de :

$$\Delta\lambda = 1.96 * \lambda * \sqrt{\frac{2}{N}} \quad \textbf{(17)}$$

Où λ est la valeur propre et N le nombre de réalisations. En détectant chaque λ dans la plage d'erreur, si les voisins se chevauchent, le test de signification n'a pas été réussi (North *et al.,* 1982).

III. Résultats et discussions

III . 1. Tendances spatiales et temporelles des précipitations

Les tendances monotones des précipitations mensuelles pour chaque station du bassin Bas Sebou sont calculées à l'aide des tests de Mann-Kendall. Sur les huit tendances statistiquement significatives, sept sont des tendances à la baisse, tandis qu'une est une tendance à la hausse (**Tableau 21**). Cela indique que la tendance à la baisse domine dans la majorité des stations du bassin Bas Sebou, ce qui explique la diminution des précipitations au cours du siècle dernier. Les pentes des tendances significatives, calculées par la méthode de la pente de Sen (TS), les plus remarquables sont indiquées par (*) dans le **tableau 21**, par rapport aux autres marquées par une pente presque plate et qui sont ignorées. Par conséquent, les tendances à la baisse des précipitations en mars sont généralement dominantes avec une pente moyenne notable de 0,425 mm/an, tandis que les seules tendances à la hausse sont celles du mois d'août, avec une pente plate. Les précipitations moyennes en mars sont de 58,8 mm (**Tableau 19**) et les tendances significatives à la baisse avec une pente de 0,42 mm/an peuvent représenter une sécheresse agricole. La station de Sidi Slimane (SS) présente la pente la plus forte avec 0,5 mm/an en décembre.

Tableau 21 : Tendance mensuelle à la hausse (à la baisse) des précipitations des stations du bassin Bas Sebou.

Station	Période	Paramètres	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin.	Juill.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Kt	1916-2017	M-K (Z)	1,0	0,5	-3,0	-1,0	-2,8	-2,0	0,1	2,0	1,2	1,6	-0,8	-0,3
		M-K (S)	341	188	-1020	-354	-967	-685	31	572	410	562	-288	-88
		Pente de Sen (TS)	0,2	0,1	-0,42*	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	-0,2	-0,1
		p-value	0,3	0,6	0,0	0,3	0,0	0,0	0,9	0,0	0,2	0,1	0,4	0,8
SA	1918-2017	M-K (Z)	0,2	-1,7	-2,7	-0,7	-0,7	-3,0	-3,0	-1,4	-1,6	-1,0	0,1	-1,0
		M-K (S)	80	-557	-901	-235	-237	-970	-970	-277	-337	-341	32	-325
		Pente de Sen (TS)	0,0	-0,3	-0,42*	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,3
		p-value	0,8	0,1	0,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,2	0,1	0,3	0,9	0,3
SS	1933-2017	M-K (Z)	-0,3	-0,1	-1,3	-0,4	-0,8	-1,3	0,3	-0,8	0,6	0,2	-0,1	-2,4
		M-K (S)	-90	-35	-352	-105	-211	-325	47	-147	158	47	-36	-626
		Pente de Sen (TS)	-0,1	0,0	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,5*
		p-value	0,7	0,9	0,2	0,7	0,4	0,2	0,8	0,4	0,5	0,9	0,9	0,0

Note. *(TS) Pente de Theil Sen, statistiques de Mann Kendall (Z et S) et probabilité de signification (p-value).*

III . 2. Influence des indices climatiques sur les tendances des précipitations

Les indices climatiques pertinents pour le bassin Bas Sebou qui auraient influencé les tendances à la baisse des précipitations en mars et décembre sont déjà déterminés. Les changements dans les tendances des précipitations en présence des variables influentes iONA, iOM et iOA sont déterminés par le test de Mann-Kendall partiel (MK-P) sur les précipitations mensuelles à chaque station et présentés dans **les tableaux 23, 24 et 25**. L'influence déterminée par le test P-MK est classée en influence faible, modérée et forte (**Tableau 22**). Les résultats de l'influence des indices climatiques sur les tendances significatives à la baisse en mars et

décembre sont présentés dans **le tableau 26**. Il apparaît que les indices climatiques iOA et iOM ont une faible influence sur les tendances pluviométriques en mars et une forte influence en décembre. Cependant, l'indice iONA a une forte influence sur les tendances pluviométriques pour les deux mois au niveau des trois stations du bassin Bas Sebou.

Tableau 22 : Classification du type d'influence.

Condition	Type d'influence
MK-P Le conditionnement de la variable d'influence modifie la statistique MK jusqu'à 5 %	Faible
MK-P Le conditionnement de la variable d'influence modifie la statistique MK de 5 % à 10 %	Modéré
MK-P Le conditionnement de la variable d'influence modifie la statistique MK de plus de 10 %	Fort

Tableau 23 : Influence de l'iONA sur les tendances pluviométriques dans le bassin Bas Sebou.

Mois	Stations	MK-P avec le iONA comme covariable			Mann-Kendall			Changement dans les statistiques MK selon la covariation du iONA	Influence
		p-value	P-MK statistiques (S)	Type de tendance	*p-value*	MK-statistiques (S)	Type de tendance		
Mars	Kt	0.027	-633.6	En hausse	0.003	-1020	En baisse	38%	Fort
	SA	0.037	-573,7	En hausse	0.007	-901	En baisse	36%	Fort
Décembre	SS	0.023	-459.4	En baisse	0.017	-626	En baisse	26,60%	Fort

Tableau 24 : Influence de l'iOA sur les tendances pluviométriques dans le bassin Bas Sebou.

Mois	Stations	MK-P avec le iOA comme covariable			Mann-Kendall			Changement dans les statistiques MK selon la covariation du iOA	Influence
		p-value	MK-P statistiques (S)	Type de tendance	*p-value*	MK-statistiques (S)	Type de tendance		
Mars	Kt	0.0047	-972	En baisse	0.003	-1020	En baisse	4%	Faible
	SA	0.0154	-799	En baisse	0.007	-901	En baisse	11%	Fort
Décembre	SS	0.0172	-608	En baisse	0.017	-626	En baisse	2,80%	Faible

Tableau 25 : Influence de l'iOM sur les tendances pluviométriques dans le bassin Bas Sebou.

Mois	Stations	MK-P avec le iOM comme covariable			Mann-Kendall			Changement dans les statistiques MK selon la covariation du iOM	Influence
		p-value	MK-P statistiques (S)	Type de tendance	*p-value*	MK-statistiques (S)	Type de tendance		
Mars	Kt	0.001	-1083	En baisse	0.003	-1020	En baisse	5%	Faible
	SA	0.003	-948	En baisse	0.007	-901	En baisse	5%	Faible
Décembre	SS	0.004	-736	En baisse	0.017	-626	En baisse	15%	Fort

Tableau 26 : Influence des indices climatiques sur l'évolution des précipitations des mois de mars et décembre.

Mois	Station	NAOI	MOI	SOI
Mars	Kt	Fort (+)	Faible (-)	Faible (-)
	SA	Fort (+)	Faible (-)	Fort (-)
Décembre	SS	Fort (-)	Fort (-)	Faible (-)

Note. *(+) indique les tendances à la hausse et (-) les tendances à la baisse.*

III . 3. Influence des indices climatiques sur la variabilité des précipitations

D'après les résultats du test MK et TS ci-dessus (**Tableau 21**), les tendances pluviométriques sont significatives en mars et en décembre. Les stations présentant des tendances pluviométriques significatives en mars sont situées près de l'océan Atlantique, tandis que la station située à l'intérieur du bassin (l'Est) présente des tendances significatives en décembre. Sachant que la plupart des précipitations ont lieu en hiver (décembre, janvier et février) puis au printemps (mars, avril et mai). Par conséquent, l'attention doit être portée sur les mois de décembre et mars afin de déterminer la nature de la relation entre la variabilité des précipitations et les schémas de téléconnexion à travers les étapes suivantes :

a) Analyse des composantes principales (ACP) pour identifier les modèles de variabilité des précipitations pour les deux mois (mars et décembre) et construction des séries temporelles correspondantes (PC) ;
b) Analyse de corrélation entre les séries temporelles de précipitations (PCs) et les indices climatiques pour vérifier leur pertinence ;
c) Analyse FOE sur les variables climatiques (SST, SLP et GPH-500) pour révéler les modèles de téléconnexion qui prédominent pendant les mois de mars et décembre et qui peuvent expliquer la variabilité des précipitations ;
d) Analyse de corrélation entre les séries temporelles de précipitations (PCs), les anomalies SST, les circulations atmosphériques telles que SLP et les hauteurs du géopotentiel à 500 hPa (GPH-500) pour étudier leurs relations et leurs influences sur les précipitations dans le bassin Bas Sebou.

III . 4. Liens entre les indices climatiques et la variabilité des précipitations en mars

III . 4. a. Modes de précipitations du mois de mars

L'analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur les précipitations de mars pour la période 1948 à 2017 montre que la première composante (PC1) explique une variation de 68,7% (**Tableau 27**), suffisamment capable d'expliquer la variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou et de réaliser l'analyse de corrélation avec les indices climatiques.

Tableau 27 : Principaux modes de précipitations (PCs) dans le bassin Bas Sebou pour le mois de mars.

Composant (PC)	Valeur propre	Pourcentage de variance (%)	Pourcentage cumulé (%)
1	2.06	68.7	68.6
2	0.74	25	93.6
3	0.19	6.3	100

III . 4. b. Corrélation entre les indices climatiques et les précipitations du mois de mars

L'association des précipitations du mois de mars avec les indices climatiques est démontrée par l'analyse de corrélation entre la série temporelle des précipitations du mode pluviométrique (PC1-Mars) et les indices climatiques pour le mois de mars. Les résultats des corrélations du produit de Pearson (R) entre ch

aque paire de variables montrent que l'indice climatique à grande échelle iONA présente une corrélation hautement significative avec le PC1-Mars. Le modèle de téléconnexion à grande échelle du iOA est positivement corrélé avec le PC1-Mars avec un niveau de confiance de 20 %. L'iOM est négativement corrélé avec le PC1-Mars avec un niveau de confiance de 99% (**Tableau 28**).

Tableau 28 : Corrélation entre PC1-mars et les indices climatiques

Corrélation de Pearson (R)	**iONA**	**iOM**	**iOA**
PC1-Mars	-0.6	-0.26	0.16
p-value	**0.00****	**0.015***	**0.14**

Note. *Les chiffres en gras avec un astérisque indiquent une corrélation significative avec un niveau de confiance de 99 % pour un astérisque (*) et de 100 % pour deux astérisques (**), tandis que les chiffres en surbrillance indiquent une corrélation avec un niveau de confiance de 90 %.*

III . 4. c. Principaux modes des schémas de téléconnexion pour le mois de mars : Analyse par FOE

L'analyse FOE est réalisée globalement sur SST, SLP et GPH-500 pour le mois de mars pendant la période 1948 à 2017. Les principaux modes d'FOE sont sélectionnés en fonction de leur signification, en calculant l'incertitude du spectre des valeurs propres du mois de mars de la matrice de covariance de STT, SLP et GPH-500 (**Équation 17**).

Les résultats indiquent que les deux premières valeurs propres de STT, SLP et GPH-500 sont clairement séparées et bien distinctes du reste du spectre, donc statistiquement bien définies (**Figure 70**). Par conséquent, deux modes principaux pour chacune des variables climatiques sont pris en compte pour l'analyse. Les modes principaux (FOE : FOE-1 = 16% et FOE-2 = 9%) calculés dans leur ensemble donnent deux modes qui expliquent 25% de la variance des anomalies de la STT (**Figure 71**). L'FOE-1 présente le modèle OA dans sa phase positive qui est étroitement associée aux conditions de La Niña avec une structure en forme de fer à cheval, reflétant une diminution de la température de l'eau de surface dans l'océan Pacifique oriental autour de l'équateur. Ce phénomène est dû au renforcement des alizés dans le Pacifique équatorial en direction de l'Australie et des Philippines, ce qui provoque une remontée d'eau froide depuis les profondeurs le long de la côte du Pérou. Le schéma de l'oscillation décennale du Pacifique (ODP) peut également être observé dans sa phase négative, reflétée par un arc chaud dans le Nord de l'océan Pacifique (**Figure 71**). Le deuxième mode (FOE-2 : 9%) est plus fort dans l'océan Atlantique et ressemble également au schéma de l'oscillation multi-décennale de l'Atlantique (OMA) dans sa phase positive avec un tripôle négatif de la SST d'une structure océanique dite en fer à cheval avec des anomalies chaudes au large de la côte est des États-Unis et des anomalies froides au Nord de 40°N (**Figure 71**).

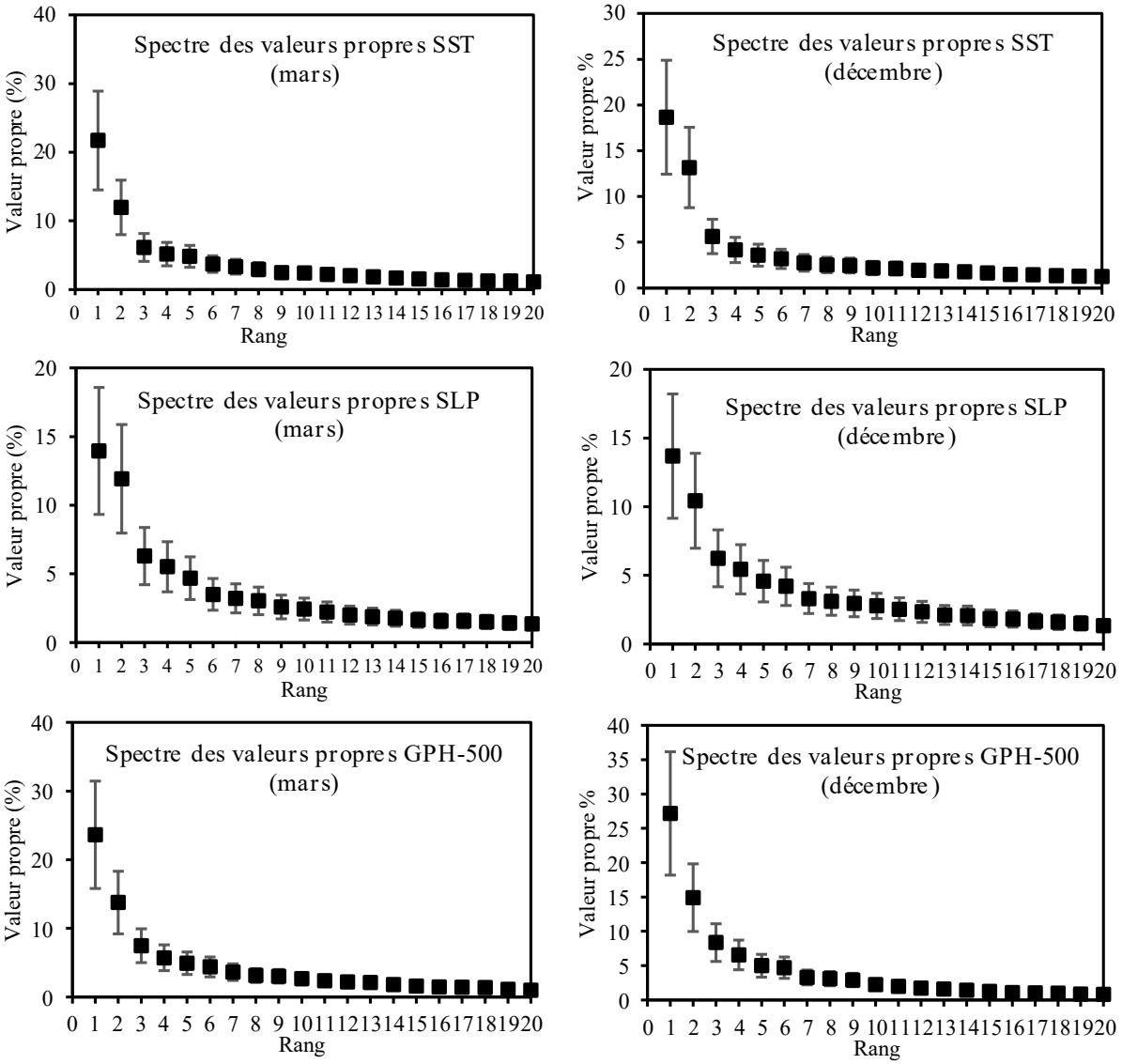


Figure 70 : Spectre des valeurs propres (%) de la matrice de covariance pour les mois de mars et décembre (SST, SLP et GPH-500). La barre verticale montre les estimations d'incertitude basées sur la règle empirique de North *et al.,* (1982). Les 20 premières valeurs propres sur 70 sont affichées.

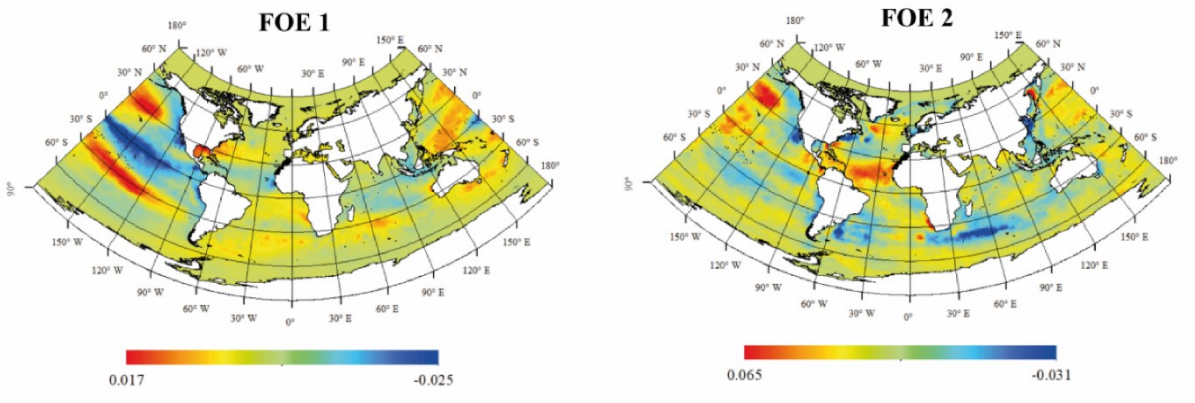


Figure 71 : FOEs de la SST normalisée pour le mois de mars durant la période 1948-2017.

La figure 72 montre deux principaux modes annulaires de SLP, un mode annulaire Nord (MAN) (FOE-1 = 13%) et un mode annulaire sud (MAS) (FOE-2 = 10%), qui expliquent environ 23% de la variabilité cumulée. L'FOE-1 montre une signature de l'oscillation arctique (OA) qui ressemble cependant beaucoup aux anomalies associées à l'ONA dans sa phase positive avec des centres d'action d'une structure dipolaire Nord-Sud, d'où la haute pression aux Açores et la basse pression en Islande. Le deuxième mode (FOE-2) indique un mode annulaire Sud (MAS), également connu sous le nom d'oscillation antarctique (OAA), qui est le mode climatique décennal dominant dans l'hémisphère sud. Ce mode est caractérisé par un centre d'amplitude d'un signe au-dessus de l'Antarctique et d'un autre signe opposé dans un anneau allant de 40° S à 50° S (**Figure 72**).

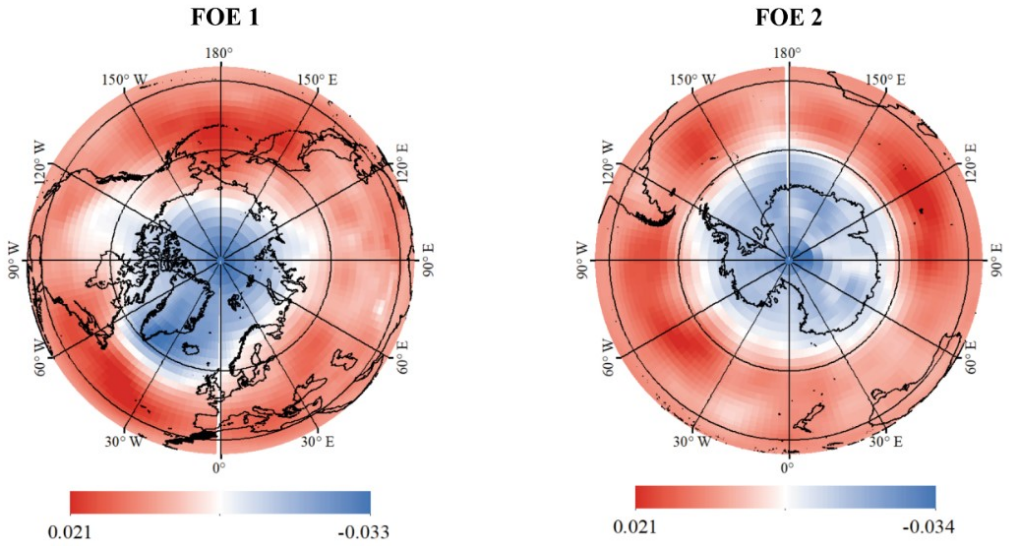


Figure 72 : FOEs du SLP standardisé pour le mois de mars durant la période 1948-2017.

Dans l'analyse du géopotentiel à 500 hPa (GPH-500) en mars durant la période 1948-2017, l'ONA correspond à la première composante (FOE-1 = 24%) (**Figure 73**). Sa configuration spatiale est dominée par un fort dipôle Nord-Sud conduisant à une phase positive d'iONA. Le centre positif s'étend sur l'Europe, l'Atlantique subtropical occidental et l'Afrique du Nord (zone de haute pression). Le centre négatif est situé sur l'Arctique et l'Islande (zone de basse pression). La rencontre de ces deux centres d'action favorise les vents d'Ouest qui sont donc dominants sur l'Europe du Nord. Ces deux centres d'action sont déplacés à l'Ouest des centres prototypes de l'ONA, ce qui indique un décalage vers l'Ouest. Ce mode présente également le schéma OM avec une différence d'anomalie de hauteur du géopotentiel à 500 hPa positive (négative) à Alger (Le Caire). Pour le deuxième mode (FOE-2 : 9%), il y a aussi un déplacement vers l'Ouest des centres d'action de l'ONA mais cette fois-ci la différence des anomalies est faible, indiquant une phase négative de la iONA.

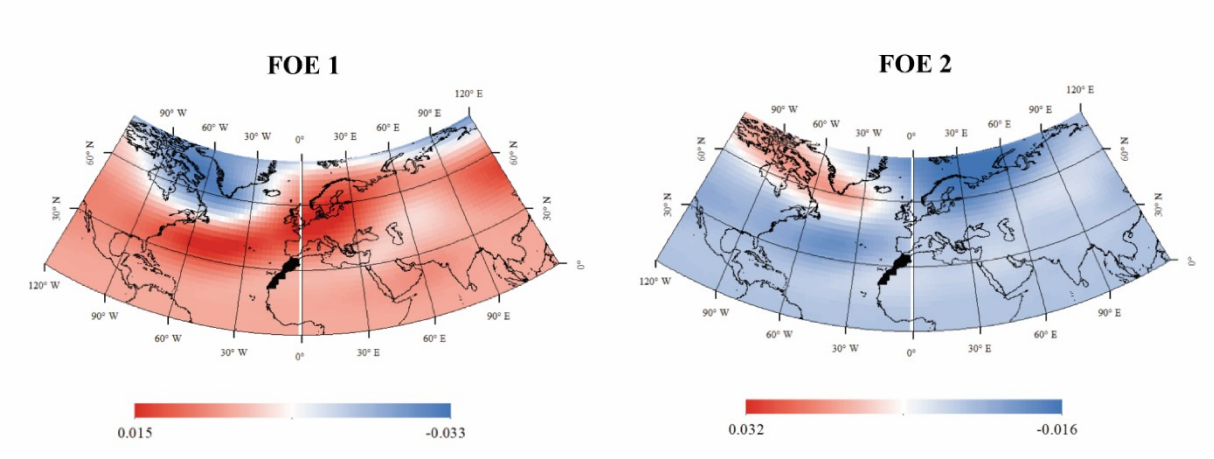


Figure 73 : FOEs normalisées du GPH-500 pour le mois de mars durant la période 1948-2017.

III . 4. d. Relation entre les anomalies de la circulation océanique et la variabilité des précipitations pour le mois de mars

La figure 74a montre les régions océaniques dont la variabilité de la série SST est corrélée avec la variabilité des précipitations de mars (PC1-Mars) du bassin Bas Sebou au cours de la période 1948-2017. Les influences positives sur la variabilité des précipitations proviennent de l'Ouest de l'océans Atlantique et Pacifique. Dans le Nord de l'océan Atlantique, le modèle de corrélation tripolaire observé dans l'FOE-2 est significativement corrélé avec les précipitations du bassin Bas Sebou. En effet, la corrélation du PC1-Mars avec les anomalies de la SST est similaire au modèle de la SST associé à l'ONA. Une forte corrélation est observée au niveau du Golfe de Cadix traduit par une dépression. Ce creux apparaît aussi bien en hiver qu'en été, qu'il soit formé en liaison avec le front polaire ou le front des alizés, ou qu'il résulte d'une cyclogenèse locale. Dans les tropiques, le PC1-Mars est négativement corrélé avec le centre-Est du Pacifique alors qu'il est positivement corrélé avec l'Ouest du Pacifique (**Figure 70a**), indiquant le lien entre les précipitations et le OA, mais la corrélation est généralement insignifiante et peut être considérée comme faible, ce qui est cohérent avec les résultats du **tableau 25**. Pour le modèle régional (OM), **la figure 74a** montre un comportement opposé du coefficient de corrélation entre l'Est (Le Caire) et l'Ouest (Alger) du bassin méditerranéen.

III . 4. e. Relation entre les anomalies de la circulation atmosphérique et la variabilité des précipitations du mois de mars

La relation entre les précipitations du bassin Bas Sebou (PC1-Mars) et les circulations atmosphériques SLP et GPH-500 du mois de mars pour la période 1948-2017 est étudiée en effectuant une analyse de corrélation (**Figures 74b, 74c**). En réponse au PC1-Mars, la corrélation SLP est négative sur la plupart des régions tropicales et subtropicales avec des corrélations négatives significatives sur l'Ouest du Pacifique, la péninsule arabique et l'Afrique du Sud. Dans l'océan Atlantique Nord, une anomalie de haute pression se trouve au-dessus des Açores en réponse à la corrélation entre PC1-Mars et SLP, ce qui indique un schéma de l'ONA

fort et positif mais avec une corrélation non significative (faible). En d'autres termes, les conditions humides (sèches) sont associées à des conditions de pression inférieures (supérieures) à la normale. Pour le schéma global de l'oscillation australe (OA), les corrélations négatives (positives) dans le Pacifique tropical occidental (oriental) indiquent un lien entre la variabilité des précipitations et l'OA, mais la corrélation est généralement insignifiante, ce qui est à nouveau cohérent avec les résultats des sections précédentes. La corrélation PC1-Mars avec SLP ne montre pas de modèle d'anomalie distinctif similaire au modèle OM en Méditerranée.

Afin de comprendre les liens entre les signaux de téléconnexion observés, notamment OA dans l'océan Pacifique, ONA dans l'océan Atlantique et OM dans le bassin méditerranéen, et les précipitations dans le bassin Bas Sebou par le biais des circulations atmosphériques, la corrélation PC1-Mars est réalisée avec GPH-500, comme le montre **la figure 74c**. Seuls les deux centres d'action Nord-Sud (Islande-Açores) dans l'océan Atlantique Nord présentent des relations significatives avec les précipitations du mois de mars. Dans le centre d'action des Açores, GPH-500 montre des corrélations significatives négatives tandis que la région de l'Islande au Nord montre des corrélations significatives positives, qui sont indicatives de conditions anticycloniques. L'anomalie SLP négative (positive) dans les Açores (Islande) avec sa contrepartie négative (positive) à 500 hPa s'étend à l'Amérique du Nord, indiquant des liens avec l'ONA. Dans le bassin méditerranéen, en réponse à GPH-500, PC1-Mars est négativement corrélé avec la région d'Alger et positivement corrélé avec la région du Caire, mais la corrélation reste insignifiante (modérée) à faible. Cette anomalie GPH-500 est indicative du mode OM. La corrélation PC1-Mars avec GPH-500 ne montre pas de modèle d'anomalie distinctif similaire au modèle OA dans l'Océan Pacifique.

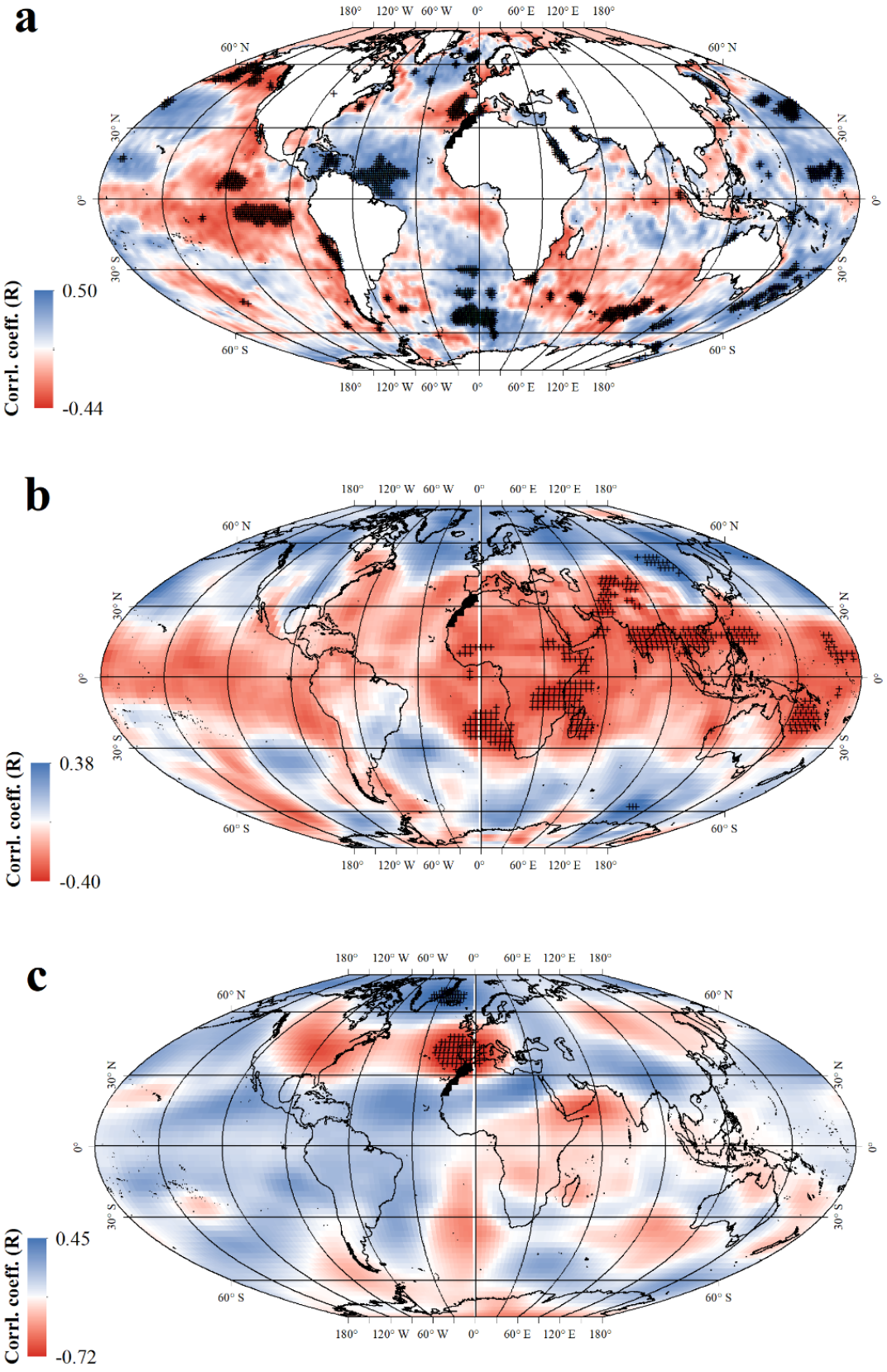


Figure 74 : Corrélation entre le PC1-Mars des précipitations dans le bassin Bas Sebou et la SST normalisée (a), le SLP (b) et le GPH-500 (c) pour le mois de mars (1948-2017). Les points de grille significatifs au niveau de confiance de 95 % sont marqués d'une croix (+).

Pour évaluer la relation entre les circulations atmosphériques et la variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou, les séries temporelles (C1 et C2) correspondant aux deux modes principaux (FOE-1 et FOE-2) qui expliquent une variabilité combinée de 37,4 % sont extraites. Les résultats de l'analyse de corrélation de C1 et C2 avec la pluviométrie (PC1-Mars) du bassin Bas Sebou sont présentés dans le tableau 29, indiquant que seul C1 a une corrélation significative avec la variabilité de la pluviométrie du bassin Bas Sebou. Ensuite, une analyse de corrélation est effectuée entre le mode principal (C1) influençant les précipitations et les indices climatiques afin de déterminer les indices influençant les précipitations dans le bassin Bas Sebou. Les résultats indiquent que les précipitations de mars sont liées à l'iONA (Tableau 30).

Tableau 29 : Corrélation entre les PC de GPH-500 (C1 et C2) et les précipitations dans le bassin Bas Sebou (PC1-Mars).

Composantes principales du GPH-500	**PC1**	
	Coeff. Corrélation. (R)	***p*-value**
C1	-0,2	**8%**
C2	0,007	95%

Tableau 30 : Corrélation entre le PC du GPH-500 (C1) et les indices climatiques.

Indices climatiques	**C1**	
	Coeff. Corrélation. (R)	***p*-value**
iONA	0,65	**0%**
iOM	-0,06	61%
iOA	0,012	91%

III . 4. f. Relation temporelle entre PC1-Mars et les indices climatiques pour le mois de mars

La figure 75 montre la relation temporelle mensuelle entre le PC1-Mars et les indices climatiques. La relation temporelle indique que, à l'exception de l'iONA, les autres indices climatiques (iOM et iOA) sont à leur niveau de signification maximal avec le mode principal respectif (PC1-Mars) après le mois de mars (Décalage = 0). L'iONA atteint sa signification négative en janvier (Décalage = -1). La relation temporelle montre également que l'iOM et l'iONA sont négativement corrélés alors que le iOA est positivement corrélé avec le mode principal des précipitations (PC1-Mars).

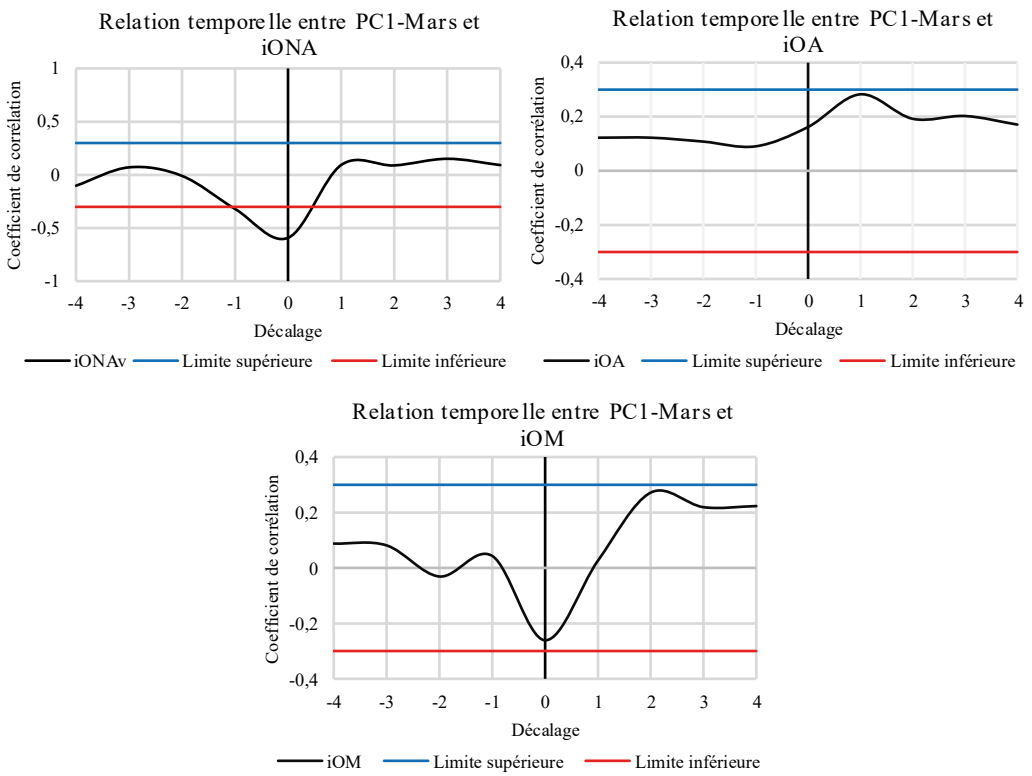


Figure 75 : Coefficient de corrélation temporelle entre les PCs les plus significatifs (PC1-Mars) et les indices climatiques. Le mois de mars est considéré comme le mois pivot, la valeur "0" étant représentée par une ligne verticale, tandis que les valeurs négatives/positives le long de l'axe des x (mois) indiquent les mois précédents/suivants à partir du mois de mars. Les limites supérieure et inférieure représentent le niveau de signification à 95 %.

III . 4. g. Synthèse des résultats des analyses pour le mois de mars

Les résultats obtenus à partir de toutes les analyses ci-dessus sont résumés dans **le tableau 31** ci-dessous avec la comparaison des résultats obtenus précédemment à partir des analyses de corrélation et de Mann-Kendall partiel (MK-P). Ainsi, l'analyse permet de conclure que l'influence du iOA sur les précipitations dans le bassin Bas Sebou est insignifiante (faible). On peut donc affirmer que le iOA a une faible influence sur les précipitations du mois de mars. L'influence du iOM est significative jusqu'à un niveau de confiance de 80 % (peut être considérée comme modérée). Enfin, l'influence du iONA est significative jusqu'à un niveau de confiance de 100 % (peut être considérée comme forte).

Tableau 31 : Résultats de l'analyse des précipitations et des indices climatiques dans le bassin Bas Sebou pour le mois de mars.

Indices climatiques	**Mann-Kendall partiel (MK-P)**	**Corrélation entre PC1-Mars et les indices climatiques**	**Analyse FOE**	**Corrélation entre PC1-Mars et les anomalies de :**		
				SST	**SLP**	**GPH-500**
NAOI	Forte	Significatif	Fort	Forte	Faible	Forte
SOI	Modérée	Significatif à 90%	Modéré	Modérée	Faible	Faible
MOI	Faible	Significatif à 99%	Faible	Faible	Faible	Modérée

III . 5. Liens entre les indices climatiques et la variabilité des précipitations en décembre

III . 5. a. Modes de précipitations du mois de décembre

L'analyse en composantes principales (ACP) est réalisée sur les précipitations de décembre de 1948 à 2017. La première composante (PC1-Décembre) explique une variation de 67,9%, ce qui est suffisant pour expliquer la variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou et pour effectuer une analyse de corrélation avec les indices climatiques (**Tableau 32**).

Tableau 32 : Principaux modes de précipitations (PCs) dans le bassin Bas Sebou pour le mois de décembre.

Composant (PC)	Valeur propre	Pourcentage de variance (%)	Pourcentage cumulé (%)
1	2.04	67.9	67.9
2	0.81	27.2	95.2
3	0.14	4.7	100

III . 5. b. Corrélation entre les indices climatiques et les précipitations

Pour mieux comprendre la relation entre le PC1-Décembre et les indices climatiques, une analyse de corrélation est effectuée entre la série temporelle des précipitations (PC1-Décembre) et les indices climatiques. Les résultats des corrélations de Pearson (R) entre chaque paire de variables sont présentés dans **le tableau 33**. Comme les résultats précédents, l'indice climatique à grande échelle iONA montre également une corrélation hautement significative avec PC1-Décembre. L'indice d'oscillation méditerranéenne (iOM) est négativement corrélé avec la PC1-Décembre avec un niveau de confiance de 80 %. Enfin, le modèle de téléconnexion à grande échelle de l'indice d'oscillation australe (iOA) est positivement corrélé avec le PC1-Décembre avec un niveau de confiance de 50 %.

Tableau 33 : Corrélation entre PC1-Décembre et les indices climatiques.

Corrélation de Pearson (R)	iONA	iOM	iOA
PC1-Décember	-0,66	-0,15	0,07
p-value	**0.00***	**0.20**	**0.52**

Note. *Les chiffres en gras avec un astérisque (*****) indiquent une corrélation significative à 100% de confiance, tandis que les chiffres en gras indiquent une corrélation avec un niveau de confiance de 50 %.*

III . 5. c. Principaux Modes des schémas de téléconnexion pour le mois de décembre : Analyse par FOE

L'analyse FOE est réalisée sur la SST, la SLP et le GPH-500 pour le mois de décembre durant la période (1948 – 2017). Suivant la règle empirique établie par North *et al.,* (1982), les principaux modes FOE ont été sélectionnés. En conséquence, deux valeurs propres de SST, SLP et GPH-500 se détachent nettement du reste du spectre (**Figure 70**). Parmi les principaux modes FOE (FOE-1 = 18% et FOE-2 = 13%) calculés globalement, deux modes expliquent 31% de la variance des anomalies SST pour le mois de décembre (**Figure 76**). Contrairement à l'FOE-2 des résultats de la SST pour le mois de mars, un tripôle positif de SST apparaît dans l'océan Atlantique Nord et entraîne une diminution des précipitations dans le Nord-Ouest de

l'Afrique (Li *et al.*, 2003). Cependant, le deuxième mode (FOE-2 ; **Figure 76**) en décembre montre des résultats similaires à l'FOE-1 en mars (**Figure 71**), indiquant la présence du schéma d'OA dans sa phase positive liée aux conditions de La Niña.

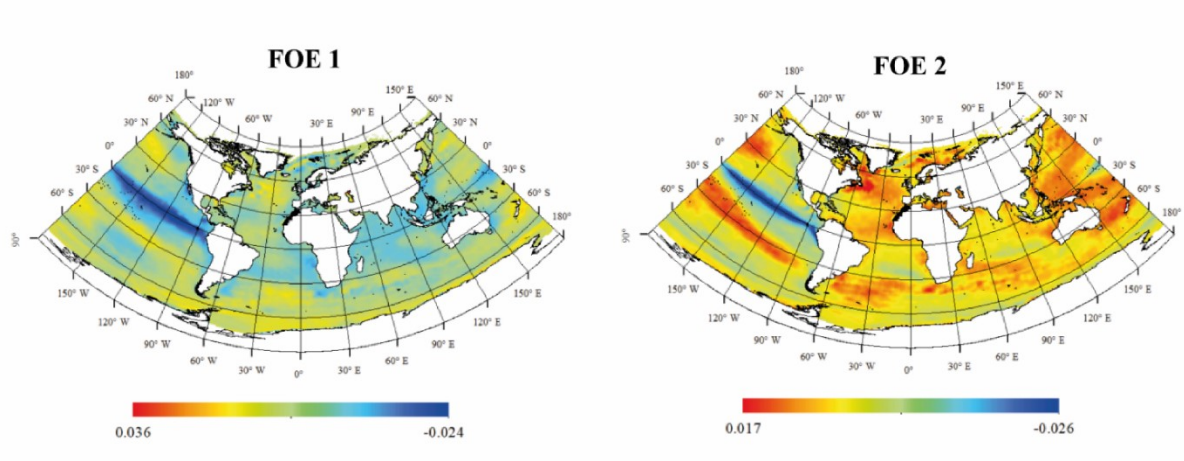


Figure 76: FOEs de la SST normalisée pour le mois de décembre durant la période 1948-2017.

La Figure 77 montre deux modes dominants (FOE-1 = 13%, FOE-2 = 10%) de SLP qui expliquent 23% de la variance des anomalies pour le mois de décembre. Le premier mode (FOE-1) montre la structure d'un vortex polaire qui ressemble beaucoup au schéma de l'oscillation arctique (OA) dans une phase positive où la pression atmosphérique est inférieure à la normale au pôle Nord et supérieure à la normale à la latitude moyenne (environ 45°N). Selon le centre des prédictions climatiques de la NOAA, cette phase entraîne une activité cyclonique plus intense dans le bassin méditerranéen, associée à une advection froide plus fréquente à travers l'Europe. Le deuxième mode (FOE-2) présente un schéma ONA faible dans sa phase positive.

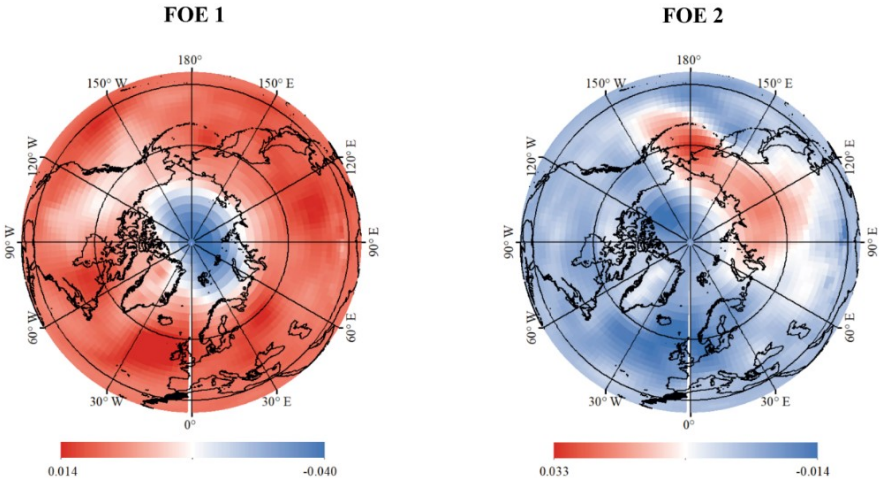


Figure 77 : FOEs du SLP standardisé pour le mois de décembre durant la période 1948-2017.

Les résultats obtenus par l'analyse FOE de la série GPH-500 pour le mois de décembre (1948-2017) sont présentés dans **la Figure 78**. Deux modes principaux sont sélectionnés (FOE-1 : 27% et FOE-2 = 14%), expliquant 41% de la variance des anomalies GPH-500. Comme pour les résultats précédents, le premier mode (FOE-1) montre le schéma ONA dans sa phase

positive avec un déplacement des centres d'action vers l'Ouest. Pour l'FOE-2, ces deux centres d'action ont connu également un déplacement mais inverse, le centre d'action islandais (Açores) se déplaçant vers l'Ouest (vers l'Est), indiquant également l'ONA dans sa phase négative (iONA -) avec une anomalie négative (positive) de la hauteur du géopotentiel à 500 hPa aux Açores (Islande). La différence des hauteurs du géopotentiel entre Alger et Le Caire indique également la présence de la configuration OM.

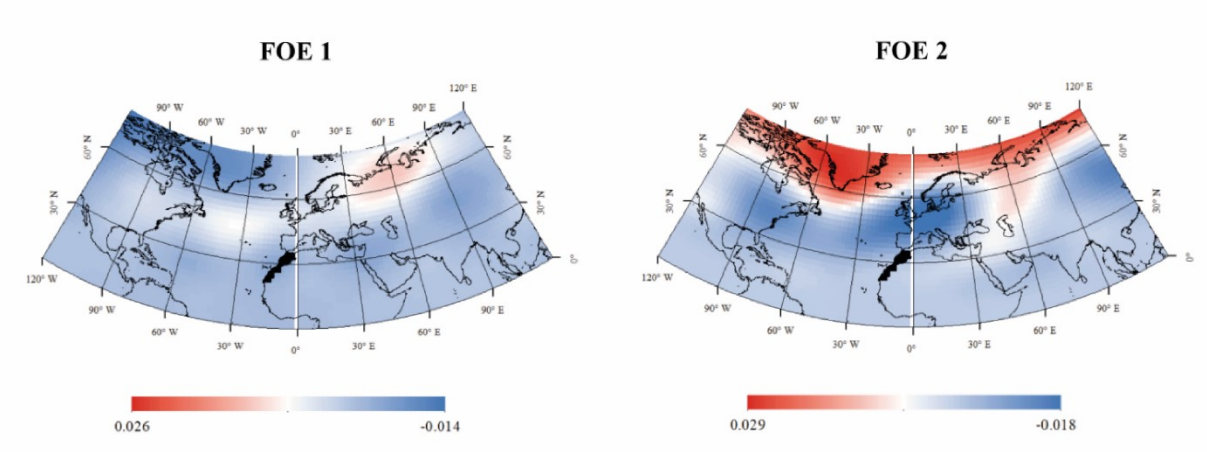


Figure 78 : FOEs normalisées du GPH-500 pour le mois de mars durant la période 1948-2017.

III . 5. d. Relation entre les anomalies de la circulation océanique et la variabilité des précipitations pour le mois de décembre

La relation entre les précipitations (PC1-Décembre) dans le bassin Bas Sebou et les anomalies de la SST pour le mois de décembre est réalisée à l'aide d'une analyse de corrélation de Pearson (R). **La figure 79a** montre la distribution du coefficient de corrélation entre PC1-Décembre et la SST standardisée pour le mois de décembre. Dans l'Atlantique Nord, un dipôle de corrélation positive (négative) dans les centres d'action de la NAO est visible. Cette anomalie de la SST en surface indique des liens entre les précipitations et l'ONA, mais la corrélation est généralement insignifiante dans certaines zones importantes et peut être considérée comme faible. Dans le bassin méditerranéen, les PC1-Décembre sont négativement corrélés avec la Méditerranée occidentale alors qu'ils sont positivement corrélés avec la Méditerranée orientale (**Figure 79a**). Cette anomalie de surface de la SST indique des liens entre les précipitations et l'OM, mais la corrélation est généralement insignifiante et peut être considérée comme faible. Dans l'océan Pacifique, PC1-Décembre ne montre aucune corrélation discernable dans la région OA et les corrélations sont généralement insignifiantes, ce qui est cohérent avec les résultats du **tableau 33**.

III . 5. e. Relation entre les anomalies de la circulation atmosphérique et la variabilité des précipitations pour le mois de décembre

La relation entre les précipitations (PC1-Décembre) du bassin Bas Sebou et les circulations atmosphériques SLP et GPH-500 du mois de décembre de 1948 à 2017 est étudiée

à travers une analyse de corrélation (**Figures 79b, 79c**). **La figure 79b** montre la distribution du coefficient de corrélation entre les précipitations et le SLP standardisé pour le mois de décembre. Dans l'Atlantique Nord, on observe une importante anomalie de basse pression sur l'Islande, tandis qu'aux Açores, on observe une anomalie de haute pression en réponse à l'association PC1-Décembre avec le SLP. Cette anomalie SLP de surface indique une configuration de l'ONA forte et positive (iONA +) (**Figure 79a**). Dans le bassin méditerranéen (**Figure 79b**), la relation entre les précipitations de décembre et le SLP montre une corrélation généralement négative et significative dans la partie centrale à orientale du bassin, suggérant que des conditions plus humides (plus sèches) sont liées à une cyclogenèse anormalement forte (faible), indiquant la présence du schéma de circulation OM régional. En ce qui concerne le schéma de circulation à l'échelle globale (OA), en réponse au PC1-Décembre, la région tropicale de l'Ouest (Darwin) montre une corrélation négative avec le SLP tandis que la région tropicale du centre-Est (Tahiti) montre une corrélation positive similaire au schéma OA, mais la corrélation est insignifiante et peut être considérée comme faible, ce qui est cohérent avec les résultats du **tableau 33**.

Pour mieux comprendre les liens entre les modèles de téléconnexions observés, y compris l'ONA dans l'océan Atlantique, l'OM dans le bassin méditerranéen et l'OA dans l'océan Pacifique, et les précipitations du bassin Bas Sebou à travers les circulations atmosphériques, une analyse de corrélation est effectuée entre PC1-Décembre et GPH-500, comme le montre la **figure 79c**. En réponse aux corrélations de PC1-Décembre avec SLP et GPH-500, les figures montrent une basse pression de surface dans le bassin Bas Sebou, ce qui est indicatif de conditions cycloniques. Seuls l'océan Atlantique Nord et le bassin méditerranéen présentent des corrélations significatives avec les précipitations de décembre. Par conséquent, l'anomalie négative (positive) du SLP au-dessus des Açores (Islande) et sa contrepartie à 500 hPa indiquent des liens avec l'ONA. Plus près du bassin méditerranéen, en réponse à PC1-Décembre avec SLP et GPH-500, **la figure 79b** montre une basse pression dans la région du Caire (Méditerranée orientale) tandis que **la figure 79c** montre une anomalie de hauteur positive qui indique des conditions cycloniques liées à un stade OM positif (iOM +) avec des précipitations réduites dans le bassin méditerranéen.

Ensuite, les séries temporelles (C1 et C2) des modes principaux (FOE-1 et FOE-2) du GPH-500 qui expliquent 42% de la variabilité, sont étudiées pour évaluer la relation entre les circulations atmosphériques et les précipitations de l'ensembles des stations du bassin Bas Sebou (PC1-Décembre). La matrice de corrélation entre C1 et C2, et la pluviométrie PC1-Décembre du bassin Bas Sebou qui représente les modes principaux (C1 et C2) du GPH-500 et qui a une influence significative sur la pluviométrie, indique que C2 a une corrélation significative avec la pluviométrie et donc prise en compte pour la suite de l'analyse (**Tableau 34**). Deuxièmement, l'analyse de corrélation effectuée entre C2 et les indices climatiques indique que les précipitations dans le bassin Bas Sebou sont liées au iONA et au iOM (**tableau 35**).

Tableau 34 : Corrélation entre les PC de GPH-500 (C1 et C2) et les précipitations dans le bassin Bas Sebou (PC1-Décembre).

Composantes principales du GPH-500	PC1-Décembre	
	Coeff. Corrélation (R)	*p-value*
C1	-0,02	0.85
C2	0,3	**0.01**

Tableau 35 : Corrélation entre le PC du GPH-500 (C2) et les indices climatiques.

Indices climatiques	C2	
	Coeff. Corrélation (R)	*p-value*
iONA	-0,47	**0,00**
iOM	0.17	0,15
iOA	0,07	0,52

III . 5. f. Relation temporelle de la PC1 avec les indices climatiques pour le mois de décembre

La relation temporelle mensuelle du PC1-Décembre avec les indices climatiques indique que, à l'exception du iONA, les indices climatiques iOM et iOA sont à leur maximum de signification avec le mode principal respectif PC1-Décembre précédant décembre (Décalage = 0) et le iONA atteint sa signification négative en décembre (**Figure 80**). La relation temporelle montre également que les indices climatiques sont positivement corrélés avant décembre et négativement corrélés avec le mode pluviométrique principal (PC1-Décembre).

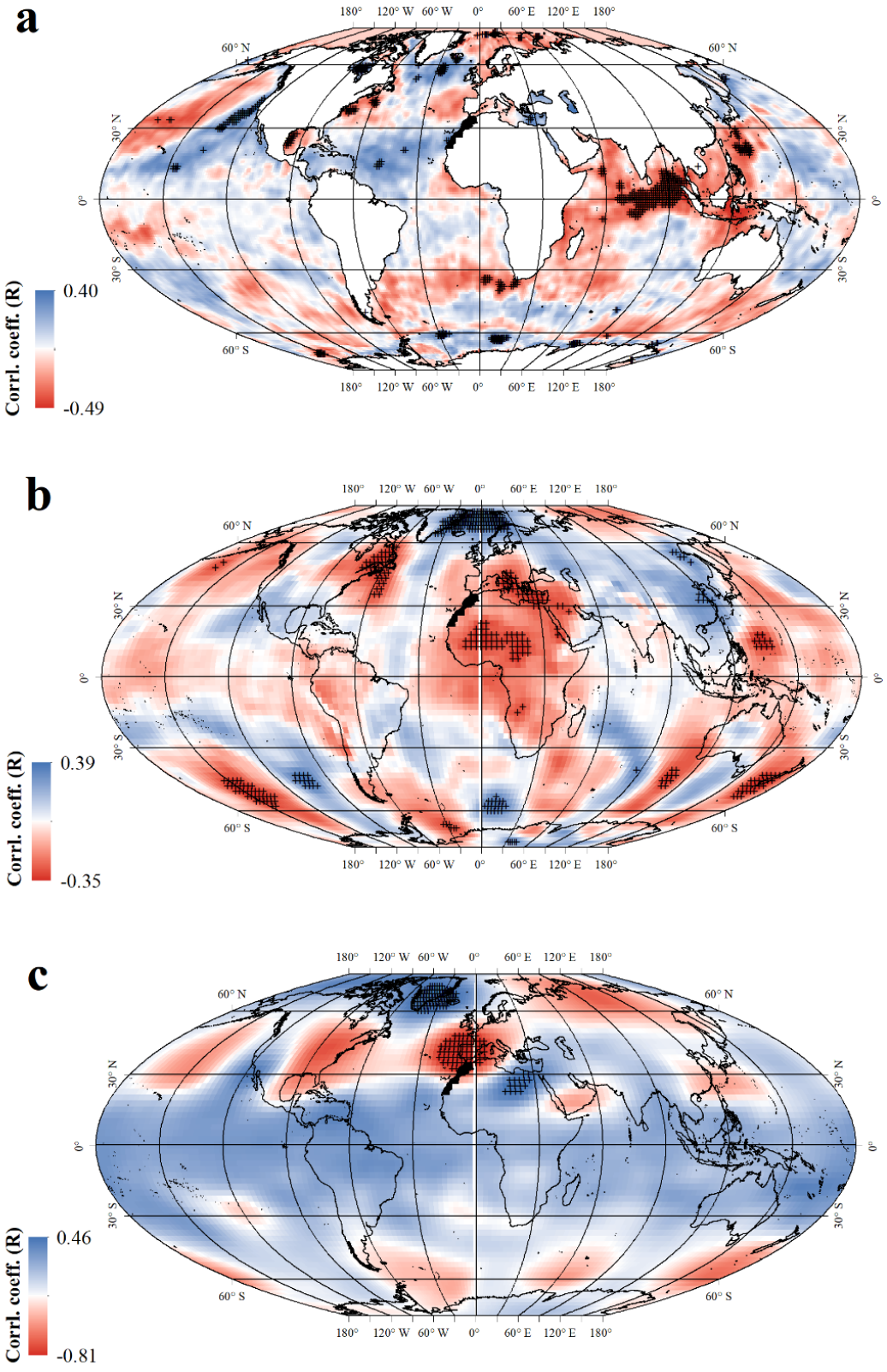


Figure 79 : Corrélation entre le PC1-Décembre des précipitations dans le bassin Bas Sebou et la SST normalisée (a), le SLP (b) et le GPH-500 (c) pour le mois de mars (1948-2017). Les points de grille significatifs au niveau de confiance de 95 % sont marqués d'une croix (+).

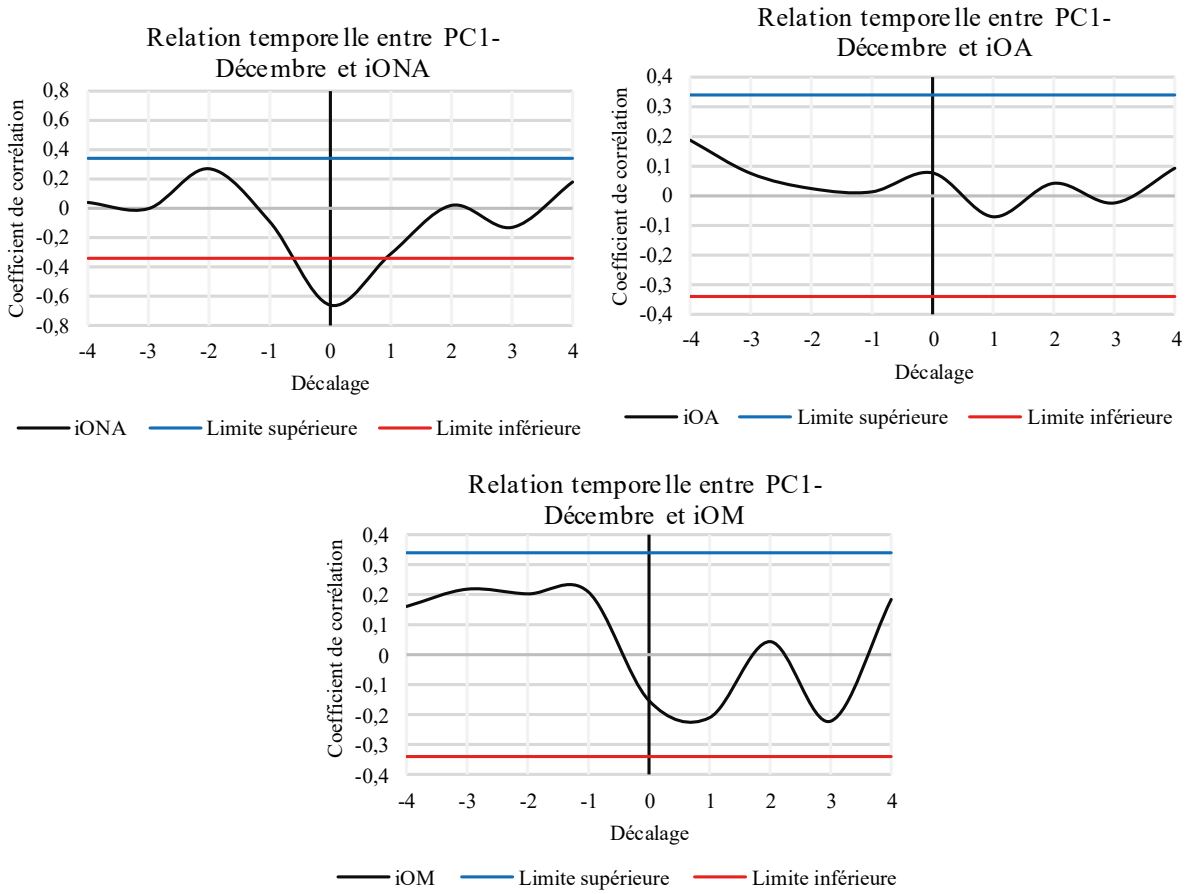


Figure 80 : Coefficient de corrélation temporelle entre les PCs les plus significatifs (PC1-Décembre) et les indices climatiques. Le mois de décembre est considéré comme le mois pivot, la valeur "0" étant représentée par une ligne verticale, tandis que les valeurs négatives/positives le long de l'axe des x (mois) indiquent les mois précédents/suivants à partir du mois de décembre. Les limites supérieure et inférieure représentent le niveau de signification à 95 %.

III . 5. g. Synthèse des résultats des analyses pour le mois de décembre

Les résultats obtenus à partir de toutes les analyses ci-dessus sont résumés dans **le tableau 36** ci-dessous avec la comparaison avec les résultats obtenus précédemment à partir des analyses de corrélation et de Mann-Kendall partiel (MK-P). Comme pour les résultats précédents, on peut conclure que l'influence du iOA sur les précipitations du bassin Bas Sebou est insignifiante (faible) et que les autres indices climatiques influencent les précipitations hivernales de manière modérée à forte pour l'iOM et le'iONA, respectivement. En général, on observe que la plupart des corrélations significatives sont négatives, ce qui indique que les quantités de pluie étudiées dans cette étude peuvent être liées à des phases négatives des indices iONA et iOM.

Tableau 36 : Résultats de l'analyse des précipitations et des indices climatiques dans le bassin Bas Sebou pour le mois de décembre.

Indices climatiques	Mann-Kendall partiel (MK-P)	Corrélation entre PC1-Décembre et les indices climatiques	Analyses FOE	Corrélation entre PC1-Décembre et les anomalies de :		
				SST	SLP	GPH-500
iONA	Forte	Significative	Forte	Forte	Forte	Forte
iOA	Faible	Significative à 50%	Modérée	Forte	Faible	Faible
iOM	Forte	Significative à 20%	Faible	Faible	Faible	Forte

IV. Discussion

Les données de la série chronologique des précipitations mensuelles de 1984 à 2017 ont montré qu'il y a une diminution tangible des précipitations au cours des dernières décennies et que la majorité des précipitations se produisent en hiver et au printemps avec des tendances à la baisse observées au début de l'hiver (décembre) et au début du printemps (mars). Pour ces mois, l'évolution des tendances en tenant compte de l'influence des indices climatiques sélectionnés (iONA, iOM et iOA) et en appliquant le test MK-P a montré que l'indice iONA a une plus grande influence sur les précipitations que les indices iOM et iOA, qui ont respectivement une influence modérée et faible. Malgré la négligence des effets de ces derniers sur l'évolution des précipitations dans la région (Ward *et al.,* 1999, Knippertz *et al.,* 2003; Huebener & Kerschgens, 2007), il a été démontré que la phase négative de l'indice iOA (El Niño) a une influence négative sur les précipitations dans le Nord-Ouest du Maroc au printemps qui avec une SST plus élevée que la normale dans le Pacifique central et une convection accrue provoquant un réengagement de la circulation tropicale de Walker orientée Est-Ouest, affectant le climat de l'Inde tropicale et de l'Océan Atlantique (Karrouk, 2007; Atiah *et al.,* 2020). Il explique les interactions entre les téléconnexions tropicales et subtropicales d'une part et les téléconnexions extratropicales d'autre part en affectant le climat du Maroc. Lorsque le soulèvement intertropical devient important en repoussant les anticyclones subtropicaux plus au Nord, l'indice iONA positif (iONA +) est établi (Karrouk, 2001, 2002, 2005). Cette situation se manifeste par une stabilité atmosphérique des latitudes moyennes y compris le Maroc indiquant un champ anticyclonique pendant les périodes considérées comme humides alors que les perturbations sont situées au Nord du front polaire. À cet égard, les corrélations entre les précipitations de printemps (mars) et l'anomalie de la température de surface de la mer (SST) sont significativement négatives (positives) dans le Pacifique Est (Ouest), ce qui signifie qu'il y a un lien fort entre la variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou et les anomalies de la SST dans le Pacifique Est (**Figure 74a**) Par ailleurs, lorsque le transfert d'énergie à travers la branche supérieure de Hadley devient moins important que la normale et que les anticyclones subtropicaux deviennent moins puissants et aux basses latitudes (La Niña), des conditions humides peuvent s'installer au Maroc. Le gradient énergétique méridien devient faible et la portée du courant d'Ouest est moins étendue. À nouveau, des ondulations planétaires se développent entre les masses d'air subtropicales et subpolaires, des échanges méridiens ont lieu le long des vallées et des crêtes planétaires et les vents d'Ouest deviennent forts. Ce régime est caractérisé par des perturbations violentes aux latitudes moyennes et des précipitations aux

latitudes de transit y compris le Maroc. Ceci exprime l'indice négatif de l'oscillation nord-atlantique (iONA -) avec un affaiblissement du courant jet atlantique (jet stream) (Zhang *et al.,* 2015). En ce qui concerne le phénomène de La Niña, son effet sur les fluctuations pluviométriques dans le bassin Bas Sebou n'est pas justifié car il prédomine dans les mois les plus affectés par les fluctuations (décembre et mars) (**Figures 71 et 76**). En revanche, le phénomène d'El Niño a montré des effets négatifs évidents sur les fluctuations conduisant à des années de sécheresse, notamment l'année 2015-2016 (WMO, 2017 ; Driouech *et al.,* 2021). À l'échelle de l'océan Atlantique, l'interaction entre les anomalies de SST (Czaja & Frankignoul, 2002 ; Li *et al.,* 2003) et le forçage atmosphérique associé à l'ONA a été prouvée par des simulations (Rodwell et al. 1999 ; Sutton *et al.,* 2001 ; Peng *et al.,* 2002) et des observations (Czaja & Frankignoul, 2002) est probablement à l'origine des fluctuations pluviométriques dans le bassin Bas Sebou. En effet, les anomalies de la SST pour le mois de mars (**Figure 71** ; FOE2) montrent une configuration tripolaire positive de la SST induisant un faible dipôle de hauteur du géopotentiel à 500 hPa à l'Est de l'Atlantique Nord avec une anomalie positive à l'Ouest de Gibraltar et une anomalie négative plus forte centrée à l'Ouest de la Grande-Bretagne conduisant à la fois à la diminution des précipitations dans le bassin Bas Sebou et au forçage de la phase positive de l'ONA (iONA +). Compte tenu de l'importance de l'influence de l'ONA qui atteint 100% avec une dominance de sa phase positive, en particulier de 1960 à 1990 (Mariotti & Dell'Aquila, 2012 ; Zamrane *et al.,* 2021), il influence les précipitations au Maroc à travers sa modulation de la trajectoire des tempêtes. Au début des années 1990, les valeurs élevées de l'indice ONA ont contribué à la tendance au réchauffement hivernal, après la période des années 1960 avec des valeurs faibles qui se sont manifestées par un déplacement vers l'Est des centres du prototype de l'ONA (Hilmer & Jung 2000). Les premiers modes (FOEs) en décembre et mars montrent la non-stationnarité des centres de l'ONA avec un déplacement vers l'Ouest pendant sa phase positive (iONA +), entraînant une diminution des précipitations hivernales (Rousi *et al.,* 2020). Parmi les modes de variabilité du climat hivernal, l'oscillation arctique (OA) présente des similitudes avec l'ONA pendant leurs phases positives, dont les impacts climatiques sur les précipitations hivernales restent difficiles à différencier (Deser, 2000 ; Lee *et al.,* 2020). De fortes corrélations entre l'ONA et l'OM (Criado-Aldeanueva & Soto-Navarro 2020) gérées par le système cyclonique de l'Atlantique Nord-Est qui force la cyclogenèse méditerranéenne (Criado-Aldeanueva *et al.,* 2014 ; Zeroual *et al.,* 2017) existent, en particulier dans le Nord-Est de l'Espagne, où les précipitations sont plus fortes (plus faibles) pendant les phases négatives (positives) de l'ONA et de l'OM (Angulo-Martínez & Beguería, 2012). En effet, la corrélation négative modérée entre iOM et les précipitations du début de l'hiver (décembre) au début du printemps (mars), comme c'est le cas pour l'iONA, soutient les résultats discutés ci-dessus, mais leurs effets restent faibles (R = -0,15, R = -0,26, respectivement) (**Tableaux 28 et 33**). En général, le Nord-Est du Maroc, séparé du bassin Bas Sebou par les chaînes de montagnes du Rif et du Moyen Atlas, est soumis aux influences des cyclones méditerranéens, où elles sont faiblement ressenties.

V. Conclusion

L'approche basée sur des analyses statistiques approfondies et des fonctions orthogonales empiriques (FOE) est utilisée pour comprendre la variabilité des tendances pluviométriques dans le Bassin du Bas Sebou. Il a été prouvé que les deux saisons les plus humides de l'année sont les plus affectées par la variabilité des précipitations et les tendances à la baisse prévoient une diminution de la quantité de précipitations de 0,5 mm par an au début de l'hiver (décembre) et de 0,42 mm par an au début du printemps (mars). Des fonctions orthogonales empiriques (FOE) ont été appliquées pour extraire les structures expliquant la variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou en relation avec certaines variables climatiques caractérisant la variation de la température de surface de la mer (SST), de la pression au niveau de la mer (SLP) et de la hauteur du géopotentiel à 500 hPa (GPH-500). L'influence des indices climatiques par rapport aux tendances observées dans le bassin Bas Sebou indique une forte influence de l'indice d'oscillation nord-atlantique (iONA) et une influence modérée des indices climatiques dominants dans le bassin méditerranéen et l'océan Pacifique, iOM et iOA respectivement. L'analyse de corrélation entre la série chronologique des précipitations (PCs) et les indices climatiques montre que l'ONA et l'OM influencent négativement les précipitations pendant les deux saisons des pluies et expliquent que leurs phases positives diminuent les précipitations dans le bassin Bas Sebou. En revanche, l'indice du modèle climatique dominant dans l'océan Pacifique (iOA) a été positivement corrélé avec les principaux régimes pluviométriques de décembre et mars, ce qui indique que sa phase négative (El Niño) affecte négativement les précipitations dans le bassin Bas Sebou. Ainsi, la mauvaise saison agricole 2015-2016 pourrait être attribuée à l'événement El Niño qui a commencé en mars 2015 et s'est renforcé vers la fin de l'année 2015. Une corrélation notable est observée entre la SST dans l'océan Pacifique oriental et occidental et les précipitations printanières. Les eaux de surface de mer anormalement chaudes (froides) dans ces régions océaniques correspondent généralement à des conditions sèches (humides) dans le bassin Bas Sebou. En revanche, la prédominance des événements La Niña (iOA +) dans notre analyse FOE de SST des mois les plus affectés par la variabilité des précipitations invalide l'hypothèse selon laquelle ces événements pourraient affecter directement les quantités de précipitations tombées, créant des conditions plus humides en Afrique du Nord, en particulier au Maroc.

Globalement, les résultats obtenus dans cette étude soulignent à nouveau la force de l'influence négative de l'oscillation Nord Atlantique (ONA) sur les quantités de pluies hivernales et printanières au Maroc et soutiennent les conclusions précédentes. Les indices iOM et iOA influencent davantage les précipitations printanières que les précipitations hivernales. Les résultats indiquent également que les anomalies pluviométriques des deux saisons humides de l'année sont causées par d'autres processus locaux et régionaux tels que l'orographie et la SST. Ces résultats devraient être très pertinents pour les schémas de prévision statistique, qui sont d'un intérêt considérable dans les régions où l'agriculture joue un rôle économique important.

En résumé, la variabilité des précipitations peut entraîner des sécheresses en réduisant la quantité de précipitations reçues sur une certaine période de temps. Cela peut réduire le niveau de l'eau dans les rivières, les lacs et les réservoirs, ce qui peut entraîner une diminution de l'approvisionnement en eau douce. De plus, la chaleur peut accélérer l'évaporation de l'eau, aggravant encore la situation. Il est donc important d'évaluer les sécheresses. Cette information est essentielle pour prendre des décisions éclairées sur la gestion des ressources en eau, la planification de la production agricole, la prévention des incendies de forêt, la protection de la faune et la flore et la sécurité alimentaire des communautés.

En effet, il existe différents outils pour évaluer la sécheresse, qui sont souvent utilisés tels que les indices de sécheresse conjointement pour fournir une analyse complète et précisé la situation. Cependant, le choix de l'indice de sécheresse dépend des données disponibles, des objectifs de l'évaluation et des caractéristiques de la région étudiée. Il est important de comprendre les avantages et les limites de chaque indice de sécheresse pour choisir celui qui convient le mieux à l'objectif de l'évaluation. Dans le chapitre suivant, nous analyserons en détail les indices de sécheresse en comparant leurs performances pendant les sécheresses historiques et leurs réponses en termes de rendement des cultures afin d'identifier les indices de sécheresse les plus appropriés pour le bassin Bas Sebou.

CHAPITRE IV

ÉVALUATION COMPARATIVE DES INDICES DE SÉCHERESSE

I. Introduction 146
II. Matériels et méthodologie 147
II . 1. Données et prétraitement 147
II . 2. Sélection des indices de sécheresse (DIs) 148
II . 3. Calcul des indices de sécheresse (DIs) 149
II . 4. Évaluation des indices de sécheresse (DIs – *Drought Indices*) 152
III. Résultats et discussion 153
III . 1. Distribution spatio-temporelle des épisodes de sécheresse 153
III . 2. Corrélation entre les différents indices de sécheresse (DSs) 157
III . 3. Évaluation des caractéristiques de la sécheresse météorologique 158
III . 4. Performance des indices de sécheresse (DIs) par rapport aux sécheresses historiques 160
III . 5. Réponses temporelles des indices de sécheresse (DIs) aux rendements des cultures 164
IV. Conclusion 167

CHAPITRE IV
ÉVALUATION COMPARATIVE DES INDICES DE SÉCHERESSE

La variabilité des précipitations dans le bassin Bas Sebou peut être influencées par des facteurs à différentes échelles de temps, tels que les oscillations climatiques à grande échelle, les changements dans la circulation atmosphérique et les conditions locales telles que la topographie et la végétation. Comme évoqué dans le chapitre 3, les précipitations sont variables plutôt représentative de l'évolution des changements globaux, ce qui signifie que les périodes de sécheresse et de pluies abondantes peuvent être plus fréquentes et plus intenses. Donc il est indispensable de disposer d'outils de mesure et d'évaluation des sécheresses qui permettent de suivre l'évolution de ces phénomènes et d'anticiper les risques associés. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer l'intensité des sécheresses, notamment en utilisant des indices de sécheresse qui combinent des mesures de précipitations, d'évapotranspiration et d'humidité du sol pour quantifier la sévérité et la durée des conditions de sécheresse. Ces indices sont utilisés pour suivre l'évolution des conditions de sécheresse sur une période donnée, identifier les zones les plus touchées et fournir des informations pour la planification et la gestion des ressources en eau.
Le point central de ce chapitre est un article publié dans la revue *Kuwait journal of sciences* (Hakam *et al.,* 2022c), vise à évaluer la sécheresse agro-hydro-météorologique par différents indices en comparant leur performance pendant les sécheresses historiques et leur réponse en termes de rendement des cultures afin d'identifier les indices de sécheresse les plus appropriés.



Hakam, O., Baali, A., Ahouach, Y., & Azennoud, K. (2022). Comparative evaluation of precipitation-temperature based drought indices (DIs): A case study of Moroccan Lower Sebou basin. *Kuwait Journal of Science*, *49*(3). DOI: https://doi.org/10.48129/kjs.13911

Résumé

En raison du manque d'études sur la sécheresse dans le bassin Bas Sebou, de la complexité des phénomènes de sécheresse et de la différence des conditions climatiques, l'identification des indices de sécheresse (DIs – *Drought Indices*) les plus appropriés pour évaluer les conditions de sécheresse est devenue une priorité. Par conséquent, l'évaluation de la performance de différents (DIs) a été envisagée pour identifier les indices de sécheresse universels bien adaptés au bassin Bas Sebou. Sur la base des données disponibles, cinq DIs ont été utilisés : L'indice de précipitations normalisées (SPI - *Standardized Precipitation Index*), l'indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisées (SPEI - *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*), l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI - *Reconnaissance Drought Index*), l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer auto-calibré (sc-PDSI - *self-calibrated Palmer Drought Severity Index*) et l'indice de sécheresse du débit des cours d'eau (SDI - *Streamflow Drought Index*). Les DIs ont été calculés à l'échelle annuelle en utilisant des séries chronologiques mensuelles de précipitations, de températures et de débits des cours d'eau de 1984 à 2016. La méthode de Thornthwaite a été utilisée pour calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP). En outre, la corrélation de Pearson (R) a été analysée. En outre, les données sur le rendement du blé dur, du blé tendre et de l'orge pour la période 2000-2016 ont également contribué à l'évaluation des performances de ces indices. Les résultats ont prouvé que l'indice SPI est adapté à la détection de la durée et de l'intensité de la sécheresse par rapport à d'autres indices avec des coefficients de corrélation élevés, en particulier dans les régions subhumides, sachant qu'il a tendance à donner des résultats plus humides dans les stations avec des climats semi-arides. Les indices multiscalaires (SPI, SPEI et RDI) suivent la même tendance au cours de la période étudiée. Cependant, le sc-PDSI semble être le plus sensible à la température et aux précipitations en surestimant les conditions de sécheresse. En outre, les corrélations rendement/sécheresse tendent à être plus élevées pour les indices multiscalaires que pour le sc-PDSI. Dans le même temps, de légères différences ont été détectées entre l'indice SPI et l'indice SPEI en ce qui concerne la performance des systèmes agricoles. Nos résultats suggèrent que l'utilisation d'indices multiscalaires dans la surveillance et l'évaluation de la sécheresse est nécessaire pour obtenir des conclusions solides.

Mots-clés : Système agricole ; Conditions de sécheresse ; Indices multiscalaires ; Bassin Bas Sebou ; Maroc.

Abstract

Due to the lack of studies on drought in the Lower Sebou basin, the complexity of drought phenomena and the difference in climatic conditions. Therefore, identifying the most appropriate drought indices (DIs) to assess drought conditions has become a priority. Therefore, evaluating the performance of different (DIs) was considered to identify the universal drought indices well adapted to the lower Sebou basin. Based on data availability, five DIs were used: Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI), Reconnaissance Drought Index (RDI), self-calibrated Palmer Drought Severity Index (sc-PDSI) and Streamflow Drought Index (SDI). The DIs were calculated on an annual scale using monthly time series of precipitation, temperature, and river flow from 1984-2016. Thornthwaite's method was used to calculate potential evapotranspiration (PET). In addition, Pearson's correlation (r) was analyzed. In addition, data on the yield of durum wheat, soft wheat, and barley for the period 2000-2016 also contributed to the performance evaluation of these indices. The results proved that SPI is suitable for detecting the drought duration and intensity compared to other indices with high correlation coefficients, especially in sub-humid regions, knowing that it tends to give more humid results in stations with semi-arid climates. The multi-scalar indices (SPI, SPEI, and RDI) follow the same trend during the period studied. However, sc-PDSI appears to be the most sensitive to temperature and precipitation by overestimating the drought conditions. In addition, yield/drought correlations tend to be higher for multi-scalar indices than for sc-PDSI. At the same time, slight differences were detected between SPI and SPEI in the performance of agricultural systems. Our results suggest that using multi-scalar indices in drought monitoring and assessment is necessary to have solid conclusions.

Keywords: *Agricultural system; Drought conditions; Multi-scalar indices; Lower Sebou Basin; Morocco.*

I. Introduction

La sécheresse est l'un des phénomènes météorologiques extrêmes les plus complexes et les plus dommageables (Scheff, 2019). Elle est également considérée comme le moins bien compris de tous les risques naturels affectant divers systèmes environnementaux (Vicente-Serrano *et al.,* 2020). Par conséquent, il n'existe pas d'approche universelle pour définir, surveiller et quantifier sa gravité et sa durée (Yihdego *et al.,* 2019) en raison de son étendue spatio-temporelle complexe et des mécanismes atmosphériques et hydrologiques complexes qui déterminent la disponibilité de l'eau (Deb *et al.,* 2019). La diversité des définitions de la sécheresse et la nécessité de disposer de longues séries climatologiques homogènes rendent difficile la quantification précise de l'évolution de la fréquence et de l'intensité de ces phénomènes depuis le début du XXe siècle (Euzen *et al.,* 2013). Globalement, la sécheresse est définie comme un événement causé par des précipitations inférieures à la normale sur une période prolongée (Swain *et al.,* 2017) et précède généralement les autres catégories de sécheresse. Par conséquent, son évaluation et sa prévision précises fournissent des informations précieuses aux planificateurs des ressources en eau et aux décideurs politiques (Amiri *et al.,* 2018). Selon une norme numérique, la sécheresse peut être décrite par son intensité, sa localisation, sa durée et son moment d'apparition, de sorte que les mesures de la sécheresse peuvent être comparées entre les régions et les événements de sécheresse passés. À cette fin, divers indices et indicateurs tels que des paramètres météorologiques, hydrologiques et biophysiques ont été mis au point pour surveiller et évaluer la sécheresse. Selon l'Organisation météorologique mondiale (WMO & GWP, 2016), les indices de sécheresse sont subdivisés en quatre catégories : météorologique, hydrologique, agricole et socio-économique, chacune d'entre elles pouvant détecter différents types de sécheresse. Les indices de sécheresse météorologiques populaires sont nombreux et comprennent : l'indice de précipitations normalisé (SPI ; McKee & John, 1993), l'indice de sécheresse de Palmer auto-calibré (sc-PDSI ; Wells *et al.,* 2004), l'indice de précipitations et d'évapotranspiration normalisé (SPEI ; Vicente-Serrano *et al.,* 2010) et l'indice de sécheresse de reconnaissance (RDI ; Tsakiris & Vangelis, 2005) ; les indices liés à l'hydrologie comprennent l'indice d'approvisionnement en eau de surface (SWSI ; Shafer & Dezman, 1982) et l'indice de sécheresse du débit des cours d'eau (SDI ; Nalbantis & Tsakiris, 2009), et les indices liés à l'agriculture comprennent l'indice d'humidité des cultures (CMI ; Palmer, 1968) et l'indice de déficit d'humidité du sol (SMDI ; Narasimhan & Srinivasan, 2005). De nombreuses méthodes d'évaluation développées au cours du siècle dernier utilisent de nouveaux outils technologiques tels que la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) (Al Jassar & Rao, 2015 ; Mohammed, 2021), chacun ayant ses avantages et ses limites. Il s'agit notamment d'indices calculés à partir de la réflectance via des capteurs embarqués sur des satellites ou sur des drones, tels que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI ; Kogan, 1995 a,b) et l'indice d'état de la végétation (VCI ; Kogan, 1995b). Ces indices fournissent une mesure à haute résolution de l'état de la végétation et de la température (Bouras *et al.,* 2020) malgré les difficultés rencontrées pendant les saisons de mousson (couverture nuageuse). Néanmoins, un indice de sécheresse propre à

une région donnée peut ne pas être appliqué dans d'autres zones, étant donné les différences de conditions et de caractéristiques climatiques (Yang *et al.,* 2017). Par conséquent, de nombreuses études ont été menées à différentes échelles dans le monde entier pour comparer et rechercher l'indice de sécheresse le plus approprié pour une région donnée (Bayissa *et al*., 2018 ; Ballah *et al.,* 2021). Au Maroc, à l'instar des pays d'Afrique du Nord, la fréquence et la sévérité des sécheresses ont été marquées au cours des dernières décennies (Driouech *et al.,* 2021). D'un point de vue historique, des études dendrochronologiques ont montré que le Maroc a connu sur dix siècles (de 1000 à 1984), 146 années sèches, soit une année sur 6 à 7 (Stockton, 1985). Cependant, peu d'études ont été rapportées jusqu'à présent (Ed-Daoudi, 2014 ; Acharki *et al.,* 2019), notamment dans le bassin Bas Sebou, où la présente étude est pionnière. De plus, ces études antérieures ont ignoré les indices basés sur l'évapotranspiration tels que RDI, SPEI, et sc-PDSI, sachant que l'évapotranspiration conduit à des pertes importantes de ressources en eau, notamment dans les régions semi-arides. La présente étude menée dans le bassin Bas Sebou vise à évaluer la sécheresse météorologique, agricole et par extension hydrologique. Cette évaluation permettra de comparer la performance de ces indices durant les sécheresses historiques et d'analyser leur impact sur le rendement des cultures. L'objectif final étant de déterminer les indices de sécheresse les plus pertinents.

II. Matériels et méthodologie

II . 1. Données et prétraitement

Les séries chronologiques mensuelles de précipitations, de températures (4 stations) et de débits (2 stations) fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou (ABHS) pour la période 1984-2016 ont été utilisées et réparties uniformément sur l'ensemble du bassin Bas Sebou (**Figure 81)**. Les caractéristiques de ces stations sont présentées dans le **tableau 37**. En outre, les données sur la production annuelle (tonne, t) et la superficie récoltée (hectares, ha) du blé dur, du blé tendre et d'orge ont été obtenues auprès des services statistiques du ministère de l'agriculture. Par conséquent, les séries chronologiques des rendements des céréales pluviales en tonnes par hectare (t/ha) représentent le rapport entre la production annuelle (t) et la superficie récoltée (ha) au cours de la période 2000-2016 pour chaque province du bassin Bas Sebou (Sidi Kacem et Kenitra).

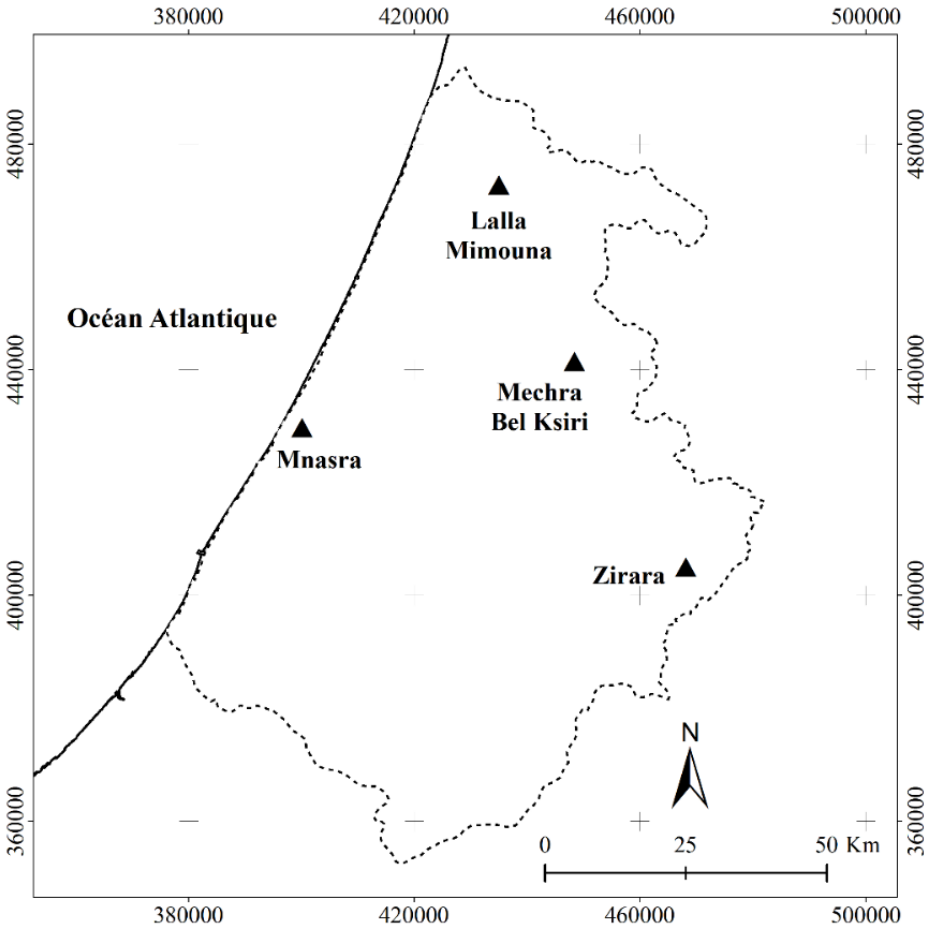


Figure 81 : Localisation géographique du bassin du Bas Sebou et répartition spatiale des stations hydrométéorologiques d'observation.

Tableau 37 : Caractéristiques des stations synoptiques dans le bassin Bas Sebou et précipitations moyennes annuelles moyennes, évapotranspiration potentielle (ETP) durant la période (1984-2016).

Station	Type de station	Précipitations (mm/an)	ETP (mm/an)
Lalla Mimouna	Météorologique, jauge	574,7	1157,5
Mechra Bel Ksiri	Météorologique, jauge	515	1441,4
Mnasra	Météorologique	567	1239,5
Zirara	Météorologique	387	1480

Note. *ETP : Évapotranspiration potentielle calculée sur la base de l'équation de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948)*

II . 2. Sélection des indices de sécheresse (DIs)

L'évaluation de la sécheresse nécessite différentes approches : une approche basée sur la perception/l'observation, une approche basée sur des données de télédétection, une approche basée sur des modèles et une approche basée sur des données in-situ (hydrométéorologiques). Cet ensemble d'approches est généralement toujours accompagné de plusieurs indicateurs et indices essentiels pour évaluer et surveiller les différents types de sécheresse et l'aspect du cycle hydrologique. Plus de 150 indices de sécheresse (DIs) et indicateurs sont appliqués dans le monde. Une quarantaine d'entre eux sont couramment utilisés pour surveiller la variabilité spatiale et temporelle dans les régions sujettes à la sécheresse (WMO & GWP, 2016).

Cependant, en l'absence d'une définition universelle de la sécheresse, aucun indice unique ne peut répondre aux objectifs de cette étude sous différents climats mondiaux.

En général, l'approche des données in situ offre des méthodes directes et simples pour surveiller l'apparition, la propagation et l'intensité des sécheresses (Senay *et al.,* 2015). Selon des études nationales et internationales sur la robustesse et la faiblesse des indices de sécheresse (Ezzine *et al.,* 2014 ; WMO & GWP, 2016), les indices utilisés sont l'indice standardisé des précipitations, aussi couramment désigné par sa dénomination anglophone *Standardized Precipitation Index (SPI)*, l'indice standardisé d'évapotranspiration des précipitations (*The Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index SPEI*), l'indice de sécheresse de reconnaissance (*The reconnaissance drought index RDI*) et l'indice de sévérité de la sécheresse de Palmer auto-calibrant (*The Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index sc-PDSI*). Il convient également de souligner que le RDI, le SPEI et le sc-PDSI sont utilisés pour la première fois dans le bassin Bas Sebou et que l'indice de sécheresse du débit des cours d'eau (*Streamflow Drought Index SDI*) est sélectionné comme indice de sécheresse hydrologique.

II . 3. Calcul des indices de sécheresse (DIs)

Les DIs choisis se caractérisent par leur spécificité et la complexité de leur calcul. À l'exception du SPI, ils intègrent différentes composantes du bilan hydrique basées uniquement sur les précipitations cumulées. Leur calcul peut être effectué sur des échelles de temps de 1, 3, 6, 9 et 12 mois, à l'exception de sc-PDSI, qui a une échelle de temps flexible mais presque annuelle (Zhong *et al.,* 2020). En raison de ce défaut, le sc-PDSI ne peut pas identifier les sécheresses courtes et longues (Vicente-Serrano *et al.,* 2010). En outre, de nombreuses études ont montré que les DIs multiscalaires tels que SPI, SPEI et RDI présentent une bonne corrélation avec le sc-PDSI sur une échelle de temps d'environ 12 mois (Vicente-Serrano *et al.,* 2015 ; MAF & GDWM, 2018). Par conséquent, l'étude s'est concentrée sur la variation des caractéristiques de la sécheresse sur une échelle de temps annuelle, telle que reflétée par sc-PDSI, SPI-12, SPEI-12, et RDI-12.

Pour la normalisation des DIs, une distribution gamma à deux paramètres pour SPI et RDI et une distribution log-logistique à trois paramètres pour SPEI ont été choisies (**Tableau 38**). Pour plus de précision, le calcul de SPI (**Équation 18**) et de SPEI nécessite la méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP), alors que celui de RDI n'en dépend pas (Vangelis *et al.,* 2013). L'utilisation de la méthode Thornthwaite dans le cas de SPEI et sc-PDSI est recommandée dans plusieurs travaux (Thornthwaite, 1948 ; Dai, 2011).

Tableau 38 : Les variables d'ajustement et la distribution de probabilité sélectionnées des indices de sécheresses.

Indice de sécheresse (IS)	Variables	Distribution de probabilité
Standardized Precipitation Index (SPI)	P	Gamma
Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	P, T	Log-Logistic (3 paramètres)
Reconnaissance Drought Index (RDI)	P, T	Gamma
self-calibrating Palmer Drought Severity Index (sc-PDSI)	P, T, CED	(-)
Streamflow Drought Index (SDI)	Débit	Log-normal

Note. *T : température moyenne mensuelle de l'air ; P : précipitations cumulées mensuelles ; CED : capacité en eau disponible.*

L'indice standardisé des précipitations (SPI - *Standardized Precipitation Index*) : Cet indice est basé sur les enregistrements historiques des précipitations à un endroit donné (McKee *et al.*, 1993) pour calculer la probabilité de précipitations à n'importe quelle échelle de temps entre 1 et 48 mois. Cette étude utilise l'application *SPI Generator* disponible au Centre national d'atténuation de la sécheresse de l'Université du Nebraska. Les valeurs négatives et positives indiquent respectivement des conditions sèches et humides. La catégorie d'intensité de la sécheresse va de plus de 2,0 (Extrêmement humide) à moins de -2,0 (Extrêmement sec) (**Tableau 39**).

$$\mathrm{SPI} = \frac{\mathrm{Pi}-\mathrm{Pm}}{\mathrm{S}} \qquad \textbf{(18)}$$

Avec P_i : la pluie du mois ou de l'année i ; P_m : la pluie moyenne de la série ; S : l'écart-type de la série sur l'échelle de temps considérée. Une distribution gamma a été utilisée pour surmonter la contrainte des précipitations qui ne sont pas distribuées normalement au cours de l'année.

L'indice standardisé d'évapotranspiration des précipitations (SPEI - *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) : il s'agit d'un indice développé par Vicente-Serrano *et al.*, (2010) à l'Institut Pirenaico d'écologie de Saragosse ; cet indice relativement récent est basé sur la différence mensuelle entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée selon la méthode de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948). Il utilise également la même catégorie de sécheresse que l'indice SPI (**Tableau 39**), et son calcul nécessite le package R "SPEI" dans un environnement de programmation R (Beguería & Vicente-Serrano, 2009).

La différence entre les précipitations mensuelles cumulées et l'évapotranspiration est calculée comme suit :

$$D_i = P_i - PET_i \qquad \textbf{(19)}$$

Les valeurs Di sont agrégées à différentes échelles de temps, en suivant la même procédure que pour SPI. Les niveaux de sécheresse annuels pour chaque plage de l'indice SPEI sont indiqués dans **le tableau 9**.

Indice de sécheresse de reconnaissance (RDI - *Reconnaissance Drought Index*) : Cet indice est le résultat d'un travail entrepris par Tsakiris & Vangelis (2005) à l'Université technique nationale d'Athènes (Grèce) ; il contient à la fois une équation simplifiée du bilan hydrique qui prend en compte les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Son produit est estimé par trois valeurs : la valeur initiale, la valeur standardisée et la valeur normalisée. La valeur normalisée est similaire à l'indice SPI et peut lui être directement comparée sur plusieurs périodes de 1, 3, 6, 9, 12 mois ou plus.

La valeur normalisée de l'indice pour une période donnée, indiquée par le nombre de mois (k) dans une année, est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$RDI = \frac{\sum^{J=k} P_i}{\sum ETP_i} \quad \textbf{(20)}$$

Pi et ETPi sont les précipitations mensuelles et l'évapotranspiration potentielle d'une année hydrologique qui commence généralement en octobre (Maroc). Les valeurs de RDI suivent la distribution log-normale ou gamma. Ce rapport est normalisé de la même manière que les équations utilisées pour normaliser SPI afin d'obtenir les valeurs RDI.

Indice de sécheresse du débit des cours d'eau (SDI - *Streamflow Drought Index*) : Les calculs de cet indice établi par Nalbanties & Tsakiris (2009) sont effectués à partir des valeurs mensuelles du débit et des méthodes de normalisation utilisées pour le SPI afin de produire un indice de sécheresse en fonction du débit des cours d'eau. RDI et SDI ont été calculés à l'aide du logiciel *DrinC* (Tigkas *et al.*, 2015), développé par le Laboratoire de réhabilitation et de gestion des ressources en eau de l'Université technique nationale d'Athènes.

Il a été suggéré qu'une série temporelle de volumes de décharge mensuels Qi, j désigne l'année hydrologique et j le mois de l'année hydrologique (j=1 pour octobre et j=12 pour septembre) sur la base de cette série.

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j} \; i = 1,2, \ldots k = 1,2,3,4 \quad \textbf{(21)}$$

Où Vi, k est le volume cumulé du débit pour la i^{ème} année hydrologique et la ki^{ème} période de référence.

L'indice SDI est défini comme suit pour chaque période de référence k de la ième année hydrologique :

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \overline{V_k}}{S_k} \quad \textbf{(22)}$$

Où $\overline{V_k}$ et S_k sont, respectivement, la moyenne et l'écart-type des volumes de débit cumulés de la période de référence (k), les valeurs de SDI et les désignations de gravité sont similaires

à celles de SPI, de RDI et de SPEI (**Tableau 39**).

Indice de gravité de la sécheresse de Palmer auto-étalonné (sc-PDSI- *self-calibrating Palmer Drought Severity Index*) : Initialement, l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) proposé était un indice de sécheresse basé sur des données semi-physiques (Palmer, 1965). Il intègre le bilan hydrique du sol à partir d'un modèle simple d'humidité du sol. Par la suite, l'algorithme du PDSI a été modifié par Wells *et al.,* (2004) dans l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer auto-calibré (sc-PDSI). Cet indice peut ajuster automatiquement les constantes empiriques dans le calcul du PDSI avec des valeurs calculées dynamiquement. La fonction de calcul du sc-PDSI est basée sur des codes sources en C ++ développés par l'Agence de gestion des risques (AGR) et l'Université du Nebraska dans le cadre du projet Greenleaf (*http://greenleaf.unl.edu*). Des algorithmes et des procédures de calcul plus détaillés sont disponibles (Wells *et al.,* 2004).

L'indice sc-PDSI est calculé à partir des séries temporelles de précipitations et de températures mensuelles et de paramètres fixes liés aux caractéristiques du sol ou de la surface à chaque endroit. Les valeurs sc-PDSI sont divisées en neuf catégories allant de -4 (sec) à 4 (humide), en utilisant une classification complète basée sur la sévérité des conditions sèches ou humides (**Tableau 39**).

Tableau 39 : Catégorisation du degré de sécheresse / d'humidité en fonction des indices de sécheresse.

Classe	SPI, SPEI, DRI et SDI
Extrêmement humide (E. H)	≥ 2
Fortement humide (F.H)	1.5 to 1.99
Modérément humide (M.H)	1.0 to 1.49
Normal (N)	0.99 to -0.99
Modérément sec (M.S)	-1 to -1.49
Sévèrement sec (S.S)	-1.5 to -1.99
Extrêmement sec (E.S)	≤ -2

Classe	sc-PDSI
Extrêmement humide (E. W)	≥ 4
Fortement humide (S. W)	3 to 3,99
Modérément humide (Mo. W)	2 to 2,99
Légèrement humide (Mi. W)	1 to 1,99
Humide (I. W)	0,5 to 0,99
Normal (N)	0,49 to -0,49
Sec (S)	-0,50 to -0,99
Légèrement sec (L.S)	-1 to -1,99
Modérément sec (M.S)	-2 to -2,99
Sévèrement sec (S.S)	-3 to -3,99
Extrêmement sec (E.S)	≤ -4

II . 4. Évaluation des indices de sécheresse (DIs – *Drought Indices*)

Compte tenu du grand nombre d'DIs développés et des efforts des comités scientifiques, il est également essentiel de considérer l'application pratique car chaque indice a ses propres limites, calcule la sécheresse différemment et compare plusieurs indices en utilisant les mêmes données régionales. Pour évaluer la performance des DIs utilisés, des relations statistiques ont d'abord été calculées pour fournir des diagnostics utiles dans l'évaluation de la performance. Par conséquent, les analyses ont été effectuées comme suit : (**i**) analyse des séries temporelles pour évaluer la distribution spatio-temporelle de la sécheresse météorologique ; (**ii**) analyse de

corrélation de Pearson (R) entre les différents indices de sécheresse ; (**iii**) comparaison des caractéristiques de la sécheresse identifiées et (**iv**) comparaison des DIs pendant les principaux épisodes historiques de sécheresse. Sachant que la sécheresse est l'un des stress abiotiques importants qui affectent le rendement et la qualité des céréales (Pervez *et al.,* 2017), la dernière étape (**v**) est axée sur la performance des différents indices de sécheresse dans l'évaluation de l'impact du climat sur les cultures, en utilisant des données sur le rendement des céréales pluviales, afin de refléter les capacités de chaque indice dans le suivi de la sécheresse agricole. L'analyse de corrélation de Pearson (R) a également été utilisée pour examiner la relation entre les indices de sécheresse et les rendements des cultures. Dans l'analyse, les anomalies dans le rendement des céréales ont été calculées en supprimant la tendance linéaire de la série chronologique du rendement des cultures afin d'exclure les facteurs non climatiques. Les variations des rendements des cultures dépendent généralement de plusieurs facteurs en plus des facteurs climatiques, tels que les nouvelles technologies de gestion et les pratiques innovantes. C'est pourquoi le rendement détourné a été calculé à l'aide de la méthode du Z-score afin d'exclure le biais dû à des facteurs non climatiques (Bouras *et al.,* 2020).

III. Résultats et discussion

III . 1. Distribution spatio-temporelle des épisodes de sécheresse

Quatre DIs ont été calculés pour évaluer la distribution spatio-temporelle de la sécheresse météorologique à chaque station du bassin Bas Sebou. Les résultats obtenus ont montré des intensités et des épisodes différents des séquences de sécheresse, même au cours de la même année et de la même période de temps. Ensuite, les coefficients de corrélation de Pearson (R) ont été dérivés des valeurs des séries temporelles des DIs pour toutes les stations. Chaque station est associée à toutes les autres stations, formant une matrice de coefficient de corrélation 4 x 4.

III . 1. a. Distribution spatio-temporelle de SPI

Les valeurs de l'indice SPI-12 à travers les stations montrent une intensité de sécheresse unique avec des épisodes de sécheresse uniformes (**Figure 82**). À la station de Lalla Mimouna, 2016 a été l'année la plus sèche avec des épisodes de sécheresse extrême. Des épisodes de sécheresse ont été observés en 1995, 2005 et 2016 dans les différentes stations. Les années 2005 et 2016 ont été marquées par des sécheresses sévères à extrêmes dans la station de Lalla Mimouna, tandis que la station de Mnasra a enregistré des intensités relativement faibles, bien que les deux stations soient situées dans la zone côtière. Dans le cas des stations situées à l'intérieur du bassin, la station de Zirara a connu des épisodes de sécheresse extrême en 1995, tandis que la station de Mechra Bel Ksiri a connu une sécheresse sévère en 2016. En général, toutes les stations ont montré des valeurs SPI-12 indiquant des années de sécheresse identiques avec une forte corrélation entre elles ($0,76 \leq R \leq 0,92$) en raison de la grande homogénéité des précipitations dans le bassin Bas Sebou et de la dominance du climat océanique influencé par la topographie locale.

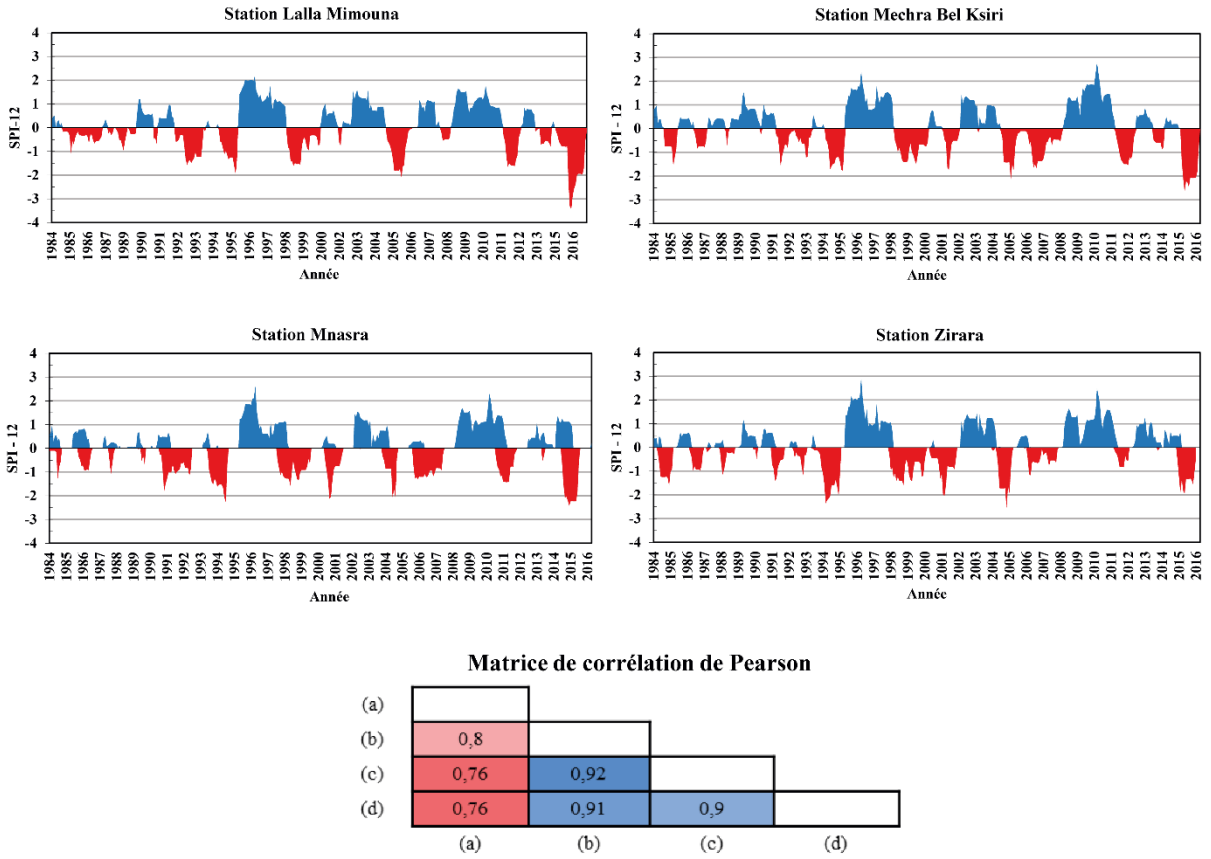


Figure 82 : Distribution spatio-temporelle de SPI-12 dans le bassin Bas Sebou et matrice de corrélation de SPI-12 entre les différentes stations : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara.

III . 1. b. Distribution spatio-temporelle de SPEI

La figure 83 montre que la distribution spatio-temporelle des valeurs SPEI-12 reflète une hétérogénéité très distincte, reflétée par une très faible corrélation entre la station de Lalla Mimouna et la station de Mnasra (R = 0,48). La majorité des valeurs de SPEI-12 montrent que le bassin Bas Sebou a connu des sécheresses extrêmes à sévères, en particulier en 2006 et 2016, étant donné que 2016 a été l'année la plus sèche en 33 ans, marquée par l'influence d'un fort évènement d'El Niño (WMO, 2017). SPEI-12 montre la prévalence de sécheresses extrêmes en 1995, 2006 et 2016 à la station de Mechra Bel Ksiri, suivies de sécheresses sévères à la station de Mnasra, et les sécheresses modérées sont très fréquentes à la station de Zirara. Cependant, la station de Lalla Mimouna a connu des sécheresses sévères à extrêmes au cours de la dernière décennie et sur une plus longue durée. En ce qui concerne les années humides enregistrées, les stations de Lalla Mimouna et Zirara ont enregistré des années humides fréquentes, tandis que les autres stations sont marquées par une seule période extrêmement humide entre 2009 et 2011.

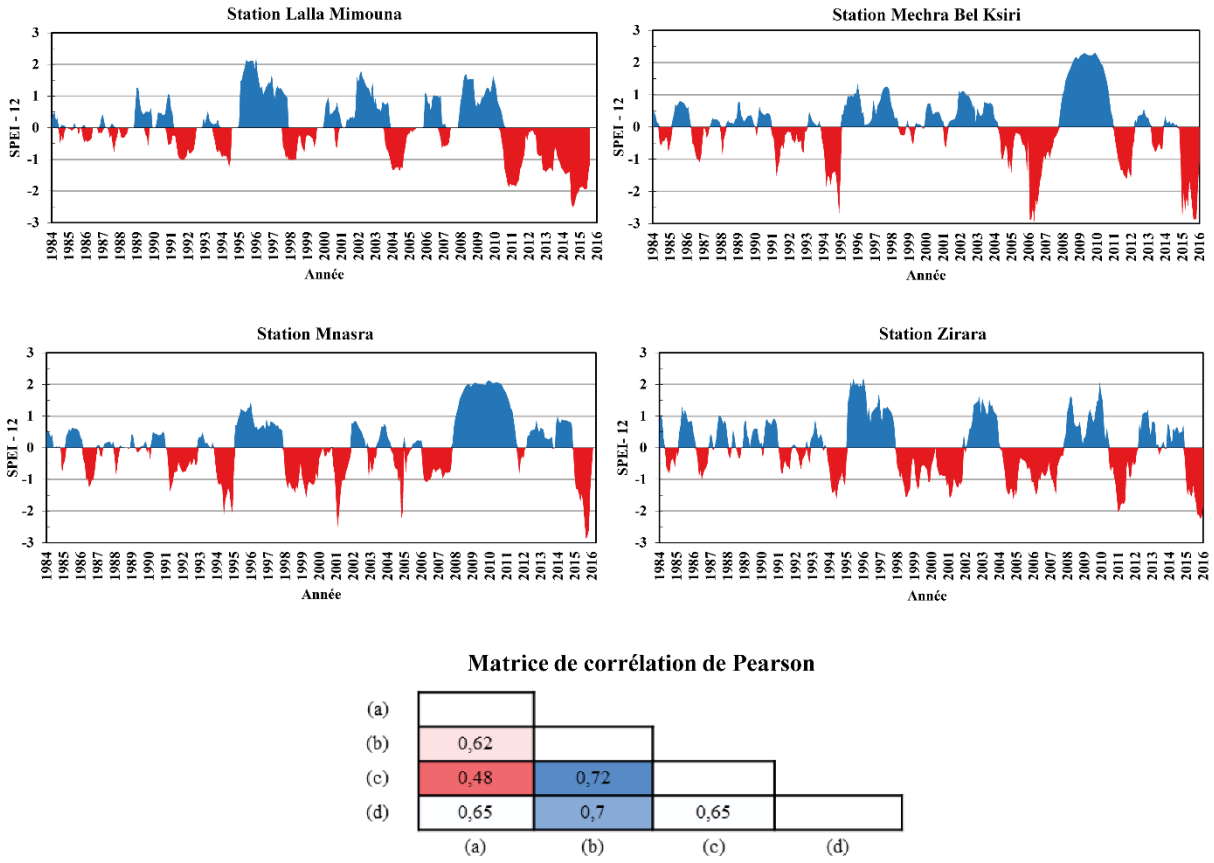


Figure 83 : Distribution spatio-temporelle de SPEI-12 dans le bassin Bas Sebou et matrice de corrélation de SPEI-12 entre les différentes stations : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara.

III . 1. c. Distribution spatio-temporelle de RDI

La variation spatio-temporelle de RDI-12 dans le bassin Bas Sebou montre que l'année 2016 a eu la sévérité maximale (-3,44), indiquant une sécheresse extrême, suivie par l'année 2005 (-2,76) (**Figure 84**). La station de Mechra Bel Ksiri n'a connu qu'une seule période extrêmement humide et longue entre 2009 et 2011. Les valeurs RDI-12 montrent une abondance de sécheresses modérées à la station de Mechra Bel Ksiri, à l'exception d'une seule sécheresse extrême en 2016. Les stations de Mnasra et Zirara ont comparativement plus d'années sèches que les autres stations, en particulier la station de Mechra Bel Ksiri, où l'ampleur de la sécheresse est plus importante au cours des dernières années. **La figure 84** montre également des sécheresses généralisées produites en 1995, 2006 et 2016. Cependant, les événements se sont produits au cours d'années apparemment aléatoires avec de faibles coefficients de corrélation ($0,62 \leq R \leq 0,87$) par rapport à SPI-12.

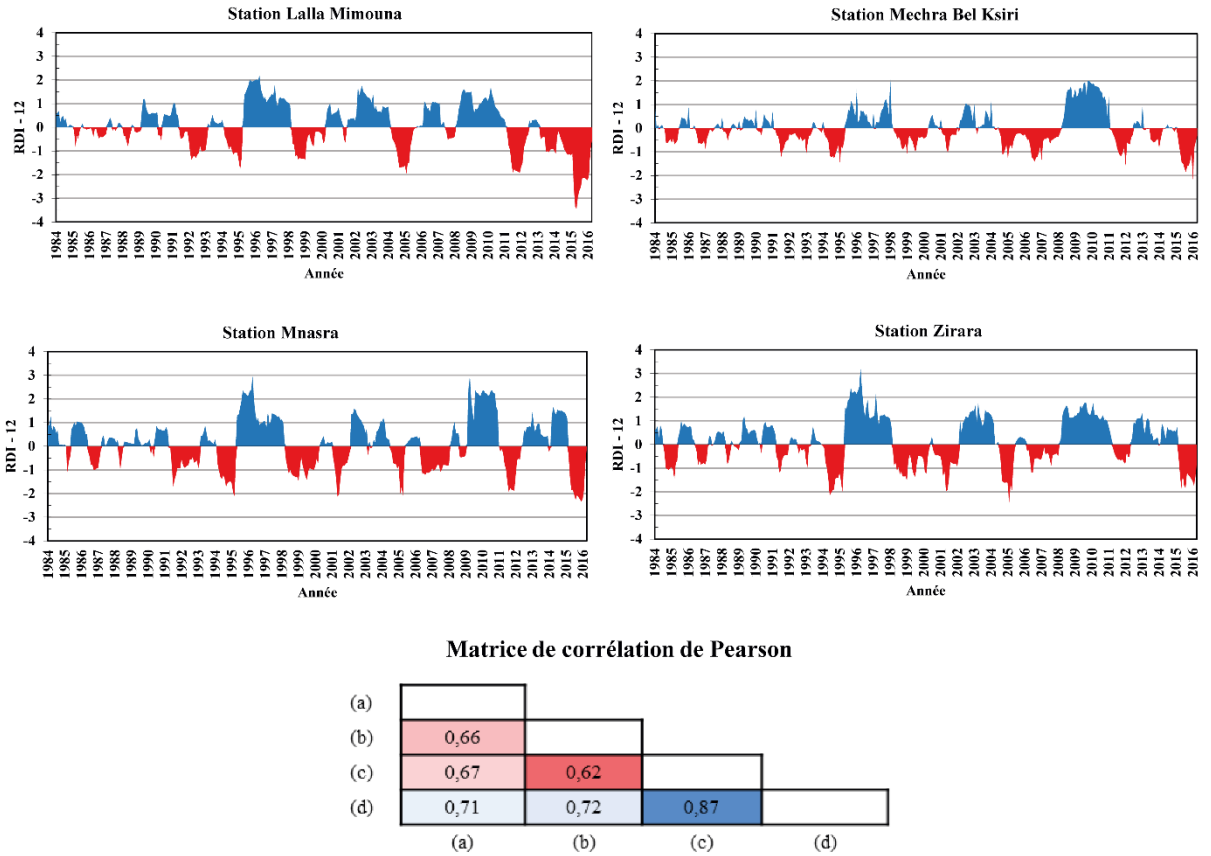


Figure 84 : Distribution spatio-temporelle de RDI-12 dans le bassin Bas Sebou et matrice de corrélation de SPI-12 entre les différentes stations : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara.

III . 1. d. Distribution spatio-temporelle de l'indice sc-PDSI

Contrairement aux autres indices, l'abondance des épisodes de sécheresse est bien marquée dans toutes les stations avec des sévérités très larges (**Figure 85**), probablement en raison des algorithmes incorporant davantage de facteurs biophysiques pour calculer le sc-PDSI (Abrantes *et al.,* 2021). En outre, l'évolution du sc-PDSI au cours de la période 1984-2016 a révélé de nouveaux épisodes de sécheresse, parfois de longue durée, en particulier au cours des périodes 1985-1988, 1992-1995, 1998-2002, 2005-2008 et 2012-2016. Il est également intéressant de noter que la station de Lalla Mimouna a montré une humidité relative même pendant les périodes de sécheresse enregistrées par les autres stations. Cependant, depuis 2012, les précipitations ont été réduites et l'ETP a augmenté en raison de l'augmentation de la température. Ainsi, la sévérité et la durée de la sécheresse induite surestimée par le sc-PDSI entraîne une variation de l'intensité, de la sévérité et de la durée des épisodes de sécheresse d'une station à l'autre. Ces épisodes sont presque similaires dans les stations à l'exception de la station de Lalla Mimouna, qui a montré des coefficients de corrélation relativement plus faibles, par rapport aux autres stations ($0,42 \leq R \leq 0,45$). Cette différence pourrait être expliquée par la différence de position latitudinale entre la station de Lalla Mimouna et les autres stations d'une part. D'autre part, la présence de forêts denses maintient la capacité de rétention d'eau des sols (Xing *et al.,* 2018). La corrélation la plus élevée ($R = 0,79$) est enregistrée entre les deux stations

(Mechra Bel Ksiri et Zirara) qui se trouvent à l'intérieur du bassin (degré de continentalité).

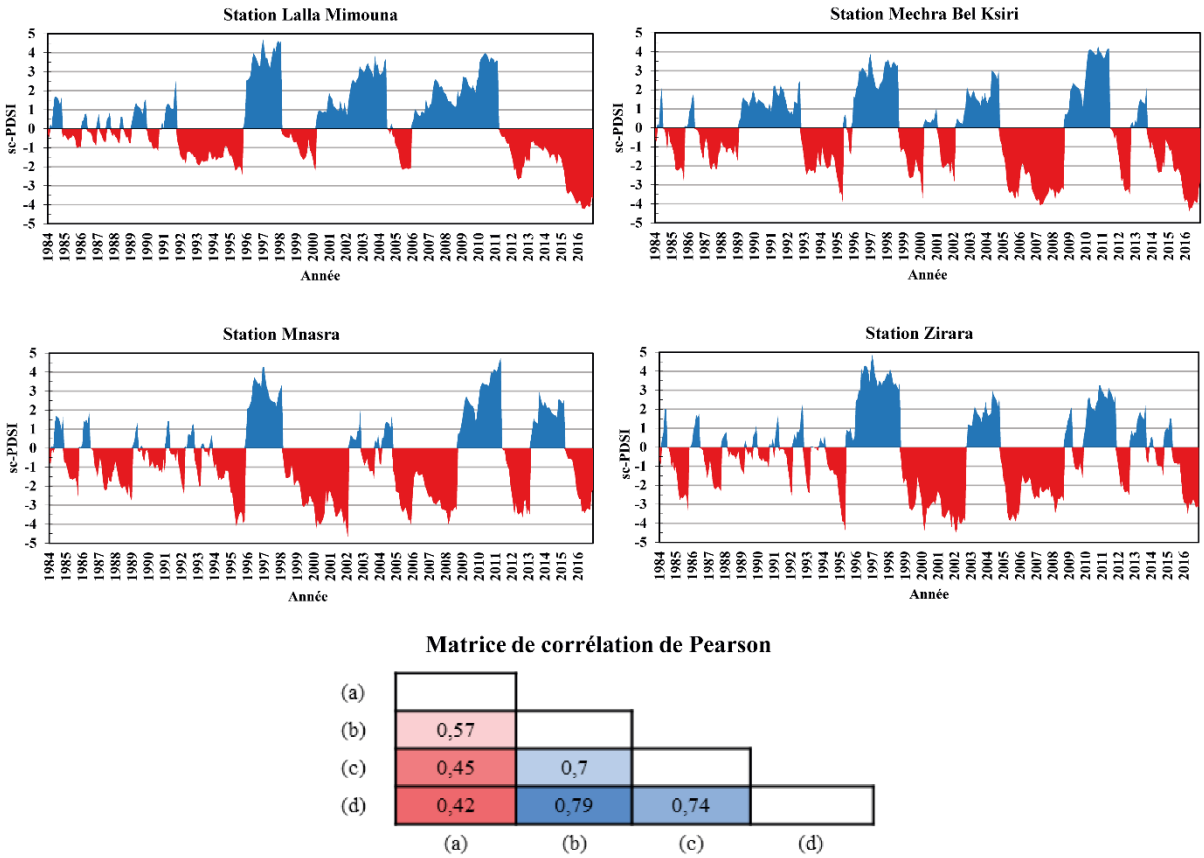


Figure 85: Distribution spatio-temporelle de sc-PDSI dans le bassin Bas Sebou et matrice de corrélation de SPI-12 entre les différentes stations : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara.

III . 2. Corrélation entre les différents indices de sécheresse (DSs)

Les valeurs de corrélation de Pearson (R) ont été obtenues en comparant les résultats des différentes stations et ont été prises comme références pour la discussion. **La figure 86** illustre clairement l'importance des indices SPI-12 et RDI-12 dans les différentes stations du bassin Bas Sebou, où les résultats obtenus montrent un comportement généralement similaire. Cette similitude des sorties entre les indices SPI et RDI n'est pas unique dans cette région (Merabti *et al.*, 2018 ; Pathak & Dodamani, 2019), et leurs coefficients de corrélation couplés à d'autres indices sont comparativement plus élevés ($0,77 \leq R \leq 0,99$) (**Figure 86**). Cependant, dans la station de Mechra Bel Ksiri, SPI-12 a réagi relativement mieux avec d'autres indices que RDI-12. Cette différence est justifiée par le fait que RDI a enregistré moins d'années sèches à cette station que SPI, SPEI et sc-PDSI (**Figure 84**). Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), SPI-12 reste l'indice le plus recommandé pour la surveillance de la sécheresse. Les résultats obtenus à partir des corrélations ont montré que l'indice SPI-12, qui nécessite des données pluviométriques, peut remplacer efficacement le RDI-12, le SPEI-12 et le sc-PDSI, car il est positivement corrélé avec des coefficients de corrélation élevés allant jusqu'à $R = 0,99$ et statistiquement significatifs (**Figure 86**). Dans la plupart des stations, SPI-12 est en bonne corrélation avec SPEI-12, sauf à la station Zirara ($R = 0,84$), ce qui s'explique par le fait que

SPI-12 et SPEI-12 fonctionnent mieux dans les zones humides que dans les régions arides ou semi-arides (Yang *et al.,* 2017). Cependant, la corrélation entre SPI-12 et sc-PDSI est minime. L'indice SPI-12 saisit les anomalies dans le régime des précipitations, tandis que les indices basés sur le bilan hydrique (sc-PDSI, SPEI et RDI) estiment les anomalies dans le bilan hydrique climatique. Plus précisément, on constate une forte cohérence entre les indices multiscalaires (SPI, RDI et SPEI) et l'indice sc-PDSI. De faibles corrélations ont été manifestées entre SPEI-12, RDI-12, et sc-PDSI par rapport à SPI-12 dans les stations de Mechra Bel Ksiri et Zirara, sachant que les corrélations les plus fortes ont été mentionnées dans la station de Lalla Mimouna (**Figure 86**). Ces résultats confirment l'abondance de la sécheresse indiquée par SPEI-12 et sc-PDSI dans la station de Zirara en raison du climat semi-aride (**Figures 83 et 85**), ce qui explique pourquoi SPI ne peut pas surveiller et évaluer la sécheresse dans un tel contexte (Nikbakht & Hadeli, 2021). Cependant, l'inclusion de la température dans l'algorithme de SPEI et sc-PDSI, en particulier, ne fournit pas suffisamment d'informations pour la station de Lalla Mimouna, où les températures sont des séries relativement stationnaires. Il a également été constaté que l'indice SPI diffère peu de l'indice sc-PDSI et de l'indice SPEI lorsque les tendances temporelles de la température sont évidentes (Vicente-Serrano *et al.,* 2010). Dans l'ensemble, l'évolution spatio-temporelle des DIs dans le bassin Bas Sebou suit généralement un modèle de changement similaire, conforme aux résultats obtenus dans d'autres régions (Jain *et al.,* 2015 ; Adnan *et al.,* 2018).

Station Lalla Mimouna

	RDI-12	SPI-12	SPEI-12	sc-PDSI
RDI-12		0,98	0,98	0,83
SPI-12	0,98		0,94	0,79
SPEI-12	0,98	0,94		0,84
sc-PDSI	0,83	0,79	0,84	

Station Mechra Bel Ksiri

	RDI-12	SPI-12	SPEI-12	sc-PDSI
RDI-12		0,77	0,8	0,67
SPI-12	0,77		0,87	0,79
SPEI-12	0,8	0,87		0,72
sc-PDSI	0,67	0,79	0,72	

Station Mnasra

	RDI-12	SPI-12	SPEI-12	sc-PDSI
RDI-12		0,94	0,83	0,74
SPI-12	0,94		0,86	0,73
SPEI-12	0,83	0,86		0,7
sc-PDSI	0,74	0,73	0,7	

Station Zirara

	RDI-12	SPI-12	SPEI-12	sc-PDSI
RDI-12		0,99	0,92	0,8
SPI-12	0,99		0,84	0,8
SPEI-12	0,92	0,84		0,78
sc-PDSI	0,8	0,8	0,78	

Figure 86 : Matrice de corrélation de Pearson des indices de sécheresse pour toutes les stations du bassin Bas Sebou.

III . 3. Évaluation des caractéristiques de la sécheresse météorologique

Compte tenu de la durée et de la gravité de la sécheresse identifiée au cours de la période 1984-2016, des catégories de mois secs ont été déterminées (**Tableau 39, Figure 83**), ce qui nous a permis de visualiser leurs fréquences relatives dans chaque station (**Figure 84**). Sachant que la fréquence relative indique le pourcentage de chaque classe de sévérité de la sécheresse

selon l'indice considéré.

Les DIs utilisés, à l'exception de sc-PDSI, où le nombre de mois secs est relativement élevé, ont montré un nombre identique de mois secs dans toutes les stations (**Figure 87**). La station de Zirara a reçu plus de mois secs que les autres stations, notamment la station de Lalla Mimouna. Il faut noter que l'indice RDI-12 montre des fréquences relatives identiques et plus élevées, en particulier dans la classe des sécheresses modérées (M.S), atteignant (97%) à la station de Mechra Bel Ksir et 92% à la station de Zirara (**Figure 88**). L'indice RDI est plus adapté à la caractérisation de la sécheresse dans les régions semi-arides (Moghimi *et al.*, 2020). Cependant, l'indice sc-PDSI montre des fréquences relatives de mois secs dans toutes les catégories et dans toutes les stations. En outre, selon les indices utilisés, la classe de sécheresse modérée est la plus dominante dans toutes les stations. Par conséquent, et sur la base des résultats obtenus ci-dessus, la station de Lalla Mimouna reste la moins sujette aux épisodes de sécheresse en rapport avec sa situation en latitude, qui subit fréquemment le passage des dépressions cycloniques vers le Nord sans tenir compte de sa proximité de la côte, sachant que la station de Mnasra malgré sa situation côtière, elle a enregistré des épisodes de sécheresse presque similaires à la station de Zirara (**Figure 87**).

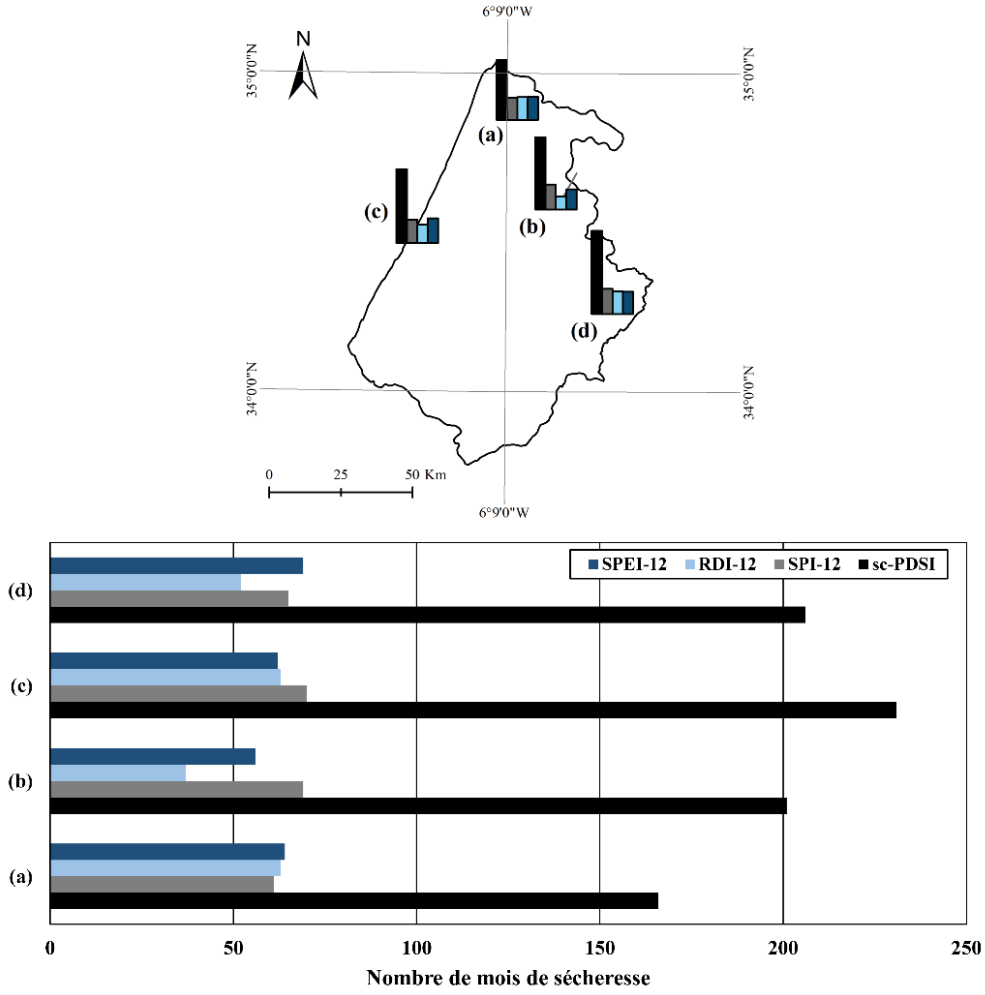


Figure 87: Distribution spatiale du nombre de mois secs des stations du bassin Bas Sebou : (a) Lalla Mimouna, (b) Mechra Bel Ksiri, (c) Mnasra, (d) Zirrara, pour la période 1984-2016.

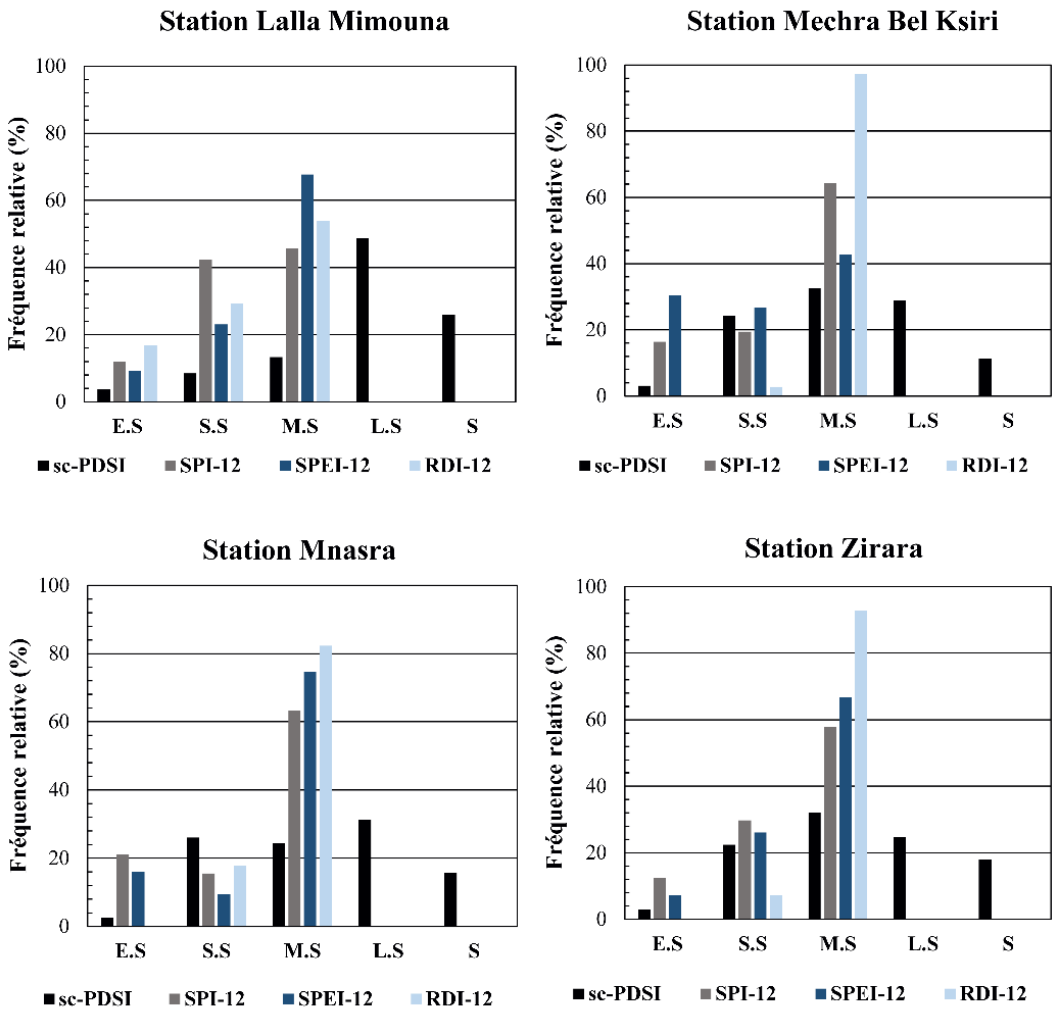


Figure 88 : Histogrammes de fréquence relative des classes de sécheresse dans le bassin Bas Sebou durant la période 1984-2016 ; « Extrêmes sec (E.S) », « Sévèrement sec (S.S) », « Modérément sec (M.S) », « Légèrement Sec (L.S) » et « Sec (S) ».
Note. *Les classes de sécheresse : Légèrement Sec (L.S) et Sec (S) ont été attribuées pour l'indice sc-PDSI.*

III . 4. Performance des indices de sécheresse (DIs) par rapport aux sécheresses historiques

La performance des DIs dans le bassin Bas Sebou nécessite pratiquement la recherche d'une période où la sécheresse est bien définie et reconnue. Pour ce faire, trois approches ont été mises en œuvre, à savoir les résultats ci-dessus, le calcul de l'indice de sécheresse basé sur le débit des cours d'eau (SDI) et les archives climatiques.

Selon le rapport du Haut-Commissariat au Plan, le bassin Bas Sebou a connu une sécheresse sévère qui a duré de 1991 à 1995, dont l'année 1995 a été déclarée catastrophique du point de vue agricole (Laouina, 2006). Cette situation se reflète également au niveau des eaux de surface (barrages et rivières), accompagnée d'un déficit de 75% du débit moyen de l'ensemble du bassin versant du Sebou (Bzioui, 2004). En ce qui concerne le débit fluvial du bassin Bas Sebou, les séries chronologiques des débits des principaux cours d'eau utilisées pour

déterminer SDI-12 ont également déterminé et approuvé la présence dans les deux stations de jaugeage d'une sécheresse hydrologique sévère à extrême (stations de Mechra Bel Ksiri et de Lalla Mimouna) (**Figure 89**). En outre, tous les DIs ont également montré des situations de sécheresse sévère à extrême pour la même période, 1991-1995 (**Figures 82, 83, 84 et 85**).

Pour évaluer la performance des DIs durant les sécheresses historiques, les séries temporelles des indices et indicateurs tels que les températures (T) et les précipitations (P) de la période 1991-1995 sont comparées à celles des températures et précipitations mensuelles moyennes pour la période 1984-2016. Cette opération nous a permis d'établir l'adéquation de chaque indice météorologique de sécheresse pour déterminer le début, la fin et la sévérité de la sécheresse. Dans toutes les stations, les valeurs mensuelles des températures et des précipitations (1991-1995) et les valeurs des DIs ont clairement montré que le déficit des précipitations mensuelles est inférieur à la moyenne (**Figure 89**). SPI-12, SPEI-12, et RDI-12 ont la même tendance, en particulier à la station de Lalla Mimouna (janvier 1991 à septembre 1992), malgré les précipitations et l'évapotranspiration significatives montrant l'effet des anomalies de précipitations sur l'évapotranspiration. Par conséquent, SPEI-12 et RDI-12 fonctionnent de manière similaire à SPI-12, qui inclut les précipitations. La similitude entre SPI-12, RDI-12 et SPEI-12 montre que les précipitations sont le principal déterminant de la sécheresse météorologique dans le Nord du bassin Bas Sebou. SPEI-12 et RDI-12 à la station de Lalla Mimouna et à partir d'octobre 1992 répondent moins à la sécheresse que SPI-12, qui marque des sécheresses modérées à sévères. Ceci est dû au calcul de l'indice SPI-12 basé sur les précipitations qui pourrait indiquer des situations plus sèches dans les régions subhumides (station de Lalla Mimouna) ou plus humides dans les régions semi-arides (station de Zirara de mai 1992 à juillet 1993). D'autre part, Pathak & Dodamani (2019) ont montré que les indices SPI, RDI, et SPEI suivent un comportement global similaire dans les régions semi-arides. La **figure 90** montre également une très grande similitude entre SPI-12/RDI-12, en particulier à la station de Zirara, où ils ont le coefficient de corrélation le plus élevé (R = 0,99) (**Figure 86**). Les indices RDI et SPI sont les plus appropriés pour la caractérisation de la sécheresse dans les régions arides et semi-arides (Xu *et al.,* 2015). L'évolution de l'indice sc-PDSI diffère d'une station à l'autre en montrant une tendance relativement exagérée pendant les périodes sèches et même humides, étant donné que cet indice prend en compte des facteurs biophysiques qui dépendent des facteurs de localisation de la station, contrairement aux autres indices qui sont focalisés sur la pluviométrie et l'ETP. Grâce à une observation approfondie de la relation entre les indicateurs (T, P) et les DIs météorologiques, le sc-PDSI semble être le plus sensible aux températures et aux précipitations en surestimant les conditions de sécheresse (Jiang *et al.,* 2015). Il a connu une forte baisse de valeur après le déficit pluviométrique de novembre 1991 aux stations de Lalla Mimouna, Mnasra et Zirara. Il convient également de noter que le déficit pluviométrique n'était pas significatif de novembre 1991 à octobre et que les indices SPI-12, SPEI-12, et RDI-12 ont indiqué cette période comme habituelle à humide, contrairement au sc-PDSI, qui a maintenu ses valeurs négatives (**Figure 90**). De même, pendant les épisodes pluvieux, la courbe sc-PDSI montre des tendances à la hausse en novembre 1995 aux stations de Lalla Mimouna et Mnasra et en juin 1995 aux stations de Mechra Bel Ksiri et Zirara (**Figure**

90). Sachant que le sc-PDSI prend en compte la capacité de rétention d'eau du sol, qui était élevée durant cette période, surtout dans les zones forestières. Les valeurs indiquées par le sc-PDSI sont les plus négatives durant cette année, à l'exception des stations de Zirara et Mechra Bel Ksiri. Le mois de juin a enregistré des précipitations importantes d'origine orageuse, ce qui a augmenté la valeur du sc-PDSI. La méthode de Thornthwaite surestime l'impact de la température sur le calcul de l'évapotranspiration (Trenberth *et al.*, 2007 ; Hobbins *et al.*, 2008), comme le montre la diminution des valeurs de sc-PDSI. L'équation de Penman Monteith n'a pas été utilisée en raison du manque de données sur ses paramètres et de la forte corrélation et similarité entre cette méthode et la méthode de Thornthwaite au niveau mondial.

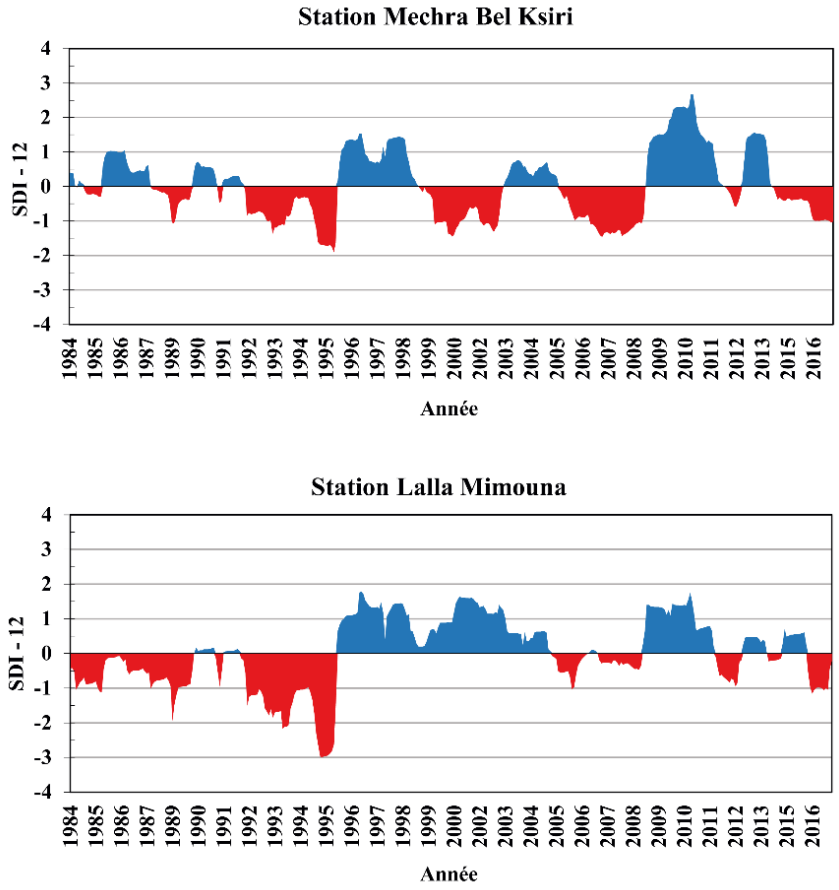


Figure 89 : Variation annuelle de l'indice SDI au cours de la période 1984-2016.

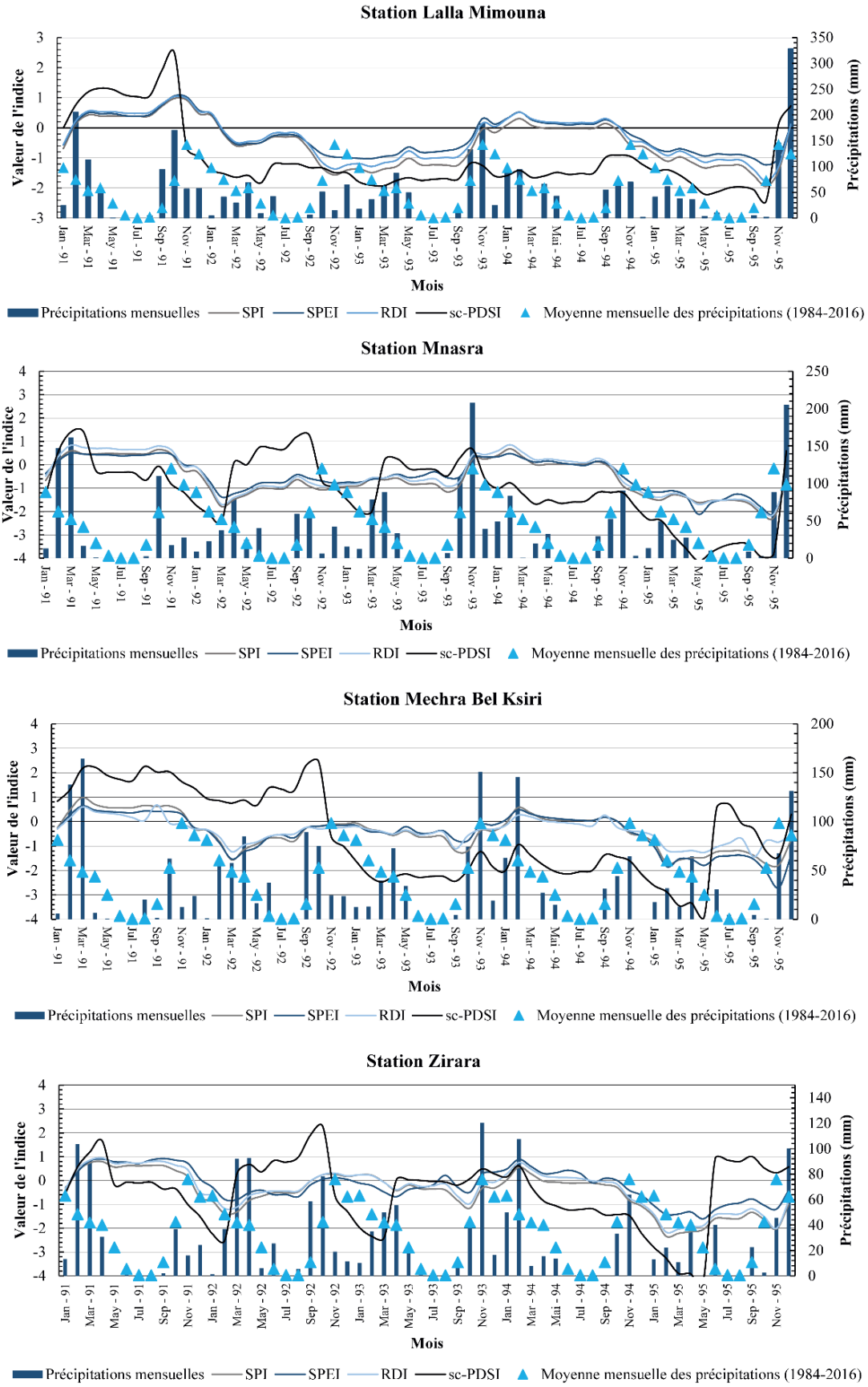


Figure 90 : évolution des indices de sécheresse et les précipitations mensuelles au cours de la période 1991-1995, et les précipitations moyennes pour la période 1984-2016 dans le bassin Bas Sebou.

III . 5. Réponses temporelles des indices de sécheresse (DIs) aux rendements des cultures

Les indices de sécheresse (DIs – *Drought Indices*) appliqués ont été évalués afin de déterminer s'ils répondent au critère de bon indice et s'ils sont utiles dans le bassin Bas Sebu. L'analyse de corrélation entre le rendement des cultures et les indices de sécheresse a également été réalisée pour les quatre stations météorologiques pendant 16 ans. Il convient de noter que les graphiques RDI, SPI et SPEI ont été récupérés par le coefficient de corrélation maximal de 1 à 12 mois. Comme les résultats précédents et indépendamment du type de céréale et de l'échelle temporelle considérés, nos résultats ont montré que les DIs multiscalaires (RDI, SPI et SPEI) ont une plus grande capacité à refléter les impacts de la sécheresse sur les rendements des céréales pluviales par rapport au sc-PDSI, en particulier au début de la saison de croissance (octobre à décembre) (**Figures 91, 92 et 93**). Ceci est principalement dû à leur flexibilité à refléter les impacts négatifs du climat sur différentes régions ayant des caractéristiques très différentes (Vicente-Serrano *et al.,* 2011). Cette différence est essentielle en agrométéorologie, car les cultures ne réagissent pas de la même manière au déficit hydrique. Cette constatation est conforme à des études antérieures similaires menées dans diverses régions, qui ont indiqué que ces indices étaient efficaces pour surveiller les impacts de la sécheresse sur l'agriculture (Mahmoudi *et al.,* 2019 ; Peña-Gallardo *et al.,* 2019 ; Wable *et al.,* 2019).

Cependant, les résultats de l'évaluation des performances de sc-PDSI ont montré quelques exceptions au cours des stades de croissance intermédiaire et finale, ce qui correspond aux stades de croissance critiques des céréales selon le calendrier phénologique et peut être utile à des fins de surveillance. Cette évaluation a également révélé des différences significatives dans l'influence des conditions de sécheresse sur les rendements de l'orge, du blé dur et du blé tendre au cours des différents mois. Pendant le début et le milieu de la saison de croissance, les coefficients de corrélation (R) obtenus à partir des indices multiscalaires sont principalement d'environ 0,6 d'octobre à avril et d'environ 0,4 en mai avant de diminuer à environ 0,3 en juin (près de la récolte). Ceci est dû au cycle de croissance des céréales qui se termine généralement en juin et à la faible demande d'humidité, ce qui souligne l'importance de conditions d'humidité adéquates pendant la saison hivernale pour un développement et une croissance excellente des céréales. Des différences mineures entre les DIs multi-scalaires suggèrent que l'indice SPEI est le plus performant pour toutes les cultures céréalières, bien que l'indice SPI soit plus faible en ce qui concerne les rendements de l'orge (**Figure 91**). Les rendements de blé dur et de blé tendre (**Figures 92 et 93**) présentent des corrélations plus fortes que les rendements d'orge, en particulier pour l'indice SPI, qui ne dépend que de la quantité de précipitations dans le calcul (**Figure 91**). Ceci est dû aux caractéristiques physiologiques de l'orge et à la texture sableuse du sol, qui sont moins dépendantes de la disponibilité en eau au stade de la germination et du remplissage des grains que le blé (Mamnouie *et al.,* 2006) et moins sujettes au stress hydrique dans des conditions de sécheresse en raison de leur coefficient de transpiration plus élevé (Fischer *et al.,* 1998). En outre, les résultats indiquent une similitude entre la réponse temporelle de l'orge, du blé dur et du blé tendre aux conditions de sécheresse, bien qu'au Maroc, l'orge soit généralement cultivée plus tard que le blé et dans des sols à faible capacité de

rétention d'eau. Ils ont également indiqué que le facteur température est plus important que les précipitations dans le suivi et l'évaluation de la sécheresse agricole, indiquant que des changements extrêmes de la température moyenne pendant les stades de croissance les plus sensibles peuvent affecter négativement les cultures céréalières pluviales. En outre, les résultats de l'évaluation comparative dans les sections précédentes suggèrent le rôle des précipitations dans la surveillance et l'évaluation de la sécheresse météorologique dans le bassin Bas Sebou. La supériorité de SPI suggère que la simplicité et la disponibilité des données donnent un pouvoir bien défini. En outre, l'utilisation des précipitations et de l'évapotranspiration (bilan hydrique) dans le calcul de SPI constitue, grâce à sa meilleure corrélation entre la sécheresse et les rendements céréaliers, la solution la plus adéquate pour aborder la caractérisation de la sécheresse agricole au Maroc afin d'avoir les informations nécessaires pour mettre en place un produit d'assurance, offrant une garantie sur la production céréalière dans les zones pluviales et contre les risques de sécheresse.

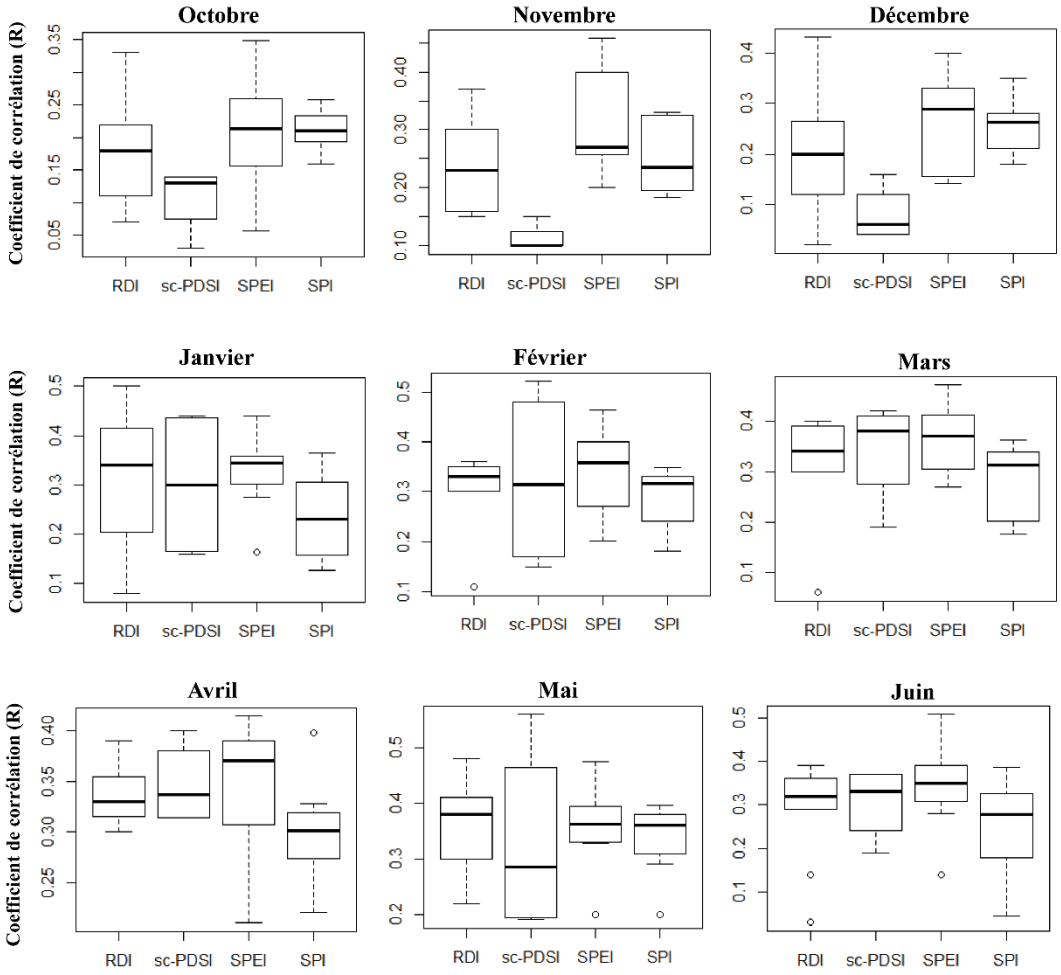


Figure 91: Relation entre les indices de sécheresse et le rendement des céréales pluviales pendant la campagne de l'orge (d'octobre de l'année précédente à juin de l'année en cours). Les limites supérieures et inférieures de la boîte indiquent les quartiles supérieurs et inférieurs, respectivement. La ligne dans la boîte indique la médiane, les lignes à l'extérieur de la boîte indiquent les limites supérieures et inférieures, et les cercles indiquent les valeurs aberrantes dans l'ensemble des données.

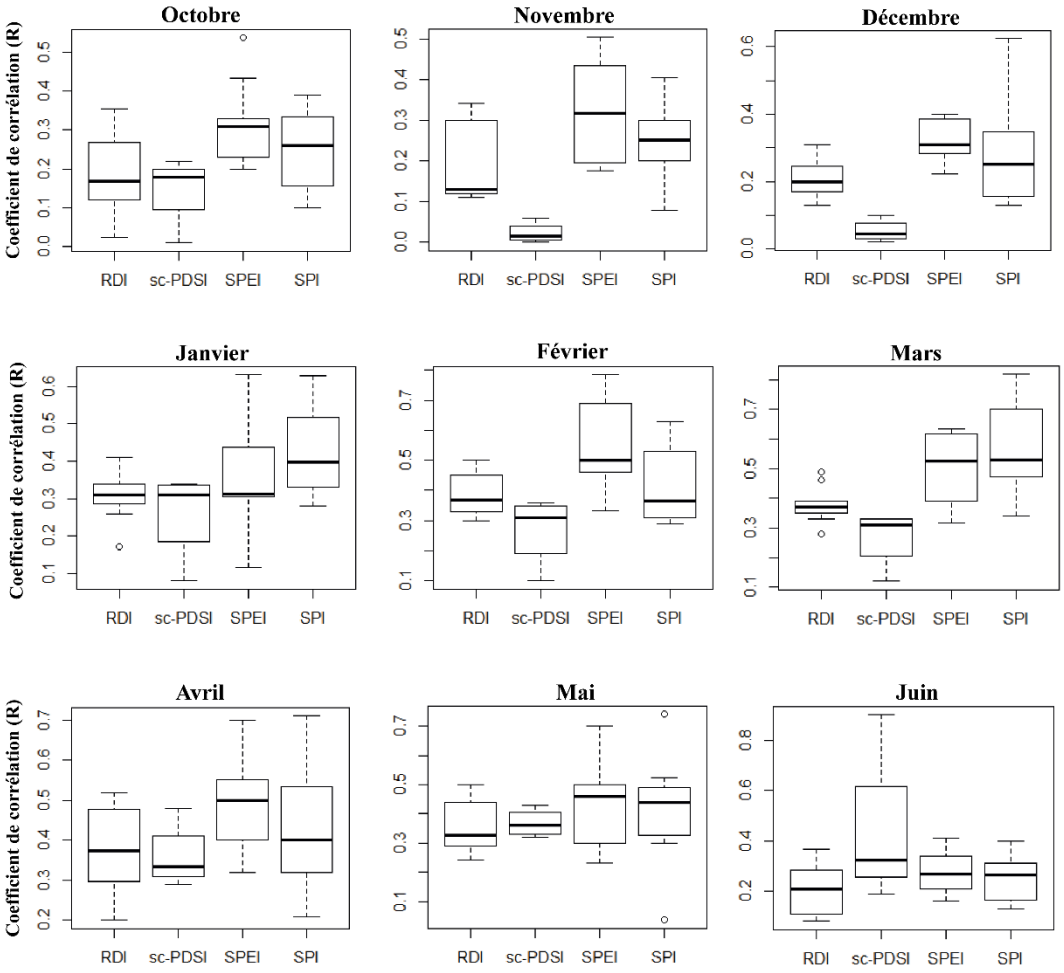


Figure 92 : Relation entre les indices de sécheresse et le rendement des céréales pluviales pendant la campagne du blé dur (d'octobre de l'année précédente à juin de l'année en cours). Les limites supérieures et inférieures de la boîte indiquent les quartiles supérieurs et inférieurs, respectivement. La ligne dans la boîte indique la médiane, les lignes à l'extérieur de la boîte indiquent les limites supérieures et inférieures, et les cercles indiquent les valeurs aberrantes dans l'ensemble des données.

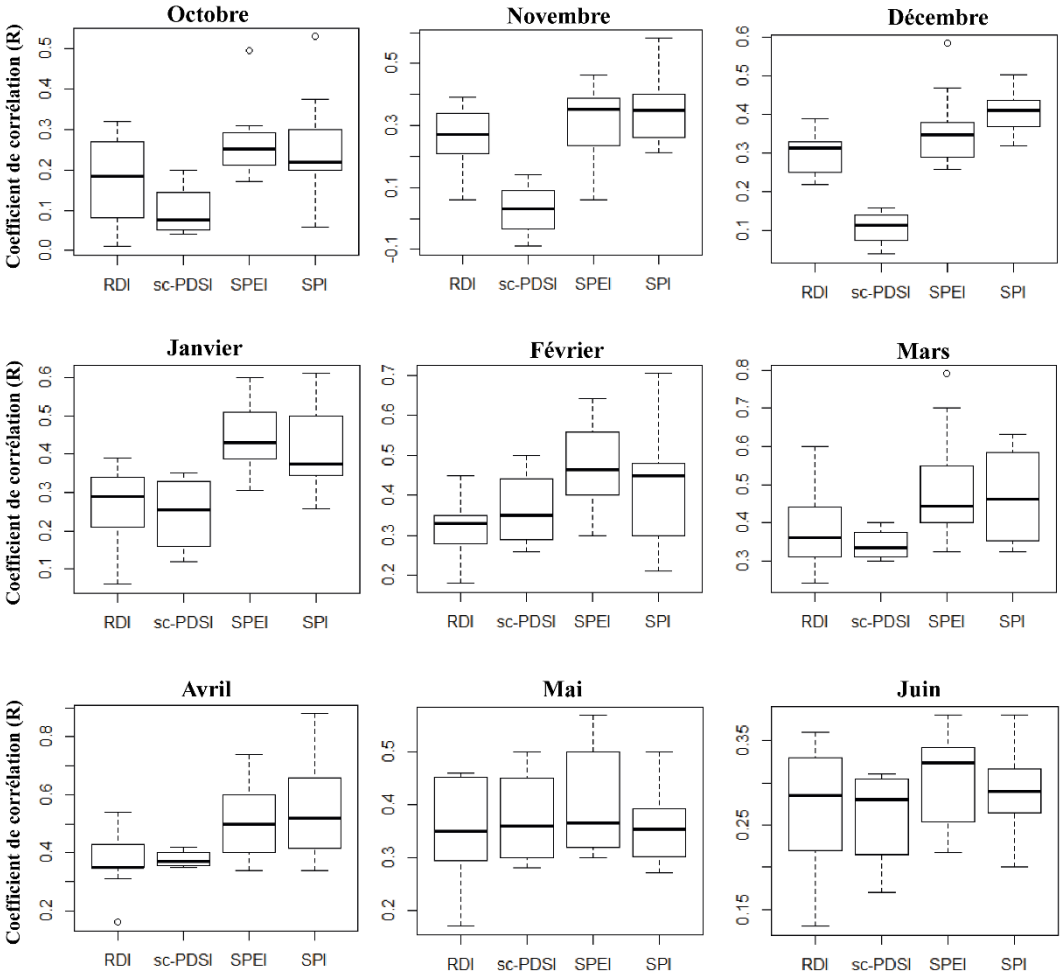


Figure 93 : Relation entre les indices de sécheresse et le rendement des céréales pluviales pendant la campagne du blé tendre (d'octobre de l'année précédente à juin de l'année en cours). Les limites supérieures et inférieures de la boîte indiquent les quartiles supérieurs et inférieurs, respectivement. La ligne dans la boîte indique la médiane, les lignes à l'extérieur de la boîte indiquent les limites supérieures et inférieures, et les cercles indiquent les valeurs aberrantes dans l'ensemble des données.

IV. Conclusion

L'étude menée dans le bassin Bas Sebou a évalué l'applicabilité et la performance régionales de quatre indices de sécheresse (DIs), SPI, SPEI, RDI et sc-PDSI, sur la base de séries temporelles de précipitations et de températures de quatre stations météorologiques au cours de la période 1984-2016 et de rendements céréaliers (2000-2016). La distribution spatio-temporelle des épisodes de sécheresse à l'aide des indices de sécheresse (DIs) montre que la sévérité et l'intensité des sécheresses ont augmenté depuis 2012. Tous les indices multi-scalaires révèlent quatre sécheresses annuelles typiques en 1995, 1999, 2012 et 2016. L'exception est l'indice sc-PDSI, qui a montré de nouveaux épisodes de sécheresse avec une tendance parfois durable. Plus important encore, l'évaluation de la performance des indices de sécheresse pour le suivi de l'effet du climat sur les rendements céréaliers a montré la meilleure performance des indices multiscalaires, tandis que de petites différences ont été détectées entre l'indice SPI et les indices SPEI et RDI dans la performance des systèmes agricoles. Les rendements de l'orge et

du blé sont plus vulnérables à la sécheresse pendant la phase de croissance intermédiaire (printemps), et les conditions d'humidité en hiver ont également un impact sur les rendements des cultures.

Les conditions climatiques dans le bassin Bas Sebou sont très diverses. Cela souligne la nécessité d'établir des indices précis et efficaces pour évaluer et surveiller l'effet du climat, en particulier dans les zones agricoles vulnérables. Par conséquent, nous suggérons dans le chapitre suivant, qu'une analyse plus approfondie en utilisant ces indices pourrait également aider à comprendre les mécanismes climatiques et biophysiques responsables de la distribution spatio-temporelle des conditions climatiques dans le bassin Bas Sebou. Cela pourrait contribuer à une meilleure compréhension des impacts de la variabilité et du changement climatiques sur l'agriculture et l'environnement dans la région. Les résultats de cette analyse pourraient également aider à informer les politiques et les pratiques agricoles pour améliorer la durabilité et la productivité des systèmes agricoles dans la région.

CHAPITRE V

ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE

I. Introduction 172
II. Données utilisées et méthodologie 174
II . 1. Données utilisées 174
II . 2. Indices de sécheresse (DIs) 174
II . 3. Identification et caractérisation des événements de sécheresse 175
II . 4. Analyse des tendances (test de Mann-Kendall) 175
II . 5. Sécheresses et anomalies climatiques à grande échelle 176
III. Résultats 177
III . 1. Évolution temporelle de l'indice SPI et de l'indice SPEI 177
III . 2. Variations mensuelles de l'indice SPI et de l'indice SPEI 179
III . 3. Variabilité temporelle 181
III . 4. Variabilité spatiale et interannuelle 182
III . 5. Cohérence entre les indices de sécheresse (DIs) et les indices climatiques à grande échelle ...184
IV. Discussion 186
V. Conclusion 187

CHAPITRE V
ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE DE LA SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE

Suite aux résultats de l'article présenté dans le chapitre précédant, le Bassin Bas Sebou a subi des sécheresses de plus en plus fréquentes et sévères au cours des dernières décennies. Cela nous a permis d'évaluer l'évolution spatio-temporelle des sécheresses à travers un ensemble d'indices, qui permettent de mesurer la gravité et l'impact de la sécheresse sur l'environnement et l'agriculture. En effet, les résultats obtenus suggèrent que l'utilisation d'indices multiscalaires tels que SPI et SPEI dans la surveillance et l'évaluation de la sécheresse est nécessaire afin de prendre en compte les différents aspects de la sécheresse et de ses effets.

De façon similaire au précédent, ce chapitre est construit autour d'évolution spatiotemporelle de la sécheresse dans le bassin Bas Sebou. Après s'être concentré la sélectionne des indices les plus appropriés pour étudier et surveiller les différents types de sécheresses dans le bassin Bas Sebou, il s'agit ici de caractériser la sécheresse et sa relation avec la dynamique atmosphérique à grande échelle. Le chapitre est construit autour d'un article publié dans la revue *Acta geographica Slovenica*, se focalisant sur l'évolution spatio-temporelle des sécheresses afin de déterminer les tendances et les régions les plus vulnérables à la sécheresse et les facteurs qui contribuent à cette vulnérabilité.



Hakam, O., Baali, A., Ait Brahim, Y., El Kamel, T., Azennoud, K. (2022). Spatiotemporal evolution of droughts and their teleconnections with large-scale climatic indices in the Lower Sebou basin in northwestern Morocco. Acta geographica Slovenica journal. DOI : https://doi.org/10.3986/AGS.10508

Résumé

Le Maroc, placé sous un climat méditerranéen, a la particularité d'être exposé à l'influence des perturbations provenant de l'Océan Atlantique, faisant des périodes de sécheresse reconnues au cours des quatre dernières décennies des phénomènes climatiques variables dans l'espace et dans le temps. L'application des indices de sécheresse les plus reconnus au niveau mondial (SPI- *Standardized Precipitation Index* et SPEI - *Standardized Evapotranspiration and Precipitation Index*) dans le bassin du Bas Sebou, montre que la durée, la fréquence et la sévérité des sécheresses ont augmenté depuis le début du 21ème siècle. La période sèche la plus longue est observée dans les régions situées à l'Est, en particulier dans le Sud-Est où la sévérité de la sécheresse correspondante est également intense. L'analyse des tendances saisonnières de la sécheresse montre des tendances significatives et confirme une augmentation de la température, indiquant un réchauffement accru en été et une diminution des précipitations en hiver. Ces résultats révélés et placés dans un contexte climatique régional encore plus large comprenant les deux oscillations atmosphériques dominantes telles que l'oscillation Nord-Atlantique (ONA) et l'oscillation Méditerranéenne (OM), suggèrent que les tendances significatives de la sécheresse déterminées dans le bassin Bas Sebou sont couplées aux faits relatifs des deux oscillations. Cette cohérence se manifeste par le fait qu'elles sont fortement influencées par les systèmes cycloniques de l'Atlantique Nord-Est qui forcent la cyclogenèse méditerranéenne.

Mots-clés : Sécheresse ; Téléconnexions ; Bassin Bas Sebou ; Maroc

Abstract

Morocco, placed under a Mediterranean climate, has the particularity of being exposed to the influence of disturbances coming from the Atlantic Ocean, making the drought periods recognized during the last four decades variable climatic phenomena in space and time. The application of the most globally agreed drought indices (Standardized Precipitation Index: SPI and Standardized Evapotranspiration and Precipitation Index: SPEI) in the Lower Sebou basin, located in the North-West, shows that the duration, frequency and severity of droughts have increased since the beginning of the 21st century. The longest dry period is observed in the regions located in the East, particularly in the Southeast where the severity of the corresponding drought is also intense. The analysis of seasonal drought trends shows significant trends and confirms an increase in temperature, indicating increased warming in summer and decreased precipitation in winter. These findings revealed and placed in the even broader regional climatic context including the two dominant atmospheric oscillations such as the North Atlantic oscillation (NAO) and the Mediterranean oscillation (MO); suggest that the significant drought trends determined in the lower Sebou basin are coupled to the relative facts of the two oscillations. This coherence is manifested by the fact that they are strongly influenced by the North-East Atlantic cyclonic systems that force the Mediterranean cyclogenesis.

Keywords: *Drought; Teleconnection; Lower Sebou basin; Morocc*

I. Introduction

La sécheresse est un phénomène climatique considéré comme l'une des catastrophes naturelles les plus dommageables au monde et qui touche un grand nombre de personnes chaque année. On estime que 55 millions de personnes sont touchées par la sécheresse chaque année dans le monde (Vatter *et al.,* 2019 ; UNODRR, 2021). La sécheresse survient lorsqu'il y a moins de précipitations dans une région pendant une longue période ou lorsqu'il y a une mauvaise répartition des précipitations sur une certaine période. La société météorologique américaine a classé les sécheresses en quatre types : sécheresse météorologique, sécheresse hydrologique, sécheresse agricole et sécheresse socio-économique (Yihdego *et al.,* 2019). Elles peuvent ne pas se produire simultanément, mais la sécheresse météorologique reste le moteur des autres (Wilhite, 2006). Cette sécheresse peut prendre la forme de sécheresses permanentes, comme ce qui se produit dans les climats arides et semi-arides ou méditerranéens pendant la saison estivale ou dans les régions subtropicales en hiver. Elle peut également se transformer en catastrophe naturelle lorsqu'elle devient très fréquente et dure plus longtemps. Par conséquent, l'évaluation et la caractérisation de la sécheresse météorologique sont très importantes pour comprendre ces risques. Cependant, l'évaluation des caractéristiques de la sécheresse et de sa variabilité spatiale reste très difficile (Vicente-Serrano *et al.,* 2020). À cette fin, de nombreux indices ont été développés pour identifier et caractériser quantitativement les événements de sécheresse, afin de surveiller et de prédire le début, la fin et les impacts de la sécheresse (Bayissa et al. 2018). D'autre part, aucun indice unique ne peut représenter tous les aspects de la sécheresse météorologique (Yihdego, Vaheddoost & Al-Weshah 2019). Pour surmonter cette contrainte, une approche multi-index a été adoptée pour la caractérisation de la sécheresse dans le bassin Bas Sebou. En conséquence, deux indices de sécheresse peuvent être utilisés comme base pour caractériser la sécheresse météorologique dans le bassin Bas Sebou, l'indice de précipitations normalisées (SPI) (McKee *et al.,* 1993) et l'indice de précipitations-évapotranspiration normalisées (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.,* 2010). Largement utilisés dans le monde (Vicente-Serrano *et al.,* 2012 ; Beguería *et al.,* 2014 ; Šebenik *et al.,* 2017) et recommandés par l'Organisation météorologique mondiale (WMO, 2012), ces indices ont été appliqués en raison de leur performance et de leur applicabilité régionale par rapport à d'autres indices de sécheresse, comme indiqué dans le chapitre précédent (Hakam *et al.,* 2022c). Les approches SPI et SPEI sont similaires, mais il existe des différences évidentes entre les paramètres d'entrée pour le calcul. Le calcul de SPI nécessite des données sur les précipitations et est bien adapté dans le temps et l'espace, mais SPEI utilise la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui peut tenir compte des effets possibles de la variabilité de la température et des températures extrêmes au-delà du contexte du réchauffement climatique.

Au Maroc, comme dans les zones semi-arides méditerranéennes, la sécheresse est l'une des catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus répandues et est devenue un élément structurel du climat du pays au cours des dernières décennies, comme le montrent Stigter *et al.,*

(2014) pour des études de cas dans le Sud du Portugal, en Espagne et au Maroc. Selon une étude récente de Woillez (2019), les précipitations au Maroc ont généralement diminué de manière significative sur la période 1951-2010, entre -10 et -25 mm par an dans le Nord du pays, avec des augmentations de température de l'ordre de +1 °C à +2 °C en moyenne annuelle entre 1901 et 2012. Sur les 30 dernières années, la tendance est nettement supérieure à la moyenne mondiale, avec + 0,42 °C par décennie en moyenne depuis 1990, contre + 0,28 °C par décennie en moyenne sur tous les continents (Woillez, 2019), entraînant une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes tels que les sécheresses et les inondations. Le bassin Bas Sebou n'a pas été épargnée au cours des dernières décennies et a connu des canicules en 1995 et 2001 et des inondations en 1996, 2002 et 2009 (ABHS, 2010a).

L'évolution spatio-temporelle des sécheresses dans le bassin Bas Sebou est contrôlée par l'hétérogénéité du paysage et des événements climatiques spécifiques tels que les anomalies météorologiques extrêmes et les circulations atmosphériques à grande échelle (Lamb & Peppler, 1987 ; Zamrane *et al.,* 2021 ; Hakam *et al.,* 2022a). Certaines études ont démontré une anti-corrélation entre les précipitations au Maroc, notamment dans la partie nord-ouest, et l'oscillation nord-atlantique (NAO) (Marchane *et al.,* 2016 ; Driouech *et al.,* 2021 ; Hakam *et al.,* 2022a). Sachant que le calcul de cette oscillation, qui fait sentir ses effets en hiver, est basé sur la différence de pression atmosphérique entre la dépression islandaise et l'anticyclone des Açores, négligeant l'oscillation méditerranéenne (OM) malgré la proximité de la mer Méditerranée. En effet, il a été démontré que l'indice iOM influence la variabilité saisonnière des précipitations dans le bassin méditerranéen, en particulier en hiver (Criado-Aldeanueva & Soto-Navarro, 2020). Actuellement, les études sur la sécheresse dans le bassin Bas Sebou sont rares, la plupart d'entre elles étant basées sur des approches statistiques simples (El Jihad *et al.,* 2014 ; Acharki *et al.,* 2019).

Plus vulnérable que les autres bassins, confrontée à de nombreuses sécheresses (Ajlal & Agoutime, 2021 ; Hakam *et al.,* 2022c) et faisant l'objet d'une alerte à la sécheresse par l'Observatoire régional de l'environnement et du développement durable au Maroc (OREDD, 2014), l'étude climatique dans le bassin Bas Sebou est devenue primordiale. Aucune étude régionale n'ayant ciblé les caractéristiques météorologiques de la sécheresse et sa relation avec la dynamique atmosphérique à grande échelle, une telle étude dans le bassin Bas Sebou en tant que grande plaine agricole permettrait de mettre en perspective les investissements de la stratégie Maroc-Plan Vert (38,6 milliards de dirhams) et les infrastructures menacées (MAPM, 2020). Cette stratégie vise à développer une agriculture moderne et performante répondant aux exigences des marchés nationaux et internationaux (22% des exportations totales du Maroc, soit environ 5,57 milliards de dollars) (Harbouze *et al.,* 2019). Cette étude ouvre également des portes pour le développement de systèmes d'alerte précoce à la sécheresse en Afrique du Nord, car la diffusion de ces données permettra de prendre des décisions proactives sur l'utilisation de l'eau et les pratiques agricoles.

II. Données utilisées et méthodologie

II . 1. Données utilisées

Les données météorologiques fournies par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb (ORMVAG) à partir des quatre stations météorologiques couvrent la période de 1984 à 2016. La répartition et les caractéristiques de ces stations sont présentées dans la **figure 81**.

Deux anomalies climatiques importantes à grande échelle ont été sélectionnées pour analyser les principaux facteurs de sécheresse dans le bassin Bas Sebou : l'ONA (oscillation Nord-Atlantique) et l'OM (oscillation Méditerranéenne) en raison de leur influence négative et significative sur la variabilité des précipitations du bassin Bas Sebou, comme le montre les sections précédentes. L'indice d'oscillation Nord-Atlantique (iONA) est un dipôle méridien de pression atmosphérique dont les centres d'action se situent près des Açores (37 °N, -25 °E) et de l'Islande (65 °N, -18 °E) (**Figure 69**). L'indice d'oscillation Méditerranéenne (iOM) est défini comme un comportement dipolaire de l'atmosphère entre les sous-bassins est-ouest de la Méditerranée. Cet indice mesurant l'intensité du dipôle a été défini comme les anomalies normalisées de hauteur 500 hPa entre Alger (36,4 °N, 3,1 °E) et Le Caire (30,1 °N, 31,4 °E) (**Figure 69**) (Conte *et al.,* 1989).

II . 2. Indices de sécheresse (DIs)

Les indices de sécheresse (DIs) permettent de convertir les variables indicatrices telles que la température et les précipitations en une valeur numérique afin de représenter l'étendue du déficit hydrique d'une manière facile à comprendre. Les DIs utilisés dans cette étude, à savoir *Standardized Precipitation Index* (SPI) et *Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index* (SPEI), caractérisent principalement la sécheresse météorologique (**Tableau 40**).

Tableau 40 : Caractéristiques des indices de sécheresse utilisés.

Indice	Variables	Distribution de probabilité	Référence
Standardized Precipitation Index (SPI)	P	Gamma	McKee, Doesken and Kleist (1993)
Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index (SPEI)	P, ETP	Log–Logistic (3 parameters)	Vicente-Serrano, Beguería and López-Moreno (2010)

Tableau 41 : Classification des indices SPI et de l'indice SPEI. L'échelle des couleurs indique les classes de sécheresse dans **la figure 93**.

SPI/SPEI	Valeur	Classe
	≥ 2	Extrêmement humide
	1.5 to 1.99	Très humide
	1 to 1.49	Modérément humide
	–0.99 to 0.99	Normal
	–1 to –1.49	Modérément sec
	–1.5 to –1.99	Très sec
	≤ –2	Extrêmement sec

II . 3. Identification et caractérisation des événements de sécheresse

La théorie des "runs" proposée par Yevjevich (1967) a été appliquée pour identifier et caractériser les événements de sécheresse météorologique basés sur les indices de sécheresse. Un événement de sécheresse est défini comme une séquence consécutive de mois (t) avec une valeur de l'indice de sécheresse (Xt) en dessous d'un seuil choisi (X_0) ; ainsi chaque événement de sécheresse est caractérisé par les paramètres suivants (**Figure 94**) :

- la durée de la sécheresse (D) est définie comme l'intervalle de temps entre le début et la fin d'un événement de sécheresse ;
- l'intensité de la sécheresse (Is) est définie comme le nombre de mois pendant lesquels les valeurs de l'indice sont inférieures à -1 ;
- la gravité de la sécheresse (S) est définie comme la somme des valeurs DIs mensuelles lorsqu'elles sont inférieures à -1 (X_0) pendant la période considérée ;
- l'intensité maximale (P) indique la valeur de l'indice la plus basse au cours d'un événement de sécheresse.

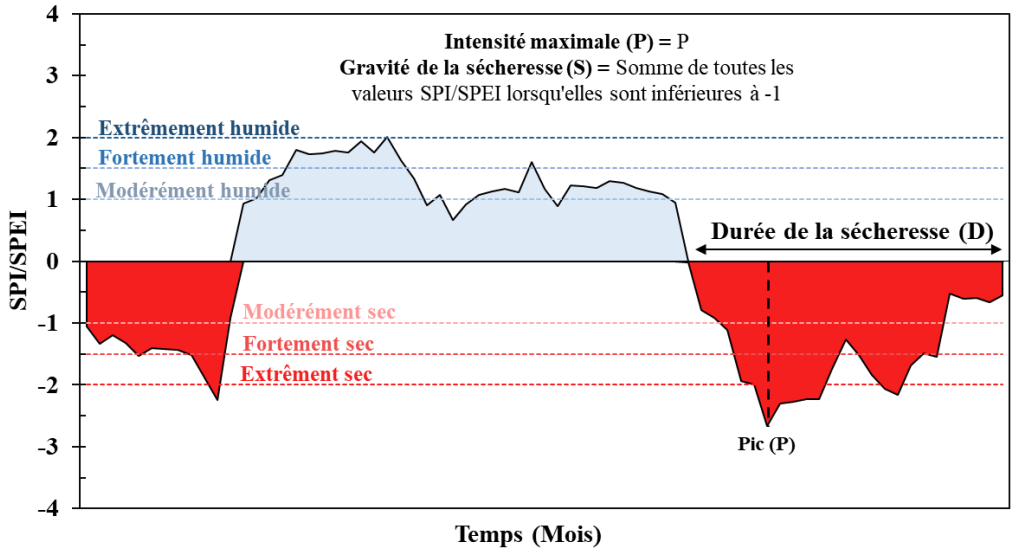


Figure 94 : Caractéristiques de la sécheresse selon la théorie de "Run".

II . 4. Analyse des tendances (test de Mann-Kendall)

Le test de tendance de Mann Kendall (MK) permet de détecter la présence d'une tendance monotone dans une série temporelle de variables hydro-climatiques (Acharki *et al.*, 2019). Dans ce chapitre, le test MK est appliqué pour analyser les caractéristiques temporelles des indices SPI et SPEI.

Afin de trouver une tendance monotone dans les séries temporelles utilisées, il est nécessaire d'identifier la période de début des tendances. La statistique du test séquentiel de Mann-Kendall (SQMK- *Sequential Mann-Kendal*) est donc particulièrement utile pour une telle analyse de détection des changements (Gerstengarbe & Werner, 1999). La procédure de test

SQMK est différente du test Z-score et se compose des étapes suivantes :

- Les valeurs de la série x sont remplacées par leurs rangs r_i, classés par ordre croissant ;
- Les quantités r_i (i = 1, 2, ..., n) sont comparées à r_j (j = 1, 2, ..., i -1) ;
- La statistique t_i est définie comme suit :

$$t_i = \sum_{k=1}^{i} n_k \quad \textbf{(23)}$$

- La variance de la statistique var (t_i) et la moyenne E (t_i) du test sont calculées comme suit:

$$E(t_i) = \frac{i(i-1)}{4} \quad \textbf{(24)}$$

Et

$$var(t_i) = \frac{i(i-1)(2i+5)}{72} \quad \textbf{(25)}$$

- Les valeurs de la statistique u(t_i) peuvent alors être calculées comme suit :

$$u(t_i) = \frac{[t_i - E(t_i)]}{\sqrt{var(t_i)}} \quad \textbf{(26)}$$

Alors que la statistique séquentielle directe, u(t_i), est estimée à l'aide de la série temporelle originale x1, x2... x_n, les valeurs de la statistique séquentielle rétrospective, u'(t_i), sont estimées de la même manière, mais en commençant par la fin de la série. Lors de l'estimation de u'(t_i), la série temporelle est réorganisée de manière à ce que la dernière valeur de la série temporelle originale apparaisse en premier xn, x_{n-1}...1. La version séquentielle de la statistique du test de Mann-Kendall permet de détecter le début approximatif d'une tendance en développement. Lorsque les courbes u(t_i) et u'(t_i) sont tracées, l'intersection des courbes u(t_i) et u'(t_i) localise approximativement le point d'inflexion potentiel de la tendance. Si l'intersection des courbes u(t_i) et u'(t_i) se situe entre ± 1,96 (niveau de confiance de 95 %) de la statistique normalisée Z, on peut en déduire qu'il y a eu un changement détectable à ce moment de la série temporelle. En outre, si au moins une valeur de la variable réduite est supérieure à un niveau de signification choisi de la distribution gaussienne, l'hypothèse nulle (H_0 : l'échantillon étudié ne montre pas le début d'une nouvelle tendance) est rejetée.

II . 5. Sécheresses et anomalies climatiques à grande échelle

Pour rechercher d'éventuelles relations, l'analyse de la cohérence en ondelettes a été appliquée aux SPI et SPEI et aux indices d'anomalies climatiques à grande échelle, tels que iONA et iOM. La cohérence des ondelettes est une approche utilisée pour analyser le degré de cohérence de la transformée en ondelettes croisées dans l'espace-temps-fréquence. Elle a été

largement utilisée pour analyser la périodicité de la sécheresse et les relations entre la variabilité hydrologique et les éventuelles téléconnexions (Zamrane *et al.,* 2021).

Selon Torrence & Webster (1999), le coefficient de cohérence des ondelettes peut être défini comme suit (Chang *et al.,* 2019) :

$$R^2(\alpha,\tau) = \frac{|S(\alpha^{-1}W_{xv}(\alpha,\tau))|^2}{S(\alpha^{-1}|W_x(\alpha,\tau)|^2)*S(\alpha^{-1}|W_y(\alpha,\tau)|^2)} \quad \textbf{(27)}$$

Où $R^2(\alpha,\tau)$ prend des valeurs comprises entre 0 (pas de cohérence) et 1 (cohérence parfaite), α est le paramètre d'expansion d'échelle, τ est le paramètre de décalage temporel sans dimension, $W_{xy}(\alpha, \tau)$ est la transformée en ondelettes croisée des deux séries temporelles, W_x et W_y sont les sommes des rangs des observations dans les échantillons x_t et y_t, respectivement, et S représente un opérateur de lissage, qui est défini comme suit :

$$S(W) = S_{scale}\left(S_{time}(W(\alpha,\tau))\right) \quad \textbf{(28)}$$

Où S_{scale} et S_{time} représentent le lissage le long de l'axe d'échelle des ondelettes et dans le temps, respectivement.

III. Résultats

III . 1. Évolution temporelle de l'indice SPI et de l'indice SPEI

Les valeurs mensuelles des indices SPI et SPEI qui ont été calculées sur quatre échelles de temps (1, 3, 6 et 12 mois) peuvent être utilisées pour le suivi et l'évaluation de différents types de sécheresse et leur application complète peut permettre une détection et une évaluation globales des sécheresses et des inondations. Ils ont d'abord été calculés à l'aide des deux données climatiques mensuelles observées par quatre stations météorologiques entre 1984 et 2016. Ensuite, les séries temporelles de SPI et SPEI ont été moyennées sur les quatre stations pour caractériser les conditions sèches ou humides dans le bassin Bas Sebou. **La figure 95** montre le processus de changement de l'indice SPI et de l'indice SPEI à différentes échelles temporelles (1, 3, 6 et 12 mois) au cours de la période 1984-2016. Les deux indices indiquent une gravité extrême de la sécheresse après le début du 21ème siècle, où la fréquence et l'intensité des périodes de sécheresse augmentent. Il convient de noter que plus l'échelle de temps est longue, plus la gravité et la durée de la sécheresse sont évidentes. Des périodes ou années de sécheresse typiques se sont produites en 1992-1995, 1999-2002, 2005-2006, 2012 et 2015-2016 en appliquant les indices sur une échelle annuelle (SPI-12 et SPEI-12). Cependant, les indices ont fluctué fréquemment, avec une large gamme, sur des échelles de temps de 1 et 3 mois, ce qui suggère l'impact du changement climatique à court terme. En outre, l'éventail des fluctuations positives et négatives de l'indice SPI était plus large que celui de l'indice SPEI. Cependant, sur des échelles de temps plus longues (6 et 12 mois), les valeurs de l'indice SPI et de l'indice SPEI ont eu une tendance régulière, la volatilité a diminué et les caractéristiques des changements interannuels et inter-décennaux étaient évidentes, d'où l'augmentation de la durée de la

sécheresse. La tendance temporelle de l'indice SPI et de l'indice SPEI a montré une évolution relativement stable et une différence d'amplitude plus faible à différentes échelles temporelles, mais il existe de légères différences dans la valeur de fluctuation et la continuité, ce qui explique les différentes intensités et fréquences de la sécheresse. La différence entre SPI et SPEI diminue avec l'augmentation de l'échelle temporelle, où les valeurs fluctuent entre -4 et 4 à des échelles temporelles courtes (1 mois) et entre -1 et 1 à des échelles temporelles longues (12 mois). En outre, il convient de noter que cette différence s'est accrue au cours des dernières années (**Figure 96**).

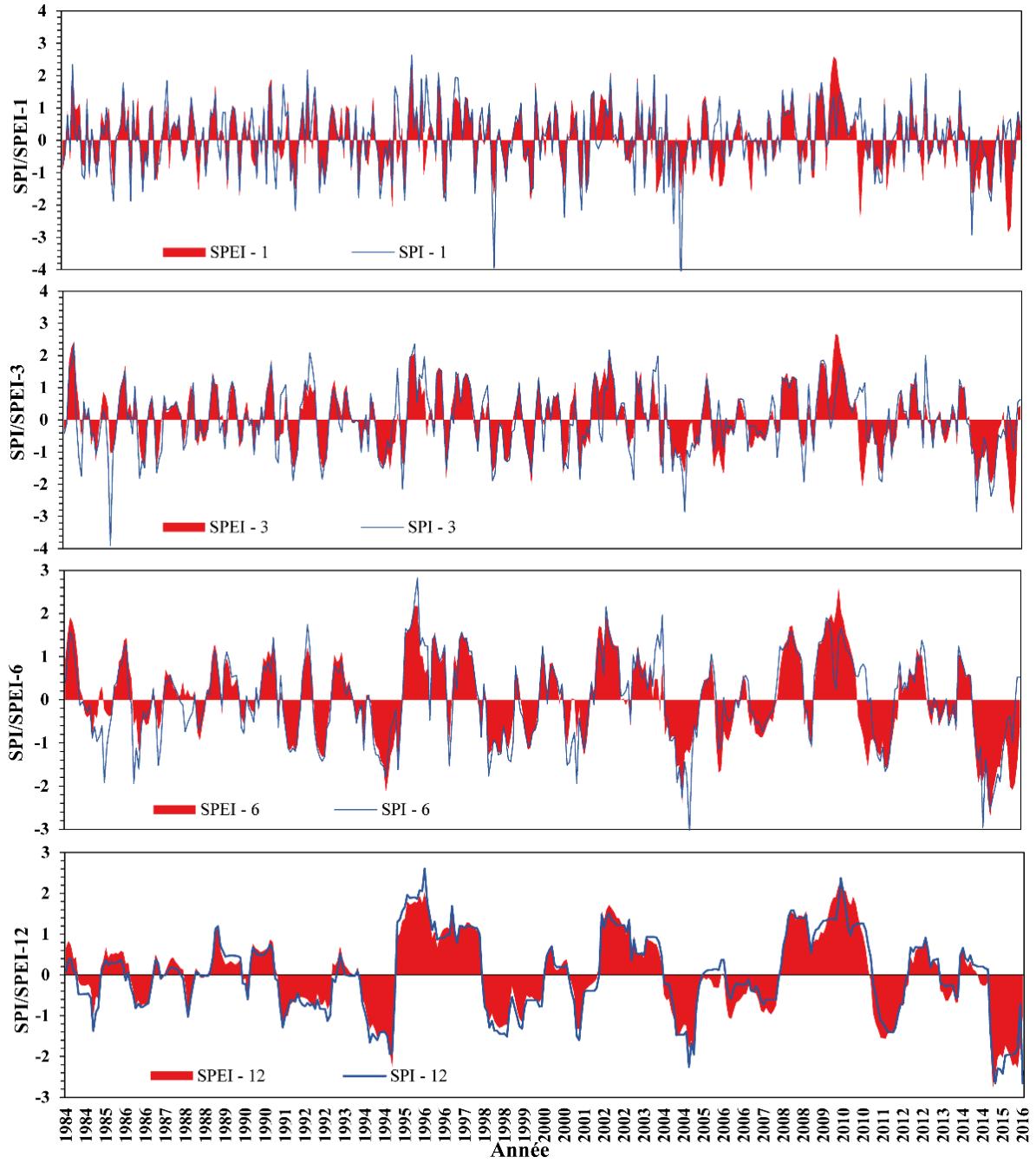


Figure 95 : Évolution temporelle de l'indice SPI et de l'indice SPEI aux échelles de 1, 3, 6 et 12 mois au cours de la période 1984-2016.

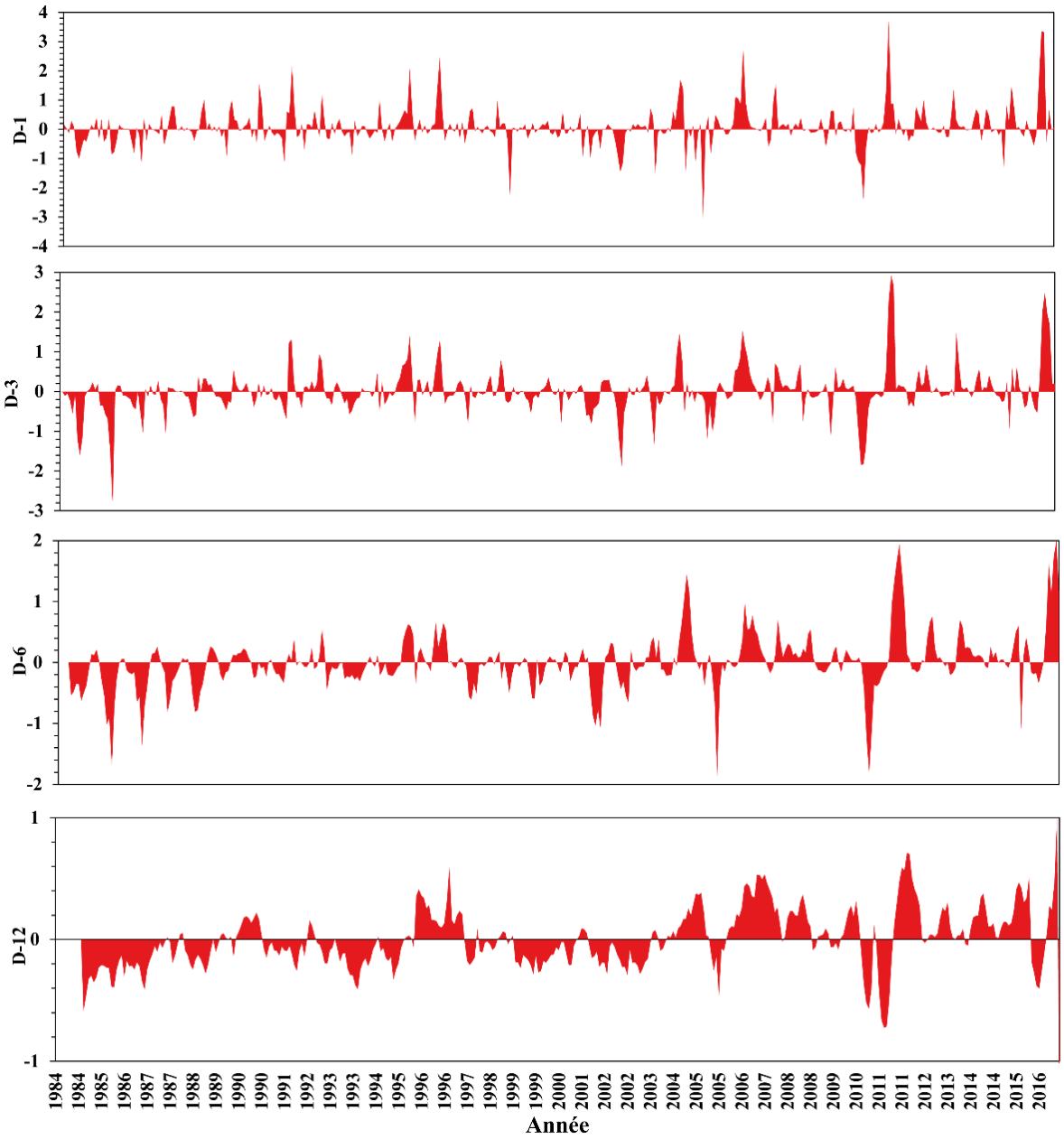


Figure 96 : Différence (D) entre les indices SPI et SPEI dans les différentes échelles de temps (1, 3, 6 et 12 mois) au cours de la période 1984-2016.

III . 2. Variations mensuelles de l'indice SPI et de l'indice SPEI

Les valeurs de la distribution mensuelle des indices SPI et SPEI étaient assez claires à différentes échelles temporelles, ce qui peut refléter la variation des conditions sèches et humides pour chaque mois dans le bassin Bas Sebou (**Figure 97**). Il est clair que la durée et l'intensité de la sécheresse au cours de certains mois ont considérablement augmenté et que l'effet des échelles temporelles sur la durée et l'intensité de la sécheresse est évident, en particulier après le début du 21ème siècle. Il est également observé que les sécheresses reflétées par SPI et SPEI sont légèrement différentes pour chaque mois et à différentes échelles de temps, en particulier à l'échelle d'un et de trois mois. Ainsi, **la figure 97** montre que la distribution de la sécheresse exprimée par l'indice SPI était aléatoire sur des échelles courtes (1 mois et 3 mois),

en particulier pendant la saison hivernale. Les mois secs reflétés par SPEI-1 et SPEI-3 étaient concentrés dans les mois d'hiver avant 2004, et après cette année, les mois secs commencent à se déplacer vers l'été et la fin de l'année (décembre). En outre, les sécheresses reflétées par SPEI étaient plus fréquentes sur des échelles de temps courtes, en particulier un mois, tandis que les sécheresses reflétées par SPI étaient courantes sur des échelles de 6 mois et 12 mois ; ce qui reflète l'effet du paramètre d'évapotranspiration inclus dans le calcul SPEI sur la variation des conditions de sécheresse dans le bassin Bas Sebou.

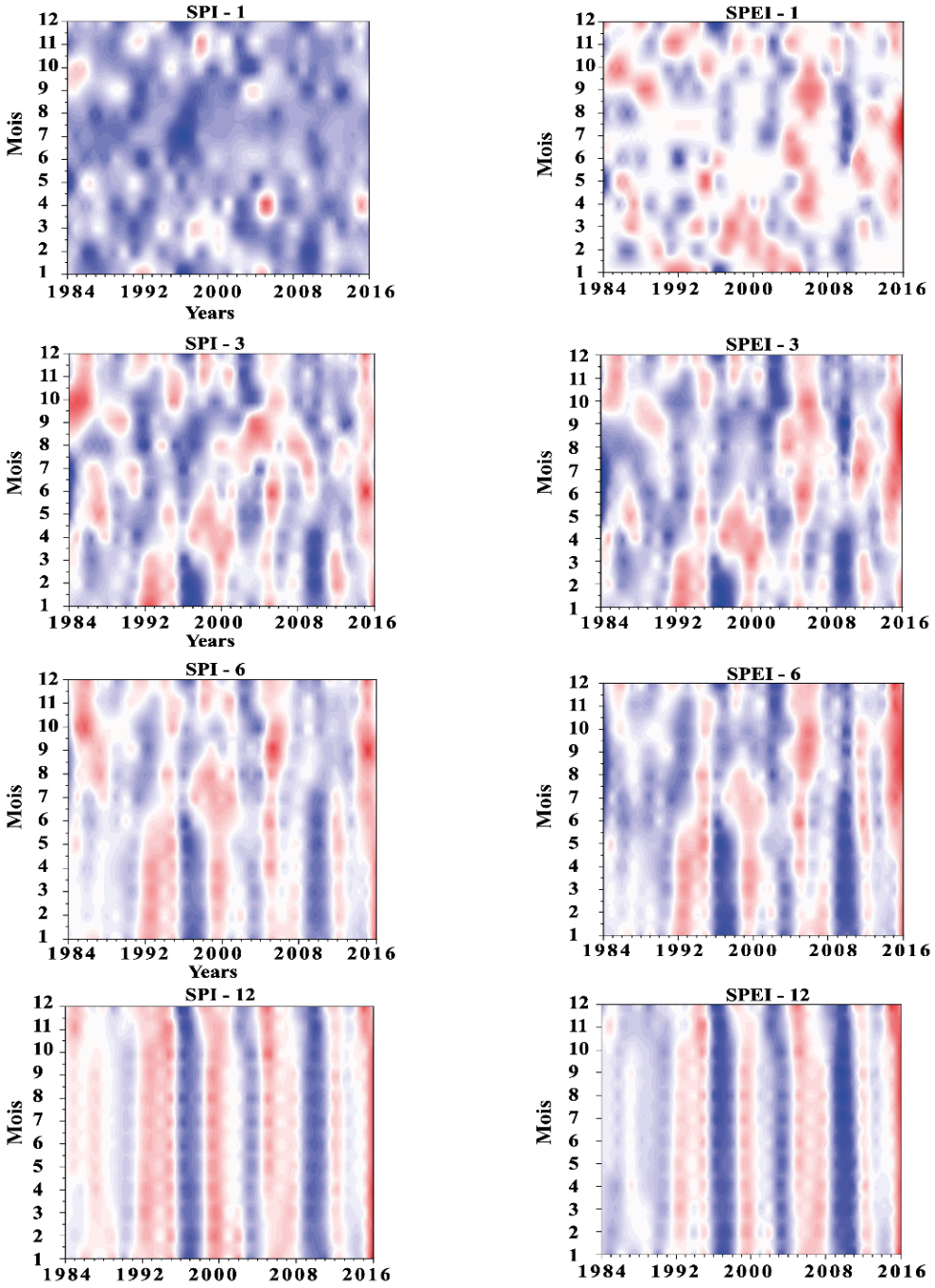


Figure 97 : Variations mensuelles des indices SPI et SPEI aux échelles temporelles de 1, 3, 6 et 12 mois pendant la période 1984-2016 dans le bassin Bas Sebou, Les indications de la légende des couleurs sont obtenues dans **le tableau 41**.

III . 3. Variabilité temporelle

L'évolution des valeurs SPEI et SPI et les tendances annuelles et saisonnières, ainsi que les résultats graphiques du test SQMK ont permis d'identifier l'année où le point d'inflexion et l'ampleur du changement se sont produits dans le bassin Bas Sebou. Sachant que le point d'inflexion identifié et l'ampleur de l'année de changement pour chaque période représentent le début d'une tendance négative ou positive (**Figure 98**).

Les valeurs annuelles et saisonnières (hiver, printemps, été et automne) du ZSPEI étaient respectivement de -0,85, -0,50, -0,26, -3,51 et 0,54, et montraient une tendance à la baisse, à l'exception de la saison d'automne (Z_{SPEI} = 0,54). Alors que les valeurs annuelles et saisonnières de Z_{SPI} étaient respectivement de 0,39, -0,60, -0,23, -2,25 et 1,07, contrairement à SPEI, Z_{SPI-12} a montré une tendance à la hausse (**Figure 98**). Selon les indices SPI et SPEI, des épisodes de sécheresse extrême à l'échelle annuelle ont été observés en 2006 et 2016. En ce qui concerne les sécheresses saisonnières, l'hiver a été le plus touché par la sécheresse, suivi du printemps, alors que l'indice SPEI considère l'automne comme la saison la moins sujette à la sécheresse. Il convient de noter que les courbes u(t) et u'(t) de l'indice SPI à l'échelle annuelle et automnale étaient en très bon accord, ce qui pourrait suggérer que les précipitations annuelles sont principalement influencées par les précipitations automnales (**Figure 98**). En général, les séries SPI et SPEI ont montré une grande variabilité, sans tendance significative au cours de la période étudiée, sauf pour l'été où les sécheresses les plus sévères n'ont été enregistrées qu'à partir de l'année 2000. Comme le montre **la figure 98**, les tendances à la baisse en été ont été très significatives de 2004 à 2016 à un niveau de signification de 95 %, de sorte que l'intersection des courbes u(t) et u'(t) de SPI-3 et SPEI-3 pendant la saison estivale s'est produite en 1998 et 2003, respectivement, et a dépassé la limite de confiance en 2004 (**Figure 98**). Ceci est clairement indiqué dans la variation mensuelle de SPEI-3 et SPI-3 dans **la figure 97**.

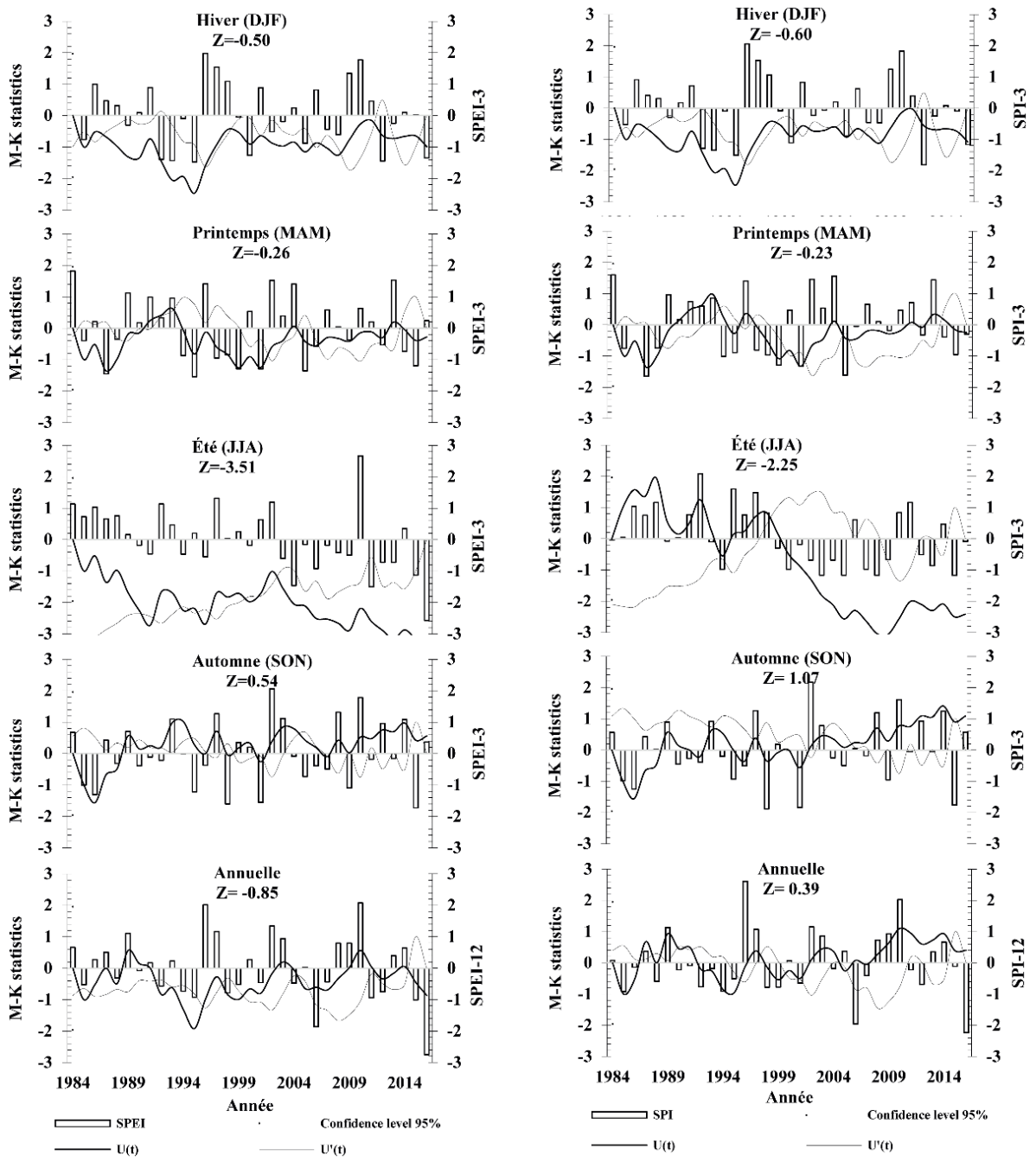


Figure 98 : Variations saisonnières et annuelles du test de tendance MK et changements abrupts de SPEI (à gauche) et SPI (à droite) dans le bassin Bas Sebou au cours de la période 1984-2016.

III . 4. Variabilité spatiale et interannuelle

À l'échelle annuelle, la distribution spatiale des tendances de la durée de la sécheresse de SPI et SPEI a été interpolée par la méthode de pondération inverse à la distance (en anglais, inverse distance weighting ou IDW) dans un environnement SIG (**Figure 99a**). La durée de la sécheresse reflétée par SPI-12 et SPEI-12 était identique avec une distribution spatiale opposée. En termes de tendances, toutes les stations ont montré des tendances à la hausse non significatives ; cependant, l'indice SPI-12 a suggéré que les deux stations (Lalla Mimouna et Mnasra) ont montré une tendance à la baisse (tendance à être humide). En revanche, les autres

stations ont montré une tendance à la hausse, principalement situées à l'intérieur du bassin Bas Sebou. La durée des sécheresses dans le bassin Bas Sebou a augmenté d'Ouest en Est. Le SPEI-12 a montré que la durée de la sécheresse est plus longue dans les régions occidentales et plus courte dans la partie Nord-Est du bassin.

La distribution spatiale des tendances de la sévérité de la sécheresse dans le bassin Bas Sebou était différente de celle de la durée de la sécheresse, où la station de Mnasra a enregistré la période la plus longue et la moins sévère en même temps (**Figure 99b**). Cependant, les indices SPI-12 et SPEI-12 ont montré un comportement général similaire de la distribution de la sévérité de la sécheresse, à l'exception de la station de Zirara. Les sécheresses ont été plus fréquentes dans le Nord-Est du bassin, en particulier dans la station de Mechra Bel Ksiri. En termes de tendance, toutes les stations ont montré des tendances à la hausse, seules les stations de Lalla Mimouna et de Mechra Bel Ksiri ont enregistré une tendance à la hausse significative pour SPEI et SPI respectivement, principalement dans le Nord-Ouest et le Nord-Est du bassin. En général, les sécheresses se produisent dans le bassin en montrant des tendances significatives à la hausse.

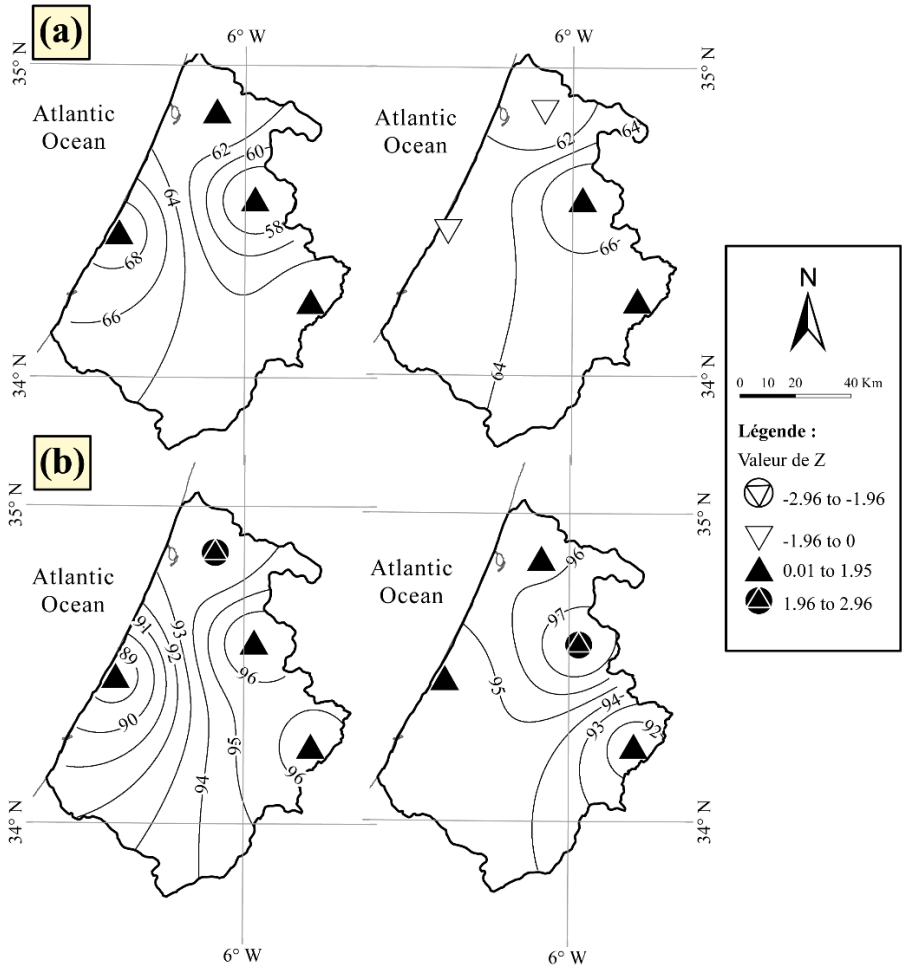


Figure 99 : Distribution des tendances de la durée de la sécheresse (a) et de la sévérité de la sécheresse (b) pour SPEI (gauche) et SPI (droite). Tendance positive significative (Z > 1,96), tendance non significative (-1,95 < Z > 1,96) et tendance négative significative (Z < -1,95).

III . 5. Cohérence entre les indices de sécheresse (DIs) et les indices climatiques à grande échelle

La cohérence par ondelettes (CO) identifie à la fois les bandes de fréquence et les intervalles de temps des covariations entre SPI et SPEI, et les indices climatiques à grande échelle (c.-à-d. iOAN et iOM) dans le bassin Bas Sebou (**Figures 100 et 101**). La cohérence par ondelettes, dont la valeur varie de 0 à 1, mesure la corrélation croisée entre la sécheresse et les indices climatiques en fonction de la fréquence. L'ombrage coloré représente l'ampleur de la cohérence, comme indiqué dans la barre de couleur, indiquant la variabilité à l'échelle temporelle de la corrélation entre les deux séries temporelles. Les contours blancs représentent les sections significatives qui ont un niveau de signification de 95 %. Les flèches représentent la cohérence (orientée vers la droite : corrélation positive, orientée vers la gauche : corrélation négative). Comme le montrent **les figures 100 et 101**, pour une périodicité plus courte de moins d'un an, une cohérence significative entre les indices de sécheresse et les indices climatiques (iONA et iOM) a été observée de manière intermittente d'une année à l'autre. Une forte cohérence négative est détectée autour de 8-16 ans (pluriannuelle) tout au long de la période considérée (1984-2016). L'ONA a une relation de premier ordre avec la variation de la sécheresse sur une période de 8 à 16 ans, apparaissant depuis 1990 pour SPI et pendant toute la période considérée (1984-2016) pour SPEI. Une énergie considérable est observée pendant une courte période au milieu des années 1990 et de 2006 à 2015 pour le groupe des 2-4 ans (**Figure 100**). Dans le cas de l'OM, la cohérence avec les indices de sécheresse était presque similaire à celle de l'ONA, mais avec une faible énergie. Les mêmes énergies sont détectées pendant les mêmes périodes de l'ONA (**Figure 101**). L'ONA présente principalement une forte cohérence négative, tandis que dans l'OM, la cohérence est en partie positive et en partie négative.

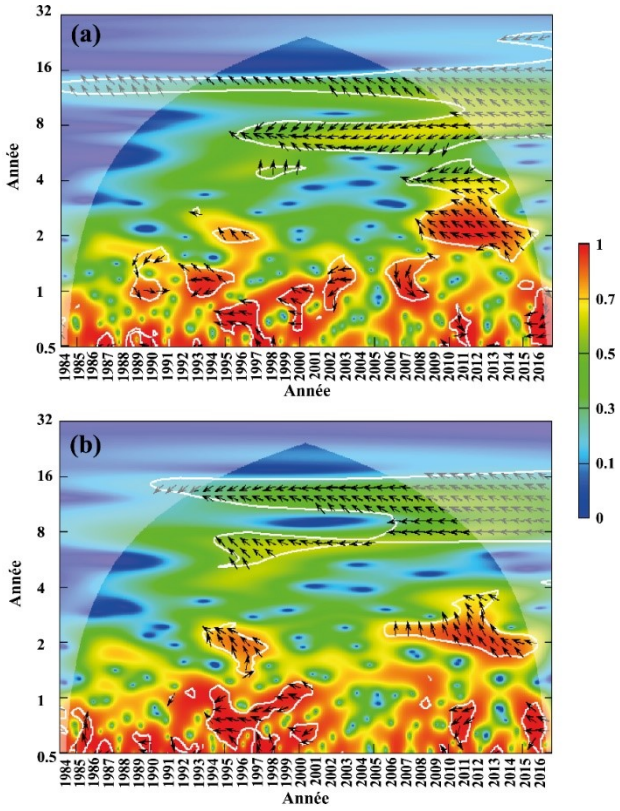


Figure 100 : Spectre de cohérence des ondelettes entre les indices climatiques à grande échelle (ONA) et les séries SPEI (a) et SPI (b). Les couleurs allant du bleu au rouge indiquent une cohérence croissante. Le niveau de signification de 95 % par rapport au bruit rouge est représenté par un contour blanc.

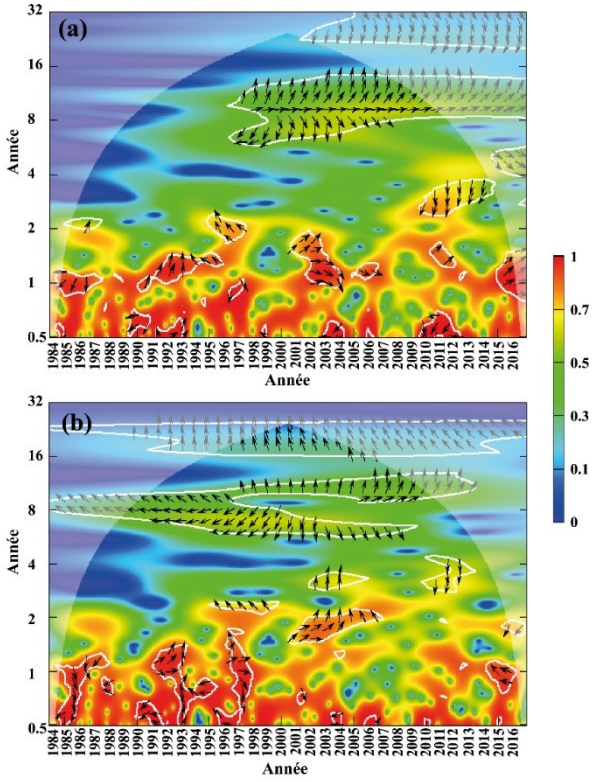


Figure 101 : Spectre de cohérence des ondelettes entre les indices climatiques à grande échelle (OM) et les séries SPEI (a) et SPI (b). Les couleurs allant du bleu au rouge indiquent une cohérence croissante. Le niveau de signification de 95 % par rapport au bruit rouge est représenté par un contour blanc.

IV. Discussion

Les résultats révèlent quelques différences entre les indices de sécheresse dans le suivi de la sécheresse, constatées dans la plupart des études (Liu *et al.,* 2021 ; Hakam *et al.,* 2022c), qui sont dues à la variation des conditions climatiques dans les différentes stations du bassin Bas Sebou et surtout la station Zirara. Le fait que le calcul des indices de sécheresse soit basé sur les précipitations et que la variabilité des précipitations soit beaucoup plus importante que celle de l'ETP, considérée comme stationnaire (sans tendance temporelle), l'importance de cette dernière serait négligeable et les conditions de sécheresse sont presque contrôlées par la variabilité temporelle des précipitations. Cependant, certains auteurs ont mis en garde contre le fait de négliger systématiquement l'importance de l'effet de la température sur les conditions de sécheresse, et de nombreuses études empiriques ont montré que l'augmentation de la température affecte de manière significative la sévérité de la sécheresse (McGuire *et al.,* 2010 ; Linares & Camarero, 2012). En raison de la prise en compte de la température par SPEI, l'évolution de la sécheresse annuelle a montré une tendance à la baisse, alors que la sécheresse reflétée par SPI-12 a montré une tendance à la hausse, de sorte que la performance de SPI pourrait être insuffisante pour renforcer les conclusions sur la tendance au réchauffement du climat au Maroc.

À l'échelle saisonnière, tant SPI-3 que SPEI-3 ont montré des tendances à la baisse, à l'exception de l'automne où SPI-3 a enregistré une valeur positive (Z_{SPI-3} = 1,07). Cela indique que la saison d'automne serait marquée par une légère augmentation des précipitations et un déplacement de la saison la plus humide de l'année, étant donné que les précipitations sont relativement plus abondantes en automne et moins abondantes en hiver (Z_{SPI-3} = -0,60). Par conséquent, la sécheresse automnale qui a commencé en septembre a été de moins en moins sévère dans le bassin Bas Sebou et lorsque les pluies ont commencé tôt avec une forte intensité, on peut s'attendre à une sécheresse hivernale (**Figure 97**). Ces résultats confirment davantage les conclusions d'Acharki *et al.,* (2019) et de Diani *et al.,* (2019). En outre, SPI-3 et SPEI-3 ont montré que la saison estivale était la plus sujette à la sécheresse, avec une tendance à la baisse significative au niveau de confiance de 95 %, déclenchée en 2004 (**Figures 97 et 98**). Ce déclenchement de mois secs peut expliquer l'augmentation des températures moyennes à partir de l'année 2004 (Driouech, 2010). Ainsi, l'intensification des épisodes de sécheresse en été est également liée à la nature des vents qui prévalent en cette saison, à savoir les vents continentaux chauds du Sud-Est (Chergui et Sirocco). Ces vents ont conduit à une évapotranspiration élevée marquée par la tendance de SPEI-3 à la valeur la plus basse de Z (Z_{SPEI-3} = -3.52) et les faibles quantités de précipitations reçues sont principalement d'origine orageuse (Z_{SPEI-3} = -2.25). En ce qui concerne la saison hivernale, aucun mois n'a échappé à la sécheresse, que ce soit par SPI-3 ou par SPEI-3 et même sur des échelles de temps différentes. La sécheresse anormale des mois de la saison des pluies est due à une fréquence relative de situations anticycloniques aléatoires. Cette sécheresse hivernale semble varier d'un mois à l'autre et est plus courte que celle de la saison estivale (**Figure 97**). La raison en est que les situations anticycloniques hivernales, générant un temps sec et froid, sont moins persistantes que le temps stable et chaud

de l'été (anticyclones d'été), et donc plus rapidement dégradées par les perturbations pluviométriques.

Le climat du bassin Bas Sebou est soumis aux contrastes du climat méditerranéen concomitant aux influences océaniques qui lui confèrent des rythmes climatiques particuliers d'une part, et d'autre part aux vents du Nord-Ouest, à la rencontre des chaînes ibériques (Espagne) arrivant secs au Nord-Ouest du Maroc. De plus, il y a une simple succession de deux environnements climatiques (cyclonique et anticyclonique), qui ont une influence remarquable sur la variabilité interannuelle du climat au Maroc (Driouech *et al.,* 2021) et en particulier dans le bassin Bas Sebou (Hakam *et al.,* 2022a). L'influence dominante des indices climatiques à grande échelle sur l'évolution de la sécheresse s'est légèrement manifestée dans le bassin Bas Sebou. L'analyse de cohérence par ondelettes indique une influence significative des indices climatiques (iONA et iOM) sur la variabilité de la sécheresse à l'échelle annuelle à pluriannuelle (5 ans), en particulier pendant les années avec des conditions de sécheresse. L'ONA et l'OM ont été fortement influencés par les systèmes cycloniques de l'Atlantique Nord-Est qui forcent la cyclogenèse méditerranéenne (Zeroual *et al.,* 2017), induisant une forte corrélation entre eux (Criado-Aldeanueva *et al.,* 2014). L'OM peut être définie comme une oscillation des anomalies de pression au niveau de la mer (SLP) en Méditerranée centrale et occidentale, une source importante de cyclogenèse. Comme l'occurrence de ces cyclones est en partie liée à l'activité des fronts de l'Atlantique Nord gouvernés par l'ONA, on peut s'attendre à une forte corrélation (Criado-Aldeanueva & Soto-Navarro, 2020). Par exemple, Angulo-Martínez & Beguería (2012) ont constaté que la force érosive des précipitations dans le bassin de l'Èbre (Nord-Est de l'Espagne) est la plus forte pendant les phases négatives de l'ONA et de l'OM. Elle est plus faible pendant les phases positives.

La surveillance efficace de la sécheresse météorologique dépend fortement des données d'observation (in situ), telles que la durée de l'observation, la source authentique, la densité spatiale et les critères critiques utilisés pour l'analyse, les tendances et la périodicité. En outre, l'analyse des modèles climatiques mondiaux et régionaux pourrait fournir la dynamique physique du changement climatique et améliorer la fiabilité des résultats de l'analyse.

V. Conclusion

L'évaluation de l'évolution spatiotemporelle de la sécheresse météorologique dans le bassin Bas Sebou et sa relation avec la dynamique atmosphérique à grande échelle. En appliquant des indices de sécheresse de sécheresse sélectionnés dans le chapitre précédant, montre que la durée, la fréquence et la sévérité des sécheresses ont augmenté depuis le début du 21ème siècle. La période sèche la plus longue est observée dans les régions situées à l'intérieur du bassin Bas Sebou, en particulier dans le Sud-Est où la sévérité de la sécheresse correspondante est également intense. L'analyse des tendances saisonnières de la sécheresse montre des tendances significatives et confirme une augmentation de la température, indiquant un réchauffement accru en été et une diminution des précipitations en hiver. Ces résultats

révélés et placés dans un contexte climatique régional encore plus large comprenant les deux oscillations atmosphériques dominantes telles que l'oscillation nord-atlantique (ONA) et l'oscillation méditerranéenne (OM), suggèrent que les tendances significatives de la sécheresse déterminées dans le bassin Bas Sebou sont couplées aux faits relatifs des deux oscillations.

En effet, lorsque la sécheresse météorologique persiste, la quantité d'eau disponible pour les cultures et le sol diminue progressivement, ce qui peut entraîner une sécheresse agricole. Les rendements agricoles peuvent être considérablement réduits en raison de la pénurie d'eau. De plus, la sécheresse météorologique peut également affecter la qualité des cultures. Une période prolongée de sécheresse peut rendre les plantes plus vulnérables aux maladies et aux parasites. Les cultures peuvent également être affectées par la chaleur et les vents forts, qui peuvent assécher encore plus les sols et les plantes.

En somme, la sécheresse météorologique peut avoir un impact considérable sur la sécheresse agricole en affectant la disponibilité et la qualité de l'eau pour les plantes. Les agriculteurs doivent donc être conscients de l'impact de la sécheresse sur leurs cultures et mettre en place des pratiques agricoles adaptées pour faire face à cette situation difficile. Dans le chapitre suivant, les résultats précédents seront utilisés pour évaluer et quantifier l'impact de la sécheresse agricole sur la santé de la végétation. Plus précisément, on examinera comment les conditions de sécheresse ont affecté la croissance des plantes, la production agricole et la santé globale des écosystèmes. On pourra également étudier l'impact de la sécheresse sur la santé humaine, notamment en ce qui concerne la sécurité alimentaire. Les résultats de cette analyse pourraient aider les décideurs à comprendre les risques liés à la sécheresse et à élaborer des stratégies pour atténuer ses effets négatifs sur les populations et les écosystèmes touchés.

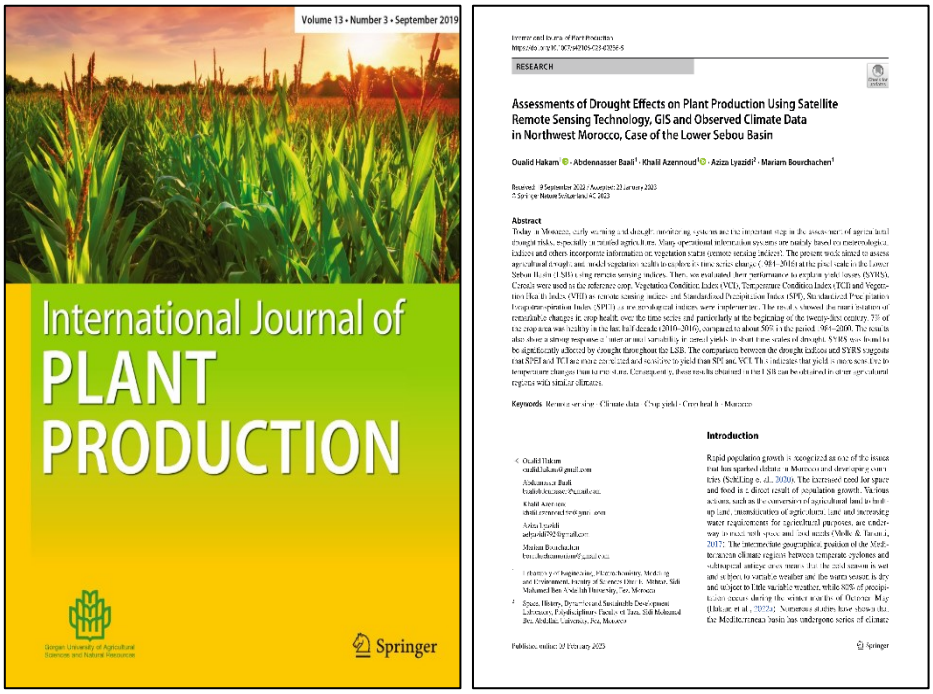
CHAPITRE VI

ÉVALUATION DE LA SÉCHERESSE AGRICOLE

I. Introduction 192
II. Matériel et méthodologie....194
II . 1. Matériel....194
II . 2. Méthodologie....194
II . 2. a. Identification des terres agricoles 194
II . 2. b. Indices de sécheresse (DIs – *Drought Indices*)....195
II . 2. c. Changement décennal moyen de VHI 199
II . 2. d. Modélisation de la cohérence de VHI à l'aide de l'approche fréquentielle 200
II . 2. e. Performance des indices de sécheresse (DIs) 200
III. Résultats et discussions 200
III . 1. Cartographie de VCI et de TCI 200
III . 2. Cartographie de la VHI 202
III . 3. Variation décennale moyenne du VHI 204
III . 4. Cohérence du VHI....206
III . 5. Sécheresse et rendement des cultures céréalières....207
III . 6. Performance des indices de sécheresse (DIs)....209
IV. Discussion 210
V. Conclusion....212

CHAPITRE VI
ÉVALUATION DE LA SÉCHERESSE AGRICOLE

Jusqu'à présent, mon analyse s'est concentrée sur les indices liés à la température et aux précipitations. Dans l'optique d'avoir une vue d'ensemble sur la vitesse des changements pouvant être pertinente pour la plus grande partie possible du bassin du Bas Sebou et leurs impacts potentiels sur les populations et les écosystèmes qui en dépendent. La représentation du climat qu'ont les populations rurales est plus visuelle, en opposition à celle des populations urbaines. Ces dernières ont souvent une proximité limitée à la végétation et, par conséquent, y sont moins sensibles. La population du bassin Bas Sebou dépend largement de l'agriculture qui est la principale activité économique, employant une grande partie de la population locale et contribuant de manière significative à l'économie de la région. En outre, les exploitations agricoles de petite taille sont courantes dans le bassin Bas Sebou, avec une forte présence de cultures vivrières destinées à la consommation locale et à la vente sur les marchés locaux. Ce chapitre a alors pour but donc d'évaluer la sécheresse agricole, qui est l'une des principaux risques naturels de la production agricole et à modéliser l'état de la végétation afin d'explorer son évolution dans le temps (1984-2016) à l'échelle du pixel dans le bassin Bas Sebou. Nous évaluons ensuite le lien entre la sécheresse agricole, identifiée par des indices dérivés des observations de télédétection et par observations issues de stations météorologiques, et le rendement des céréales. Les résultats de ce chapitre sont publiés dans la *revue International Journal of Plant Production.*



Hakam, O., Baali, A., Azennoud, K., Lyazidi, A., & Bourchachen, M. (2023). Assessments of Drought Effects on Plant Production Using Satellite Remote Sensing Technology, GIS and Observed Climate Data in Northwest Morocco, Case of the Lower Sebou Basin. International Journal of Plant Production, 1-16. DOI: https://doi.org/10.1007/s42106-023-00236-5

Résumé

Aujourd'hui au Maroc, les systèmes d'alerte précoce et de suivi de la sécheresse constituent une étape importante dans l'évaluation des risques de sécheresse agricole, en particulier l'agriculture pluviale. De nombreux systèmes d'information opérationnels sont principalement basés sur des indices météorologiques et d'autres intègrent des informations sur l'état de la végétation (indices de télédétection). Le présent travail visait à évaluer la sécheresse agricole et à modéliser l'état de la santé de la végétation afin d'explorer son évolution dans le temps (1984-2016) à l'échelle du pixel dans le bassin Bas Sebou en utilisant des indices de télédétection. Ensuite, nous avons évalué leur performance pour expliquer les pertes de rendement (SYRS). Les céréales ont été utilisées comme culture de référence. L'indice d'état de la végétation (VCI), l'indice d'état de la température (TCI) et l'indice de santé de la végétation (VHI) en tant qu'indices de télédétection et l'indice de précipitations normalisées (SPI), l'indice d'évapotranspiration des précipitations normalisées (SPEI) en tant qu'indices météorologiques ont été mis en œuvre. Les résultats ont montré la manifestation de changements remarquables dans la santé des cultures au cours de la série chronologique et en particulier au début du 21ème siècle. 7 % de la surface cultivée était en bonne santé au cours de la dernière moitié de la décennie (2010-2016), contre environ 50 % au cours de la période 1984-2000. Les résultats montrent également une forte réaction de la variabilité interannuelle des rendements céréaliers à des échelles de temps courtes de la sécheresse. SYRS s'est avéré être significativement affecté par la sécheresse tout au long de la période considérée. La comparaison entre les indices de sécheresse et le SYRS suggère que SPEI et TCI sont plus corrélés et sensibles au rendement que SPI et VCI. Cela indique que le rendement est plus sensible aux changements de température qu'à l'humidité. Par conséquent, ces résultats obtenus dans le bassin Bas Sebou peuvent être obtenus dans d'autres régions agricoles avec des climats similaires.

Mots clés : télédétection ; données climatiques ; rendement des cultures ; santé des cultures ; Maroc.

Abstract

Today in Morocco, early warning and drought monitoring systems are the important step in the assessment of agricultural drought risks, especially in rainfed agriculture. Many operational information systems are mainly based on meteorological indices and others incorporate information on vegetation status (remote sensing indices). The present work aimed to assess agricultural drought and model vegetation health to explore its time series change (1984-2016) at the pixel scale in the Lower Sebou Basin using remote sensing indices. Then, we evaluated their performance to explain yield losses (SYRS). Cereals were used as the reference crop. Vegetation Condition Index (VCI), Temperature Condition Index (TCI) and Vegetation Health Index (VHI) as remote sensing indices and Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) as meteorological indices were implemented. The results showed the manifestation of remarkable changes in crop health over the time series and particularly at the beginning of the 21st century. 7 % of the crop area was healthy in the last half decade (2010-2016), compared to about 50 % in the period 1984-2000. The results also show a strong response of inter-annual variability in cereal yields to short time scales of drought. SYRS was found to be significantly affected by drought throughout the lower Sebou basin. The comparison between the drought indices and SYRS suggests that SPEI and TCI are more correlated and sensitive to yield than SPI and VCI. This indicates that yield is more sensitive to temperature changes than to moisture. Consequently, these results obtained in the lower Sebou basin can be obtained in other agricultural regions with similar climates.

Keywords: *remote sensing; climate data; crop yield; crop health; Morocco.*

I. Introduction

La croissance rapide de la population est reconnue comme l'une des questions qui a suscité un débat au Maroc et dans les pays en développement (Schilling *et al.,* 2020). Le besoin accru d'espace et de nourriture est une conséquence directe de la croissance démographique. Diverses actions, telles que la conversion des terres agricoles en terres bâties, l'intensification des terres agricoles et l'augmentation des besoins en eau à des fins agricoles, sont en cours pour répondre à la fois aux besoins en espace et en nourriture (Molle & Tanouti, 2017). La position géographique intermédiaire des régions climatiques méditerranéennes entre les cyclones tempérés et les anticyclones subtropicaux signifie que la saison froide est humide et soumise à un temps variable et que la saison chaude est sèche et soumise à un temps peu variable, tandis que 80 % des précipitations se produisent pendant les mois d'hiver d'octobre à mai (Hakam *et al.,* 2022a). De nombreuses études ont montré que le bassin méditerranéen a subi une série de changements climatiques, qui se manifestent par des sécheresses, des températures élevées, des inondations, des pénuries d'eau et des réductions des terres arables (De Girolamo *et al.,* 2022), menaçant la sécurité alimentaire locale et les marchés agroalimentaires. En effet, la sensibilité de l'agriculture au Maroc se manifeste à travers des variables climatiques et atmosphériques telles que l'insolation, la température et la pluviométrie, qui ont toutes un rôle dans le développement et la croissance des cultures. L'agriculture pluviale, dite *Agriculture de Bour*, dominée par les céréales (43550 km^2 en 2020), est intrinsèquement vulnérable au changement climatique (HCP, 2021). L'agriculture irriguée, qui couvre plus de 4,6% de la surface agricole totale (Harbouze *et al.,* 2019), est influencée par la disponibilité des ressources en eau, qu'elles soient de surface ou souterraines. Le niveau de plus en plus bas des nappes phréatiques justifie écologiquement la pratique des cultures traditionnelles malgré la révolution verte qui a conduit à l'émergence de nouvelles cultures à haut rendement. Pour explorer la zone de production potentielle des cultures, plusieurs facteurs de conditionnement peuvent être pris en compte et intégrés. En outre, le contrôle de la santé des cultures est une autre approche directe de l'estimation du potentiel des cultures. La bonne santé des cultures dans certaines zones indique naturellement des facteurs de conditionnement favorables ainsi que des chances d'amélioration de la productivité qui devraient être suivies par un système d'alerte précoce de la surveillance de la santé des cultures à cette fin est très essentielle.

De nouvelles techniques autres que les techniques traditionnelles, y compris l'indice de précipitations normalisées (SPI) (McKee *et al.,* 1993) et l'indice d'évapotranspiration des précipitations normalisées (SPEI) de Vicente-Serrano *et al,* (2010) peuvent être utilisés pour évaluer la sécheresse agricole (Karimzadeh Soureshjani, 2021 ; Ojara, *et al.,* 2022 ; Bouabdelli, *et al.,* 2022 ; Hakam *et al.,* 2022c), sachant que les données d'observation des stations météorologiques sont incapables de capturer le climat local et la variabilité biophysique du paysage. En outre, la technologie de la télédétection a la capacité de collecter des données et d'obtenir des informations avec une résolution spatiale, en suivant les changements dans les séries temporelles des cultures et des zones de santé à travers les unités spatiales. Elle permet

ainsi d'enregistrer les changements dans la phénologie des cultures tout au long de la saison de croissance en analysant la teneur en chlorophylle ou les changements structurels dans les cultures. Grâce à l'analyse d'images satellite, il est possible de cartographier et de classer les cultures et d'évaluer leur état de santé (Caballero *et al.,* 2020), ce qui est possible grâce à l'interaction variable de différentes couvertures de cultures saines tirées du spectre électromagnétique (SE). À des fins de photosynthèse, la chlorophylle absorbe l'énergie dans les bandes visibles du SE, qui est apparente dans les bandes rouge et bleue et réfléchie dans la bande verte. Cependant, le fait que la structure interne des feuilles reflète faiblement la bande verte permet de rechercher des indices de l'état de la végétation établis sur l'avantage de la réflectance contrastée dans les bandes rouge (R) et proche infrarouge (PIR) du spectre électromagnétique (SE). À cet égard, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) (Gao, 1996) utilisé pour évaluer la vigueur et la quantité de la végétation est une aide à la prise de décision agricole (Lebrini *et al.,* 2020). L'indice d'état de la végétation (VCI – *Vegetation Condition Index*) (Kogan, 1995b), d'une part, et l'indice de température (TCI - *Temperature Condition Index*) (Kogan, 1995b), d'autre part, sont utilisés pour estimer respectivement la verdure et la température de la végétation, en tant qu'indicateurs de la santé de la végétation. Il convient de noter que l'indice de santé de la végétation (VHI - *Vegetation Health Index*) (Kogan, 1995b) est la combinaison de l'influence du stress hydrique sur la végétation (VCI) et de celle du stress thermique (TCI). En effet, de nombreuses études ont été menées pour cartographier et surveiller l'état de la végétation à l'aide d'images satellite (Ezzine *et al.,* 2014 ; García-León *et al.,* 2019 ; Dehkordi *et al.,* 2020 ; Moutia *et al.,* 2021). Étant donné que peu d'études ont abordé la modélisation des changements annuels de l'état de santé de la végétation, ce travail vise à cartographier et à surveiller l'état de santé de la végétation dans le bassin Bas Sebou pendant 33 ans (1984-2016) en utilisant l'analyse d'images satellitaires et en appliquant l'approche fréquentielle. Il convient de noter que plusieurs études ont commencé à évaluer la performance des indices satellitaires afin de détecter la sécheresse agricole et d'expliquer les pertes de rendement, sachant que cette opération nécessite la disponibilité des données, le choix de l'approche de quantification de la sécheresse et l'adaptation des indices à différents scénarios. À cette fin, cette étude se concentre sur :

a) la cartographie des zones cultivées dans le bassin Bas Sebou au cours des 33 dernières années (1984-2016) ;
b) la modélisation des séries temporelles de l'état de santé des cultures en tenant compte des indices VCI, TCI et VHI ;
c) la modélisation de la cohérence au niveau des pixels des paramètres de conditionnement de la végétation et de l'état de santé de la végétation ;
d) l'analyse de la sécheresse dans le bassin Bas Sebou, d'un point de vue agronomique, en relation avec les cultures céréalières ;
e) évaluation et quantification de la capacité des indices de sécheresse météorologiques (SPI et SPEI) et satellitaires (VCI, TCI et VHI) à expliquer les facteurs de variabilité des rendements céréaliers.

II. Matériel et méthodologie

II . 1. Matériel

Les images satellite du capteur Landsat (résolution spatiale : 30 m) de la collection 2 level 2 et de la saison hivernale de la série chronologique (1984-2016) ont été téléchargées à partir de la base de données de service géologique des États-Unis (USGS) (*https://earthexplorer.usgs.gov/*). Les images Landsat des mois de printemps (mars, avril et mai), qui correspondent à des périodes de photosynthèse active, ont été sélectionnées, car toutes les années ne disposaient pas de données pour les mêmes mois, y compris la meilleure image de chaque année, qui présentait une couverture nuageuse minimale (<10%). Nous avons donc téléchargé trente-trois images Landsat de 1984 à 2016, dont Landsat TM 4-5 (1984-2012) et Landsat 8 OLI/TIRS (2012-2016). Nous avons utilisé des séries chronologiques de précipitations et de températures mensuelles (4 stations) fournies par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb (ORMVAG) et réparties uniformément sur l'ensemble du bassin Bas Sebou **(Figure 81)**. Les données de productivité céréalière (blé dur, blé tendre et orge) pour la période considérée ont été collectées auprès des services statistiques du ministère de l'agriculture. La série chronologique de la production céréalière d'automne en tonnes par hectare (t/ha^{-1}) représente le rapport entre la production annuelle (t) et la superficie cultivée (ha) pour chaque province au cours de la période 1984-2016.

II . 2. Méthodologie

II . 2. a. Identification des terres agricoles

À l'exception de quelques images Landsat avec couverture nuageuse, l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN) désigné par sa dénomination anglophone NDVI et la carte d'occupation des sols obtenue auprès du CRTS (**Figure 28**) ont été a été utilisé pour cartographier les terres agricoles dans le bassin Bas Sebou pour la période 1984-2016. Il a été utilisé pour la première fois dans l'étude des grandes plaines pour générer une image décrivant la couverture végétale, également appelée biomasse relative. Cet indice est basé sur la comparaison de deux caractéristiques d'un ensemble de données matricielles multispectrales : l'absorption des pigments chlorophylliens dans la bande rouge (R) et la réflectivité élevée du matériel végétal dans la bande proche infrarouge (PIR). Le NDVI est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \quad \textbf{(29)}$$

Où R et PIR représentent les mesures de réflectance spectrale acquises dans les bandes rouge visible (R) et proche infrarouge (PIR), respectivement.

En général, les valeurs NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant à des surfaces non végétales, telles que la neige, l'eau ou les nuages, où la réflectance rouge (R) est supérieure à la réflectance proche infrarouge (PIR). Les formations

végétales ont des valeurs NDVI positives, qui se situent généralement entre 0,1 et 0,07 (Pal *et al.,* 2022). Les valeurs les plus élevées correspondent aux zones les plus densément couvertes. Il est donc difficile de déterminer la limite entre la végétation naturelle et les terres agricoles. Cependant, nous avons mené une enquête approfondie sur le terrain et des observations à partir de photos aériennes obtenues à l'aide de *Google Earth* et de la carte d'occupation des sols (**Figure 28**) afin d'identifier et de collecter l'emplacement des terres agricoles telles que les céréales d'automne et les cultures pluviales. Nous avons ensuite extrait les valeurs spectrales des images NDVI en nous basant sur les emplacements exacts recueillis lors de l'enquête sur le terrain. Sur la base de la valeur spectrale extraite, nous avons fixé les limites supérieure et inférieure à 0,4 et 0,17, respectivement, sur la base de la valeur spectrale extraite. Enfin, nous avons classé les images NDVI en zones agricoles et autres classes en fonction des plages de seuils.

II . 2. b. Indices de sécheresse (DIs – *Drought Indices*)

Indice de l'état de la végétation (VCI - *Vegetation Condition Index*) : caractérisant les conditions d'humidité de la végétation, le VCI est un indice permettant de comparer l'effet du climat sur la végétation dans des zones non homogènes (Kogan, 1995b). Cet indice exprime le niveau de croissance atteint par la végétation dans chaque zone (pixel) à une date donnée en pourcentage de la croissance maximale enregistrée les années précédentes à la même date.

Le calcul de VCI (**Équation 30**) est basé sur les données NDVI (**Équation 29**) au niveau de chaque pixel sur l'ensemble de la période d'étude. Une valeur de VCI d'environ 50 % correspond à une situation de croissance moyenne de la végétation, tandis que des valeurs comprises entre 50 % et 100 % indiquent des conditions de végétation optimales ou supérieures à la normale. Une valeur de VCI de 100 % signifie que la valeur du NDVI pour le mois sélectionné est égale au $NDVI_{max}$, ce qui signifie que les conditions de végétation sont optimales. Les différents degrés de gravité de la dégradation de la végétation sont représentés par une valeur de VCI inférieure à 50 %. Une valeur de VCI proche de 0 % reflète un mois extrêmement sec et une valeur du NDVI proche de son minimum à long terme. Les faibles valeurs de l'indice de végétation qui persistent pendant plusieurs intervalles de temps consécutifs indiquent l'apparition d'une sécheresse.

$$VCI = \frac{NDVI_a - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} * 100 \qquad \textbf{(30)}$$

Le $NDVI_a$ représente une carte du NDVI à un moment donné, tandis que le $NDVI_{min}$ et le $NDVI_{max}$ sont respectivement les valeurs minimale et maximale du NDVI au cours de la période d'observation.

Indice de condition de température (TCI - *Temperature Condition Index*) : pendant les saisons humides, il est fréquent que les conditions nuageuses durent longtemps et que le NDVI calculé pendant ces périodes donne une fausse impression de stress hydrique ou de sécheresse.

Pour éliminer cette ambiguïté dans l'évaluation par satellite de l'état de la végétation, Kogan (1995b) a proposé d'utiliser l'indice de température dérivé des bandes thermiques du capteur Landsat, qui ont été converties en températures de brillance. Cette mesure permet de déterminer la température liée au stress de la végétation ainsi que le stress causé par une humidité élevée. Pour calculer l'indice de température, plusieurs étapes doivent être réalisées. La première étape consiste à calculer la température de la surface du sol (TSS) ou LST en anglais.

Température de la surface du sol (LST – *Land Surface Temperature*) : La LST de la saison hivernale a été dérivé de la bande thermique des images satellites Landsat (TM et OLI) (**Tableau 42**). Les images ont été capturés après minuit et aux premières heures du matin (au cours desquelles l'émissivité maximale est observée) sont choisis pour le LST. Trois algorithmes ont été utilisés pour dériver le LST à partir d'images satellites, tels que le modèle de transfert radiatif (RTM - *Radiative Transfer Model*), la mono-fenêtre (MW - *Mono-Window*) et la fenêtre fractionnée (SW - *Split-Window*). La littérature précédente a rapporté que la méthode RTM génère les meilleurs résultats (Chatterjee *et al.,* 2016 ; Isaya Ndossi & Avdan, 2016 ; Windahl & de Beurs, 2016). Mais l'exigence d'une mesure in situ par radiosonde des paramètres atmosphériques au moment du passage du satellite rend l'algorithme moins préférable à SW et MW. Le LST dérivé des images satellites montre une erreur moyenne généralement inférieure à 1,5 K pour les algorithmes MW et SW, avec des résultats légèrement meilleurs pour l'algorithme SW avec l'augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique (Jim enez-Munoz *et al.,* 2014). Le LST a été dérivé sur la base de certains paramètres, tels que l'émissivité du sol, la transmission atmosphérique et la température atmosphérique moyenne effective. Tandis que les valeurs empiriques associées aux images adoptées dans l'algorithme MW pour estimer le LST sont données dans le **tableau 42**. Chaque objet émet de l'énergie électromagnétique thermique lorsque sa température reste supérieure au zéro absolu (K). Compte tenu de cela, la température de surface terrestre de différents objets a été calculée. Les capteurs thermiques (TM/TIRS) ont reçu les signaux et ce signal a ensuite été converti en rayonnement au niveau du capteur. Parmi les différentes méthodes d'extraction de la température de surface terrestre à partir de l'image Landsat, la méthode conçue par le Landsat Project Science Office (2002) a été largement utilisée. C'est comme suit.

Tableau 42 : Constantes empiriques pour la série de capteurs Landsat.

Constantes	TM	OLI
K_1	607.76	774.8853
K_2	1260.56	1321.0789
L_{max}	15.303	22.00180
L_{min}	1.238	0.10033
$Qcal_{max}$	255	65535
$Qcal_{min}$	1	1

Conversion de la radiance spectrale (All) à partir des nombres numériques (DN - *digital numbers*) : L'équation 31 est utilisée pour calculer la radiance spectrale (All) (Landsat, 2002).

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{\lambda\, max} - L_{\lambda\, min}}{Qcal_{max} - Qcal_{min}}\right) * (Qcal - Qcal_{min}) + L_{\lambda\, min} \quad \textbf{(31)}$$

Où $Qcal_{min}$= 0, $Qcal_{max}$= 255, Qcal est la valeur quantifiée du pixel calibré ou le numéro numérique de chaque pixel, L_λ min est la radiance spectrale pour la bande thermique au numéro numérique 0, $L_{\lambda max}$ est la radiance spectrale pour la bande thermique au numéro 255.

Conversion de la radiance spectrale (L_λ) en températures de brillance du satellite (TB) : Une fois que les DN ont été convertis en réflectance, la radiance spectrale des bandes thermiques des capteurs TM/TIRS doit être convertie en températures de brillance du satellite (TB). **L'équation résultante (32)** est la suivante (Landsat, 2002).

$$TB = \frac{\text{Kj}}{\ln(\frac{Ki}{L_\lambda}+1)} \quad \textbf{(32)}$$

Où TB est la température de brillance du satellite (K), L_λ est la radiance spectrale de la bande thermique en $W.m^{-2}.sr^{-1}.mm^{-1}$ et K_i et K_j sont les constantes d'étalonnage.

Estimation de la LST : Afin d'estimer la température de surface, l'émissivité terrestre qui modifie la luminance du corps noir (loi de Planck) doit être déterminée. Des modifications de l'émissivité spectrale sont donc nécessaires et des corrections peuvent être apportées en fonction de la nature de l'utilisation et de la couverture des sols dans une zone spécifique. L'émissivité de chaque pixel peut être calculée en utilisant les valeurs du rapport de végétation.

$$\text{Émissivité de la surface terrestre } (\varepsilon) = 0.004 * \text{Pv} + 0.986 \quad \textbf{(33)}$$

Où P_v est la proportion de végétation, calculée à l'aide de la formule ci-dessous.

$$Pv = \left(\frac{\text{NDVI}-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}}\right)^2 \quad \textbf{(34)}$$

Artis & Carnahan, (1982) ont utilisé l'équation suivante pour obtenir la LST corrigée de l'émissivité.

$$LST = \frac{TB}{\{1+[(\frac{\lambda}{\rho})ln\varepsilon]\}} \quad \textbf{(35)}$$

Où LST est la température de la surface terrestre en Kelvin (K), λ est la longueur d'onde du rayonnement émis en mètres, TB est la température de brillance du capteur en Kelvin, ρ=h×c/σ, σ est la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), h est la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js), et c'est la vitesse de la lumière ($2,998 \times 10^{8}$ m/s).

Tableau 43 : Longueur d'onde centrale des bandes Landsat.

Satellite	Numéro de bande	λ (µm)
Landsat 4 et 5	6	11,45
Landsat 8	10	10,8
Landsat 8	11	12

Calcul de TCI : la LST a été calculée à l'aide des équations mentionnées ci-dessus (**Équations 30 à 35**). Le TCI est basé sur la LST selon **l'équation (36)** :

$$TCI = \left(\frac{LST_a - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}}\right) * 100 \quad \textbf{(36)}$$

LST_a est la valeur de la température de surface du sol de l'année (a) sélectionnée, LST_{max} et LST_{min} sont les valeurs de la température maximale et minimale du sol pour le même pixel au cours de l'année (a). Les valeurs de TCI varient de 0 à 100. Une valeur proche de 100 indique une température proche de son niveau maximal et un facteur de stress thermique potentiel pour la végétation.

Indice de santé de la végétation (VHI – *Vegetation Health Index*) : selon Kogan (2002), TCI combiné à VCI est une source d'information très utile pour surveiller l'état de la végétation et l'impact du climat. La combinaison de ces indices permet de détecter non seulement les périodes de sécheresse mais aussi les situations d'excès d'humidité. L'indice VHI est une mesure utilisée pour évaluer la santé des cultures sur une échelle allant de très sain à complètement malsain, avec plusieurs situations intermédiaires telles que normal, légèrement supérieur ou inférieur à la normale, et stressé. Les trois valeurs de l'indice vont de 0 à 100, indiquant un stress (0-35), état normal (35-40) et état favorable (40-100). Par conséquent, le résultat final de VHI (**Équation 37**) est la combinaison de VCI basé sur le NDVI et de TCI basé sur le LST.

$$VHI = \alpha * VCI + (1 - \alpha) * TCI \quad \textbf{(37)}$$

Où α est la contribution relative de VCI et de TCI à VHI. Selon la plupart des travaux, α = 0,5, ce qui suppose la même contribution des deux indices en l'absence d'informations plus précises (Kogan, 2001).

Indice standardisé des précipitations (SPI - *Standardized Precipitation Index*) : il s'agit d'un indice statistique qui mesure la probabilité d'occurrence des précipitations au cours d'une certaine période dans une région. Il présente l'avantage d'être facile à calculer et stable, et de pouvoir éliminer les différences spatio-temporelles dans les précipitations. Il est sensible à la sécheresse et peut être utilisé pour surveiller et évaluer les conditions climatiques sur une échelle plus large que le mois (1 mois à 48 mois).

Indice normalisé précipitation-évapotranspiration (SPEI - *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index*) : remplace les précipitations mensuelles dans SPI par la différence entre les précipitations mensuelles et l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP), ce qui le rend plus sensible aux réactions à la sécheresse causées par le réchauffement climatique. La différence dans le bilan hydrique est normalisée sous la forme d'une distribution de probabilité log-logistique pour déterminer la valeur de l'indice SPEI (Vicente-Serrano *et al.,* 2010). Les conditions sèches et humides sont indiquées par des valeurs négatives et positives de l'indice SPI et de l'indice SPEI, respectivement (**Tableau 44**).

Ces indices (SPI et SPEI) ont été calculés à l'aide du progiciel SPEI R version 1.7 et l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée à l'aide de l'équation de Thornthwaite (Thornthwaite, 1984).

Série standard des résidus de rendement (SYRS - *Standard Yield Residual Series*) : Les anomalies de rendement des céréales ont été calculées pour exclure les facteurs non climatiques en supprimant une tendance linéaire des séries chronologiques de rendement des cultures. Les changements dans les rendements des cultures dépendent généralement d'un certain nombre de facteurs, y compris les nouvelles technologies de gestion et les pratiques innovantes, en plus du facteur climatique. Un rendement tendanciel a été calculé à l'aide d'une tendance polynomiale à plusieurs facettes (Sun *et al.,* 2012) afin d'exclure toute distorsion due à des facteurs non climatiques. Les résidus du rendement tendanciel ($Yi^{(T)}$) peuvent représenter l'indicateur de risque de sécheresse agricole :

$$Y_i^{(T)} = Y_i^0 - Y_i^{(\tau)} \quad \textbf{(38)}$$

Yi^0 représentant le rendement observé et Y_i représentant la valeur du rendement tendanciel pour une année distincte.

La distribution de probabilité log-logistique a été utilisée pour ajuster les rendements résiduels de diverses cultures céréalières. La série $Yi^{(T)}$ a ensuite été normalisée pour chaque culture à l'aide de la transformation Z-score afin de comparer la variabilité des rendements entre des cultures ayant des moyennes et des écarts types différents. La série des rendements résiduels standard (SYRS) est déterminée comme suit :

$$SYRS = \frac{Y_i^{(T)} - Y_m}{\tau} \quad \textbf{(39)}$$

Où $Yi^{(T)}$ est le rendement résiduel, Y_m est la moyenne du rendement résiduel et τ est l'écart-type du rendement résiduel. **Le tableau 44** présente les catégories de rendement du SYRS dérivées de la distribution normale standard.

II . 2. c. Changement décennal moyen de VHI

Pour étudier l'évolution de VHI d'une décennie à l'autre, nous avons d'abord créé des cartes de VHI moyen pour quatre décennies (1984-1990, 1990-2000, 2000-2010 et 2010-2016). Nous avons ensuite divisé les cartes de VHI en trois catégories (faible, modéré et élevé). La technique de détection des changements a été appliquée entre les décennies 1ère (1984-1990) et 2ème (1990-2000), 2ème (1990-2000) et 3ème (2000-2010), 3ème (2000-2010) et 4ème (2010-2016), et 1ère (1984-1990) et 4ème (2010-2016) pour étudier le décalage temporel de la zone entre les classes VHI. Il serait ainsi plus facile de voir comment chaque proportion de zones à VHI déterminé (faible, modéré et élevé) a évolué au fil du temps.

II . 2. d. Modélisation de la cohérence de VHI à l'aide de l'approche fréquentielle

La modélisation de la cohérence est un outil très important pour identifier les zones qui semblent être en bonne ou mauvaise santé des cultures au cours de la série chronologique. Cette modélisation signifie l'apparition de pixels ayant des conditions VHI à l'échelle temporelle. Une cohérence plus élevée indique l'apparition d'un pixel avec un bon VHI (VHI > 40) pendant une période plus longue, jusqu'à 2016. Le bassin Bas Sebou a été divisé en trois classes de cohérence basées sur le modèle d'état de fréquence VHI : élevée (un pixel avec une bonne valeur VHI apparaît > 67 % du temps), modérée (un pixel avec une bonne valeur VHI comprise entre 67 % et 33 % du temps) et faible (un pixel avec une bonne valeur VHI apparaît moins de 33 % du temps). Cette méthode est déjà utilisée par Borro *et al.,* (2014) pour la modélisation fréquentielle de la présence d'eau de surface. Pour ce faire, la carte VHI de chaque année a été reclassée dans un format binaire, 1 étant attribué aux classes VHI élevées (VHI > 40) et 0 aux classes VHI faibles (VHI < 40).

II . 2. e. Performance des indices de sécheresse (DIs)

Les systèmes hydrologiques, écologiques et agricoles réagissent à des échelles de temps de sécheresse différentes en raison des différentes conditions naturelles de végétation et de culture pour faire face aux déficits hydriques ou des différences dans la lithologie, l'utilisation des terres et/ou les régimes de gestion de l'eau. C'est pourquoi SPI et SPEI ont été calculés à différentes échelles de temps allant de 1 à 12 mois. La nature multiscalaire de ces deux indices de sécheresse constitue un avantage significatif par rapport aux autres indices disponibles. L'analyse de corrélation de Pearson (r) a été utilisée pour expliquer les relations linéaires entre les SYRS (c'est-à-dire le blé dur, le blé tendre et l'orge) et les séries d'indices de sécheresse (DI) pendant les principaux stades de croissance des cultures (d'octobre à juin).

Tableau 44 : Catégories de santé de la végétation, de sécheresse, d'humidité et de pertes de rendement en fonction des indices de sécheresse (DIs) utilisés.

Catégories de santé de la végétation	Valeurs de VHI	Classe humide/sec de SPI/SPEI	Valeurs de SPI/SPEI	Catégories dans les séries de résidus de rendement normalisés (SYRS)	Valeurs de SYRS
Stress	0-35	Extrêmement humide	>2,00	Augmentation du rendement élevé	>1,50
		Très humide	1,50-1,99	Augmentation de rendement modérée	1,00-1,49
État normal	35-40	Modérément humide	1,49-1,00	Augmentation de rendement faible	0,51-0,99
		Normal	0,99 to -0,99	Normal	0,50 to -0,50
		Modérément sec	-1,00 to -1,49	Faibles pertes de rendement	-0,51 to -0,99
État favorable	40-100	Très sec	-1,50 to -1,99	Pertes de rendement modérées	-1,00 to -1,49
		Extrêmement sec	<-2,00	Pertes de rendement élevées	<-1,50

III. Résultats et discussions

III . 1. Cartographie de VCI et de TCI

VCI varie considérablement dans le bassin au cours de la période 1984-2016 (**Figure**

102). Citons par exemple en 1995, 2002, 2006, 2010, 2015 et 2016, des parties plus larges (> 50% des terres agricoles) ont enregistré un VCI faible (VCI < 40) qui se trouvaient avec un VCI élevé en 1988, 1999, 2004, 2008, 2012 et 2014. **La figure 102** a montré que la partie centrale du bassin Bas Sebou le long d'Oued Sebou indique les zones humides de la plaine inondable qui fluctuent fortement en fonction des taux de pluies et des inondations. Au cours de 2010, le bassin Bas Sebou a connu des précipitations abondantes qui ont créé de vastes zones humides sous forme des terres submergées jusqu'à un maximum de 1350 km^2 (ORMVAG, 2010), alors que les valeurs de VCI de ces zones ont enregistré de très mauvaises conditions de végétation et TCI a montré des conditions thermiques favorables pour les cultures.

La température de la surface terrestre (LST) pendant la saison hivernale varie de 7 à 20 °C le long de la série chronologique. La température la plus élevée a été enregistrée en 2006 et 2015, mais en moyenne, la température hivernale se situe autour de 14 °C. Des températures relativement élevées (> 14 °C) ont été enregistrées sur une grande partie des terres agricoles en 1985, 1995, 2002, 2006, 2015 et 2016, et au contraire, des températures basses (< 10 °C) ont été enregistrées en 1988, 2004 et 2012 (**Figure 102**). Les terres agricoles affectées par les températures élevées sont situées loin de la côte (vers l'Est du bassin) en raison du degré de continentalité. Au cours des années considérées comme normales (TCI > 40), les terres agricoles de la plaine d'inondation ont enregistré des températures basses par rapport au reste du bassin en raison de la disponibilité de l'humidité du sol.

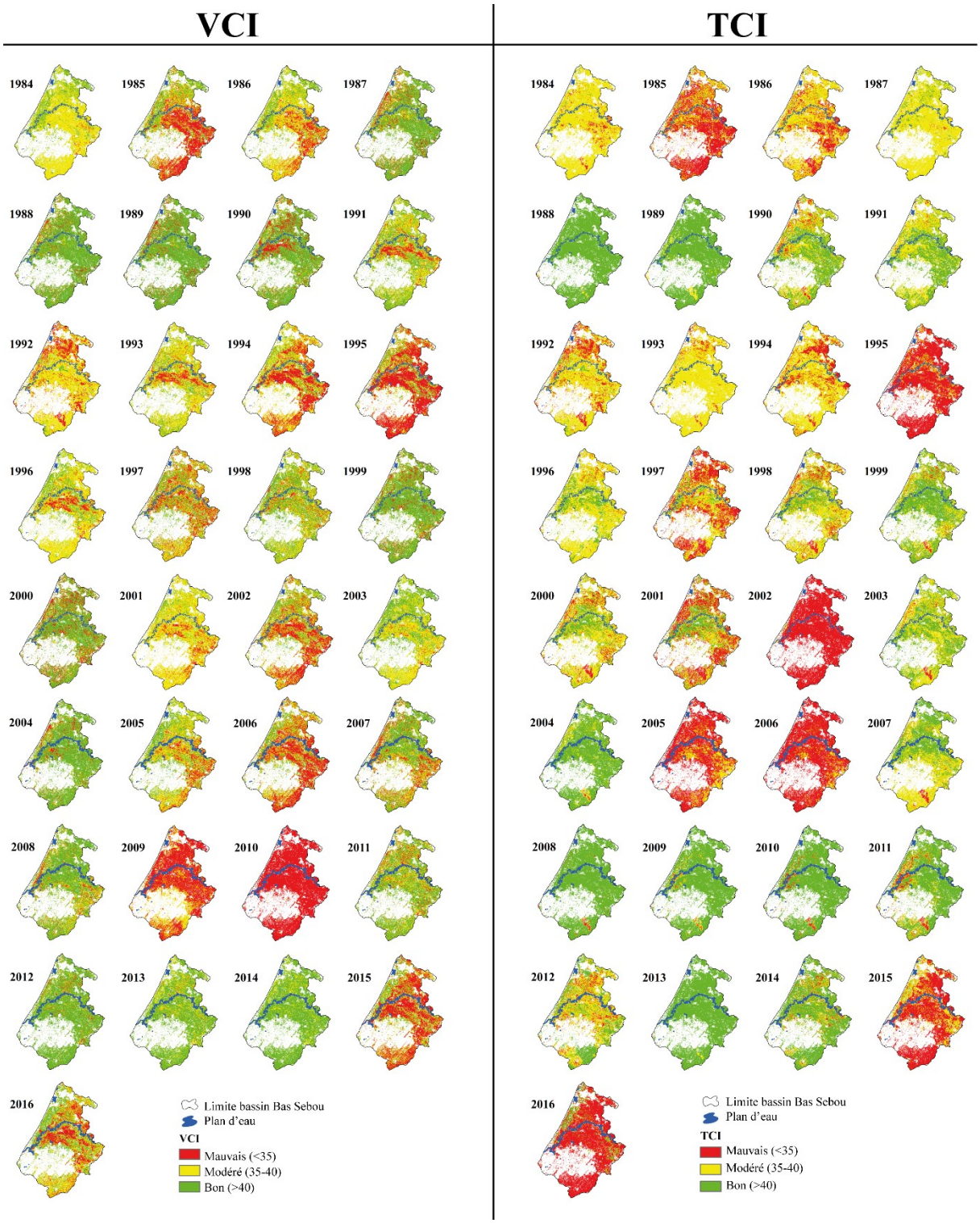


Figure 102 : Indice annuel de l'état de la végétation (VCI) et indice de l'état de la température (TCI) (1984-2016).

III . 2. Cartographie de la VHI

La figure 103 illustre l'état annuel du VHI (bon, modéré et mauvais) du bassin Bas Sebou au cours de la période 1984-2016. L'évolution de la superficie des terres agricoles sous différentes catégories de santé des cultures a été calculée et présentée sur **les figures 103 et**

104. Une partie plus large de la zone d'étude (> 80 % des terres agricoles) a enregistré un bon VHI en 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1999, 2008 et 2014, et à l'inverse, les faibles valeurs de VHI (mauvaise santé de végétation) se sont étalées sur de longues périodes (1994-1995), (2002-2007), (2009-2010) et (2015-2016) (**Figure 103**). Peu de changements remarquables dans les conditions VHI ont été observés depuis 1984 à 2016, en particulier au début du 21ème siècle. L'évolution temporelle du VHI a également montré une diminution progressive au cours de la série chronologique de la bonne santé des cultures (**Figure 104**). Par exemple, 56249 km^2 de superficie était sous un bon VHI pendant la période de 1984 à 2000, réduite à 36280 km^2 pendant la période 2010-2016. Dans son homologue, la superficie sous VHI modéré et faible (VHI < 40) a augmenté au cours de la dernière décennie (**Figure 104**). En outre, la répartition des pourcentages des superficies des terres agricoles affectées par la sécheresse au cours de la période 1984-2016 montre également que presque la moitié de superficie a connu des conditions non propices aux cultures (**Figure 105**). Cependant, pour atténuer la demande croissante de cultures, la mise à niveau qualitative des cultures est souhaitée, mais la détérioration qualitative de la santé des cultures et de la productivité ne sont pas prometteuses. La restauration et la récupération des terres agricoles pour améliorer la gestion de l'eau et d'augmenter la productivité est une pratique très courante dans les pays en développement, comme beaucoup de cas au Maroc. En fait, les deux possibilités sont devenues primordiales pour contrarier les besoins de plus en plus croissants sauf que l'amélioration qualitative des cultures reste encore plus prometteuse.

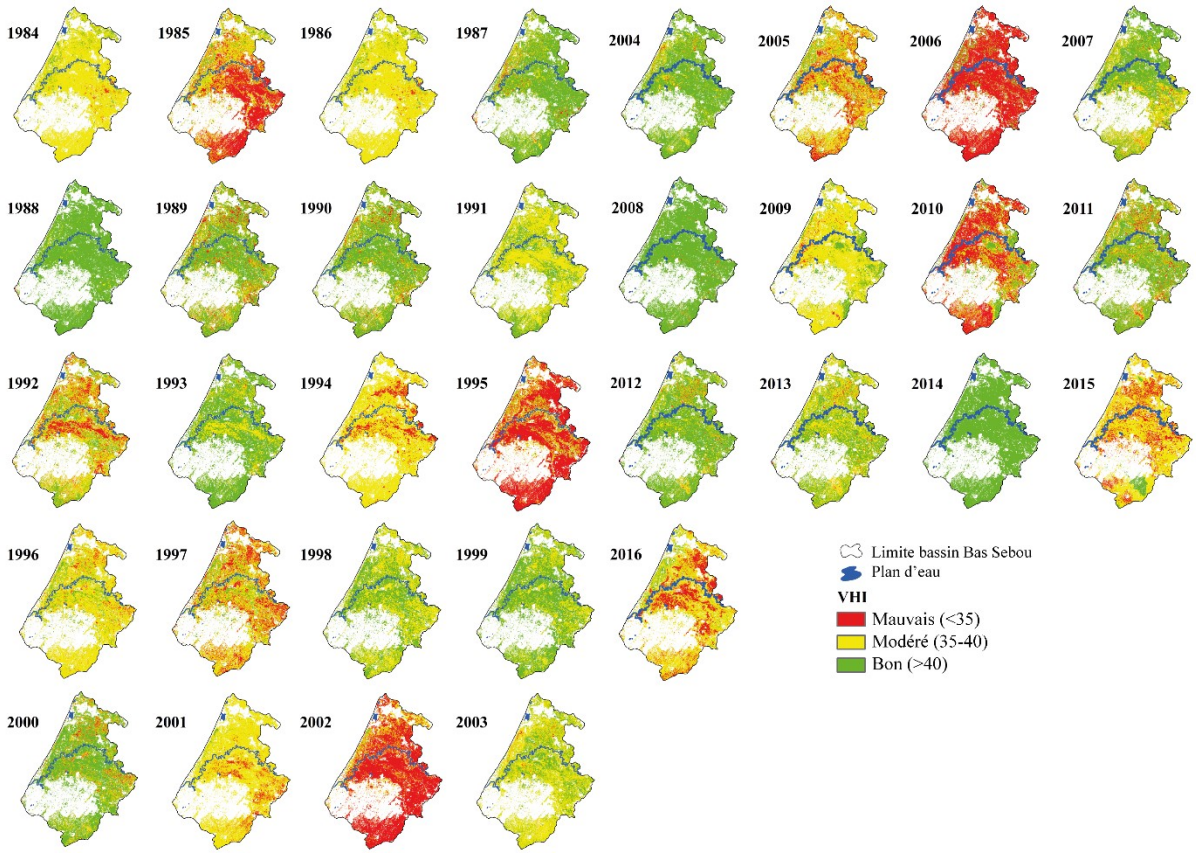


Figure 103 : Indice de santé de la végétation (VHI) pour chaque année (1984-2016).

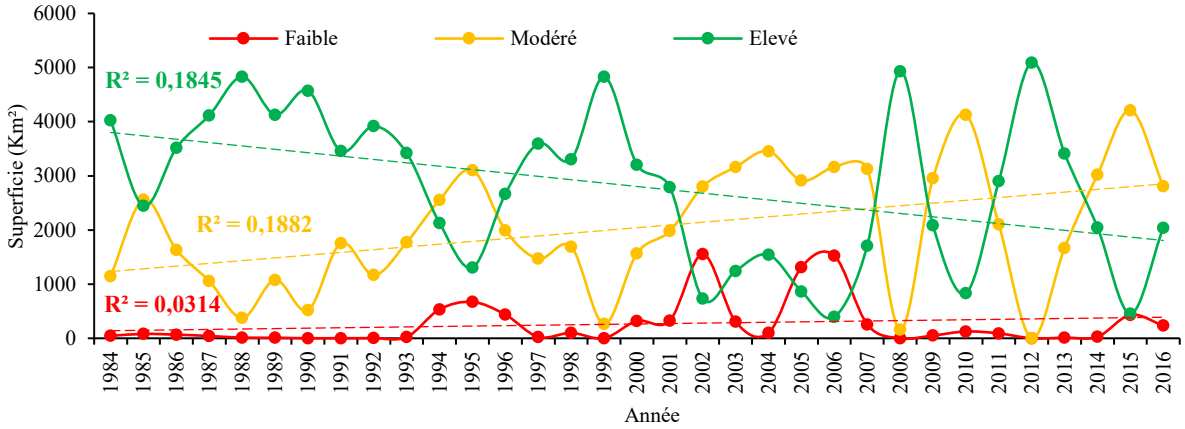


Figure 104 : Zone de l'état sanitaire des cultures sur la base de l'indice VHI pour la période 1684 à 2016.

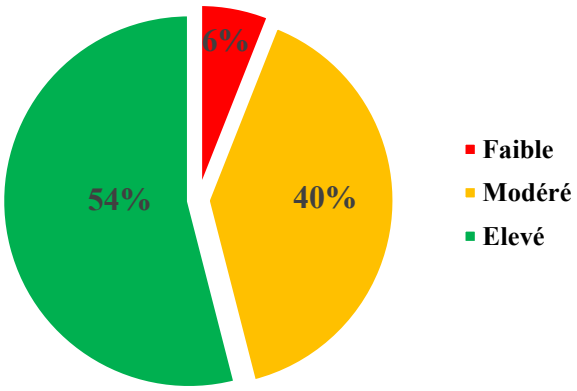


Figure 105 : Pourcentage de la superficie agricole touchée par des sécheresses dues à l'indice VHI au cours de la période 1984-2016.

III . 3. Variation décennale moyenne du VHI

Après une moyenne décennale du VHI, sa matrice de changement a été calculée entre les quatre décennies. **La figure 106** explique les changements de superficie des différentes catégories qualitatives de VHI entre la 1ère et la 2ème, la 2ème et la 3ème, la 3ème et la 4ème, et la 1ère et la 4ème décennie. La matrice des zones de changement commuté a révélé qu'environ 1169,71 km^2 des zones de bon VHI (VHI >40) sont converties en catégories de VHI modéré et mauvais (VHI<40) entre la 1ère et la 4ème décennie (Tableau 3). Sachant entre la 2ème et la 3ème décade, cette superficie était de 706,39 km^2. Seule 2.31 km^2 a enregistré une amélioration qualitative de la santé des cultures de la 1ère à la 4ème décennie. Les superficies qui n'ont pas connu de changement de VHI élevé, modéré et faible sont respectivement de 3893 km^2, 2,66 km^2, et 0,84 km^2 entre la 1ère et la 4ème décennie (Tableau 3). La superficie inchangée représente environ 76% de la superficie totale des terres agricoles. La variation décanale du VHI entre la 2ème et la 3ème décade montre une dégradation qualitative dans les terres éloignées du cours d'eau principal (Oued Sebou), tandis que les terres proches du cours ayant une sécurité en irrigation ont vécu une gradation ascendante dans la santé des cultures. Cependant, au cours des dernières décennies (3ème et la 4ème), l'impact croissant des sécheresses et inondations a détérioré la santé

des cultures malgré l'effet de l'irrigation. Ces résultats mettent en évidence la vulnérabilité des ressources en eau face aux changements climatiques, nécessitant une bonne gestion des terres inondables pour maintenir l'agriculture en bon état, chose remarquée au Sud du Maroc (Seif-Ennasr *et al.*, 2020).

Tableau 45 : Superficies sous changement décennal de VHI (km^2).

Matrice de changement	1ère à 2ème décennie	2ème à 3ème décennie	3ème à 4ème décennie	1ère à 4ème décennie
Faible inchangé	1,19	22,83	33,86	0,84
Faible à modéré	0,74	56,79	62,10	0,89
Faible à élevé	2,11	171,38	111,20	2,31
Modéré inchangé	4,83	103,92	191,97	2,66
Modéré à faible	5,43	44,44	74,67	1,20
Modéré à élevé	2,93	320,73	524,99	9,30
Élevé inchangé	4360,04	3584,72	3262,06	3893,07
Élevé à modéré	463,05	630,84	636,67	886,59
Élevé à faible	243,35	139,83	176,73	283,13

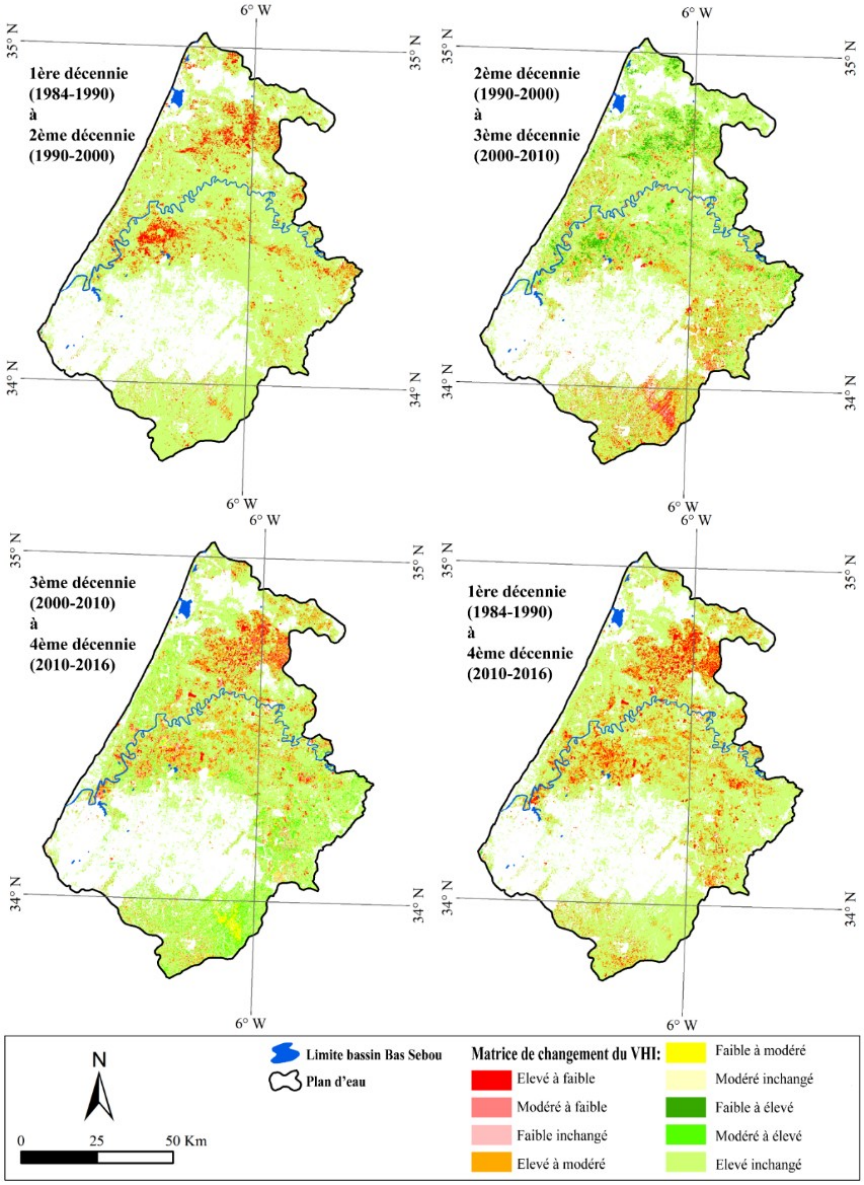


Figure 106 : Changement décennal de l'indice de santé de la végétation (VHI).

III . 4. Cohérence du VHI

Les cartes décanales et les séries chronologiques complètes (1984 à 2016) du modèle de cohérence de VHI basé sur l'approche fréquentielle sont présentées sur la **figure 107**. La zone sous différentes fréquences ou états de cohérence de VHI est représentée dans le **Tableau 46**, et répartie en trois classes de cohérence : faible, modérée et élevée. Au cours de la première décennie (1984-1990), les superficies des états VHI de fréquence élevée, modérée et faible étaient respectivement de 2117,7 km^2 (41,7 %), 2745,7 km^2 (54,1 %) et 206,8 km^2 (4,07 %). Au cours de la quatrième décennie (2010-2016), les classes de cohérence du statut VHI étaient respectivement de 356,2 km^2 (7,03 %), 2314,2 km^2 (45,7 %) et 2390,9 km^2 (47,2 %). Il s'avère que la superficie de l'état VHI faiblement cohérente a augmenté de façon très remarquable (augmentation de 43.1 % des terres) entre la 1ère et la 4ème décennie au dépend de celle de l'état hautement cohérente. La carte de cohérence de toute la période (1984-2016) montre clairement qu'une superficie d'environ 1223 km^2 (24 %) peut être considérée comme une zone de culture constante. Sur la superficie totale cultivée, plus de 70% de la superficie était modérément cohérente, ce qui signifie que les cultures sont en mauvaise santé dont la situation peut s'aggraver avec le temps.

Les cartes décanales et les séries temporelles complètes (1984 à 2016) du modèle de cohérence de l'IHV basé sur l'approche fréquentielle sont présentées à la figure 7. La zone sous différentes fréquences ou états de cohérence de l'ICV est représentée dans le tableau 5 et divisée en trois classes de cohérence : faible, modérée et élevée. Au cours de la première décennie (1984-1990), les superficies sous IHV de fréquence élevée, modérée et faible étaient respectivement de 2117,7 km2 (41,7 %), 2745,7 km2 (54,1 %) et 206,8 km2 (4,07 %). Au cours de la quatrième décennie (2010-2016), les classes de cohérence du statut VHI étaient respectivement de 356,2 km2 (7,03 %), 2314,2 km2 (45,7 %) et 2390,9 km2 (47,2 %). On constate que la zone de l'état VHI faiblement cohérent a augmenté de façon très remarquable (43,1 % d'augmentation des terres) entre la première et la quatrième décennie au détriment de l'état hautement cohérent. La carte de cohérence pour l'ensemble de la période (1984-2016) montre clairement qu'une superficie d'environ 1 223 km2 (24 %) peut être considérée comme une zone de culture constante. Sur l'ensemble des terres agricoles, plus de 70 % de la superficie était modérément cohérente, ce qui signifie que les cultures sont en mauvaise santé et que leur situation risque de s'aggraver au fil du temps.

Tableau 46 : Superficie sous différentes classes de cohérence de différentes périodes (km^2).

Classe de cohérence	1ère décennie	2ème décennie	3ème décennie	4ème décennie	1984-2016
Élevée	2117.7 (41.7 %)	2959.3 (58.5 %)	210.6 (4.16 %)	356.2 (7.03 %)	1223 (24 %)
Modérée	2745.7 (54.1 %)	1463.3 (28.9 %)	4701.8 (92.9 %)	2314.2 (45.7 %)	3728 (74.3 %)
Faible	206.8 (4.07 %)	634.3 (12.54 %)	144.7 (2.8 %)	2390.9 (47.2 %)	83 (1.62 %)

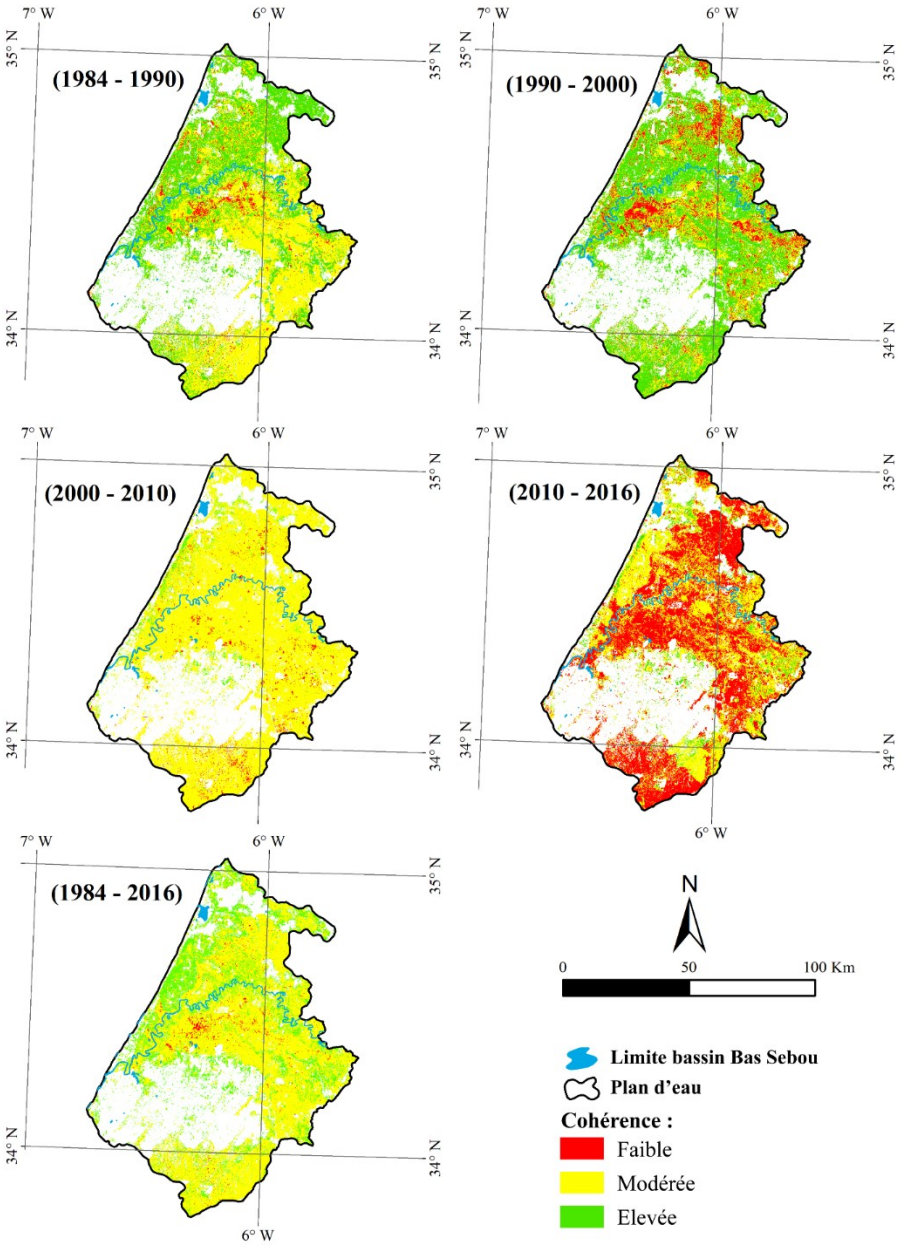


Figure 107 : Cohérence de VHI au cours de différentes périodes.

III . 5. Sécheresse et rendement des cultures céréalières

Les séries chronologiques des indices de sécheresse de télédétection (VCI, TCI et VHI) et météorologiques (SPI et SPEI) pendant la saison de croissance des céréales d'octobre à juin sont superposées aux anomalies de rendement (SYRS) pour le blé dur, le blé tendre et l'orge, du 1984 à 2016 (**Figures 108, 109 et 110**). Le SYRS comme indicateur de la sécheresse agricole avec des valeurs allant du moins ou égal à -1,50 (pertes de rendement élevées) à plus ou égal à 1,50 (augmentation de rendement élevée) (**Tableau 44**). Les valeurs correspondantes aux 1, 3, 6 et 12 mois des indices SPI et SPEI ont été calculées pour les stations du bassin Bas Sebou. Ensuite, leurs moyennes pondérées ont été obtenues pour couvrir l'ensemble du bassin Bas Sebou, enfin régionalisées. Ces indices permettent la détection, l'évaluation et le suivi des

sécheresses et, dans certaines mesures des inondations. L'évolution temporelle des indices météorologiques (SPI et SPEI) montre que plus l'échelle de temps est longue, plus la sévérité et la durée de la sécheresse sont évidentes. Ils ont fluctué fréquemment, avec une large gamme, sur des échelles de temps de 1 et 3 mois, ce qui suggère l'impact du changement climatique à court terme (**Figures 108 et 109**). Les années de récolte avec des pertes de rendement élevées pour les céréales d'automne sont 1995, 2006 et 2010. En effet, les indices météorologiques indiquent la présence d'une sécheresse sévère à extrême lors de ces années, à l'exception de l'année 2010. De ce fait, le bassin Bas Sebou a connu une succession variable de pertes de rendements céréalières, dont les causes peuvent être dues à des précipitations excessives, conduisant à des inondations, comme dans le cas de la période 2009-2011 et/ou aux épisodes de sécheresses successives et parfois de longue durée. Le phénomène d'inondation reflète, d'une part, le taux élevé de précipitations pendant une période qui ne permet pas l'infiltration ou l'évacuation des eaux stagnantes et, d'autre part, la morphologie plate de la région (plaine inondable) et la nature des sols bien développés. Par conséquent, les conditions favorables identifiées par les indices météorologiques, en particulier le SPI (**Figure 108**), coïncident avec de faibles anomalies de rendement durant cette année. Cependant, l'évolution spatio-temporelle des indices météorologiques de 1984 à 2016 montre plus d'épisodes de sécheresse en utilisant SPEI, ce qui souligne l'importance d'utiliser le facteur d'évapotranspiration (ETP) pour mieux capturer les conditions de sécheresse dans le bassin Bas Sebou. Concernant la télédétection spatiale bien compte de la variabilité interannuelle des rendements et la saison céréalière exceptionnelle de 2010 est bien reflétée par les séries chronologiques des indices de rendement et de sécheresse (**Figure 110**). L'évolution des indices VCI, TCI et VHI ont représenté une similitude évidente avec le SYRS. Enfin, une autre caractéristique frappante est que tous les indices de sécheresse (télédétection et météorologiques) montrent que la fréquence et la sévérité des sécheresses sont accentuées depuis le 21ème siècle, ce qui conforte les conclusions du réchauffement climatique au Maroc lors de ces dernières années (Schilling *et al.*, 2020).

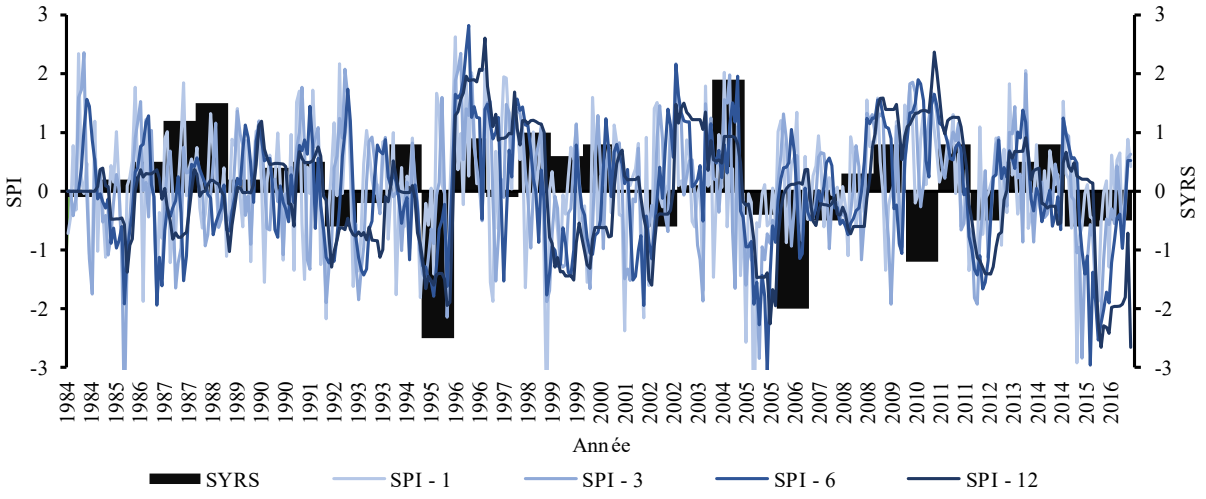


Figure 108 : Variations temporelles de rendement standardisé (SYRS) et de SPI à différentes échelles de temps (1, 3, 6 et 12 mois) durant la période 1984-2016.

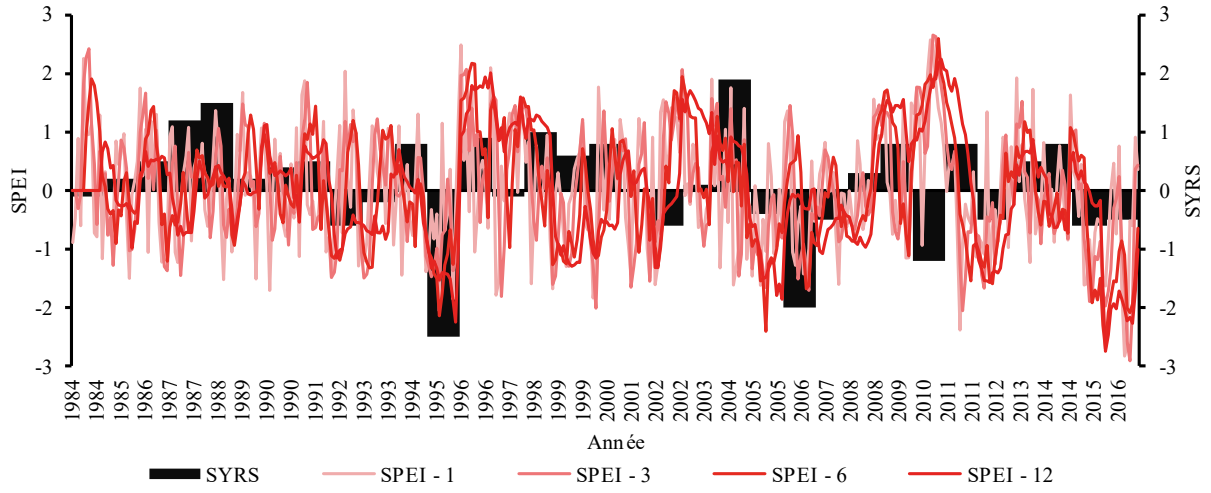


Figure 109: Variations temporelles de rendement standardisé (SYRS) et de SPEI à différentes échelles de temps (1, 3, 6 et 12 mois) au cours de la période 1984-2016.

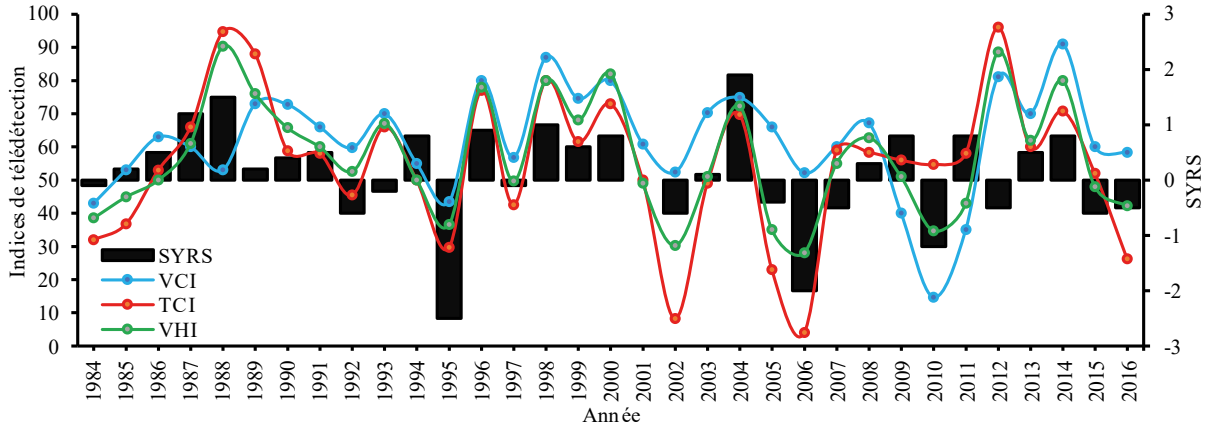


Figure 110 : Variations temporelles du rendement standardisé (SYRS) et des indices de télédétection (VCI, TCI et VHI) au cours de la période 1984-2016.

III . 6. Performance des indices de sécheresse (DIs)

Afin de maximiser la probabilité d'expliquer la variabilité des rendements, une analyse de corrélation de Pearson a été effectuée pour évaluer la relation entre SYRS, les indices météorologiques (d'octobre à mai) à différentes échelles de temps et les indices satellitaires. Étant donné les différentes sources de données de base des indices calculés (satellite, météorologique et statistique), les corrélations entre les différents indices seraient faibles. SPI et SPEI sont des indices météorologiques basés sur le niveau des précipitations et de la température par rapport à la tendance historique. L'ensemble des indices satellitaires (VCI, TCI et VHI) reflète les conditions hydriques et thermiques de la couverture terrestre. SYRS représente les valeurs d'anomalie du rendement des céréales qui vont de -1,5 à 1,5, exprimant la variabilité de la production par rapport à la normale. La matrice de corrélation entre les différents indices pendant la saison d'hiver et les anomalies de rendement des céréales, montre que les indices météorologiques et satellitaires révèlent à la fois des différences dans la force de la corrélation entre SPI ou SPEI et les indices satellitaires, et des différences entre SPI et

SPEI à différentes échelles de temps. En outre, il existe des différences de corrélation entre VCI, TCI et VHI (**Figure 111**). Pour les céréales (SYRS), les échelles temporelles SPI et SPEI à 6 et 12 mois ont montré des corrélations faibles et souvent non significatives. Les corrélations les plus fortes ont été observées pour les échelles de temps courtes (1 à 3 mois) avec généralement peu de différence. Les résultats ont également indiqué que la série SPEI avec une échelle de temps de 3 mois était la mieux corrélée et expliquait la plus grande partie de la variabilité des rendements pour les principales cultures céréalières au cours de la période 1984-2016. Des résultats similaires ont également été rapportés par Panu & Sharma (2002), qui ont indiqué que l'échelle de temps d'un mois était la meilleure pour surveiller les effets d'une sécheresse sur l'agriculture. Cette forte corrélation entre les indices météorologiques et le SYRS s'explique par le fait que les céréales sont particulièrement sensibles au manque d'eau à ce stade. Une sécheresse sévère pendant ce stade entraînerait une perte de rendement considérable, tandis que la corrélation faible pendant les étapes de semis et de traite a été attribuée au fait que la sécheresse n'avait pas d'effet significatif sur le rendement pendant ces deux étapes. À ces stades, les besoins en eau sont moindres et un excès d'humidité pourrait nuire à la production agricole. Dans l'ensemble, les rendements céréaliers dans le bassin Bas Sebou ont tendance à réagir à de courtes périodes de sécheresse (1 à 3 mois). Cependant, la sensibilité des cultures à la sécheresse est la plus forte au printemps à des échelles de temps moyennes (3 à 6 mois). Cela montre que les conditions d'humidité pendant l'hiver (la période correspondant à la plantation et aux premiers stades de croissance du tallage et de l'élongation des tiges) sont cruciales pour le bon développement des plantes, comme cela a été discuté récemment (Wang *et al.*, 2016).

	VCI	TCI	VHI	SYRS	SPI-1	SPI-3	SPI-6	SPI-12	SPEI-1	SPEI-3	SPEI-6	SPEI-12
VCI		0.46	0.71	0.37	0.2	0.22	0.3	0.34	0.21	0.22	0.4	0.44
TCI	0.46		0.91	0.56	0.19	0.08	0.16	0.23	0.22	0.3	0.33	0.65
VHI	0.71	0.91		0.57	0.26	0.08	0.32	0.33	0.26	0.36	0.3	0.46
SYRS	0.37	0.56	0.57		0.34	0.41	0.2	0.21	0.33	0.45	0.11	0.2
SPI-1	0.2	0.19	0.26	0.34		0.45	0.34	0.27	0.98	0.47	0.36	0.23
SPI-3	0.22	0.08	0.08	0.41	0.45		0.79	0.72	0.47	0.99	0.78	0.63
SPI-6	0.3	0.16	0.32	0.2	0.34	0.79		0.95	0.35	0.77	0.99	0.84
SPI-12	0.34	0.23	0.33	0.21	0.27	0.72	0.95		0.28	0.7	0.96	0.94
SPEI-1	0.21	0.22	0.26	0.33	0.98	0.47	0.35	0.28		0.51	0.38	0.25
SPEI-3	0.22	0.3	0.36	0.45	0.47	0.99	0.77	0.7	0.51		0.7	0.61
SPEI-6	0.4	0.33	0.3	0.11	0.36	0.78	0.99	0.96	0.38	0.77		0.87
SPEI-12	0.44	0.65	0.46	0.2	0.23	0.63	0.84	0.94	0.25	0.61	0.87	

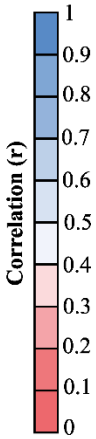


Figure 111 : Matrice de corrélation de Pearson entre les différentes DIs et le SYRS.

IV. Discussion

La sécheresse agricole continue de menacer gravement la sécurité alimentaire dans de nombreuses régions du monde en particulier dans les pays en développement comme le cas du Maroc. Ces dernières années, la sécheresse s'est aggravée dans le bassin Bas Sebou (Hakam *et al.*, 2022b), soulevant des inquiétudes quant à son impact sur la productivité agricole en général et sur les rendements des cultures en particulier. Les résultats montrent clairement que VHI a régulièrement diminué au fil du temps et que l'étendue de la zone de bonne santé de la culture

s'est déplacée vers des conditions de santé modérées et mauvaises. Par conséquent, la proportion de superficie en bonne santé des cultures a été comprimée durant la dernière décennie. La productivité céréalière a montré une légère augmentation mais l'étendue des superficies des cultures en bonne santé s'est atténuée. En effet, depuis le début du 21ème siècle, la superficie en bonne santé des cultures n'était pas très élevée et la proportion maximale de la zone d'étude (> 70 % de la superficie totale) était caractérisée par les conditions VHI modérées. Par conséquent, il y a suffisamment de possibilités d'améliorer le niveau de productivité et d'améliorer l'état de santé des cultures, ce qui peut augmenter la production brute dans le bassin Bas Sebou. Cette condition prévaut également dans d'autres parties du pays, où les installations pour les cultures d'hiver ne sont pas suffisantes. L'amélioration de la santé des sols, une bonne infrastructure, un soutien à l'irrigation ambiante sont fortement souhaités à cette fin (Roopaei *et al.,* 2017). L'un des facteurs le plus déterminant dans ce cas était la rareté de l'irrigation, qui a entraîné une dérégulation du VHI dans différentes catégories (**Tableau 45**). Seulement 24% de la superficie a été identifiée comme cohérente, ce qui n'était pas un bon indicateur d'intensification des cultures et d'amélioration de la production pour répondre aux besoins croissants de la population. De ce fait, l'indice VHI a donné de très bons résultats dans le cas présent. L'inclusion de LST et NDVI pour le calcul de la santé de la végétation peut sembler insatisfaisante, alors que leur relation avec les céréales a prouvé sa performance (R = 0.57). En général, les données climatiques (précipitations et températures) et l'agriculture correspondent à des schémas bien connus. Les indices météorologiques (SPI et SPEI) basés sur ces données sont pris en compte du fait que l'étude est faite sur les céréales d'hiver qui dépendent principalement des précipitations. Il convient de noter que la prise en compte des précipitations et de la température générerait des résultats peu efficaces par rapport aux données satellitaires. Les valeurs de différence observées entre SPEI et SPI peuvent être dues à des différences dans la méthode d'entrée et de calcul, sachant qu'ils ont tous deux des points négatifs. D'une part, l'indice SPI est basé uniquement sur les données de précipitations et, d'autre part, l'utilisation de la température seule pour calculer d'ETP via l'équation de Thornthwaite est l'un des principaux inconvénients de l'indice SPEI. En d'autres termes, le fait de calculer l'ETP d'une manière différente peut conduire à un résultat différent (Zarei & Mahmoudi, 2020). Cependant, l'association entre SPEI et SYRS a montré une bonne performance par rapport à SPI, en particulier sur des échelles de temps courtes (1 à 3 mois). Cela indique que l'inclusion d'ETP dans le calcul de l'indice de sécheresse, comme c'est le cas dans SPEI, offre une plus grande capacité à prédire les effets de la sécheresse sur les rendements des cultures par rapport à l'utilisation uniquement des précipitations. La variance de la température s'est avérée être le principal facteur distinctif parmi les cultures les plus sensibles à la sécheresse et a été approuvée par TCI. Ce dernier a montré que le bassin Bas Sebou est très sensible aux changements de température par rapport à l'humidité car la zone d'étude bénéficie de plaines inondables qui maintiennent l'humidité du sol. Les résultats indiquent donc que les rendements des cultures sont sensibles aux épisodes de sécheresse, en particulier pendant la saison de croissance. Cette constatation confirme l'affirmation de Bouras *et al.,* (2020) qui ont rapporté que les pertes de céréales pluviales sont fortement corrélées à la sévérité de la sécheresse.

D'une façon générale, les résultats de cette étude permettront de mieux comprendre l'évolution spatio-temporelle de la sécheresse agricole dans le bassin Bas Sebou (1984-2016). Les futurs plans de développement pourraient être basés sur ces résultats, en mettant l'accent sur les zones agricoles les plus vulnérables (régions du Sud et du Sud-Est), à la réponse aux plans internationaux focalisant l'adaptation et l'atténuation des effets des changements climatiques.

V. Conclusion

Le changement climatique constitue une menace importante pour le bien-être humain et la sécurité alimentaire, en particulier dans les pays en développement. A ce propos, il a été évalué les propriétés physiques de la sécheresse agricole dans le Bassin Bas Sebou de 1984 à 2016 et analysé l'interaction entre la sécheresse et le rendement des céréales pluviales à l'aide de séries de rendement résiduel standardisées (SYRS). Les indices météorologiques (multi-scalaires) ont montré que les événements climatiques extrêmes sont de plus en plus fréquents dans le bassin Bas Sebou au fil des ans d'une part. D'autre part, le suivi de la santé de la végétation a montré une baisse progressive des conditions de bonne santé des cultures et une augmentation des mauvaises conditions de santé des cultures. Cependant, pour un pays comme le Maroc, où la croissance démographique est élevée et la parité de pouvoir d'achat faible, cette tendance de VHI est défavorable. La santé des cultures est influencée par une variété de facteurs géo-climatiques et socio-économiques, mais l'approche combinée des indices satellitaires et météorologiques a donné des résultats satisfaisants. L'impact de la résolution spatio-temporelle sur le résultat final n'a pas été évalué en attendant la disponibilité des images à haute résolution temporelle avec fréquence encore plus élevée. Dans le chapitre suivant, ces résultats sont exploités pour le développement de modèles empiriques de prévision du rendement des céréales à l'échelle provinciale du bassin Bas Sebou avec l'utilisation des algorithmes d'apprentissage automatique (machine learning).

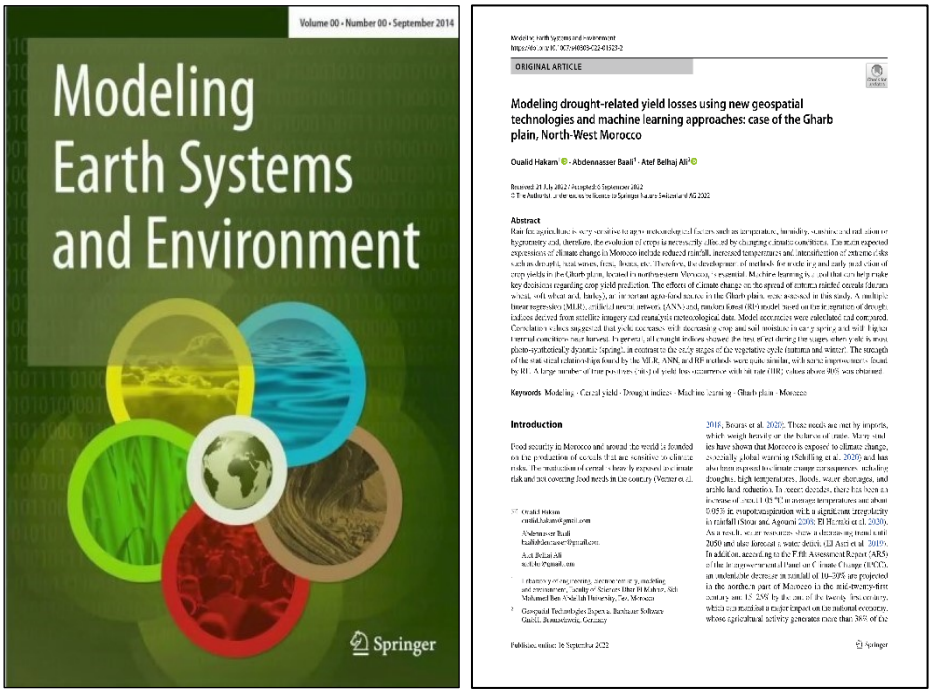
CHAPITRE VII

PRÉVISION SAISONNIÈRE DES RENDEMENTS DES CÉRÉALES

I. Introduction 216
II. Données 217
II . 1. Données sur les rendements....217
II . 2. Télédétection et indices de sécheresse multiscalaires....218
III. Méthodologie....219
III . 1. Anomalies de rendement céréalier 219
III . 2. Corrélation entre indices de sécheresse et rendements des céréales pluviales 219
III . 3. Sélection de prédicteurs significatifs....220
III . 4. Modèles 220
III . 5. Mesures d'évaluation 221
IV. Résultats 222
IV . 1. Céréales et indices de sécheresse pendant les années à faible rendement....222
IV . 2. Relation entre le rendement céréalier (SYRS) et les indices de sécheresse 226
IV . 3. Sélection de prédicteurs statistiques significatifs 230
IV . 4. Modèles MLR, RF et ANN 231
V. Discussion....238
VI. Conclusion....241

CHAPITRE VII
PRÉVISION SAISONNIÈRE DES RENDEMENTS DES CÉRÉALES

À la lumière des résultats obtenus dans les chapitres précédents, nous pouvons donc dire que nous avons atteint les objectifs fixés en introduction. L'amélioration de la capacité de suivi de sécheresse et la communication en temps réel des données de surveillance sont des étapes importantes dans le lancement de toute réponse à la sécheresse. En ce sens, le travail acquis dans ce chapitre vise à développer des modèles de prévision saisonnière du rendement des céréales dans le bassin Bas Sebou. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur les résultats du chapitre précédent où nous avons trouvé une forte corrélation entre les indices de sécheresse issus des observations satellitaires et des observations météorologiques et le rendement des céréales. Dans notre étude, nous avons évalué la performance de la combinaison entre indices de télédétection, les observations météorologiques et les indices climatiques pour prédire le rendement des céréales. Afin de construire les modèles de prévision avec ces données, nous avons utilisé une approche linéaire (régression linéaire multiple) et plusieurs approches non-linéaire basées sur les algorithmes d'apprentissage automatique (machine learning) les plus utilisés dans la littérature. Les résultats de ce chapitre sont publiés dans la revue *Modeling Earth Systems and Environment.*



Hakam, O., Baali, A., & Belhaj Ali, A. (2022). Modeling drought-related yield losses using new geospatial technologies and machine learning approaches: case of the Gharb plain, North-West Morocco. Modeling Earth Systems and Environment, 9(1), 647-667. DOI : https://doi.org/10.1007/s40808-022-01523-2

Résumé

L'agriculture pluviale est très sensible aux facteurs agrométéorologiques tels que la température, l'humidité, l'ensoleillement et le rayonnement ou l'hygrométrie et, par conséquent, l'évolution des cultures est nécessairement affectée par le changement des conditions climatiques. Les principales manifestations attendues du changement climatique au Maroc sont la réduction des précipitations, l'augmentation des températures et l'intensification des risques extrêmes tels que la sécheresse, les vagues de chaleur, le gel, les inondations, etc. Il est donc essentiel de développer des méthodes de modélisation et de prévision précoce des rendements des cultures dans la plaine du Gharb, située dans le nord-ouest du Maroc. L'apprentissage automatique est un outil qui peut aider à prendre des décisions clés concernant la prévision du rendement des cultures. Les effets du changement climatique sur la propagation des céréales pluviales d'automne (blé dur, blé tendre et orge), une source agroalimentaire importante dans la plaine du Gharb, ont été évalués dans cette étude. Un modèle de régression linéaire multiple (MLR), de réseau neuronal artificiel (ANN) et de forêt aléatoire (RF) basé sur l'intégration des indices de sécheresse dérivés de l'imagerie satellitaire et des données météorologiques de réanalyse. Les précisions des modèles ont été calculées et comparées. Les valeurs de corrélation suggèrent que le rendement diminue avec la diminution de l'humidité des cultures et du sol au début du printemps et avec des conditions thermiques plus élevées près de la récolte. En général, tous les indices de sécheresse ont montré le meilleur effet pendant les phases où le rendement est le plus dynamique sur le plan photo-synthétique (printemps), contrairement aux premières phases du cycle végétatif (automne et hiver). La force des relations statistiques trouvées par les méthodes MLR, ANN et RF était assez similaire, avec quelques améliorations trouvées par RF. Un grand nombre de vrais positifs (hits) d'occurrence de perte de rendement avec des valeurs de taux de hit (HR) supérieures à 90 % a été obtenu.

Mots-clés : Rendement céréalier, indices de sécheresse, apprentissage automatique, modélisation, plaine du Gharb, Maroc.

Abstract

Rainfed agriculture is very sensitive to agro-meteorological factors such as temperature, humidity, sunshine and radiation or hygrometry and, therefore, the evolution of crops is necessarily affected by changing climatic conditions. The main expected expressions of climate change in Morocco include reduced rainfall, increased temperatures and intensification of extreme risks such as drought, heat waves, frost, floods, etc. Therefore, the development of methods for modeling and early prediction of crop yields in the Gharb plain, located in northwestern Morocco, is essential. Machine learning is a tool that can help make key decisions regarding crop yield prediction. The effects of climate change on the spread of autumn rainfed cereals (durum wheat, soft wheat and, barley), an important agro-food source in the Gharb plain, were assessed in this study. A multiple linear regression (MLR), artificial neural network (ANN) and, random forest (RF) model based on the integration of drought indices derived from satellite imagery and reanalysis meteorological data. Model accuracies were calculated and compared. Correlation values suggested that yield decreases with decreasing crop and soil moisture in early spring and with higher thermal conditions near harvest. In general, all drought indices showed the best effect during the stages when yield is most photo-synthetically dynamic (spring), in contrast to the early stages of the vegetative cycle (autumn and winter). The strength of the statistical relationships found by the MLR, ANN, and RF methods were quite similar, with some improvements found by RF. A large number of true positives (hits) of yield loss occurrence with hit rate (HR) values above 90 % was obtained.
Keywords: *cereal yield, drought indices, machine learning, modeling, Gharb plain, Morocco.*

I. Introduction

La sécurité alimentaire au Maroc et dans le monde repose sur la production de céréales qui sont sensibles aux risques climatiques. La production de céréales est fortement exposée aux risques climatiques et ne couvre pas les besoins alimentaires du pays (Verner *et al.,* 2018 ; Bouras *et al.,* 2020). Ces besoins sont couverts par les importations, qui pèsent lourdement sur la balance commerciale. De nombreuses études ont montré que le Maroc est exposé au changement climatique, en particulier au réchauffement de la planète (Schilling et al. 2020) et a également été exposé aux conséquences du changement climatique, notamment les sécheresses, les températures élevées, les inondations, les pénuries d'eau et la réduction des terres arables. Au cours des dernières décennies, les températures moyennes ont augmenté d'environ 1,05 °C et l'évapotranspiration d'environ 0,05 %, avec une forte irrégularité des précipitations (Stour & Agoumi, 2008 ; El Harraki *et al.,* 2020). Par conséquent, les ressources en eau montrent une tendance à la baisse jusqu'en 2050 et prévoient également un déficit hydrique (El Asri et al. 2019). En outre, selon le cinquième rapport d'évaluation (AR5) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), une baisse indéniable des précipitations de 10 à 20 % est prévue dans la partie nord du Maroc au milieu du 21e siècle et de 15 à 25 % à la fin du 21e siècle, ce qui peut manifester un impact majeur sur l'économie nationale, dont l'activité agricole génère plus de 38 % de l'emploi au Maroc (Louali, 2019). Au cours des 30 dernières années connues par une faible productivité agricole (MEMWE, 2016), les sécheresses ont principalement affecté les rendements céréaliers sur les terres arables pluviales, en particulier la plaine du Gharb, qui est située au Nord-Ouest du Maroc ; est caractérisée par le secteur agricole, qui est l'un des principaux atouts de l'activité économique de la région.

Actuellement, la relation entre le rendement céréalier et l'occurrence des épisodes de sécheresse a fait l'objet de plusieurs études (El Khatri & El Hairech, 2014 ; Verner *et al.,* 2018 ; Bouras *et al.,* 2020 ; Endale *et al.,* 2021) où la baisse de la pluviométrie et l'augmentation de la température jouent un rôle majeur (Balaghi *et al.,* 2013). En outre, il a été démontré que les rendements céréaliers diminuent en fonction du réchauffement climatique, atteignant 50 à 75 % pour les années sèches et 10 % pour les années normales (Ouraich et Tyner 2014 ; Aoubouazza *et al.,* 2019). En effet, l'évaluation de la sécheresse agricole nécessite la combinaison de multiples variables liées aux facteurs climatiques, pédologiques et biophysiques des plantes (Mishra & Singh, 2010 ; Kassem *et al.,* 2022). De nombreuses méthodes de surveillance de la sécheresse ont été développées, basées sur la quantité de précipitations ou sur des indices tels que l'indice de précipitation standardisé (SPI) (McKee *et al.,* 1993) et l'indice de précipitation et d'évapotranspiration standardisé (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.,* 2010). En raison du manque de fiabilité et de l'hétérogénéité biophysique des données du réseau de stations météorologiques. Les données satellitaires, telles que l'indice normalisé des différences de végétation (NDVI), la température estimée de la surface terrestre (LST) de l'infrarouge spectral et l'humidité du sol (SM – *Soil Moisture*) ont toutes été utilisées

pour identifier la sécheresse agricole (Van Hoolst *et al.*, 2016 ; Fayech *et al.*, 2021). La plupart des indices de télédétection sont basés sur les anomalies de ces produits, comme l'indice d'état de la végétation (VCI), l'indice d'état de la température (TCI), l'indice de santé de la végétation (VHI) (Kogan, 1995b), et l'indice d'état de l'humidité du sol (SMCI – *Soil Moisture Condition Index*) (Zhang & Jia, 2013) qui prend en compte l'état de l'humidité du sol. Ces indices sont largement utilisés dans les études agronomiques, car ils constituent de bons indicateurs du stress de la végétation et peuvent être calculés à plusieurs échelles de temps (par exemple, jour, semaine, demi-mois, mois, saison et année) (Heft-Neal *et al.*, 2017 ; Singh *et al.*, 2021 ; Chere *et al.*, 2022). Dans le cas de la plaine du Gharb, une échelle de temps hebdomadaire est adoptée pour rechercher les effets de la sécheresse sur les céréales pluviales d'automne.

Dans le processus de surveillance et de planification agricole, les agrométéorologues ont besoin de modèles d'estimation simples et précis du rendement des cultures sous l'influence de conditions climatiques sèches (Mishra *et al.*, 2015 ; Jones *et al.*, 2017 ; Al Masmoudi *et al.*, 2022). L'approche de modélisation mécaniste, basée sur un échantillonnage de terrain réalisé annuellement dans les pays développés, n'a pas pu suivre le développement végétatif des céréales et prédire la récolte catastrophique de 1995 (Balaghi *et al.*, 2013). De ce fait, l'approche de prévision de la récolte céréalière au Maroc basée sur des méthodologies innovantes, combinant des approches empiriques et statistiques avec l'expertise agronomique et météorologique a été proposée par plusieurs auteurs (Balaghi *et al.*, 2008 ; Balaghi *et al.*, 2013 ; Devkota & Yigezu, 2020). Ces approches basées sur des algorithmes d'apprentissage automatique (ML - *Machine Learning*) tels que la régression linéaire multiple (MLR - *Multiple Linear Regression*), la forêt aléatoire (RF - *Random Forest*), et le réseau de neurones artificiels (ANN - *Artificial Neural Network*), utilisent des relations statistiques entre les données de rendement indépendantes et les variables prédictives (dépendantes), représentent les effets à une échelle spatio-temporelle beaucoup plus grande que les conditions de sécheresse, sont faciles à calculer, et ont des coûts de calcul plus faibles que la modélisation mécaniste.

L'objectif de ce travail est de modéliser l'influence des conditions de sécheresse sur les rendements des céréales pluviales d'automne (blé dur, blé tendre et orge) au niveau de la plaine du Gharb, situé dans le bassin Bas Sebou, en utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique et en évaluant le potentiel de combinaison des indices de télédétection et des indices de sécheresse multiscalaires. Les progrès des outils d'information géographique, ainsi que la disponibilité récente d'images satellitaires à faible coût, ont ouvert une nouvelle voie pour l'étude des interactions entre le climat et les cultures en général, et la prévision des rendements céréaliers en particulier. Par conséquent, ce document constitue une étape importante vers le développement d'un modèle de risque de sécheresse agricole, qui peut aider les agriculteurs et impliquer les compagnies d'assurance dans la gestion de la sécheresse.

II. Données

II . 1. Données sur les rendements

Sachant que le risque de sécheresse agricole affecte particulièrement l'agriculture

pluviale, des cartes et des données sur l'utilisation des terres ont été traitées pour les principales cultures pluviales (blé dur, blé tendre et orge) de la plaine du Gharb pour la période 2000-2020 (**Figure 112**). Le régime des précipitations est très variable et les cultures pluviales sont plus vulnérables aux risques de sécheresse. Les précipitations sont relativement abondantes, environ 500 mm par an, et sont également très spatiales en termes de diversité géographique, de continentalité et d'effet des modes de circulation extratropicaux. Le régime thermique, surtout en été, est caractérisé par des températures maximales élevées. La distribution spatiale de la végétation présente une hétérogénéité très nette, le printemps étant le plus vert possible (Bijaber & Rochdi, 2017). Selon Balaghi *et al.,* (2008), les pratiques culturales au Maroc sont adaptées à la distribution bimodale des précipitations et les semis des céréales pluviales s'effectuent entre septembre et décembre, en fonction de la précocité des premières précipitations en automne, et les récoltes commencent vers juin (Alaoui, 2005a, b et c).

Les données de production annuelle (tonne ; t) et de superficie récoltée (hectare ; ha) de blé dur, de blé tendre et d'orge ont été obtenues auprès des services statistiques du ministère de l'agriculture. La série chronologique de la production de céréales pluviales en tonnes par hectare (t/ha-1) représente le rapport entre la production annuelle (t) et la superficie récoltée (ha) pour chaque province au cours de la période 2000-2020.

II . 2. Télédétection et indices de sécheresse multiscalaires

La réponse des rendements des céréales pluviales (blé dur, blé tendre et orge) aux conditions de sécheresse dans la plaine du Gharb a été évaluée à l'aide d'indices de télédétection (VCI, TCI, VHI et SMCI) et d'indices de sécheresse multiscalaires (SPI et SPEI). Les indices de télédétection sont basés sur le NDVI normalisé, le LST et l'humidité du sol (SM). L'indice SMCI (**Équation 40**) caractérise les conditions de sécheresse en termes d'humidité du sol (SM) (Zhang & Jia, 2013). Sauf pour le SMCI, les valeurs de l'indice vont de 0 à 100, les valeurs inférieures à 40 indiquant des conditions de sécheresse (Kogan, 2001). L'inclusion du facteur thermique (LST) et des interactions biophysiques entre le sol et la végétation est la raison pour laquelle ces indices de télédétection sont utilisés plutôt que le NDVI seul, comme dans de nombreuses études. Afin de prendre en compte les changements de l'écosystème en termes de fluctuations entre les valeurs maximales/minimales du NDVI, de la LST et du SM.

Les données hebdomadaires sur la santé de la végétation (VH – *Vegetation Health*) des indices VCI, TCI et VHI ont été obtenues auprès de l'administration nationale des océans et de l'atmosphère (NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*) de 2000 à 2020, et le produit SM est dérivé de l'initiative de changement de l'Agence Spatiale Européenne (ESA - *European Space Agency*) avec un pas de temps quotidien pour la période 2000-2019 et une résolution de 25 km (**Tableau 47**). La moyenne des valeurs quotidiennes a été calculée pour obtenir les valeurs hebdomadaires. Pour chaque province, les moyennes spatiales des indices de télédétection ont été calculées et utilisées pour modéliser les rendements céréaliers. L'analyse a été effectuée entre les semaines 42 (environ début octobre de l'année précédente n - 1) et 25

(fin juin de l'année n).

L'un des principaux objectifs est d'utiliser les indices de télédétection dans la modélisation du rendement des céréales et de les combiner avec les indices de sécheresse multiscalaires SPI et SPEI. Par conséquent, les données utilisées pour calculer SPI et SPEI ont été obtenues à partir de la base de données ERA5, qui a été créée par le Service Copernicus sur le changement climatique (C3S - *Copernicus Climate Change Service*) du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (**Tableau 47**). Ces indices ont été calculés à l'aide du logiciel SPEI-R version 1.7 (Vicente-Serrano *et al.,* 2010), et l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée à l'aide de l'équation de Thornthwaite (Thornthwaite, 1984).

Toutes les données collectées ont été moyennées au niveau de chaque province de la zone d'étude et organisées sous forme de tableau avant d'être fusionnées avec la couche de données de rendement.

$$SMCI = \frac{\mathrm{SM} - SM_{min}}{SM_{max} - SM_{min}} * 100 \qquad \textbf{(40)}$$

Tableau 47 : Données satellitaires utilisées.

Produit	Résolution temporelle	Résolution spatiale	Variables	Source
VH	Hebdomadaire	4 km	VCI, TCI et VHI	*https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_ftp.php*
SM	Journalier	25 km	SM	*https://esa-soilmoisture-cci.org*
ERA5	Journalier	30 km	Précipitations et température	*https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5*

III. Méthodologie

III . 1. Anomalies de rendement céréalier

Les anomalies de rendement céréalier ont été calculées pour exclure les facteurs non climatiques en supprimant une tendance linéaire des séries chronologiques de rendement des cultures comme déjà abordé dans les sections précédentes. La série standard des résidus de rendement (SYRS) a été appliqué sur le rendement des céréales durant la période (2000-2020).

III . 2. Corrélation entre indices de sécheresse et rendements des céréales pluviales

L'analyse de corrélation de Pearson est effectuée, après avoir déterminé les superficies céréalières afin de chercher le degré de lien entre les rendements céréaliers et les indices de sécheresse (télédétection et multi-scalaires) (Wilks, 2006). Les relations statistiques significatives sont évaluées avec un niveau de signification de 95%. Les stades des besoins des céréales en termes d'humidité végétale, de sol et de conditions thermiques sont évalués respectivement en termes de VCT, SMCI et TCI. Le lien entre VHI et les rendements céréaliers révèlent l'effet combiné du stress hydrique et thermique au cours du cycle de croissance (intervalle de 35 semaines). En outre, l'effet des précipitations et températures à chaque échelle du temps (1, 3, 6, 9 et 12 mois) est évalué sur la base des indices de sécheresse multi-scalaires

(SPI et SPEI) au cours de la saison de croissance des céréales (9 mois : d'octobre à juin).

III . 3. Sélection de prédicteurs significatifs

La série des prédicteurs est constituée de quatre indices de télédétection et deux indices de sécheresse multi-scalaires pour chaque province. Les semaines VCI, TCI, VHI et SMCI, ainsi que les échelles de temps et les mois de SPI et SPEI, qui expliquaient le mieux le rendement céréalier ont été définies à l'aide d'une méthode de sélection automatique pas à pas (niveau de confiance 95%). Généralement, la régression pas à pas désigné par sa dénomination anglophone *Stepwise regression*, a été largement utilisée car elle nécessite peu de puissance de calcul et génère un sous-ensemble de prédicteurs (Wilks, 2006). Pour chaque province et chaque type de céréale d'automne (blé dur, blé tendre et orge), un ensemble de modèles par étape a été obtenu en se basant sur les indices de télédétection, excepté VHI qui est une combinaison à la fois de VCI et TCI afin d'éviter la colinéarité. Par la suite, des modèles de régression pas à pas sont réalisés en combinant SPI et SPEI avec les indices de télédétection (VCI + TCI + SMCI + SPI + SPEI et VHI + SMCI + SPI + SPEI) afin d'évaluer la combinaison supplémentaire des indices multi-scalaires avec les indices de télédétection dans la modélisation de la variabilité des rendements céréaliers.

III . 4. Modèles

En se basant sur les résultats de régression pas à pas (sélection des prédicteurs significatifs), une standardisation des variables dépendantes et indépendantes est effectuée en calculant le Z-score pour les modélisations statistiques ultérieures. Trois algorithmes ont été appliqués pour modéliser les rendements céréaliers (blé dur, blé tendre et orge) dans chaque province (SK et Kt) : **i**) régression linéaire multiple MLR, **ii**) réseau neuronal ANN et **iii**) forêt aléatoire (RF).

Régression linéaire multiple (MLR - *Multiple Linear Regression*) : MLR est une fonction de prédiction linéaire simple et un algorithme d'apprentissage supervisé pour décrire les variations d'une variable dépendante (rendement céréalier) associée aux variations de plusieurs variables indépendantes (précédemment sélectionnées statistiquement) (Bratsas *et al.*, 2020).

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_n x_n \qquad \textbf{(41)}$$

Où b_0 est le terme constant, b_n est les coefficients de pente pour chaque variable indépendante, x_n est la variable indépendante et Y est la variable dépendante (rendement céréalier).

Forets aléatoires (RF - *Random Forest*) : La régression RF effectue un apprentissage en parallèle sur de multiples arbres de décision construits aléatoirement et entraînés sur des sous-ensembles de données différents. Elle diffère des modèles d'arbre de décision unique car il repose sur le résultat moyen de nombreux arbres (Blanco, 2018). La valeur prédite du

rendement des céréales (blé dur, blé tendre et orge) est la réponse ajustée moyenne de tous les arbres individuels résultant de chaque échantillon. Dans cette étude, Les modèles de régression RF ont été créés dans R à l'aide du package *RandomForest* (Liaw & Wiener, 2002). La meilleure combinaison de numéro d'arbre (*n* arbre) et de nombre de variables disponible pour le fractionnement à chaque nœud d'arbre (mtry) a été choisie. Des modèles de régression RF ont été construits à l'aide de 100 arbres (n arbre = 100).

Réseau de neurones artificiels (ANN - *Artificial Neural Network*) : L'ANN est un algorithme d'apprentissage automatique (ML) dont la conception est à l'origine schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques composés de plusieurs couches et de neurones respectifs, et qui par la suite se sont rapprochés des méthodes statistiques. Dans cette étude, une structure à trois couches a été adoptée (couche d'entrée, couche cachée et couche de sortie). La couche d'entrée contient les prédicteurs statistiquement significatifs, puis transmet les informations combinées à la couche suivante (couche cachée). Par conséquence, la couche de sortie contient un neurone qui correspond à la valeur du rendement prévu des céréales. Généralement, dans un réseau de neurones, les neurones d'une couche sont connectés aux neurones de la couche suivante et les informations circulent de l'entrée à la sortie à travers les couches cachées (Cherukuri *et al.,* 2019). La formation ANN a été développée selon la méthode de rétro-propagation de Levenberg-Marquardt en R utilisant le package *Neuralnet* (Günther & Fritsch, 2010).

III . 5. Mesures d'évaluation

La performance des modèles MLR, RF et ANN est évaluée en termes de validation croisée leave-one-out. Cette technique de validation permet de vérifier la fiabilité des résultats, c'est-à-dire, évaluer les performances du modèle en utilisant successivement des observations de l'échantillon d'origine comme données d'apprentissage (données d'entraînement) et un petit ensemble d'observations restant pour la validation (données de validation). La validation croisée permet ainsi de calculer un coefficient de détermination en validation croisée (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE - *Root-Mean-Square Error*). Ensuite, les résultats de la variance expliquée des modèles (R^2) sont analysés avec et sans mode de validation croisée (R^2 no-cv).

Après avoir modélisé les rendements céréaliers au niveau de chaque province en se basant sur les algorithmes MLR, RF et ANN, le potentiel des données céréalières modélisées pour la prévision des pertes de récolte est évalué. Ici, la perte de rendement des cultures est définie comme des valeurs d'anomalie de rendement normalisée inférieures à -1.5 (**Tableau 44**). Les performances du modèle MLR et ANN concernant la perte de rendement des cultures (anomalie de rendement < -1.5) sont évaluées en termes de tableaux de contingence et de scores catégoriels associés (Wilks, 2006) : biais de fréquence (FB - *Frequency Bias*), taux de réussite (SR - *Success Rate*), taux de fausses alarmes (FAR - *False Alarm Rate*) et taux de succès (HR - *Hit Rate*). FB décrit le rapport entre la prévision moyenne et l'observation moyenne et mesure la

capacité des modèles à sous-estimer (FB <1) ou surestimer (FB> 1) ou sans biais (FB = 1) les occurrences de perte de récolte. Le score SR décrit le rapport entre le taux de réussite et les événements estimés et donne des informations sur la probabilité d'une perte de récolte, étant donné qu'elle a été prédite par le modèle. Les scores FAR et HR correspondent respectivement au taux des prévisions positives qui se révèlent erronées (fausses alarmes) et au taux de prévision correcte de la perte de récolte.

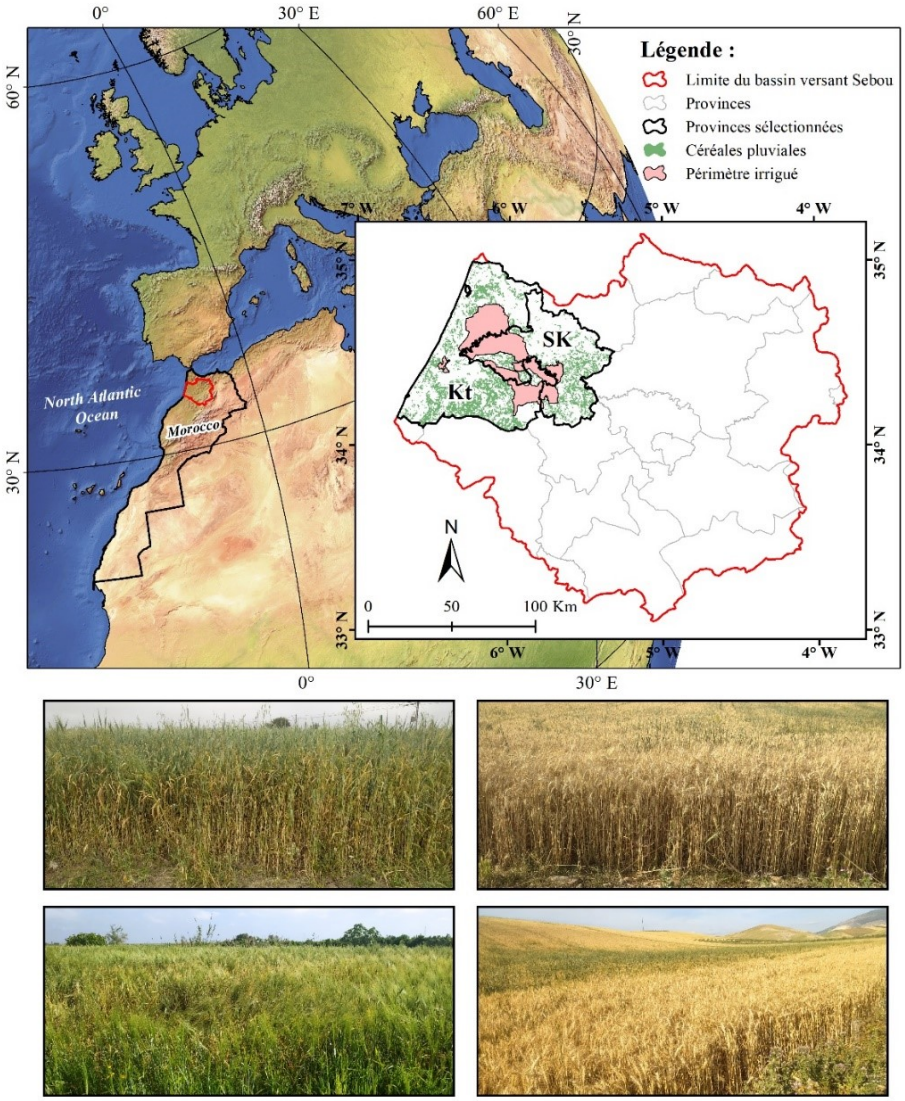


Figure 112 : Localisation géographique des provinces sélectionnées.

IV. Résultats

IV . 1. Céréales et indices de sécheresse pendant les années à faible rendement

Selon les critères décrits ci-dessus, deux provinces dominées par des activités agricoles pluviales sont distinguées. **La figure 113** montre l'évolution temporelle de la série standardisée des résidus de rendement (SYRS) du blé dur, du blé tendre et de l'orge de 2000 à 2020, calculée pour chaque province Sidi Kacem (SK) et Kenitra (Kt). Selon les catégories sélectionnées, la SYRS en tant qu'indicateur de sécheresse agricole avec des valeurs inférieures ou égales à -1,50 (fortes pertes de rendement) à supérieures ou égales à 1,50 (forte augmentation du rendement), les années agricoles qui montrent des pertes de rendement élevées similaires dans les deux

provinces pour toutes les céréales pluviales d'automne sont 2006-2007, 2015-2016 et 2019-2020. Toutefois, la province de Kénitra (Kt) présente davantage d'années déficitaires que la province de Sidi Kacem (SK), avec de grandes différences (sévérité) et de longues périodes (par exemple, 2006-2010), en particulier pour le blé dur. Ce résultat est dû au fait que la province de Kt a été confrontée à de graves inondations au début de l'automne 2008, qui ont entravé les cultures. Les précipitations supérieures à la normale (SPI extrêmement humide) (**Figure 114**) dans cette province à cette époque ont favorisé la production de céréales dans la province SK, qui n'a pas connu d'inondations en raison de la morphologie du terrain. L'orge s'est avérée la plus résistante aux déficits agricoles. Dans l'ensemble, l'évolution temporelle du SYRS du blé (dur et tendre) et de l'orge suit la même tendance dans la province de SK.

La figure 114 illustre la gravité de la sécheresse au cours d'années agricoles spécifiques à faible rendement en utilisant les valeurs moyennes réparties dans l'espace des indices de sécheresse multiscalaires qui ont été normalisés. Les indices de sécheresse multiscalaires indiquent la présence d'une sécheresse sévère à extrême dans les deux provinces pendant les années agricoles déficitaires, en particulier sur des échelles de temps plus longues (6 à 12 mois), à l'exception de la période 2008-2010 (humide à extrêmement humide). Au cours de la période étudiée, une sécheresse sévère a toujours été observée au début de la saison agricole. L'indice SPEI montre que les sécheresses se produisent au début de la saison de croissance (par exemple, 2006-2007) ou pendant la saison intermédiaire sur des échelles courtes (1 à 3 mois) (2015-2016 et 2019-2020). L'indice SPI montre des conditions moins sèches dans les deux provinces que l'indice SPEI, en particulier pour l'année agricole 2015-2016, et des tendances à des conditions normales en 2019-2020. Par conséquent, la température reste le principal facteur de variation des rendements céréaliers. Cependant, quelques exceptions existent dans la province de Kt au cours des années 2008-2009 et 2009-2010, les rendements ont chuté alors que les précipitations ont augmenté (valeurs élevées de SPI). Inversement, au cours de la saison 2005-2006, les rendements ont augmenté malgré la présence de conditions sèches selon l'indice SPI et l'indice SPEI. Ces exceptions démontrent l'importance de la distribution intra-annuelle des précipitations au cours du cycle des cultures. Il est important de noter que la campagne 2015-2016 a été la plus sèche de toute la période étudiée.

La figure 115 illustre les valeurs hebdomadaires des indices de télédétection de la semaine 42 (année n-1 des semis) à la semaine 25 (année n de la récolte), c'est-à-dire de la mi-octobre de l'année précédente au mois de juin de l'année suivante. D'après les indices VCI, TCI et VHI, des signes de sécheresse (valeurs inférieures à 40) ont été observés au cours des années de perte de rendement dans les deux provinces, en particulier au cours des années 2006-2007 et 2015-2016. En revanche, en 2019-2020, du début au milieu de la croissance, les valeurs des indices VCI et VHI indiquent des conditions d'humidité favorables (augmentation du NDVI), par opposition à des conditions plus chaudes mises en évidence par de faibles valeurs de l'indice TCI (plus évidentes dans la province de Kt).

En général, le plus grand nombre de semaines de sécheresse enregistrées par l'indice VHI

(coïncidant avec de faibles valeurs de l'indice VCI et de l'indice TIC) se trouve dans la province de Kt au cours de la campagne 2015-2016 et dans la province de SK au cours des campagnes 2006-2007 et 2015-2016. Cette caractéristique correspond aux régions défavorables situées à l'intérieur de la plaine et les plus touchées par des sécheresses intenses, en accord avec la distribution spatiale des précipitations (degré de continentalité). L'évolution de l'indice SMCI montre de grandes fluctuations entre les semaines et suit la même tendance que l'indice TCI, indiquant la forte relation entre la température de la surface du sol (LST) et l'humidité du sol (SM). L'indice SMCI présente de faibles valeurs au début de la saison de croissance, qui coïncide avec le pic de précipitations en automne-hiver, ce qui permet au sol d'être saturé d'eau et aux cultures céréalières d'être plantées.

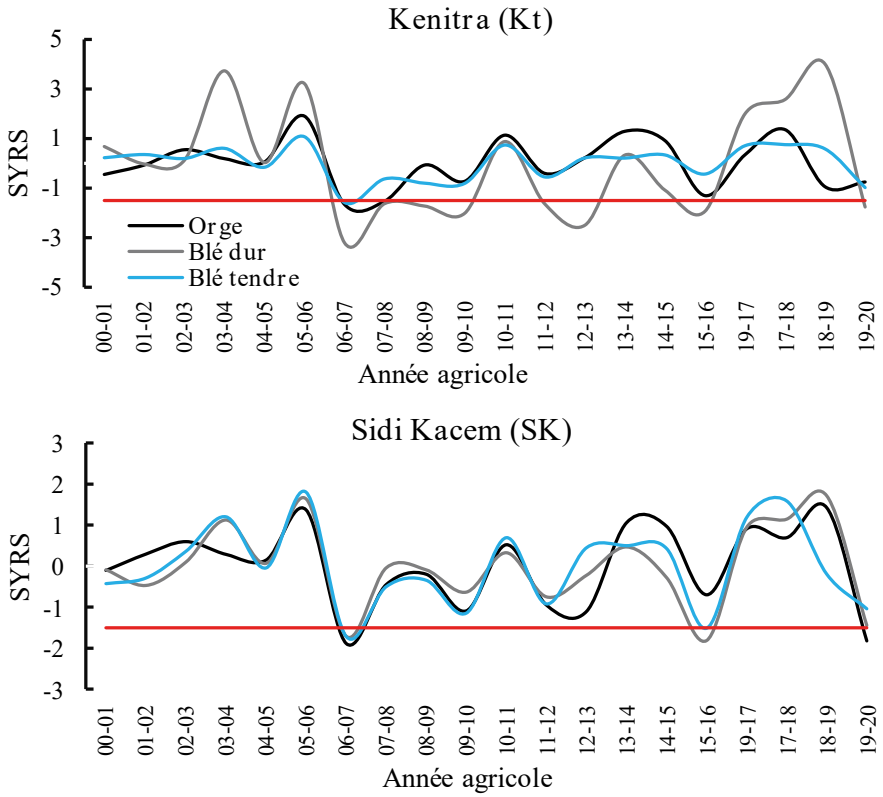


Figure 113 : Évolution temporelle du SYRS pour le blé tendre, le blé dur et l'orge au niveau des provinces Kenitra (Kt) et Sidi Kacem (SK) pendant les années agricoles 2000-2020.

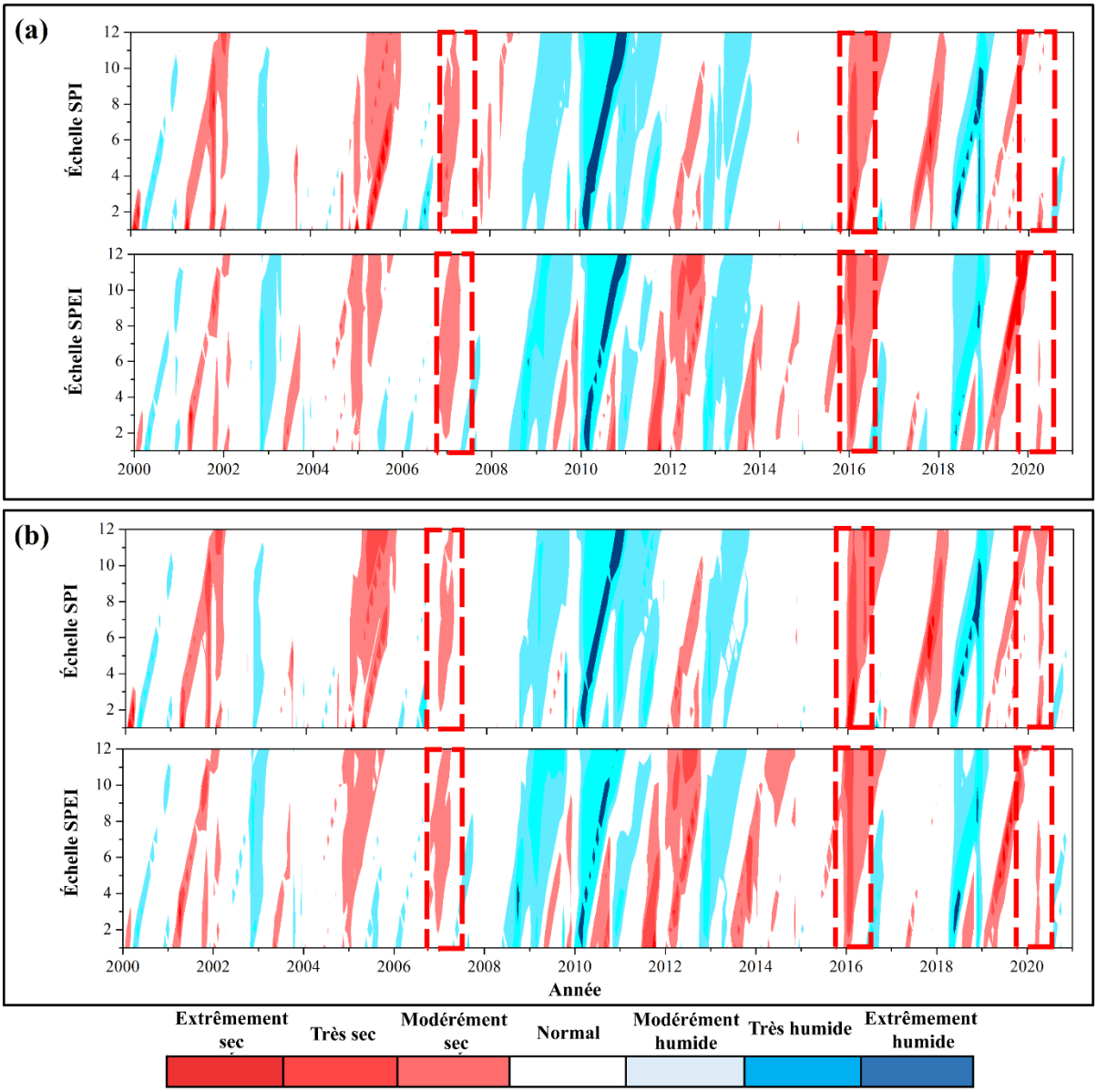


Figure 114 : Valeurs mensuelles des moyennes spatiales de SPI et SPEI à des échelles temporelles de 1 à 12 mois au niveau de la province de Sidi Kacem (a) et de Kénitra (b) pendant la période de 2000 à 2020. Les barres rouges en pointillés indiquent les années à faible rendement (entre janvier et juin).

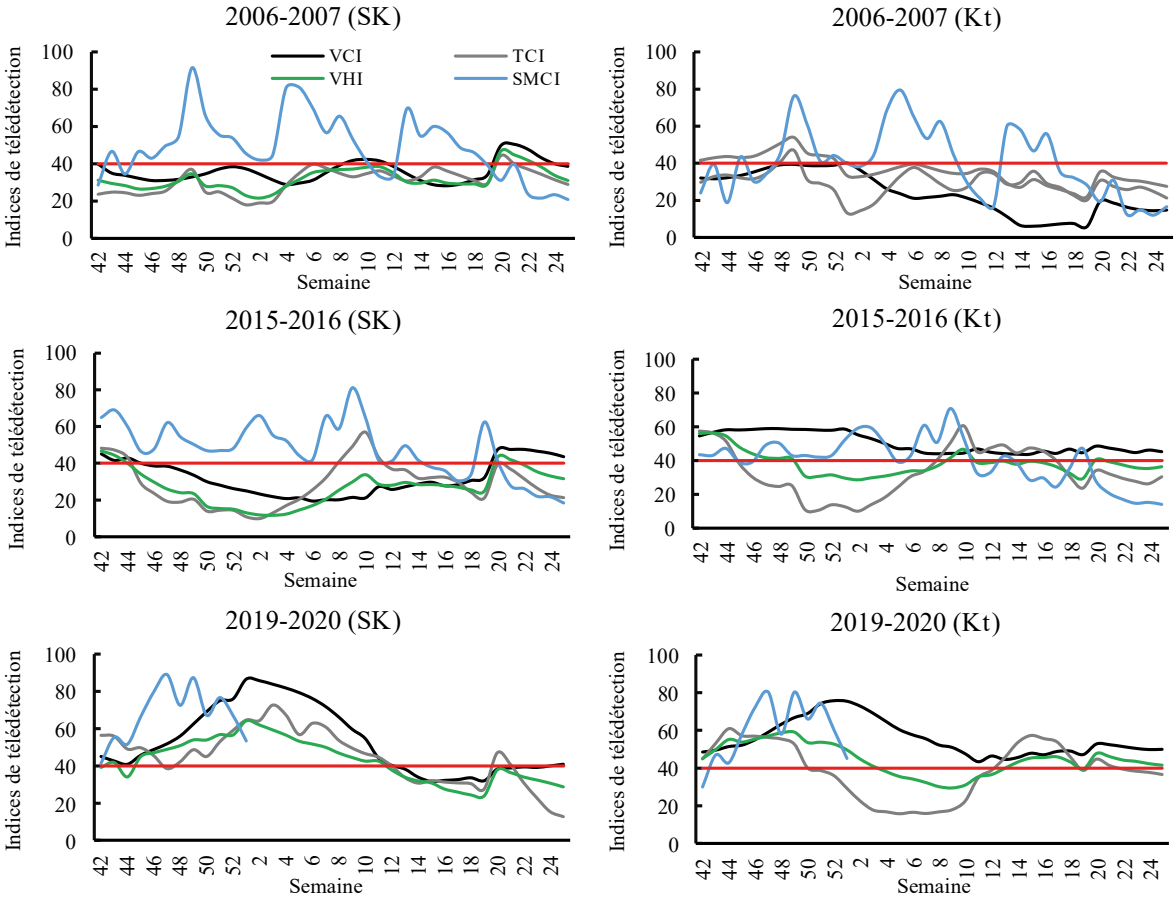


Figure 115 : Valeurs hebdomadaires des moyennes spatiales de VCI, de TCI, de VHI et de SMCI entre la semaine 42 (octobre de l'année n-1) et la semaine 25 (fin juin de l'année n), pendant les années de faible rendement dans les provinces de Sidi Kacem (SK) et de Kénitra (Kt). Les valeurs inférieures à 40 indiquent des conditions de sécheresse pour VCI, TCI et VHI.

IV . 2. Relation entre le rendement céréalier (SYRS) et les indices de sécheresse

Au cours du cycle végétatif, une analyse de corrélation de Pearson a été utilisée pour évaluer les relations entre les rendements des céréales pluviales d'automne et les indices de télédétection justifiant l'humidité et les conditions thermiques (VCI, TCI, et SMCI) d'une part, et entre les rendements des céréales pluviales d'automne et les indices de sécheresse multiscalaires d'autre part. Cette analyse montre l'évolution des coefficients de corrélation entre les indices de télédétection et les rendements des céréales pluviales d'automne (orge, blé dur et blé tendre) dans les deux provinces (SK et Kt) de la semaine 42 à la semaine 25 (**Figure 116**). En général, les corrélations entre VCI, TCI et VHI sont faibles au début de la saison de culture des céréales et deviennent plus fortes au cours des stades de croissance moyens. De même, les valeurs de corrélation indiquent que les indices de télédétection ont la plus grande influence pendant les mois de printemps, qui correspondent aux périodes de photosynthèse active. La province Kt présente moins de corrélations significatives, probablement liées à la présence de terres irriguées qui peuvent être prises en compte dans. En effet, le traitement utilisé pour identifier les céréales pluviales souffre d'incertitudes, et les céréales irriguées peuvent être

prises en compte dans l'analyse. Outre la faible résolution spatiale de certains produits, la corrélation entre les rendements et l'indice SMCI est aléatoire avec des fluctuations très importantes, car les données SM utilisées pour calculer l'indice d'humidité du sol (SMCI) ont une résolution de 25 km, ce qui peut favoriser le chevauchement des pixels des champs irrigués et pluviaux. En revanche, la province de SK présente des valeurs statistiquement significatives pour les indices VCI, TCI et VHI, ce qui indique que la baisse des rendements des cultures est associée à une diminution de l'humidité de la végétation (faibles valeurs des indices VCI et VHI) au début du printemps et à des températures élevées (faibles valeurs de l'indice TCI) à l'approche de la récolte.

La forte dépendance des rendements céréaliers à chaque échelle de temps (1 à 12 mois) par SPEI et SPI a été évaluée pour chaque céréale dans chaque province, depuis la phase des semis jusqu'à la récolte (octobre à juin) (**Figures 117 et 118**). Les résultats sont présentés pour les périodes les plus courtes (1 et 3 mois), les périodes moyennes (6 mois) et les périodes les plus longues (9 et 12 mois). Comme pour les indices de télédétection (**Figure 116**), les indices SPI et SPEI présentent de faibles corrélations au début de la saison des pluies dans les deux provinces. Ces indices sur des échelles de temps plus courtes (1 et 3 mois) présentent des corrélations négatives pendant les mois de printemps (mars à juin), en particulier dans la province de SK. En effet, les corrélations significatives trouvées par SPEI dans la province de SK sont plus prononcées pendant l'hiver à des échelles de temps de 9 et 12 mois que celles trouvées par SPI. Dans la province de Kt, les valeurs de corrélation de SPI et de SPEI à des échelles de temps de 6, 9 et 12 mois sont statistiquement significatives pendant les stades de croissance intermédiaire et finale (du printemps à juin). Seule l'orge présente des corrélations statistiquement significatives à toutes les échelles de temps.

En général, les corrélations dans la province de SK (**Figure 117**) présentent des valeurs plus fortes que dans la province de Kt (**Figure 118**), ce qui suggère des relations plus fortes entre les indices de télédétection et le rendement des céréales dans la plaine, plutôt que celles de l'indice SPI et de l'indice SPEI. En revanche, la province de Kt présente plus de mois de corrélations statistiquement significatives que la culture de l'orge (en particulier aux échelles de temps de 9 et 12 mois) que dans **la figure 118**, ce qui indique la dépendance de l'orge à l'égard de facteurs climatiques tels que les précipitations et la température.

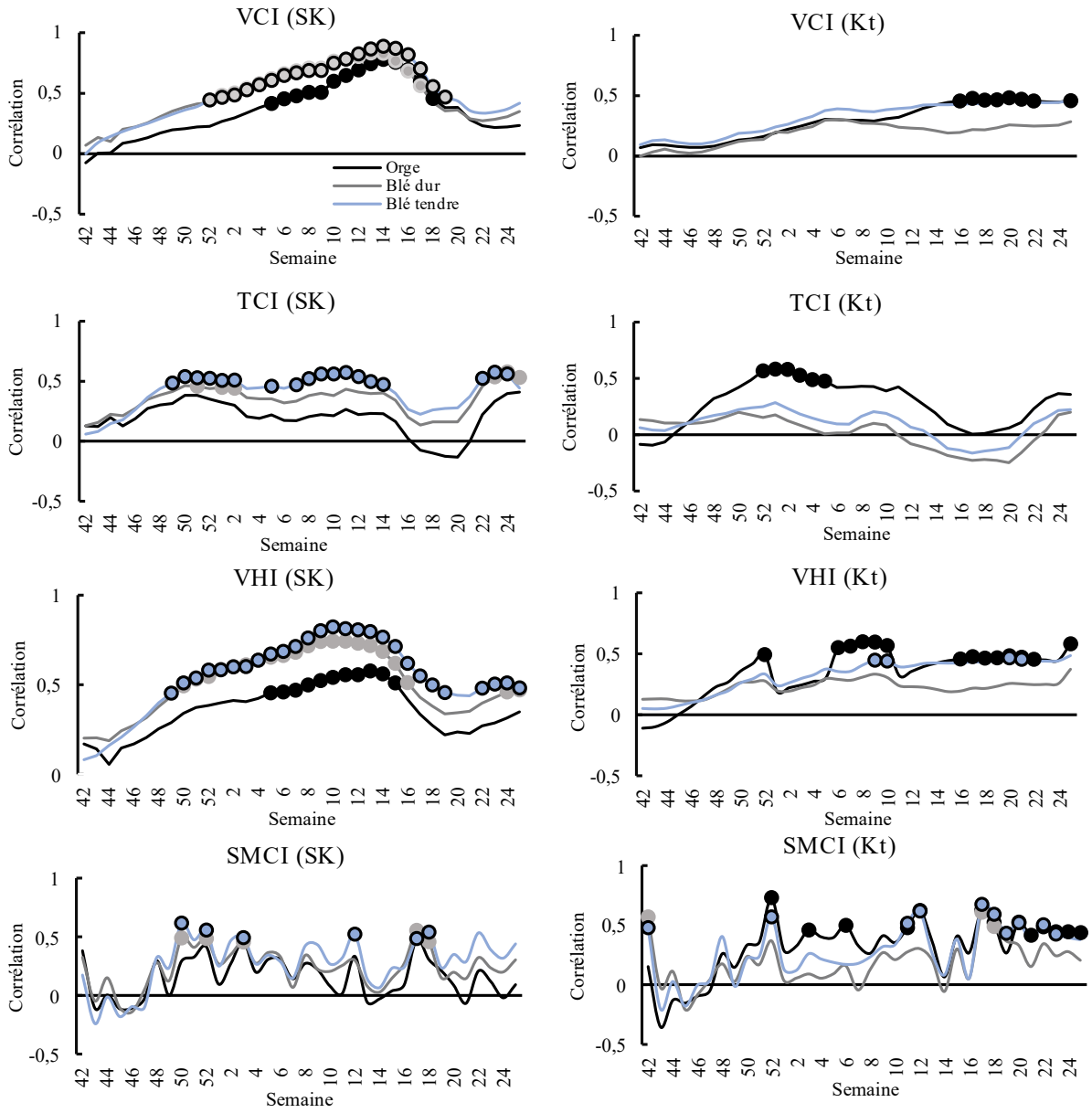


Figure 116 : Corrélations entre les valeurs hebdomadaires de VCI, TCI, VHI et SMCI et le rendement du blé dur et du blé tendre (ligne noire complète et grise), et le rendement de l'orge (ligne complète) dans la province de SK (à gauche) et de Kt (à droite) de 2000 à 2020. Les corrélations significatives au niveau de confiance de 95 % sont marquées par un cercle.

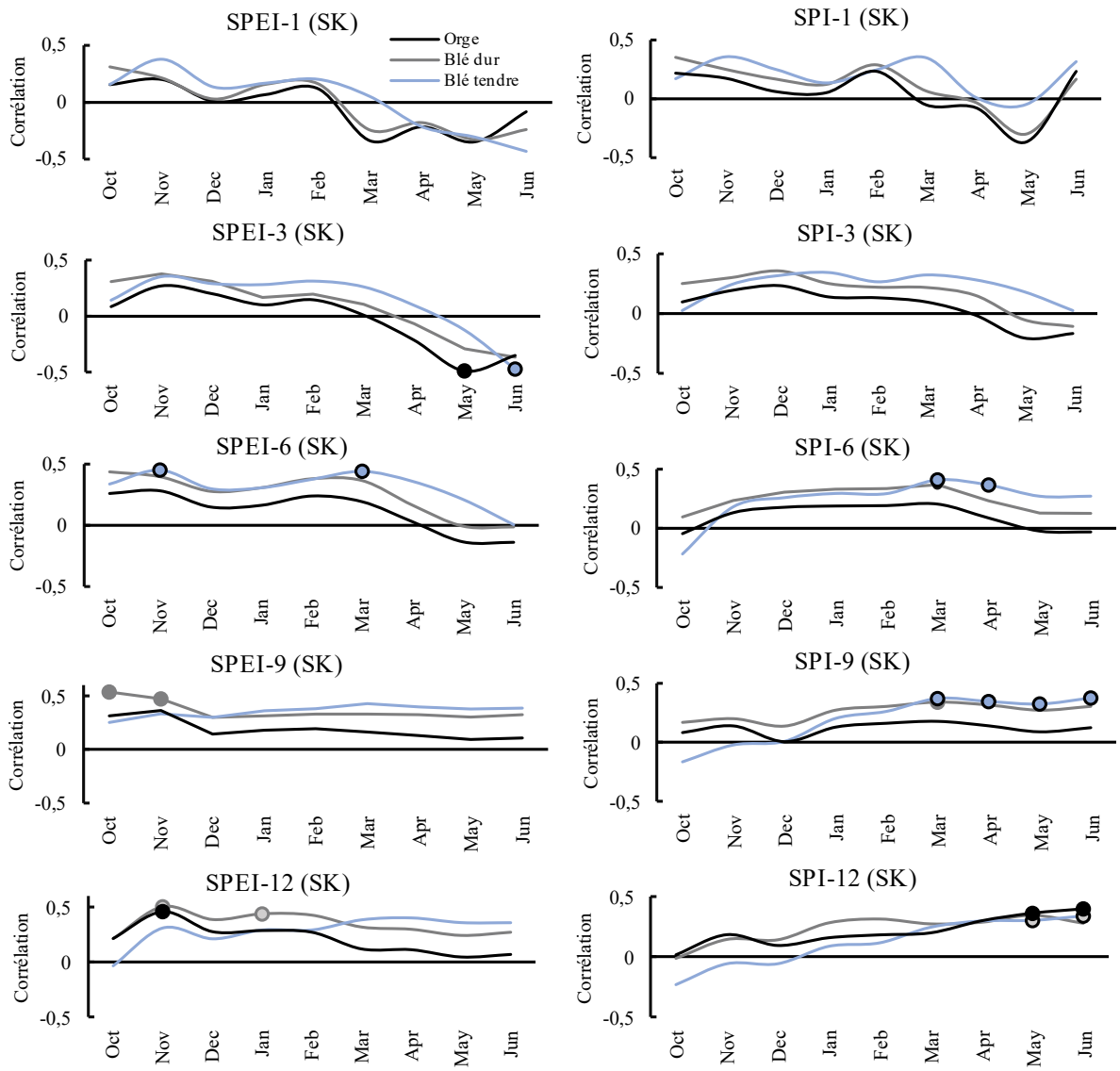


Figure 117 : Corrélations entre les indices de sécheresse multiscalaires moyens et le rendement du blé tendre, du blé dur (ligne noire et grise complète) et de l'orge (ligne complète) dans la province de Kénitra (Kt), entre octobre et juin de la période 2000-2020. Les résultats sont présentés pour des périodes de 1, 3, 6, 9 et 12 mois. Les corrélations significatives à un niveau de confiance de 95 % sont marquées par un cercle.

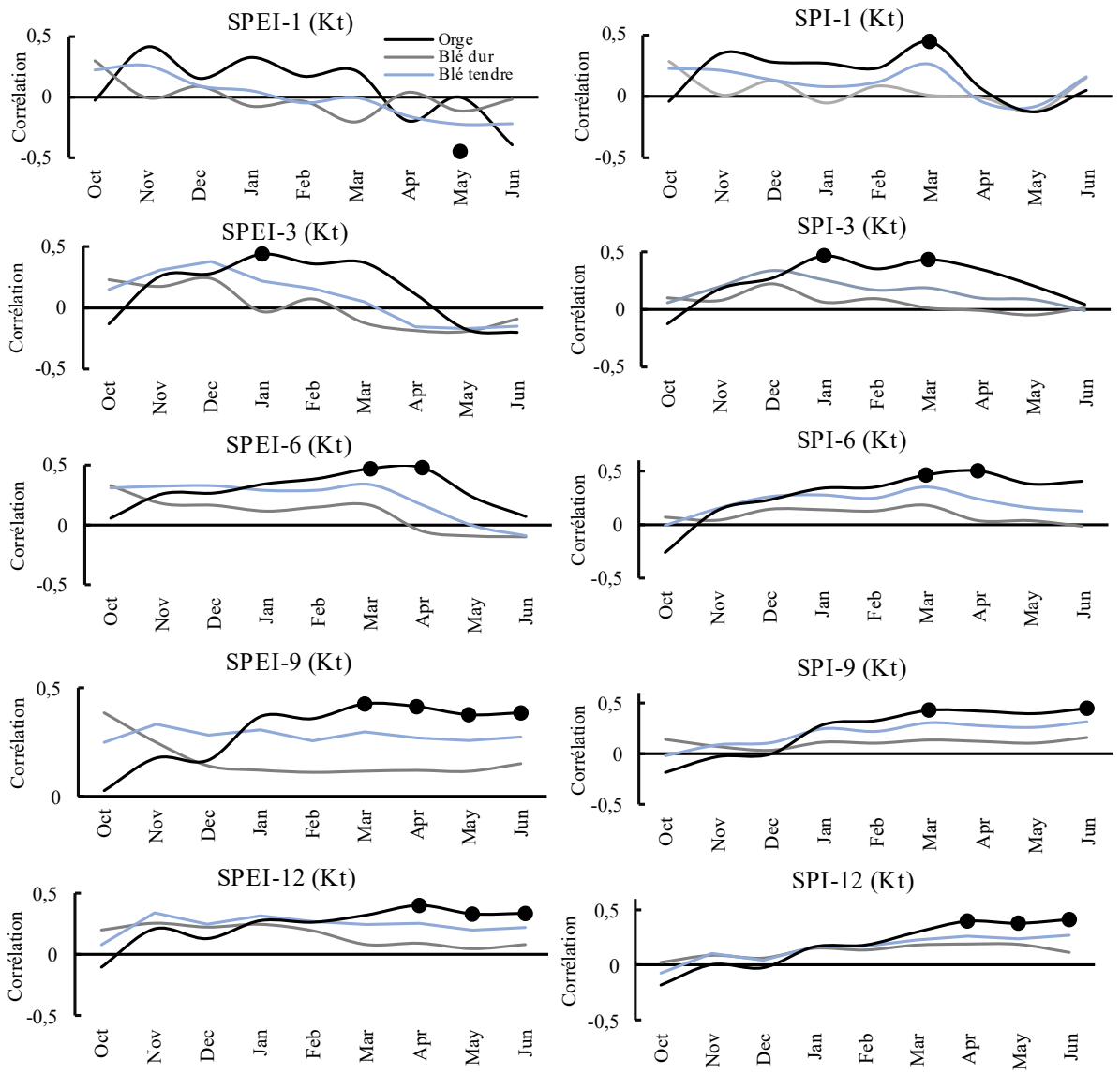


Figure 118 : Corrélations entre les indices de sécheresse multi-scalaires moyens et le rendement du blé tendre, le rendement du blé dur (ligne complète noire et grise) et le rendement de l'orge (ligne entière) dans la province de Kenitra (Kt), entre octobre et juin 2000-2020. Les résultats sont présentés pour des échelles de temps de 1, 3, 6, 9 et 12 mois. Les corrélations significatives à un niveau de confiance de 95 % sont indiquées par un cercle.

IV . 3. Sélection de prédicteurs statistiques significatifs

Les résultats de l'analyse de corrélation entre les indices de rendement et de sécheresse indiquent une variation temporelle significative et mettent en évidence les périodes où les céréales pluviales d'automne sont plus vulnérables à la sécheresse. Par conséquent, pour prévoir avec précision les rendements céréaliers, il faut négliger les informations redondantes afin de trouver les échelles de temps mensuelles les plus appropriées pour SPI, SPEI et hebdomadaires pour VCI, TCI, VHI et SMCI. L'analyse de régression par étapes a mis en évidence les variables prédictives statistiquement significatives au niveau de confiance de 95 % (**Tableau 48**). Les prédicteurs sont sélectionnés en fonction des combinaisons de six prédicteurs, résultant de 20 sous-ensembles différents de variables d'entrée pour les modèles MLR, RF et ANN. Chaque nomenclature de modèle résultante (**Tableau 48**) fait référence à l'espèce céréalière cible (lettre

"DW - *Durum Wheat*" pour le blé dur, lettre "SW - *Soft Wheat*" pour le blé tendre et lettre "B - *Barley*" pour l'orge) dans les provinces ("1" pour SK et "2" pour Kt), et à la combinaison possible de variables prédictives (lettre "a" pour VCI, TCI et SMCI ; lettre "b" pour VCI, TCI, SMCI, SPI et SPEI ; lettre "c" pour VHI et SMCI ; lettre "d" pour VHI, SMCI, SPI et SPEI). Par exemple, le modèle DW1a exprime le rendement du blé dur dans la province de SK, sur la base de semaines statiquement significatives de VCI, TCI et SMCI. Conformément aux résultats de l'analyse de corrélation ci-dessus, la régression pas à pas (*Stepwise regression*) (**Tableau 48**) indique que l'inclusion d'indices de sécheresse multiscalaires tels que l'indice SPI dans les modèles de prévision n'est significative que pour la culture de l'orge dans la province de Kt. Par conséquent, la sélection des variables prédictives choisit les mêmes variables pour la paire de modèles pour le blé tendre et le blé dur ("b" et "d") et les mêmes pour ("a" et "c"). Ainsi, l'inclusion de l'information SPEI serait une redondance dans la province Kt. En général, seuls les modèles basés sur les indices de télédétection (B2a, DW2a, SW2a, B2c, DW2c et SW2c basés sur les semaines d'hiver et de fin de printemps) et SPI (B2b et B2d basés sur une échelle de temps d'un mois de juin) sont appliqués dans la province de Kt. Les indices multi-scalaires SPEI d'octobre et novembre, et SPI du printemps et du début de l'été montrent une influence significative au niveau de la province SK. En fait, les combinaisons "b" et "d" montrent une forte relation entre le rendement des cultures céréalières et les variables prédictives, ce qui indique que la province de SK est largement tributaire de conditions météorologiques favorables pour la croissance des céréales pluviales d'automne. Les indices de télédétection montrent que les semaines les plus prédictives pour les rendements se situent entre le début de l'hiver et les semaines de printemps (VCI, VHI et SMCI), et jusqu'à l'approche de la récolte en termes de conditions thermiques (TCI).

IV . 4. Modèles MLR, RF et ANN

Le tableau 49 présente les performances des modèles de régression et d'apprentissage automatique (ML) issus des analyses MLR, ANN et RF avec leurs coefficients de détermination avec validation croisée (R^2 cv) et sans validation croisée (R^2 no-cv). Le coefficient de détermination le plus élevé (R^2 cv) obtenu est de 0,8 pour le modèle B1b, qui explique 80 % de la variance du rendement de l'orge dans la province de SK, sur la base de VCI, SPI et SPEI. Les sorties des modèles céréaliers provinciaux sans validation croisée (R^2 no-cv) sont moins conservatrices que les valeurs obtenues par validation croisée (R^2), ce qui confirme la robustesse des modèles. Ainsi, seul le modèle DW1a explique moins de 26 % de la variance en validation croisée, les autres modèles expliquant moins de 15 % en validation croisée avec un minimum de 5 % de moins pour les modèles B1b, DW1d, SW1a, et B2c. Les céréales d'automne en SK présentent la relation linéaire la plus forte étant donné les semaines de début de printemps de TCI et VCI comme prédicteurs dans le cas du blé tendre (SW1a) et de l'orge (B1b), et de VHI dans le cas du blé dur (DW1d). SPEI montre également une forte relation avec le blé dur et l'orge pendant l'automne (octobre et novembre, respectivement), et avec SPI pendant le printemps et le début de l'été.

Pour la province de Kt, les relations sont généralement faibles, les modèles SW2c et B2c affichant les valeurs les plus élevées de variance expliquée (70 et 72 %, respectivement). Le rendement de l'orge et du blé tendre dans la province de Kt ne répond qu'aux indices de télédétection (VHI et VCI, respectivement). D'autre part, l'utilisation du SMCI dans le modèle du blé dur (DW2a) réduit l'importance des indices VCI et TCI, mais son importance est légèrement moyenne ($R^2 = 0,51$). En outre, les indices de sécheresse multiscalaires ne sont pas des variables prédictives significatives dans la province de Kt car ils n'ont pas de relation significative avec les céréales pluviales d'automne.

La performance de la validation croisée des modèles ANN est représentée dans **le tableau 49** en termes de mesures statistiques (R^2 no-cv, R^2 cv, architecture et RMSE). Les résultats des modèles ANN sont présentés en fonction des architectures les plus appropriées. En général, la meilleure performance est observée entre trois et cinq neurones cachés. Les modèles DW1a et DW1d présentent également les valeurs de performance les plus élevées, expliquant 80 % de la variance. Les résultats indiquent que sept modèles ANN (indiqués par un * dans **le tableau 49**) (B1a, DW1a, DW1b, SW1b, DW1c, SW1c, B2d) améliorent les résultats du MLR (**Tableau 49**). Comme pour les statistiques de régression linéaire, les modèles DW1d, SW1a, B1b, B2c et SW2a présentent les relations les plus fortes et expliquent 80, 74, 72, 70 et 70 % de la variance dans les modèles ANN, contre 73, 71, 80, 72 et 70 % dans le cas des modèles MLR respectivement.

Les performances des modèles RF sont ensuite présentés dans **le tableau 49**, en fonction des mêmes mesures statistiques que celles utilisées pour les modèles MLR et ANN. L'utilisation de cet algorithme a mis en évidence les performances des deux modèles (SW1d et B2a marqués d'un *) par rapport au MLR et à l'ANN. Comme les résultats des statistiques MLR et ANN, les modèles SW1a, DW1d, B1b, B2c et SW2a affichent également les relations les plus fortes, expliquant 80, 77, 75, 73 et 80 % de la variance dans les modèles RF. Par conséquent, les résultats ne sont présentés que pour les modèles SW1a, DW1d, B1b, SW2a, B2c, car ils affichent les meilleures performances pour chaque céréale dans chaque province en tenant compte à la fois des méthodes MLR, ANN et RF. À l'exception de DW2a, les modèles MLR, ANN et RF n'expliquent que 51, 51 et 52 % de la variance, respectivement.

La performance globale des modèles sélectionnés montre la série chronologique des rendements céréaliers observés dans chaque province et les estimations respectives à l'aide des algorithmes MLR, ANN et RF (**Figures 119 et 120**). Les similitudes considérables entre les algorithmes MLR, ANN et RF sont bien illustrées dans la province de SK, tandis que certaines différences sont observées dans la province de Kt, en particulier pour le blé dur. Les modèles RF présentent une très forte similitude avec les céréales observées, suivis par ANN. Les modèles basés sur la régression linéaire (MLR) présentent une légère différence avec les rendements céréaliers observés. **La figure 121** présente une représentation graphique des résultats du tableau de contingence de l'occurrence des pertes de rendement des cultures (SYRS < -1,5), en comparant les performances des algorithmes MLR, ANN et RF des modèles

sélectionnés. Les résultats montrent que tous les modèles sélectionnés basés sur les techniques MLR et ANN surestiment légèrement les pertes de rendement, tandis que les modèles RF sont presque sans biais (FB = 1). Tous les modèles présentent également des valeurs HR égales à 1, à l'exception du modèle DW2a pour le MLR et l'ANN, ce qui permet de prédire de vrais résultats positifs en matière de pertes de récoltes. Comme pour les résultats HR, les valeurs SR indiquent que la probabilité d'occurrence des pertes de récolte est plus élevée, étant donné qu'elle a été prédite par le modèle, en particulier pour l'algorithme RF. Le taux de prévision erronée des pertes de récolte (FAR) indique que le taux de blé dur dans la province de Kt est plus élevé ; toutefois, l'algorithme RF affiche des valeurs nulles dans tous les modèles, ce qui explique l'absence de fausses alertes de pertes de récolte. En général, l'algorithme RF représente la meilleure performance en matière de prévision des rendements céréaliers et le rendement du blé dur dans la province de Kt s'est avéré être le moins prédit à l'aide des algorithmes MLR, ANN et RF.

Tableau 48 : Prédicteurs sélectionnés et statistiquement significatifs des rendements du blé (dur et tendre) et de l'orge par analyse de régression progressive au niveau de confiance de 95 % (les colonnes de l'indice de télédétection correspondent aux semaines respectives sélectionnées pour prédire le rendement des céréales, et l'IPS et l'IPS correspondent aux mois et aux échelles de temps sélectionnés par chaque modèle).

Province	Modèle	TCI	VCI	VHI	SMCI	SPI	SPEI
SK	B1a		12 14 15				
	DW1a	23 24	12 13 14				
	SW1a	9 12	13				
	B1b		12 15			12-juin 12-Mai	12-Novembre
	DW1b	23 24	12 13 14				
	SW1b		13			12-Mai 12-Juin	
	B1c			13			
	DW1c			11			
	SW1c			10			
	B1d			15	3 17	12-Mai 12-Juin	12-Novembre
	DW1c			12		12-May	9-Octobre
	SW1c			11 12	18	6-Mars 12-Juin 9-Juin 9-Mars 9-Mai	
Kt	B2a	1 2 3 52	15 16 17 18 19 20		12 18 20		
	DW2a				42		
	SW2a		20				
	B2b	52				1-Juin	
	b2c			6 25			
	DW2c				42		
	B2d			6		1-Juin	

Tableau 49 : Résumé des statistiques d'évaluation des performances des modèles d'apprentissage automatique (MLR, RF et ANN) (les modèles les plus performants sont signalés par un *).

Algorithme	MLR				ANN				RF		
Model	Équation de régression	R² no-cv	R² cv	RMSE	Architecture	R² no-cv	R² cv	RMSE	R² no-cv	R² cv	RMSE
B1a	Orge (1) = - 2.219 * VCI12 + 5.438 * VCI14 - 2.568 * VCI16 - 0.015	0,75	0,70	0,42	4-4-1	0,61	0,7	0,5	0,94	0,6	0,71
DW1a	Blé dur (1) = - 1.108 * TCI23 + 1.373 * TCI24 - 6.653 * VCI12 + 12.729 * VCI13 - 5.494 * VCI14 - 0.059	0,87	0,60	0,27	6-5-1	0,73	0,8*	0,41	0,94	0,61	0,52
SW1a	Blé tendre (1) = 0.614 * TCI9 - 0.460 * TCI12 + 0.829 * VCI13 - 0.063	0,76	0,71*	0,4	4-4-1	0,84	0,74*	0,37	0,96	0,8*	0,38
B1b	Orge (1) = - 0.610 * VCI12 + 1.234 * VCI15 + 0.540 * SPEI12 Nov - 5.626 * SPI12 May + 4.965 * SPI12 Jun - 0.015	0,83	0,80*	0,22	6-5-1	0,79	0,72*	0,4	0,94	0,75*	0,47
DW1b	Blé dur (1) = - 1.108 * TCI23 + 1.373 * TCI24 - 6.653 * VCI12 + 12.729 * VCI13 - 5.494 * VCI14 - 0.059	0,87	0,55	0,3	6-5-1	0,73	0,71	0,4	0,93	0,51	0,47
SW1b	Blé tendre (1) = 0.829 * VCI13 - 4.195 * SPI12 May + 3.997 * SPI12 Jun - 0.063	0,76	0,61	0,39	4-4-1	0,69	0,7	0,46	0,94	0,37	0,48
B1c	Orge (1) = 0.591 * VHI13 - 0.015	0,33	0,35	0,59	2-3-1	0,35	0,62	0,56	0,87	0,48	0,71
DW1c	Blé dur (1) = 0.736 * VHI11 - 0.059	0,55	0,59	0,49	2-3-1	0,55	0,7	0,5	0,89	0,51	0,64
SW1c	Blé tendre (1) = 0.796 * VHI10 - 0.063	0,65	0,59	0,44	2-3-1	0,74	0,72	0,43	0,94	0,6	0,53
B1d	Orge (1) = 0.469 * VHI15 + 0.401 * SMCI3 - 0.470 * SMCI17 + 0.694 * SPEI12 Nov - 8.017 * SPI12 May + 7.209 * SPI12 Jun - 0.015	0,72	0,59	0,61	7-6-1	0,6	0,59	0,64	0,96	0,62	0,53
DW1d	Blé dur (1) = 0.788 * VHI12 + 0.376 * SPEI9 Oct - 0.374 * SPI12 May - 0.059	0,75	0,73*	0,42	4-4-1	0,73	0,80*	0,51	0,94	0,77*	0,493
SW1d	Blé tendre = - 3.026 * VHI11 + 3.828 * VHI12 - 0.322 * SMCI18 - 98.553 * SPI6 Mar + 105.056 * SPI9 Mar - 6.547 * SPI9 May + 102.779 * SPI9 Jun - 103.417 * SPI12 Jun - 0.063	0,72	0,61	0,41	9-7-1	0,77	0,66	0,58	0,96	0,70*	0,43
B2a	Orge (2) = 6.355 * VCI17 - 14.291 * VCI8 + 9.476 * VCI19 - 1.159 * VCI20 + 0.123 * TCI52 - 1.751 * TCI1 + 5.101 * TCI2 - 2.839 * TCI3 + 0.441 * SMCI12 + 0.630 * SMCI18 - 0.645 * SMCI20 - 0.010	0,65	0,39	0,9	12-8-1	0,6	0,52	0,79	0,9	0,80*	0,6
B2b	Orge (2) = 0.493 * SPI1 Jun + 0.475 * TCI52 - 0.010	0,54	0,55	0,53	3-4-1	0,54	0,60	0,55	0,9	0,6	0,63
B2c	Orge (2) = 0.446 * VHI6 + 0.482 * VHI25 - 0.010	0,75	0,72*	0,55	3-4-1	0,51	0,70*	0,55	0,91	0,73*	0,42
B2d	Orge (2) = 0.491 * SPI1 Jun + 0.450 * VHI6 - 0.010	0,61	0,59	0,62	3-4-1	0,56	0,7	0,62	0,92	0,55	0,64
DW2a	Blé dur (2) = 1.343 * SMCI42 - 0.045	0,6	0,51	0,4	2-3-1	0,33	0,51	1,38	0,855	0,52	1,94
SW2a	Blé tendre (2) = 0.334 * VCI20 - 0.032	0,71	0,70*	0,46	2-3-1	0,22	0,70*	0,47	0,95	0,80*	0,35
SW2c	Blé tendre (2) = 0.334 * VHI20 - 0.032	0,7	0,61	0,46	2-3-1	0,22	0,48	0,47	0,95	0,48	0,52

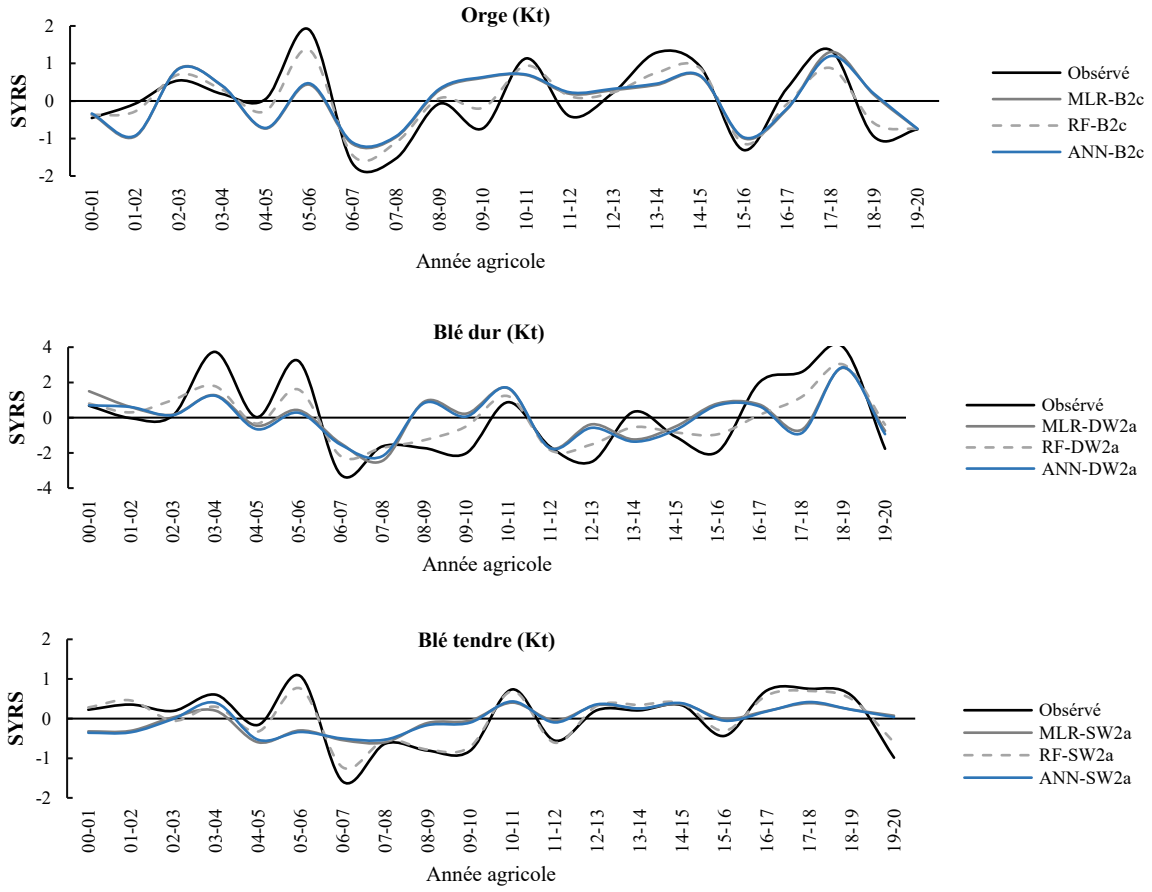


Figure 119 : Séries chronologiques d'observations des rendements du blé dur, du blé tendre et d'orge (ligne noire pleine) et estimations statistiques respectives par les méthodes MLR, RF et ANN à l'aide des modèles présentant les relations les plus fortes (B1b, DW1d, SW1a , B2c, DW2a et SW2a) pour la province de Kt de 2000 à 2020.

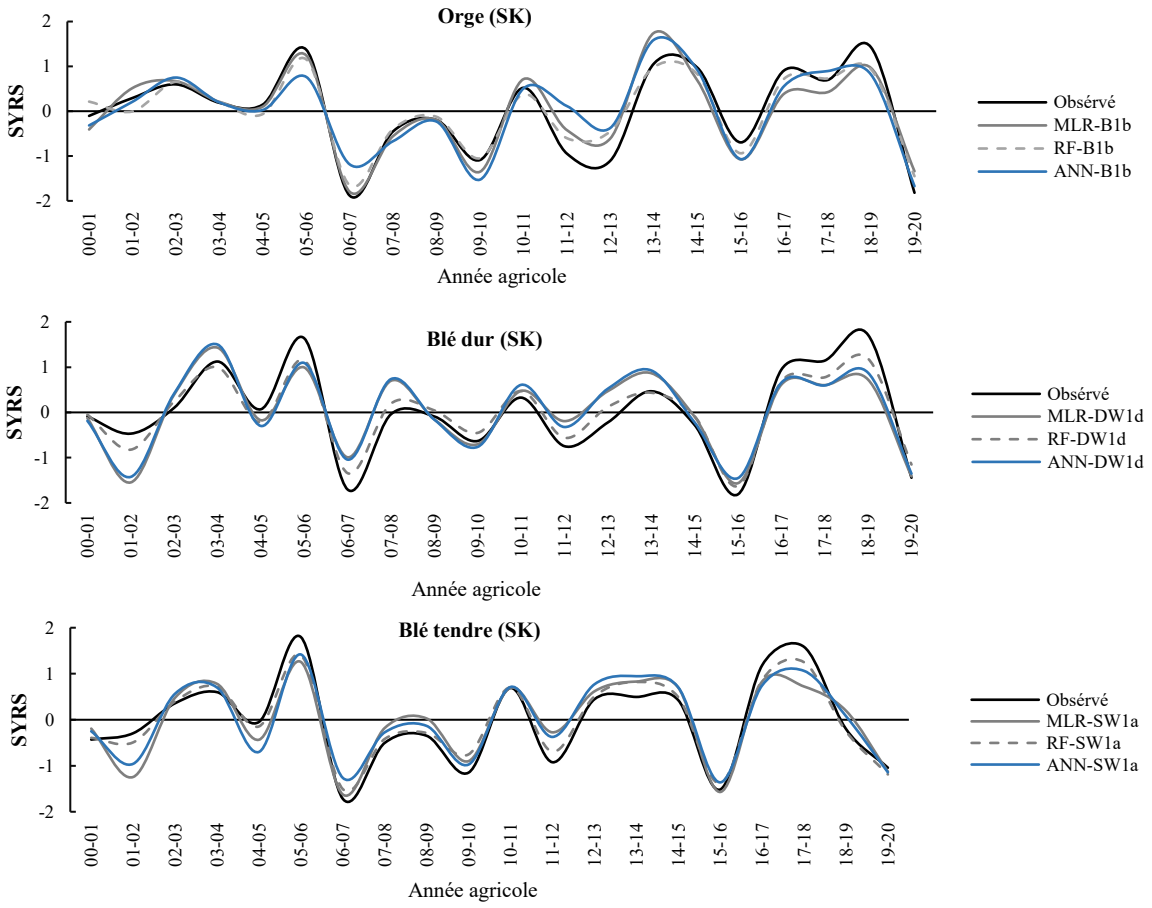


Figure 120 : Séries chronologiques d'observations des rendements du blé dur, du blé tendre et d'orge (ligne noire pleine) et estimations statistiques respectives par les algorithmes MLR, RF et ANN à l'aide des modèles présentant les relations les plus fortes (B1b, DW1d, SW1a, B2c, DW2a et SW2a) pour la province de SK de 2000 à 2020.

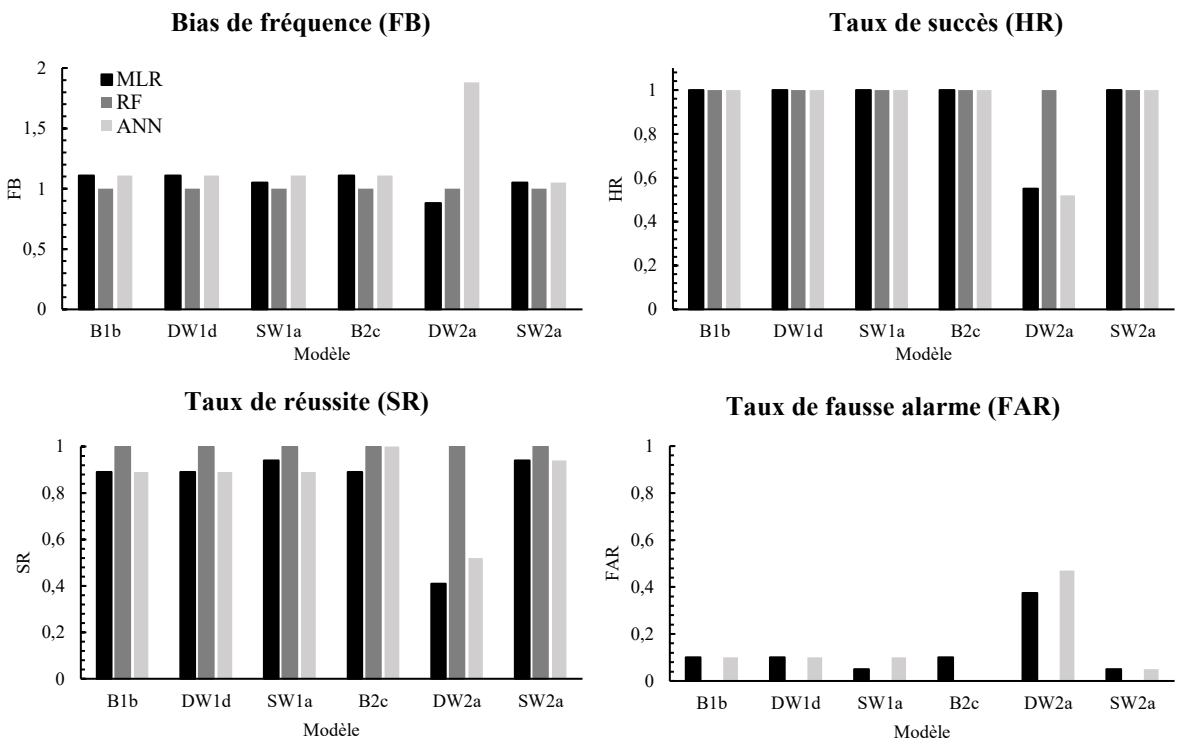


Figure 121 : Résultats de l'éventualité d'une perte de récolte (anomalie de rendement standardisée <-1,5) en termes de biais de fréquence (FB), de taux de réussite (SR), de taux de succès (HR) et de taux de fausse alarme (FAR) sur la base des algorithmes MLR, RF et ANN des modèles B1b, DW1d, SW1a, B2c, DW2a et SW2a.

V. Discussion

Ce travail visait à évaluer l'influence des conditions de sécheresse sur les rendements des cultures au cours de la période d'enquête, en utilisant les indices de télédétection (VCI, TCI, et VHI) et les indices de sécheresse multi-scalaires (SPI et SPEI) comme prédicteurs des rendements des céréales pluviales. Au cours de la période étudiée, la plaine du Gharb a connu des périodes de faibles rendements agricoles (SYRS < 1,5) au cours des années agricoles 2006-2007, 2015-2016 et 2019-2020, coïncidant également avec les principaux événements de sécheresse qui ont affecté la plaine et notamment l'année agricole la plus sèche de 2015-2016. Cette année a également enregistré une augmentation de la température (0,77 - 0,79 °C au-dessus de la moyenne) qui n'a pas été atteinte au niveau mondial et qui coïncide avec le réchauffement causé par El Niño oscillation australe (ENSO) (Verner *et al.*, 2018). En outre, la province de Kenitra (Kt) a connu une séquence différentielle de sécheresses et de rendements céréaliers, dont les causes peuvent être dues à des taux de précipitations excessifs entraînant parfois des inondations comme dans le cas de la période 2008-2010. Ce phénomène particulier reflète, d'une part, le taux élevé de précipitations pendant une durée ne permettant pas l'infiltration ou l'évacuation des eaux stagnantes et, d'autre part, la morphologie plate et la nature des sols bien développés. Par conséquent, les conditions favorables identifiées par les indices de sécheresse multiscalaires, en particulier l'indice SPI, coïncident avec les faibles anomalies de rendement au cours de cette période (**Figure 114**). Cependant, l'évolution spatio-temporelle

des indices de sécheresse multi-scalaires sur la période 2000-2020 montre plus d'épisodes de sécheresse en utilisant l'indice SPEI et ceci a mis en évidence l'importance d'utiliser le facteur de température (ETP) pour mieux capturer les conditions de sécheresse dans la plaine du Gharb.

Au cours des années à faible rendement (2006-2007, 2015-2016 et 2019-2020), l'analyse de corrélation entre les différents indices de sécheresse et les rendements céréaliers montre que les conditions de sécheresse ont un faible effet pendant les premiers stades de croissance (automne/hiver), et un fort effet pendant les stades de croissance intermédiaires et finaux (printemps/été). Des relations plus fortes avec les indices de télédétection ont également été trouvées par Bouras *et al.,* 2020 pendant les stades de floraison des céréales dans la province de Kenitra (Kt). Étant donné l'importance de déterminer la sensibilité des cultures aux conditions sèches à différents stades du développement des plantes, nous avons également recherché les besoins les plus élevés des cultures en termes de conditions thermiques (TCI), d'humidité (VCI) et d'humidité du sol (SMCI) à différents moments du cycle de croissance (**Figure 115**). L'analyse de corrélation entre le rendement des cultures et les indices de télédétection suggère que le rendement diminue avec la baisse de l'humidité (faibles valeurs VCI et SMCI) au début du printemps et vice versa. Ainsi, ils diminuent avec des conditions thermiques élevées (valeurs faibles de l'indice de télédétection) pendant la phase proche de la récolte et vice versa. Ce phénomène est très clair dans la province de SK. En effet, l'indice VCI hebdomadaire montre une amélioration du rendement des grains au cours des phases de croissance jusqu'à atteindre un pic au cours de la deuxième décennie d'avril. Cependant, dans la province de Kenitra (Kt), cette relation se poursuit jusqu'au stade proche de la récolte pour l'orge et n'existe pas dans le cas du blé. En ce qui concerne les conditions thermiques, il a été montré que l'orge est plus stable par rapport à la température dans la province de SK (le TCI n'influence pas le rendement de l'orge), alors que des relations significatives existent pendant les stades intermédiaires de la croissance dans la province de Kt. Ce résultat souligne l'importance des basses températures hivernales dans la province de Kt, qui ont fourni des conditions favorables à la croissance de l'orge.

L'utilisation de la télédétection et des approches multiscalaires a également permis de clarifier une différence régionale qui se manifeste par leur forte relation avec le rendement céréalier dans la province de SK par rapport à la province de Kt où seul le rendement de l'orge avait une relation plus forte avec l'indice SPI. Par conséquent, les résultats de la régression pas à pas (*Stepwise regression*) avec des indices de sécheresse multiscalaires dans les groupes de prédicteurs ne sont significatifs que dans la province de SK. Ces résultats indiquent que ces approches sont mieux adaptées au suivi des rendements céréaliers dans les climats semi-arides. Au contraire, les modèles de la province de Kt suggèrent une forte dépendance à l'égard de l'approche de la télédétection (**Tableau 48**). L'utilisation combinée de données climatiques telles que les précipitations et la télédétection (NDVI) a déjà été envisagée par Balaghi *et al.,* (2008) pour modéliser les rendements céréaliers au Maroc. Balaghi *et al.,* (2008) ont constaté que l'inclusion du NDVI et des précipitations dans un modèle de régression linéaire améliorait la performance du modèle et permettait de prédire le rendement des céréales deux mois avant

la récolte. De la même manière, nous nous sommes intéressés à la capacité d'estimer le rendement des cultures pendant les phases de croissance, suffisamment tôt avant la récolte. L'analyse de régression pas à pas a montré que les modèles basés sur les indices de télédétection dépendaient fortement des moyennes hebdomadaires du milieu de l'hiver (décembre et janvier) au début de l'été (avril à juin), ce qui suggère le pouvoir prédictif du rendement des cultures basé sur les données satellitaires (**Tableau 48**). La sélection de SPI et SPEI de novembre, octobre, mars, mai et juin suggère également le pouvoir prédictif d'une gamme d'échelles temporelles de sécheresse pour l'estimation des pertes de récoltes.

Les résultats des trois algorithmes (MLR, ANN et RF) ont montré que les modèles affichant les relations les plus fortes sont les mêmes et que la force des relations statistiques trouvées par les méthodes linéaires (MLR) et non linéaires (ANN et RF) est assez similaire (**Tableau 49**). Cependant, dans les deux provinces, les modèles B1b, SW1a, DW1d, B2c, SW2a et DW2a des méthodes non linéaires (ANN et RF) sont plus efficaces que les modèles MLR. En ce qui concerne la variance expliquée (R^2 cv) des modèles de blé tendre (SW1d et SW2a) et d'orge (B2c) par MLR, elle augmente respectivement de 10 % et de 1 % en utilisant l'algorithme RF. Malgré les bonnes performances des algorithmes d'apprentissage automatique (ANN et RF) par rapport à la régression linéaire multiple (MLR) dans les modèles sélectionnés (B1b, DW1d, SW1a, B2c, DW2a et SW2a), le taux de réussite (SR) de l'estimation de la perte de rendement est identique et parfait, sauf dans le cas du modèle DW2a. Le modèle RF est plus performant en termes de biais de fréquence (FB) en affichant des valeurs faibles (FB < 1). Le modèle céréalier (DW2a) dans la province de Kt présente des valeurs SR et HR faibles et des valeurs FAR élevées, ce qui indique que la capacité SMCI sous-estime la perte de récolte par rapport aux indices de télédétection (VCI, TCI et, VHI) dans les autres modèles. Ceci est probablement dû à la faible résolution spatiale des données du produit SM. À l'exception du modèle DW2a, tous les modèles appliqués ici ont répondu aux événements de perte de récoltes de blé et d'orge, ce qui donne du potentiel à la méthodologie proposée, principalement dans la province de SK. Par ailleurs, des études antérieures similaires ont également prouvé que les algorithmes non linéaires (ANN et RF) étaient plus performants que le modèle statistique de régression linéaire multiple (MLR) dans la modélisation du rendement des céréales (Jeong *et al.,* 2016 ; Van Klompenburg *et al.,* 2020 ; Wickramasinghe *et al.,* 2021). Ces pertes de récoltes céréalières pourraient également être affectées au Maroc par l'augmentation de la variabilité climatique future, y compris la diminution des précipitations et l'augmentation des températures (Verner *et al.,* 2018). Désormais, l'évaluation précise des impacts du changement climatique sur les rendements des cultures céréalières devient cruciale dans un contexte climatique vulnérable. L'introduction de nouvelles techniques d'évaluation et de méthodes statistiques pour la modélisation des cultures et la prédiction des rendements, telles que ANN et RF, est une étape importante vers l'élaboration de stratégies visant à atténuer les risques de sécheresse agricole.

Outre la légère variation des pertes de rendement céréalier estimées, les résultats sont limités par l'imprévisibilité des pertes de rendement futures. Toutefois, sur la base des indices de télédétection du milieu de l'hiver et du printemps, nous pouvons fournir des informations sur

l'estimation des rendements récoltables pour l'année en cours. En outre, les projections climatiques futures des précipitations et des températures permettant le calcul d'indices de sécheresse multiscalaires et leur application ultérieure à l'aide des relations statistiques trouvées dans cette étude pourraient être la clé de la prévision. Un autre avantage potentiel de cette étude pour la recherche future est d'évaluer l'applicabilité et la performance de ces modèles à l'échelle régionale pour chaque province de la plaine du Gharb individuellement ou dans d'autres régions agricoles du Maroc avec des climats similaires.

VI. Conclusion

Les modèles empiriques de prévision du rendement des céréales développés à l'échelle provinciale du bassin Bas Sebou avec l'utilisation des algorithmes d'apprentissage automatique montrent que le potentiel de la modélisation du rendement des cultures basée sur les indices de sécheresse multi-scalaire et les indices de télédétection, en utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique (ANN et RF) et de régression linéaire multiple statistique (MLR) fournissent des estimations bien précises des effets de la sécheresse sur de vastes zones agricoles. L'intégration de ces données dans des algorithmes d'apprentissage automatique peut fournir des outils utiles pour une prévision précoce du rendement des céréales et peut être utilisée comme une source d'informations nécessaires à la prise de décision pendant la saison de croissance. En attendant d'autres résultats à l'échelle régionale, cette approche peut constituer une base pour les prédictions et les estimations, sachant que d'autres approches à des échelles locales et limitées nécessitant un étalonnage minutieux et plusieurs mesures in situ existent déjà. Les résultats de cette approche restent relativement faciles à comprendre, précoces, rapides, peu coûteux et peuvent être adaptés à des échelles plus larges contribuant certainement à la prévision et aux outils d'observation pour les décideurs politiques et les gouvernements.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le Maroc où se situe le bassin Bas Sebou a enregistré au cours des quatre décennies des changements climatiques dont les effets sont pour certains composants palpables et d'autre composants ne le seront qu'au cours des temps. Parmi ceux-ci l'augmentation de la température, l'irrégularité des précipitations en devenant imprévisibles et la fréquence des évènements météorologiques extrêmes. D'autres conséquences peuvent être induites suite aux changements climatiques telles l'érosion et la modification de la couverture pédologique, la désertification ou la modification des écosystèmes, la migration et la sédentarisation de certaines espèces et la perte de la biodiversité. Les infrastructures sont aussi assujetties à ce problème causant des changements dans la vie socio-économique.

L'agriculture est l'activité principale de la population rurale qui domine dans le bassin Bas Sebou densement peuplé. Elle est favorisée par la géographie sous forme de plaines et collines principalement formées de formations géologiques plio-quaternaires. L'hydrographie principalement contrôlée par le régime pluvial de l'Oued Sebou et la présence de plusieurs nappes phréatiques, et les caractères géomorphologiques sont à l'origine d'une diversification de la couverture pédologique dominée par les Tirs (vertisols), minéraux bruts (sols sableux), sols brunifiés, sols moins argileux (Dess), sols hydromorphes, sols calcimagnésiques, sols sesquioxydes et sols peu évolués. La végétation naturelle assez diversifiée occupe les zones protégées non cultivables favorisée par le climat subhumide à semi-aride sous l'influence océanique dont le contrôle s'effectue par une alternance régulière d'anticyclone et cyclone.

La base de données météorologiques et hydrométriques depuis 1916 à 2017 et celle des données numériques et spatialisées, gérées par le SIG et associées aux données thématiques propres au bassin Bas Sebou, telles l'hydrographie, la morphologie, la végétation et les séries chronologiques des données de réanalyses spatialisées (pluies mensuelles, ETP et températures mensuelles) constituent la couverture spatio-temporelle permettant l'aboutissement aux résultats escomptés.

L'approche basée sur les analyses statistiques approfondies et les fonctions orthogonales empiriques (FOE) ont montré que les deux saisons les plus humides de l'année sont les plus affectées par la variabilité des précipitations et que les tendances à la baisse prévoient une diminution de la quantité de précipitations de 0,5 mm par an au début de l'hiver (décembre) et de 0,42 mm par an au début du printemps (mars). En fait, le bassin Bas Sebou se trouve sous une forte influence de l'indice d'oscillation nord-atlantique (iONA) et une influence modérée des indices climatiques dominants dans le bassin méditerranéen et l'océan Pacifique, iOM et iOA respectivement. L'analyse de corrélation entre la série chronologique des précipitations (PCs) et les indices climatiques a montré que l'ONA et l'OM influencent négativement les précipitations pendant les deux saisons des pluies et expliquent que leurs phases positives diminuent les précipitations. En revanche, l'indice du modèle climatique dominant dans l'océan Pacifique (iOA) a été positivement corrélé avec les principaux régimes pluviométriques de décembre et mars, ce qui indique que sa phase négative (El Niño) affecte négativement les

précipitations dans le bassin Bas Sebou. Ainsi, la mauvaise saison agricole 2015-2016 pourrait être attribuée à l'événement El Niño qui a commencé en mars 2015 et s'est renforcé vers la fin de l'année 2015. Les fonctions orthogonales empiriques (FOE) ont montré l'existence d'une corrélation notable entre la SST dans l'océan Pacifique oriental et occidental et les précipitations printanières. Les eaux de surface anormalement chaudes (froides) dans ces régions océaniques correspondent généralement à des conditions sèches (humides) dans le bassin Bas Sebou. En revanche, la prédominance des événements de La Niña (iOA +) des mois les plus affectés par la variabilité des précipitations invalide l'hypothèse selon laquelle ces événements pourraient affecter directement les quantités de précipitations tombées, créant des conditions plus humides en Afrique du Nord, en particulier au Maroc.

Le suivi de la sécheresse pendant la période allant de 1984 à 2016 a demandé en parallèle l'évaluation de l'applicabilité et de la performance régionale des principaux indices de sécheresse (DIs). La distribution spatio-temporelle des épisodes de sécheresse à l'aide des indices de sécheresse (DIs) montre que la sévérité et l'intensité des sécheresses ont augmenté depuis 2012. Tous les indices multi-scalaires révèlent quatre sécheresses annuelles typiques en 1995, 1999, 2012 et 2016. L'exception est l'indice sc-PDSI, qui a montré de nouveaux épisodes de sécheresse avec une tendance parfois durable. Plus important encore, l'évaluation de la performance des indices de sécheresse pour le suivi de l'effet du climat sur les rendements céréaliers a montré la meilleure performance des indices multiscalaires, tandis que de petites différences ont été détectées entre l'indice SPI et les indices SPEI et RDI dans la performance des systèmes agricoles. Les rendements de l'orge et du blé sont plus vulnérables à la sécheresse pendant la phase de croissance intermédiaire (printemps), et les conditions d'humidité en hiver ont également un impact sur les rendements des cultures.

L'application des indices de sécheresse (SPI- *Standardized Precipitation Index* et SPEI - *Standardized Evapotranspiration and Precipitation Index*), montre que la durée, la fréquence et la sévérité des sécheresses ont augmenté depuis le début du 21ème siècle. La période sèche la plus longue est observée dans les régions situées à l'Est, en particulier dans le Sud-Est où la sévérité est intense. L'analyse des tendances saisonnières montre des tendances significatives avec une augmentation de la température, indiquant un réchauffement accru en été et une diminution des précipitations en hiver. L'analyse de la cohérence par ondelette indique une forte influence des différents indices climatiques (iONA et iOM) sur la variabilité des sécheresses. Alors, à l'échelle interannuelle (moins d'un an), elle est intermittente. Pour l'échelle décennale (8 à 16 ans), une forte cohérence négative est observée tout au long de la période du 1984 à 2016. L'iONA présente une relation de premier ordre avec la variation de la sécheresse sur cette périodicité, apparaissant depuis 1990 pour SPI et pendant toute la période (1984-2016) pour SPEI. Une cohérence significative est observée pendant des périodes spécifiques des années 1990 et de 2006 à 2015 pour le groupe des 2 à 4 ans. En ce qui concerne l'OM, la cohérence avec les indices de sécheresse est presque similaire à celle de l'ONA, mais avec une faible cohérence. L'iONA présente principalement une forte cohérence négative, tandis que dans le cas de l'iOM, la cohérence est en alternance de partie positive et de partie

négative.

L'indice d'état de la végétation (VCI), l'indice d'état de la température (TCI) et l'indice de santé de la végétation (VHI) en tant qu'indices de télédétection et l'indice de précipitations normalisées (SPI) et l'indice d'évapotranspiration des précipitations normalisées (SPEI) en tant qu'indices météorologiques ont montré la manifestation de changements remarquables dans la santé des cultures au cours de la série chronologique et en particulier au début du 21ème siècle. 7 % de la surface cultivée était en bonne santé au cours de la dernière moitié de la décennie (2010-2016), contre environ 50 % au cours de la période 1984-2000. Les résultats montrent également une forte réaction de la variabilité interannuelle des rendements céréaliers à des échelles de temps courtes de la sécheresse. SYRS s'est avéré être significativement affecté par la sécheresse tout au long de la période considérée. La comparaison entre les indices de sécheresse et le SYRS suggère que SPEI et TCI sont plus corrélés et plus sensibles au rendement que SPI et VCI. Cela indique que le rendement est plus sensible aux changements de température qu'à l'humidité.

Les prédictions des rendements en impliquant les indices de sécheresse dérivés de la télédétection (VCI, TCI, VHI et SMCI) et les indices dérivés des données météorologiques (SPI et SPEI) d'une part et la régression linéaire multiple (MLR) appuyée par les deux algorithmes d'apprentissage automatique (RF et ANN) d'autre part et en appliquant la meilleure combinaison de prédicteurs pour la prévision de rendement montrent que les conditions de sécheresse ont un faible effet pendant les premiers stades de croissance (automne/hiver) et un fort effet pendant les stades de croissance intermédiaires et finaux (printemps/été). En outre, l'utilisation des indices de télédétection précise que le rendement diminue avec une baisse de l'humidité (faibles valeurs de VCI et SMCI) au début du printemps et vice versa et avec des conditions thermiques élevées (faibles valeurs de TCI) pendant la phase proche de la récolte et vice versa. Ainsi, les résultats de la régression pas à pas, en utilisant les indices de sécheresse multiscalaires comme prédicteurs, ne sont significatifs que dans la province de Sidi Kacem. Ces résultats suggèrent que les données météorologiques sont plus appropriées pour suivre les rendements des céréales dans les climats semi-arides. En revanche, les modèles utilisés dans la province de Kénitra mettent en évidence une forte dépendance envers l'approche de la télédétection. De même, les résultats montrent que les méthodes non-linéaires sont plus performantes que la méthode linéaire.

Les résultats obtenus le long du parcours de cette thèse ne sont que des précurseurs pour bien développer les connaissances dans l'évaluation des paramètres ayant des liens étroits avec les changements climatiques à court et long termes. Ils ne peuvent que constituer la base de référence à partir de laquelle des analyses météorologiques et des établissements des tendances et corrélations dans des zones voisines encore plus larges. L'amélioration des modèles de prédiction en intégrant d'autres variables tels types de sols, date de semis et pratiques de gestion, et la comparaison des modèles empiriques avec les modèles de croissance de culture appuyée par des prévisions météorologiques saisonnières, tel le modèle AquaCrop sont des

concepts à mettre en exécution dans l'avenir proche. Parmi les prérogatives, l'assimilation des acquis de l'humidité des sols à haute résolution spatiale et des indices de végétation (NDVI) dans le modèle AquaCrop. Dans ce cas, les rendements des cultures seront également projetés dans le futur, à une résolution encore plus fine, parallèlement aux conditions climatiques qui leurs sont propices. Étendre des études similaires sur tout le territoire marocain est devenu une nécessité pour comprendre les changements climatiques d'une part et d'autre part s'opposer aux impacts néfastes que peuvent induire ces changements.

BIBLIOGRAPHIE

Abbas, F., Afzaal, H., Farooque, A.A., Tang, S. (2020). Crop yield prediction through proximal sensing and machine learning algorithms. Agronomy 10. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10071046

Abdelmajid, S., Mukhtar, A., Baig, M B., Reed, M. R. (2021). Climate Change, Agricultural Policy and Food Security in Morocco. In Emerging Challenges to Food Production and Security in Asia, Middle East, and Africa Springer, Cham 171-196. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72987-5_7

Aberkan, M., (1989). Etude des formations quaternaires des marges du bassin du Gharb (Maroc nor-occidental). Thèse es Sciences, Université Bordeaux I, France, 290.

Abramowitz, M., Stegun, I. A. (1965). Handbook of mathematical functions. New York.

Abrantes, A. C., Serejo, J., & Vieira-Pinto, M. (2021). The Association between Palmer Drought Severity Index Data and Tuberculosis-like Lesions Occurrence in Mediterranean Hunted Wild Boars. Animals, 11(7) : 2060.

Acharki, S., Amharref, M., El Halimi, R., Bernoussi, A.-S. (2019). Assessment by statistical approach of climate change impact on water resources: Application to the Gharb perimeter (Morocco). Journal of Water Science 32-3. https://doi.org/10.7202/1067310ar

Adallal, R., Vallet-Coulomb, C., Vidal, L., Benkaddour, A., Rhoujjati, A., & Sonzogni, C. (2019). Modelling lake water and isotope mass balance variations of Lake Azigza in the Moroccan Middle Atlas under Mediterranean climate. Regional Environmental Change, 19, 2697-2709.

Adnan, S., Ullah, K., Shuanglin, L., Gao, S., Khan, A. H., & Mahmood, R. (2018). Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan. Climate Dynamics, 51(5-6), 1885-1899.

Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS) (2010a). Etude de schéma directeur de protection de la plaine du Gharb contre les inondations.

Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS) (2010b). Evènements hydro-pluviométriques dans le bassin du Sebou 2009–2010. Maroc.

Agence Marocaine de Presse (MAP) (2017). Ministre du développement : La mise en place d'infrastructures vertes et résilientes, condition sine qua non pour le développement durable. https://www.maroc.ma/

Ait-El-Mokhtar, M., Boutasknit, A., Ben-Laouane, R., Anli, M., El Amerany, F., Toubali, S., ... & Meddich, A. (2022). Vulnerability of oasis agriculture to climate change in Morocco. In Research Anthology on Environmental and Societal Impacts of Climate Change (pp. 1195-1219). IGI Global.

Ajlal, S., Agoutime, Z. (2021). Changements climatiques et leurs impacts dans la région du Gharb, Maroc. Journal of African Studies and River Nile Basin 3-11.

Al Jassar, H.K., & Rao, K. S. (2015). Assessment of soil moisture through field measurements and AMSR-E remote sensing data analysis over Kuwait desert. Kuwait Journal of Science, 42(2).

Al Masmoudi, Y., Bouslihim, Y., Doumali, K. (2022). Use of machine learning in Moroccan soil fertility prediction as an alternative to laborious analyses. Modeling Earth Systems and Environment 8:3707–3717. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01329-8

Alaoui, S B. (2005a). Référentiel pour la Conduite Technique de la Culture du blé dur (Triticum durum). https://www.fellah-trade.com/ressources/pdf/ble_dur.pdf. Consulté le 29 août 2022

Alaoui, S B. (2005b). Référentiel pour la Conduite Technique de la Culture d'orge (Hordeum vulgare). https://www.fellah-trade.com/ressources/pdf/orge_grain.pdf. Consulté le 29 août 2022

Alaoui, S B. (2005c). Référentiel pour la Conduite Technique de la Culture du blé tendre (Triticum aestivum). https://www.fellah-trade.com/ressources/pdf/ble_tendre.pdf. Consulté le 29 août 2022

Amiri, M A., Conoscenti, C., & Mesgari, M.S. (2018) Improving the accuracy of rainfall prediction using a regionalization approach and neural networks. Kuwait Journal of Science, 45(4).

Amiri, N., Lahlali, R., Amiri, S., El Jarroudi, M., Khebiza, M. Y., & Messouli, M. (2021). Development of an integrated model to assess the impact of agricultural practices and land use on agricultural production in morocco under climate stress over the next twenty years. Sustainability, 13(21), 11943.

Angulo-Martínez M, Beguería S (2012) Do atmospheric teleconnection patterns influence rainfall erosivity? A study of NAO, MO and WeMO in NE Spain. J Hydrol 450-168. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.063

Aoubouazza, M., Rajel, R., Essafi, R. (2013). Impact of extreme climate events on water resources and agriculture and biodiversity in Morocco. J Climatol Weather Forecasting, 1(104), 2.

Aoubouazza, M., Rajel, R., Essafi, R. (2019). Impact of extreme weather events on water resources and agriculture in Morocco. Moroccan Journal of Agronomic and Veterinary Sciences 7. https://agrimaroc.org/index.php/Actes_IAVH2/article/view/705. Accessed 29 August 2022

Artis, D, A,. & Carnahan, W, H,. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. Remote Sens Environ, 12(4), 313–329. https://doi.org/10.1016/0034-4257(82)90043-8

Atiah, W A., Mengistu Tsidu, G., Amekudzi, L K., Yorke, C. (2020). Trends and interannual variability of extreme rainfall indices over Ghana, West Africa. Theoretical and Applied Climatology 140(3): 1393-1407. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03114-6

Aurelle, D,. Thomas, S, Albert, C,. Bally, M,. Bondeau, A,. Boudouresque, C, F,. & Fady, B,. (2022). Biodiversity, climate change, and adaptation in the Mediterranean. Ecosphere, 13(4). https://doi.org/10.1002/ecs2.3915

Bader, D., Covey, C., Gutowski, W., Held, I., Kunkel, K., Miller, R., ... & Zhang, M. (2008). Climate models: an assessment of strengths and limitations. US Department of Energy Publications, 8.

Baig, M R I., Naikoo, M W., Ansari, A H., Ahmad, S., Rahman, A. (2021). Spatio-temporal analysis of precipitation pattern and trend using standardized precipitation index and Mann–Kendall test in coastal Andhra Pradesh. Modeling Earth Systems and Environment 1-20. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01262-w

Balaghi, R., Jlibene, M., Tychon, B., Eerens, H. (2013). Agrometeorological cereal yield forecasting in Morocco. National Institute for Agronomic Research, Rabat, Morocco. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3645.6805

Balaghi, R., Tychon, B., Eerens, H.,Jlibene, M. (2008). Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 10: 438-452. https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.12.001

Balas, N., Nicholson, S. E., & Klotter, D. (2007). The relationship of rainfall variability in West Central Africa to sea-surface temperature fluctuations. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 27(10), 1335-1349.

Ballah, A., & Benaabidate, L. (2021). Assessing the performance of various meteorological drought indices in capturing historic droughts in the south of Algeria. Arabian Journal of Geosciences, 14(13): 1-11.

Barakat, A., Ennaji, W., El Jazouli, A., Amediaz, R., Touhami, F. (2017). Multivariate analysis and GIS-based soil suitability diagnosis for sustainable intensive agriculture in Beni-Moussa irrigated subperimeter (Tadla plain, Morocco). Modeling Earth Systems and Environment 3. https://doi.org/10.1007/s40808-017-0272-5

Basalirwa, C P K. (1995). Delineation of Uganda into climatological rainfall zones using the method of principal component analysis. International Journal of climatology 15(10): 1161-1177. https://doi.org/10.1002/joc.3370151008

Basso, B., Liu, L. (2019). Seasonal crop yield forecast: Methods, applications, and accuracies, in: Advances in Agronomy. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.11.002

Bauer, P., Thorpe, A., & Brunet, G. (2015). The quiet revolution of numerical weather prediction. Nature, 525(7567), 47-55.

Bayissa, Y., Maskey, S., Tadesse, T., Van Andel, S.J., Moges, S., Van Griensven, A., & Solomatine, D. (2018). Comparison of the performance of six drought indices in characterizing historic drought for the upper Blue Nile basin, Ethiopia. Geosciences, 8(3): 81. https://doi.org/10.3390/geosciences8030081

Bazairi, H., Ben Haj, S., Torchia, G. (2009). Identification of important ecosystem properties and assessment of ecological status and pressures to Mediterranean marine and coastal biodiversity.

Beaudet, G., Maurer, G., & Ruellan, A. (1967). Le Quaternaire marocain. Observations et hypothèses nouvelles. Rev. Geogr. Phys. et Geol. Dyn, 9.

Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. (2009) DIGITAL.CSIC. Récupéré sur SPEI Calculator.

Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. International Journal of Climatology 34-10. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.3887

Belcaid, K., & El Ghini, A. (2020). Measuring the weather variability effects on the agricultural sector in Morocco. In Proceedings of the Thirteenth International Conference on Management Science and Engineering Management: Volume 1 13 (pp. 70-84). Springer International Publishing.

Benseddik, B., El Mrabet, E., El Mansouri, B. (2017). Delineation of artificial recharge zones in Mnasra Aquifer (NW, Morocco). Modeling Earth Systems and Environment (3):10. https://doi.org/10.1007/s40808-017-0267-2

Biberson, P. (1961a). Le Paléolithique inférieur du Maroc atlantique (No. 1). Rabat: Service des antiquités du Maroc.

Biberson, P. (1961b). Le cadre paléogéographique de la préhistoire du Maroc atlantique : par Pierre Biberson. Service des antiquités du Maroc.

Biberson, P., Choubert, G., Faure-Muret, A. Lecointre, G. (1965). Découverte d'instruments de la Pebble-culture dans les cailloutis villafranchiens d'Arbaoua. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des sciences, 245(10), 938-939.

Bigot S. (2002). Détection des discontinuités temporelles au sein des séries climatiques : point méthodologique et exemple d'application, Actes des Journées de Climatologie de la Commission « Climat et Société » du Comité National Français de Géographie, Strasbourg, pp. 27–46.

Bijaber, N., Rochdi, A. (2017). Télédétection spatiale pour l'évaluation du risque de sécheresse au Maroc. Revue Internationale de Géomatique 27:203-221. https://doi.org/10.3166/rig.2017.00026

Billaux, P., & Bryssine, G. (1967). Les sols du Maroc. Congrès de pédologie méditerranéenne : Excursion au Maroc. Cahiers de la Recherche Agronomique, 1, 59-101.

Blanco, J J. (2018). The evolution of communication media in Moche culture. Journal of Sociocybernetics 15 :100-121. https://doi.org/10.26754/ojs_jos/jos.201822618

Bonan, G. B., & Doney, S. C. (2018). Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models. Science, 359(6375), eaam8328.

Born, K., Fink, A H., Knippertz, P P. (2010). Meteorological processes influencing the weather and climate of Morocco. Impacts of Global Change on the Hydrological Cycle in West and Northwest Africa; Speth, P., Christoph, M., Diekkruger, B., Eds.

Borro M, Morandeira N, Salvia M, Minotti P, Perna P & Kandus P, 2014. Mapping shallow lakes in a large South American foodplain: a frequency approach on multitemporal Landsat TM/ETM data. Journal of Hydrology, 512, 39–52. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.057

Boselli, V., Ouallali, A., Briak, H., Houssni, M., Kassout, J., El Ouahrani, A., & Michailidi, E. M. (2020). System dynamics applied to terraced agroecosystems: The case study of assaragh (Anti-Atlas Mountains, Morocco). Water, 12(6), 1693.

Bouabdelli, S., Zeroual, A., Meddi, M., & Assani, A. (2022). Impact of temperature on agricultural drought occurrence under the effects of climate change. Theoretical and Applied Climatology, 148(1), 191-209. https://doi.org/10.1007/s00704-022-03935-7

Bouaicha, R., & Benabdelfadel, A. (2010). Variabilité et gestion des eaux de surface au Maroc. Sécheresse, 21(1e), 1-5.

Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., ... & Zhang, X. Y. (2013). Clouds and aerosols. In Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 571-657). Cambridge University Press.

Boumir, K. (1990). Paléoenvironnements de dépôt et transformations post-sedimentaires des sables fauves du bassin du sais (Maroc) (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).

Bouras, E H,. Jarlan, L,. Er-Raki, S,. Albergel, C,. Richard, B,. Balaghi, R,. & Khabba, S,. (2020). Linkages between rainfed cereal production and agricultural drought through remote sensing

indices and a land data assimilation system: a case study in Morocco. Remote Sensing, 12(24). https://doi.org/10.3390/rs12244018

Bourcart, J. (1931). Essai de classement des formations continentales quaternaires du Maroc occidental CR. Soc. Géol. Fr., Paris, 7, 256-259.

Bourcart, J. (1936). Résultats d'ensemble d'une étude du Quaternaire et du Pliocène marin du littoral atlantique du Maroc et du Portugal"-. CR du IVème Cong. des Géographes et des Ethnographes Slaves–Sofia, 1938.

Bouya, B., Faouzi, M., Ben Abbou, M., Essahlaoui, A., Bahir, M., Youbi, N., & Hessane, M. A. (2011). L'aquifère côtier des Mnasra (plaine du Gharb, Maroc): hydrogéologie et modélisation hydrodynamique. Comunicaçõe Geológicas, 98(8).

Bratsas, C., Koupidis, K., Salanova, J M., Giannakopoulos, K., Kaloudis, A., Aifadopoulou, G. (2020). A comparison of machine learning methods for the prediction of traffic speed in urban places. Sustainability 12 : 142. https://doi.org/10.3390/su12010142

Bzioui, M. (2004). Rapport national 2004 sur les ressources en eau au Maroc. UN Water-Africa, 94.

Caballero, D,. Calvini, R,. Amigo, J, M,. (2020). Hyperspectral imaging in crop fields: precision agriculture. Data handling in science and technology, 32, 453–473. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63977-6.00018-3

Camberlin, P., Janicot, S., & Poccard, I. (2001). Seasonality and atmospheric dynamics of the teleconnection between African rainfall and tropical sea-surface temperature: Atlantic vs. ENSO. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 21(8), 973-1005.

Cantat, O., Brunet, L. (2001). Discontinuité géographique et particularités climatiques en Basse-Normandie, Annales de Géographie, no 622, pp. 579–596.

Cao, J., Zhang, Z., Tao, F., Zhang, L., Luo, Y., Han, J., Li, Z. (2020). Identifying the contributions of multi-source data for winter wheat yield prediction in China. Remote Sens. 12, 1–22. https://doi.org/10.3390/rs12050750

Chadli, K., Kirat, M., Laadoua, A., El Harchaoui, N. (2016). Runoff modeling of Sebou watershed (Morocco) using SCS curve number method and geographic information system. Modeling Earth Systems and Environment 2(3):1-8. https://doi.org/10.1007/s40808-016-0215-6

Chang, X., Wang, B., Yan, Y., Hao, Y., Zhang, M. (2019). Characterizing effects of monsoons and climate teleconnections on precipitation in China using wavelet coherence and global coherence. Climate Dynamics 52. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-018-4439-1

Chatterjee, R S., Singh, N., Thapa, S., Sharma, D., Kumar, D. (2017). Retrieval of land surface temperature (LST) from landsat TM6 and TIRS data by single channel radiative transfer algorithm using satellite and ground-based inputs. Int J Appl Earth Obs Geoinf. 58 :264–277.

Chere, Z., Abegaz, A., Tamene, L. (2022). Modeling and mapping the spatiotemporal variation in agricultural drought based on a satellite-derived vegetation health index across the highlands of Ethiopia. Modeling Earth Systems and Environment. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01439-x

Cherukuri, H., Perez-Bernabeu, E., Selles, M., Schmitz, T. (2019). Machining chatter prediction using a data learning model. Journal of Manufacturing and Materials Processing 3: 45. https://doi.org/10.3390/jmmp3020045

Chervenkov, H., & Slavov, K. (2019). Theil-Sen estimator vs. ordinary least squares–trend analysis for selected ETCCDI climate indices. Comptes Rendus Acad. Bulg. Sci 72: 47-54.

Chevalier, J P. (1962). Les madréporaires miocènes du Maroc (No. 173). Éditions du Service géologique du Maroc. 173 : 2-74.

Choubert, G. (1950). Réflexions au sujet du Pliocène continental. Serv. Géol. Maroc, Notes Mém, 76, 13-92.

Choubert, G. (1959). Compléments à la note intitulée 'Essai de corrélation des formations continentales et marines du Pléistocène au Maroc,'. Com. Géomorph. Périglaciaire Maroc.

Choubert, G. (1965). L'étage Moghrébien dans le Maroc occidental. Notes Serv. Geol. Maroc, 25, 47-55.

Choubert, G., & Ambroggi, R. (1953). Note préliminaire sur la présence de deux cycles sédimentaires dans le Pliocène marin au Maroc. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, (117).

Choubert, G., Joly, F., Gigout, M., Marcais, J., Margat, J., & Raynal, R. (1956). Essai de classification du Quaternaire continental du Maroc. COMPTES RENDUS HEBDOMADAIRES DES SEANCES DE L'ACADEMIE DES SCIENCES, 243(5), 504-506.

Cirac, P., (1985). Le bassin sud-rifain occidental au Néogène supérieur. Évolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours d'une phase de comblement. Thèse es Sciences, Université de Bordeaux I, France, 283.

Collier, P., Conway, G., & Venables, T. (2008). Climate change and Africa. Oxford Review of Economic Policy, 24(2), 337-353.

Combe, M. (1975). Le bassin Rharb-Mamora et les petits bassins septentrionaux des Oueds Dradère et Soueire. Ressources en eaux du Maroc, 2, 93-128.

Combe, M., & Thauvin, J P. (1971). Ressources en eau du Maroc: domaines du Rif et du Maroc oriental. Ed. du Service géologique du Maroc.

Conte, M., Giuffrida, A., Tedesco, S. (1989). The Mediterranean Oscillation. Impact on precipitation and hydrology in Italy. Conference on Climate and Water. Helsinki.

Criado-Aldeanueva, F., Soto-Navarro, F J. (2013). The Mediterranean Oscillation teleconnection index: station-based versus principal component paradigms. Advances in Meteorology 2013. https://doi.org/10.1155/2013/738501

Criado-Aldeanueva, F., Soto-Navarro, F. J., García-Lafuente, J. (2014). Large-scale atmospheric forcing influencing the long-term variability of Mediterranean heat and freshwater budgets: Climatic indices. Journal of Hydrometeorology 15-2. https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-04.1

Criado-Aldeanueva, F., Soto-Navarro, J. (2020). Climatic indices over the Mediterranean Sea: A review. Applied Sciences 10-17. DOI: https://doi.org/10.3390/app10175790

Czaja, A., & Frankignoul, C. (2002). Observed impact of Atlantic SST anomalies on the North Atlantic Oscillation, J. Clim., 15(6): 606 – 623. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0606:OIOASA>2.0.CO;2

Daget, Ph. (1977). Le bioclimat Méditerranéen : Caractères généraux, modes de caractérisation. Vegetatio : 1-20.

Daguin, F. (1926). Sur des fossiles du Lias inférieur récoltés au voisinage du sommet du Djebel Ayachi (Haut-Atlas marocain oriental), par MM. J. Célérier et A. Charton. Bull. Soc. géol. Fr, 1-2.

Dai, A. (2011). Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116.

De Girolamo, A, M,. Barca, E,. Leone, M,. & Porto, A, L,. (2022). Impact of long-term climate change on flow regime in a Mediterranean basin. Journal of Hydrology: Regional Studies, 41. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101061

De Miras, C., & Le Tellier, J. (2005). Gouvernance urbaine et accès à l'eau potable au Maroc: partenariat public-privé à Casablanca et Tanger-Tétouan. Gouvernance urbaine et accès à l'eau potable au Maroc, 1-280.

Deb, P., Kiem, A.S., & Willgoose, G. (2019). A linked surface water-groundwater modeling approach to more realistically simulate rainfall-runoff non-stationarity in semi-arid regions. Journal of Hydrology, 575: 273-291.

Dehkordi, P. A., Nehbandani, A., Hassanpour-bourkheili, S., & Kamkar, B. (2020). Yield gap analysis using remote sensing and modelling approaches: Wheat in the northwest of Iran. International Journal of Plant Production, 14(3), 443-452. https://doi.org/10.1007/s42106-020-00095-4

Delannoy, H. (1998). Les variations des précipitations du Maroc du Centre-ouest. Méditerranée, 88(1), 11-17.

Deser, C. (2000). On the teleconnectivity of the “Arctic Oscillation”. Geophys Res Lett 27(6):779–782. https://doi.org/10.1029/1999GL010945

Devkota, M., Yigezu, Y A. (2020). Explaining yield and gross margin gaps for sustainable intensification of the wheat-based systems in a Mediterranean climate. Agricultural Systems 185. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102946

Diani, K., Kacimi, I., Zemzami, M., Tabyaoui, H., Haghighi, A. T. (2019). Evaluation of meteorological drought using the Standardized Precipitation Index (SPI) in the High Ziz River basin, Morocco. Limnological Review 19-3. DOI: https://doi.org/10.2478/limre-2019-0011

Divoux, P. (1985). Sur l’importance fondamentale des lois tirées de l’étude du Gharben ce qui concerne les pédogénèses récentes. Ibid., 97-100 pp.

Donat, M G., Peterson, T C., Brunet, M., King, A D., Almazroui, M., Kolli, R K., Al Shekaili, M N. (2014). Changes in extreme temperature and precipitation in the Arab region: long-term trends and variability related to ENSO and NAO. International Journal of Climatology 34(3): 581-592. https://doi.org/10.1002/joc.3707

Donat, M. G., Sillmann, J., Wild, S., Alexander, L. V., Lippmann, T., & Zwiers, F. W. (2014). Consistency of temperature and precipitation extremes across various global gridded in situ and reanalysis datasets. Journal of Climate, 27(13), 5019-5035.

Dresch, J., & Le Coz, J. (1960). Observations sur l'étage rharbien (Maroc occidental). CR somm. Soc. géol. Fr, 5, 108-110.

Dridri, A., & Fedan, B. (2001). Rôle du contrôle structural dans la mise en place du réseau hydrographique de Sebou et Inaouène entre Fès et Oued Amlil (Maroc). Bulletin de l‟ Institut scientifique Rabat, section Science de la Terre, 23, 67-77.

Driouech, F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Ph. D. thesis, University of Toulouse. France.

Driouech, F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique: descente d'échelle et incertitudes (Doctoral dissertation).

Driouech, F., & Mokssit, A. (2010). Variabilité et changements climatiques au Maroc, tendances observes et projections futures. Changement climatique: enjeux et perspectives au Maghreb, édité par le Bureau Multipays de l'UNESCO à Rabat.

Driouech, F., Stafi, H., Khouakhi, A., Moutia, S., Badi, W., ElRhaz, K., Chehbouni, A. (2021). Recent observed country-wide climate trends in Morocco. International Journal of Climatology 41. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.6734

Driouech, F., Stafi, H., Khouakhi, A., Moutia, S., Badi, W., ElRhaz, K., & Chehbouni, A. (2021). Recent observed country-wide climate trends in Morocco. International Journal of Climatology, 41, E855-E874.

Dünkeloh, A., Jacobeit, J. (2003). Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948–98. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 23(15): 1843-1866. https://doi.org/10.1002/joc.973

Ed-Daoudi, S. (2014). Evolutions et changements des extrêmes pluviométriques au niveau de la zone Souss-Massa-Draa (Maroc) : L'aspect sécheresse. Sciences and technologies Faculty, Marrakesh, Morocco.

El Asri, H., Larabi, A., Faouzi, M. (2019). Climate change projections in the Ghis-Nekkor region of Morocco and potential impact on groundwater recharge. Theoretical and Applied Climatology 138: 713-727. https://doi.org/10.1007/s00704-019-02834-8

El Hamly, M., Sebbari, R., Lamb, P., Ward, M N., Portis, D H. (1998). Towards the seasonal prediction of Moroccan precipitation and its implications for water resources management. Water Resources Variability in Africa During the XX Century. Proceeding of the Abidjan 98:79-87.

El Harraki, W., Ouazar, D., Bouziane, A., Hasnaoui, D. (2020). Climate Change Observations and Trends Overview: Focus on Morocco With a Case-Study of A Future Reservoir's Response to Climate Change. E3S Web of Conferences 150. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015001010

El Jihad, M. D., Peyrusaubes, D., El Bouzidi, A. (2014). Sécheresses saisonnières et changement climatique dans le Gharb (Maroc). Rur@lités 2014-4.

El Kenawy, A. M., McCabe, M. F., Vicente-Serrano, S. M., Robaa, S. M., & Lopez-Moreno, J. I. (2016). Recent changes in continentality and aridity conditions over the Middle East and North Africa region, and their association with circulation patterns. Climate Research, 69(1), 25-43.

El Khatri, S., El hairech, T. (2014). Drought conditions and management strategies in Morocco. National Meteorological Directorate. https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/605/mod_page/content/22/Morocco.pdf. Accessed 16 June 2022

Endale, B W., Simphiwe, E M., Yimer, A A. (2021). Trends in climate extremes at local farming calendar timescale: evidence from Merti District, Ethiopia Modeling Earth Systems and Environment. 7:2329–2339. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00977-6

Ennaji, W., Barakat, A., El Baghdadi, M., Oumenskou, H., Aadraoui, M., Karroum, L A., Hilali, A. (2018). GIS-based multi-criteria land suitability analysis for sustainable agriculture in the northeast area of Tadla plain (Morocco). Journal of Earth System Science 127: 1-14. https://doi.org/10.1007/s12040-018-0980-x

Euzen, A., Eymard, L., & Gaill, F. (2013). Le développement durable à découvert. CNRS Éditions, Paris.

Ezzine, H., Bouziane, A., & Ouazar, D. (2014). Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 26, 36-48. https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.005

Fayech, D., Tarhouni, J. (2021). Climate variability and its effect on normalized difference vegetation index (NDVI) using remote sensing in semi-arid area. Modeling Earth Systems and Environment 7:1667–1682. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00896-6

Feinberg, H. (1986). Les séries tertiaires des zones externes du Rif (Maroc). Notes et Mémoires du Services Géologique 315. Service Geol. Maroc. 192 pp.

Feng, P., Wang, B., Liu, D.L., Waters, C., Xiao, D., Shi, L., Yu, Q. (2020). Dynamic wheat yield forecasts are improved by a hybrid approach using a biophysical model and machine learning technique. Agric. For. Meteorol. 285–286, 107922. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107922

Filahi, S., Tanarhte, M., Mouhir, L., El Morhit, M., & Tramblay, Y. (2016). Trends in indices of daily temperature and precipitations extremes in Morocco. Theoretical and Applied Climatology, 124, 959-972. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1472-4

Filippi, P., Jones, E.J., Wimalathunge, N.S., Somarathna, P.D.S.N., Pozza, L.E., Ugbaje, S.U., Jephcott, T.G., Paterson, S.E., Whelan, B.M., Bishop, T.F.A., (2019). An approach to forecast grain crop yield using multi layered, multi-farm data sets and machine learning. Precis. Agric. https://doi.org/10.1007/s11119-018-09628-4

Fischer, R.A., Rees, D., Sayre, K. D., Lu, Z.M., Condon, A.G., & Saavedra, A.L. (1998). Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. Crop Science, 38(6): 1467-1475.

Flinch, J. (1993). Tectonic evolution of the Gibraltar arc [Ph. D. thesis]: Houston. Rice University.

Flinch, J. F., & Vail, P. R. (1998). Plio-Pleistocene sequence stratigraphy and tectonics of the Gibralter Arc.

Food and Agriculture Organization (FAO) (2017). The impact of natural hazards and disasters on agriculture, food security and nutrition.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). World Food and Agriculture Statistical Yearbook. FAO-Food & Agriculture Organization of the United Nation, Rome, Italy.

Fraisse, C. W., Sudduth, K. A., & Kitchen, N. R. (2001). Calibration of the CERES–MAIZE model for simulating site–specific crop development and yield on claypan soils. Applied Engineering in Agriculture, 17(4), 547.

Funk, C., Senay, G., Asfaw, A., Verdin, J., Rowland, J., Michaelson, J.,Eilerts, G., Korecha, D. & Choularton, R. (2005). Recent drought tendencies in Ethiopia and equatorial-subtropical eastern Africa. Famine Early Warning System Network, USAID, Washington, DC

Furnestin, J. (1959). Hydrologie du Maroc atlantique. Revue des travaux de l'Institut des pêches maritimes, 23(1), 5-77.

Furniss, M. J., Little, N. J., Peterson, D. L. (2018). Effects of climate change on infrastructure. Climate change vulnerability and adaptation in the Intermountain Region [part 2]. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-375. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 339-362.

Gadouali, F., Semane, N., Muñoz, Á G., Messouli, M. (2020). On the Link Between the Madden-Julian Oscillation, Euro-Mediterranean Weather Regimes, and Morocco Winter Rainfall. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 125(8). https://doi.org/10.1029/2020JD032387

Gao, B C,. (1996). NDWI A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sens Environ, 58(3), 257–266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

Gao, X,. Pal, J S,. Giorgi, F. (2006). Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. Geophys Res Lett 33. DOI :10.1029/2005GL024954.

García-León, D., Contreras, S., & Hunink, J. (2019). Comparison of meteorological and satellite-based drought indices as yield predictors of Spanish cereals. Agricultural Water Management, 213, 388-396. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.030

Gentil, L. (1912a). Le Maroc physique. F. Alcan.

Gentil, L. (1912b). Observations géologiques sur la ligne d'étapes de la colonne Moinier entre Fès et la côte atlantique (Maroc) CR Ac. Sc., Paris, l, 154, 89-91.

Gentil, L. (1918a). Sur le synchronisme des dépôts et des mouvements orogéniques dans les détroits Nord-Betique et Sud-Rifain (Espagne Méridionale et Maroc). CR Hebd. Séances Acad. Sci, 167, 727-730.

Gentil, L. (1918b). Notes d'un voyage géologique á Taza (Maroc septentrional):(contribution à l'étude du Détroit Sud-Rifain). L. Martinet.

Gerstengarbe, F. -W., Werner, P. C. (1999). Estimation of the beginning and end of recurrent events within a climate regime. Climate Research 11-2. DOI: https://doi.org/10.3354/cr011097

GIEC, & Pachauri, A. R. (2014). Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de Travail I, II et III au Cinquième Rapport D'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, 60-79.

Gigout, M. (1951). Etudes géologiques sur la Meseta marocaine occidentale :(arrière-pays de Casablanca, Mazagan et Safi). Maroc Matin. Notes et mémoires du service géologique du Maroc 86. 507 pp.

Gigout, M. (1952). La transgression flandrienne a dépassé de 2 m le niveau actuel de la mer, à Rabat (Maroc). C. R. somm. Soc. Géol., France. 78-79 pp.

Gigout, M. (1956). Réponse au questionnaire de la Commission des lignes de rivage du IV [e] Congrès international de l'Inqua, 1953. " Quaternaria.

Giorgi, F,. Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. Glob Planet Chang 63:90–104.

Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. Global and Planetary Change 100: 172-182. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014

Gorczinski, W. (1920). Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la climatologie. Geographic Annaler 2 : 324–331.

Guenette, S., Hurtt, G., Huntington, H., Oberdorff, T., Revenga, C., Walpole, M. (2010). Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. Science (330). p. 1496- 1501

Gujarati, D N. (2009). Basic econometrics Tata McGraw-Hill Education.

Günther, F., Fritsch, S. (2010). neuralnet: Training of neural networks. The R journal 2:30-38.

Gutiérrez, J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma, L.M. Alves, M. Amjad, I. V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon, (2021). Atlas. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Hakam, O,. Baali, A,. Ait Brahim, Y,. El Kamel, T,. Azennoud, K,. (2022a). Regional and global teleconnections patterns governing rainfall in the Western Mediterranean: case of the Lower Sebou Basin, North-West Morocco. Modeling Earth Systems and Environment. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01425-3

Hakam, O,. Baali, A,. Ait Brahim, Y,. El Kamel, T,. Azennoud, K,. (2022b). Spatiotemporal evolution of droughts and their teleconnections with large-scale climatic indices in the Lower Sebou basin in northwestern Morocco. Acta geographica Slovenica journal, 62(2). https://doi.org/10.3986/AGS.10508

Hakam, O,. Baali, A,. El Kamel, T,. Ahouach, Y,. Azennoud, K,. (2022c). Comparative evaluation of precipitation-temperature based drought indices (DIs): A case study of Moroccan Lower Sebou basin. Kuwait Journal of Sciences, 49(3). https://doi.org/10.48129/kjs.13911

Hakam, O,. Baali, A,.Belhaj, A,. (2022d). Modeling drought-related yield losses using new geospatial technologies and machine learning approaches: case of the Gharb plain, North-West Morocco. Modeling Earth Systems and Environment. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01523-2

Hakam, O., Baali, A., Azennoud, K., Lyazidi, A., & Bourchachen, M. (2023). Assessments of Drought Effects on Plant Production Using Satellite Remote Sensing Technology, GIS and Observed Climate Data in Northwest Morocco, Case of the Lower Sebou Basin. International Journal of Plant Production, 1-16. DOI: https://doi.org/10.1007/s42106-023-00236-5

Hamdani, N., & Baali, A. (2020). Characterization of groundwater potential zones using analytic hierarchy process and integrated geomatic techniques in Central Middle Atlas (Morocco). Applied Geomatics, 12(3), 323-335.

Hammi, S., Simonneaux, V., Alifriqui, M., Auclair, L., & Montes, N. (2007). Evolution des recouvrements forestiers et de l'Occupation des sols entre 1964 et 2002 dans la haute vallée des Ait Bouguemez (Haut Atlas Central, Maroc). Impact des modes de gestion. Science et changements planétaires/Sécheresse, 18, 271-277.

Hammoudy, H., Ilmen W., R., & Sinan, M. (2022). Impact of climate change on extremes events in Morocco. Environment and Natural Resources: Challenges and Solutions. DOI : 10.1088/1755-1315/1090/1/012034

Hannachi, A. (2004). A primer for EOF analysis of climate data. Department of Meteorology, University of Reading, 1, 29. http://www.o3d.org/eas-6490/lectures/EOFs/eofprimer.pdf

Harbouze, R., Pellissier, J. P., Rolland, J. P., & Khechimi, W. (2019). Rapport de synthèse sur l'agriculture au Maroc (Doctoral dissertation, CIHEAM-IAMM).

Haszpra, T., Herein, M., & Bódai, T. (2020). Investigating ENSO and its teleconnections under climate change in an ensemble view–a new perspective. Earth System Dynamics, 11(1), 267-280.

Haut-Commissariat au Plan (HCP) (2013). Monographie régionale de la région du Gharb Cherarda Béni Hssen. Lien internet : https://www.hcp.ma/region-kenitra/attachment/647182/

Haut-Commissariat au Plan (HCP) (2021). Morocco in Figures. Retrieved September 15, 2022, from https://www.hcp.ma/downloads/Maroc-en-chiffres_t13053.html

Haut-Commissariat au Plan (HCP) (2021). Les objectifs du développement durable au Maroc dans le contexte de la covid-19.

He, Y., & Lee, E. (2016). Empirical relationships of sea surface temperature and vegetation activity with summer rainfall variability over the Sahel. Earth Interactions, 20(6), 1-18.

Heft-Neal, S., Lobell, D B., Burke, M. (2017). Using remotely sensed temperature to estimate climate response functions. Environmental Research Letters 12. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5463

Heller, N E., & Zavaleta, E S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. Biol. Conserv. 142. p.14-32.

Henson, R. 2011. The Rough Guide to Climate Change London, Rough Guide Ltd.

Hilmer, M., & Jung, T. (2000). Evidence for a recent change in the link between the North Atlantic Oscillation and Arctic sea ice export. Geophysical Research Letters 27(7): 989-992. https://doi.org/10.1029/1999GL010944

Hitz, S,. (2004). Estimating global impact from climate change. Glob Environ Chang 14:201–218

Hobbins, M.T., Dai, A., Roderick, M.L., & Farquhar, G.D. (2008). Revisiting the parameterization of potential evaporation as a driver of long-term water balance trends. Geophysical Research Letters, 35 (12).

Houdret, A., Kadiri, Z., & Bossenbroek, L. (2017). A new rural social contract for the Maghreb? The political economy of access to water, land and rural development. Middle East Law and Governance, 9(1), 20-42.

Huebener, H., Kerschgen, M. (2007). Downscaling of current and future rainfall climatologies for southern Morocco. Part I: Downscaling method and current climatology. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 27(13): 1763-1774. https://doi.org/10.1002/joc.1491

Huguet, F. (1996). Contribution à la modélisation numérique du phénomène de brise de mer (Doctoral dissertation, Lyon 1).

Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M. & Lister, D. (2001). African climate change: 1900-2100. Climate research, 17, 145-168.

Hurrell, J W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. Science 269(5224): 676-679. https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 103p

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2012). Summary for policymakers. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change. Chap.3, Changes in climate extremes and their impact on the natural physical environment. Table 3–2, P191–194.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of IPCC. Cambridge University Press: Cambridge

Ionesco, T. (1957). La zone côtière atlantique du Maroc. Etude phytosociologique et écologique du secteur de Sidi-Taïbi. Ronéo, 75 p.

Ionesco, T., & Sauvage, Ch. (1962). Aide-mémoire sur les principales espèces climax du Maroc. Rabat, INRA, Maroc

Iqbal, M F., Athar, H. (2018). Variability, trends, and teleconnections of observed precipitation over Pakistan. Theoretical and applied climatology 134(1): 613-632. https://doi.org/10.1007/s00704-017-2296-1

Isaya Ndossi, M., Avdan, U. (2016). Application of open source coding technologies in the production of land surface temperature (LST) maps from Landsat: a PyQGIS plugin. Remote Sens. 8(5):413

Jain, V.K., Pandey, R.P., Jain, M.K., & Byun, H.R. (2015). Comparison drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. Weather Clim Extremes 8: 1–11.

Jarlan, L. (2016). Observation spatiale du fonctionnement éco-hydrologique des surfaces naturelles et cultivées en régions semi-arides. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches; Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Univers; Université Toulouse III – Paul Sabatier, Toulouse, France

Jeong, J H., Resop, J P., Mueller, N D., Fleisher, D H., Yun, K., Butler, E E., Kim, S H. (2016). Random forests for global and regional crop yield predictions. PLoS One 11. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156571

Jiménez-Muñoz, J, C,. Sobrino, J, A,. Skoković, D,. Mattar, C,. & Cristobal, J,. (2014). Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. IEEE Geoscience and remote sensing letters, 11(10), 1840-1843. https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032

Jlibene, M. (2011). Options génétiques d'adaptation du blé tendre au changement climatique: variétés a résistance multiple (sécheresse, cécidomyie, sectorise, rouilles). Editions INRA, Rabat.

Johnson, D. M. (2014). An assessment of pre-and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States. Remote Sensing of Environment, 141, 116-128. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.027

Johnson, M.D., Hsieh, W.W., Cannon, A.J., Davidson, A., Bédard, F. (2016). Crop yield forecasting on the Canadian Prairies by remotely sensed vegetation indices and machine learning methods. Agric. For. Meteorol. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.003

Jones, J W., Antle, J M., Basso, B., Boote, K J., Conant, R T., Foster, I., Wheeler, T R. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. Agricultural systems 155:240-254. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014

Jones, P D., Jónsson, T., Wheeler, D. (1997). Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 17(13): 1433-1450. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13<1433::AID-JOC203>3.0.CO;2-P

Kamir, E., Waldner, F., Hochman, Z. (2020). Estimating wheat yields in Australia using climate records, satellite image time series and machine learning methods. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 160, 124–135. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.008

Kang, Y., Ozdogan, M., Zhu, X., Ye, Z., Hain, C., Anderson, M. (2020). Comparative assessment of environmental variables and machine learning algorithms for maize yield prediction in the US Midwest. Environ. Res. Lett. 15. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7df9

Karimzadeh Soureshjani, H. (2021). Relationship Between Weather Conditions and Climate Indices with Rainfed Crop Yield. International Journal of Plant Production, 15(4), 541-551. https://doi.org/10.1007/s42106-021-00160-6

Karrouk, M S. (2001). Changement Climatique et Sécheresses au Maroc, Séminaire AMAECO sur Les Aléas Climatiques et Politiques Agricoles, Rabat.

Karrouk, M S. (2002). Changement Climatique et Ressources en Eau au Maroc, International WONUC Conference “Nuclear desalination, Chalenges and Options” Marrakech

Karrouk, M S. (2005). Climate Change, Water Resource and Food Security in Morocco, International Conference on: Integrated Assessment of Water Resources and Global Change: A North-South Analysis, Bonn.

Karrouk, M S. (2007). Climate change and its impacts in Morocco. In Regional climate variability and its impacts in the Mediterranean area. Springer 253-267.

Kasmi, S., Snoussi, M., Khalfaoui, O., Aitali, R., & Flayou, L. (2020). Increasing pressures, eroding beaches and climate change in Morocco. Journal of African Earth Sciences, 164, 103796.

Kassem, Y., Gökçekuş, H., Alassi, E. (2022). Identifying most influencing input parameters for predicting Cereal production using an artificial neural network model. Modeling Earth Systems and Environment 8:1157–1170. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01148-x

Kawale, J., Liess, S., Kumar, A., Steinbach, M., Snyder, P., Kumar, V., Semazzi, F. (2013). A graph-based approach to find teleconnections in climate data. Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal 6(3):158-179. https://doi.org/10.1002/sam.11181

Kessabi, R., Hanchane, M., Krakauer, N. Y., Aboubi, I., El Kassioui, J., & El Khazzan, B. (2022). Annual, Seasonal, and Monthly Rainfall Trend Analysis through Non-Parametric Tests in the Sebou River Basin (SRB), Northern Morocco. Climate, 10(11), 170.

Kili, M., El Mansouri, B., Chao, J., & Fora, A. A. (2006). De nouveaux éléments structuraux du complexe aquifère profond du bassin du Rharb (Maroc) : implications hydrogéologiques. Comptes Rendus Geoscience, 338(16), 1194-1202.

Kim, K Y, Hamlington, B., Na, H. (2015). Theoretical foundation of cyclostationary EOF analysis for geophysical and climatic variables: concepts and examples. Earth-science reviews 150: 201-218. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.06.003

Knippertz, P., Ulbrich, U., Marques, F., Corte-Real, J. (2003). Decadal changes in the link between El Niño and springtime North Atlantic Oscillation and European–North African rainfall. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 23(11): 1293-1311. https://doi.org/10.1002/joc.944

Kogan, F N. (1995a). Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. Bulletin of the American Meteorology Society, 76(5): 655–668.

Kogan, F N. (1995b). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Adv Space Res, 15(11), 91–100. https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T

Kogan, F N. (1997). Global drought watch from space. Bulletin of the American Meteorological Society 78: 621-636. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2

Kogan, F N. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment. Bulletin of the American meteorological society, 82(9), 1949-1964. https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<1949:OSTFGV>2.3.CO;2

Kogan, F. (2019). Vegetation health for insuring drought-related yield losses and food security enhancement. Remote Sensing for Food Security, 163-173. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96256-6_7

Kogan, F., Guo, W., & Yang, W. (2020). Near 40-year drought trend during 1981–2019 earth warming and food security. Geomat Nat Hazards Risk 11 (1): 469–490.

Kogan, F., Kussul, N., Adamenko, T., Skakun, S., Kravchenko, O., Kryvobok, O., Shelestov, A., Kolotii, A., Kussul, O., Lavrenyuk, A. (2013). Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorologicaldata and biophysical models. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.01.002

Korres, N E., Norsworthy, J. K., Tehranchian, P., Gitsopoulos, T. K., Loka, D. A., Oosterhuis, D. M., ... & Palhano, M. (2016). Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: a review. Agronomy for Sustainable Development, 36, 1-22.

Laborde, J P. (2002). Méthodes de détection des anomalies et du comblement des lacunes dans les séries de données, à l'usage des climatologues … et de quelques autres, Actes des Journées de Climatologie de la Commission « Climat et Société » du Comité National Français de Géographie, Strasbourg, pp. 47–66.

Laborde, J P., & Mouhous, N. (1998). Notice d'installation du logiciel HYDROLAB. Equipe de gestion et Valorisation de l'Environnement, Nice.

Lachgar, R., Badri, W., Chlaida, M. (2021). Assessment of future changes in downscaled temperature and precipitation over the Casablanca-Settat region (Morocco). Modeling Earth Systems and Environment 1-11. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01213-5

Ladouki, M., Aouane, E., Douma, M., & Mouhri, K. (2008). Effet des fluctuations climatiques sur les cours d'eau méditerranéens et les lacs de barrage au Maroc: vulnérabilité, impacts écologique et socioéconomique. In Communication au" Workshop on Climate Change and Adaptation in the Maghreb (CCAM)"(Marrakech, 2008) (Vol. 42).

Lamb, P J., Peppler, R A. (1987). North Atlantic Oscillation: concept and an application. Bulletin of the American Meteorological Society 68(10):1218-1225. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1987)068<1218:NAOCAA>2.0.CO;2

Landsat, (2002). Project Science Office. Landsat 7 Science Data User's Handbook. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.

Laouina, A. (2006). Gestion durable des ressources naturelles et de la biodiversité au Maroc. Prospectives, Maroc.

Lawless, C., Semenov, M.A. (2005). Assessing lead-time for predicting wheat growth using a crop simulation model. Agric. For. Meteorol. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.01.002

Le Coz, J. (1964). Le Rharb, fellahs et colons (Vol. 2). Centre universitaire de la recherche scientifique.

Lebrini, Y,. Boudhar, A,. Htitiou, A,. Hadria, R,. Lionboui, H,. Bounoua, L,. & Benabdelouahab, T,. (2020). Remote monitoring of agricultural systems using NDVI time series and machine learning methods: a tool for an adaptive agricultural policy. Arabian Journal of Geosciences, 13(16), 1-14. https://doi.org/10.1007/s12517-020-05789-7

Lee, D Y., Lin, W., Petersen, M R. (2020). Wintertime Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation and their impacts on the Northern Hemisphere climate in E3SM. Climate Dynamics 55(5):1105-1124. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05316-0

Lefebvre, G., Redmond, L., Germain, C., Palazzi, E., Terzago, S., Willm, L., & Poulin, B. (2019). Predicting the vulnerability of seasonally-flooded wetlands to climate change across the Mediterranean Basin. Science of the Total Environment, 692, 546-555.

Leroy, A. (1961). Recherches morphologiques dans le périmètre de Sidi Slimane. Inédit.

Levy, R. G., & Tilloy, R. (1952). Maroc Septentrional (Chaine Du Rif): Partie B. Verlag nicht ermittelbar.

Li, S., Robinson, W A., Peng, S. (2003). Influence of the North Atlantic SST tripole on northwest African rainfall. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 108(19). https://doi.org/10.1029/2002JD003130

Liaw, A., Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. R news 2: 18-22.

Libiseller, C., Grimvall, A. (2002). Performance of partial Mann–Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society 13(1):71-84. https://doi.org/10.1002/env.507

Linares, J. C., Camarero, J. J. (2012). From pattern to process: Linking intrinsic water-use efficiency to drought-induced forest decline. Global Change Biology 18-3. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02566.x

Liu, C., Yang, C., Yang, Q., Wang, J. (2021). Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. Scientific Reports 11. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3

Liverani, A., von Thadden, S., Hamilton, K., Touati, M., Demangel, P., Aouab, J., Gehne, K. (2013). Maroc-Revue des depenses publiques et analyse institutionnelle de la politique climat: programme d'appui analytique a la strategie changement climatique du Maroc.

Louali, A. (2019). Le secteur agricole marocain : Tendances structurelles, enjeux et perspectives de développement. Ministry of Economy and Finance. https://www.agrimaroc.net/2019/07/27/2801/. Accessed 29 August 2022

Mahe, G., Lienou, G., Descroix, L., Bamba, F., Paturel, J. E., Laraque, A., ... & Khomsi, K. (2013). The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment. Hydrological Processes, 27(15), 2105-2114.

Mahmoudi, P., Rigi, A., & Kamak, M.M. (2019). A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. Theoretical and Applied Climatology, 137(3): 3123-3138.

Mamnouie, E., Fotouhi Ghazvini, R., Esfahani, M., & Nakhoda, B. (2006). The effects of water deficit on crop yield and the physiological characteristics of barley (Hordeum vulgare L.) varieties. Journal of Agricultural Science and Technology, 8(3): 211-219.

Mandi, L, Ouazzani, N. (2013). Water and wastewater management in Morocco: Biotechnologies application. Sustainable Sanitation Practice 1(14):9-16.

Marchane, A., Jarlan, L., Boudhar, A., Tramblay, Y., Hanich, L. (2016). Linkages between snow cover, temperature and rainfall and the North Atlantic Oscillation over Morocco. Climate Research 69-3. DOI: https://doi.org/10.3354/cr01409

Mariotti, A., & Dell'Aquila, A. (2012). Decadal climate variability in the Mediterranean region: roles of large-scale forcings and regional processes. Climate Dynamics 38(5):1129-1145. https://doi.org/10.1007/s00382-011-1056-7

Martinez, C.J., Baigorria, G.A., Jones, J.W. (2009). Use of climate indices to predict corn yields in southeast USA. Int. J. Climatol. https://doi.org/10.1002/joc.1817

Mateo-Sanchis, A., Piles, M., Muñoz-Marí, J., Adsuara, J.E., Pérez-Suay, A., Camps-Valls, G. (2019). Synergistic integration of optical and microwave satellite data for crop yield estimation. Remote Sens. Environ. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111460

Mathbout S, Lopez-Bustins J A, Royé D, Martin-Vide J, Benhamrouche A (2020). Spatiotemporal variability of daily precipitation concentration and its relationship to teleconnection patterns over the Mediterranean during 1975–2015. International Journal of Climatology 40:1435-1455. https://doi.org/10.1002/joc.6278

Mathieu, J.A., Aires, F. (2018). Assessment of the agro-climatic indices to improve crop yield forecasting. Agric. For. Meteorol. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.031

McGuire, A. D., Ruess, R. W., Lloyd, A., Yarie, J., Clein, J. S., Juday, G. P. (2010). Vulnerability of white spruce tree growth in interior Alaska in response to climate variability: Dendrochronological, demographic, and experimental perspectives. Canadian Journal of Forest Research 40-7. DOI: https://doi.org/10.1139/X09-206

McKee, T B., Doesken, N J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology 17:179-183. https://doi.org/10.12691/ajrd-4-6-1

McVicar, T R,. Jupp, D L,. (2002). Using covariates to spatially interpolate moisture availability in the Murray–Darling Basin: a novel use of remotely sensed data. Remote Sens Environ, 79(2–3), 199–212. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00273-5

Merabti, A., Meddi, M., Martins, D.S., & Pereira, L.S. (2018). Comparing SPI and RDI applied at local scale as influenced by climate. Water resources management, 32(3): 1071-1085.

Meroni, M., Fasbender, D., Balaghi, R., Dali, M., Haffani, M., Haythem, I., Hooker, J., Lahlou, M., Lopez-Lozano, R., Mahyou, H., Ben Moussa, M., Sghaier, N., Wafa, T., Leo, O. (2016). Evaluating NDVI Data Continuity Between SPOT-VEGETATION and PROBA-V Missions for Operational Yield Forecasting in North African Countries. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2466438

Michard, A. (1976). Eléments de Géologie marocaine. Notes et mémoires du sérvice géologique du Maroc 252. 408 pp.

Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. Entrepreneurship and Sustainability Issues, 7(4), 2897.

Milly, P. C. D. (1994). Climate, soil water storage, and the average annual water balance. Water Resources Research, 30(7), 2143-2156.

Minister of Energy, Mines, Water and Environment (MEMWE). (2016). Morocco's National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/resource/docs/natc/marnc3.pdf. Accessed 29 August 2022

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (MAPM). (2020). Regional agricultural plan – Region of Gharb – Chrarda – Beni Hssen. Internet: https://www.ormvag.ma/PDF/Brochures/Plaquette PAR ORMVAG.pdf (14. 6. 2022).

Ministry of Agriculture and Forestry (MAF) & General Directorate of Water Management (GDWM). (2018) Antalya basin drought management plan, Turkey.

Mishra, A K., & Singh, V P. (2010). A review of drought concepts. Journal of hydrology, 391(1-2), 202-216.

Mishra, A K., Ines, A V., Das, N N., Khedun, C P., Singh, V P., Sivakumar, B., Hansen, J W. (2015). Anatomy of a local-scale drought: Application of assimilated remote sensing products, crop model, and statistical methods to an agricultural drought study. Journal of Hydrology 526:15-29. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.038

Mishra, A K., Singh, V P. (2010). A review of drought concepts. Journal of hydrology 391. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

Moghimi, M.M., Zarei, A.R., & Mahmoudi, M.R. (2020). Seasonal drought forecasting in arid regions, using different time series models and RDI index. Journal of Water and Climate Change, 11(3): 633-654.

Mohammed, D.A. (2021). Integrated remote sensing and GIS techniques to delineate groundwater potential area of Chamchamal basin, Sulaymaniyah, NE Iraq. Kuwait Journal of Science, 48(3).

Mokhtari, N., MRABET, R., LEBAILLY, P., & Laurent, B. O. C. K. (2014). Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 2(1), 50-66.

Molle, F,. & Tanouti, O,. (2017). Squaring the circle: Agricultural intensification vs. water conservation in Morocco. Agricultural Water Management, 192, 170-179. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.009

Montion, L. (1962). Alimentation en eau des villes de la côte Atlantique et surexploitation des eaux souterraines. Mémoire Inédit. O.N.I. 11 pp.

Moore, C. E., Meacham-Hensold, K., Lemonnier, P., Slattery, R. A., Benjamin, C., Bernacchi, C. J., ... & Cavanagh, A. P. (2021). The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: from enzymes to ecosystems. Journal of Experimental Botany, 72(8), 2822-2844.

Morel, J. L. (1988). Evolution récente de l'orogène rifain et de son avant-pays depuis la fin de la mise en place des nappes (Rif, Maroc) (Doctoral dissertation, Paris 11). 584 pp.

Moukrim, S., Lahssini, S., Rifai, N., Menzou, K., Mharzi-Alaoui, H., Labbaci, A., ... & Rhazi, L. (2020). Modélisation de la distribution potentielle de Cedrus atlantica Manetti au Maroc et impacts du changement climatique. Bois & Forêts des Tropiques, 344, 3-16.

Moutia, S,. Sinan, M,. & Lekhlif, B,. (2021). Assessment of agricultural drought in Morocco based on a composite of the Vegetation Health Index (VHI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). In E3S Web of Conferences, 314. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131404003

Mrabet, R. (2007). Conservation agriculture in Morocco: a research review. In The Proceedings of the International Workshop on Conservation Agriculture for Sustainable Land Management to Improve the Livelihood of People in Dry Areas (pp. 183-208).

Muñoz Sabater, J. (2019). ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 10(10.24381).

Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. Water Resources Management, 23(5): 881-897.

Narasimhan, B. and R. Srinivasan (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. Agricultural and Forest Meteorology, 133(1): 69–88.

Nicholson, S E., Kim, J. (1997). The relationship of the El Niño–Southern oscillation to African rainfall. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 17(2): 117-135. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199702)17:2<117::AID-JOC84>3.0.CO;2-O

Nigam S, Pyle J, Curry J A (2003). Teleconnections. Encyclopedia of atmospheric sciences, Netherland

Nikbakht, J., & Hadeli, F. (2021). Comparison of SPI, RDI and SPEI indices for drought monitoring under climate change conditions (Case study: Kermanshah station). Journal of Agricultural Meteorology, 9(1): 14-25.

Nogueira, J., Evangelista, H., Bouchaou, L., Moreira, L., Sifeddine, A., Elmouden, A., ... & Martins, R. (2022). Coastal wetland responses to a century of climate change in northern Sahara, Morocco. Limnology and Oceanography, 67(2), 285-299.

North, G R., Bell, T L., Cahalan, R F., Moeng, F J. (1982). Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. Monthly weather review 110(7):699-706. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2

Nouaceur, Z., & Murărescu, O. (2016). Rainfall variability and trend analysis of annual rainfall in North Africa. International Journal of Atmospheric Sciences, 2016.

NourEldeen, N., Mao, K., Yuan, Z., Shen, X., Xu, T., & Qin, Z. (2020). Analysis of the spatiotemporal change in land surface temperature for a long-term sequence in Africa (2003–2017). Remote Sensing, 12(3), 488.

Obasi, G. O. P. (2005). The impacts of ENSO in Africa. Climate change and Africa, 218-230.

Observatoire régional de l'environnement et du développement durable au Maroc (OREDD). (2014). Climate change in the region of Gharb, Chrarda and Beni Hssen. Internet: https://www.4c.ma (24. 12. 2021).

Office Régional de Mise en Valeur du Gharb (ORMVAG) (2010). Monograph of the Regional Office of Agricultural Investment of Gharb. Kenitra, Morocco. Retrieved September 15, 2022; from https://www.ormvag.ma/PDF/Monographie%20fran%C3%A7ais.pdf

Office Régional de Mise en Valeur du Gharb (ORMVAG) (2020). Monographie, Kenitra, Morocco.

Ojara, M. A., Yunsheng, L., Babaousmail, H., Sempa, A. K., Ayugi, B., & Ogwang, B. A. (2022). Evaluation of Drought, Wet Events, and Climate Variability Impacts on Maize Crop Yields in East Africa During 1981–2017. International Journal of Plant Production, 16(1), 41-62. https://doi.org/10.1007/s42106-021-00178-w

Omondi, P., Ogallo, L. A., Anyah, R., Muthama, J. M., & Ininda, J. (2013). Linkages between global sea surface temperatures and decadal rainfall variability over Eastern Africa region. International Journal of Climatology, 33(8), 2082-2104.

Orindi, V. A., & Murray, L. A. (2005). Adapting to climate change in East Africa: a strategic approach (No. 117). London, UK: International Institute for Environment and Development.

Ouatiki, H., Boudhar, A., Ouhinou, A., Arioua, A., Hssaisoune, M., Bouamri, H., & Benabdelouahab, T. (2019). Trend analysis of rainfall and drought over the Oum Er-Rbia River Basin in Morocco during 1970–2010. Arabian Journal of Geosciences, 12, 1-11.

Ouraich I, Tyner W E (2014) Climate change impacts on Moroccan agriculture and the whole economy: An analysis of the impacts of the Plan Maroc Vert in Morocco. UNU-WIDER publisher. https://doi.org/10.35188/UNU-WIDER/2014/804-9. Accessed 29 August 2022

Pal, S., Chowdhury, P., Talukdar, S., & Sarda, R. (2022). Modelling rabi crop health in flood plain region of India using time-series Landsat data. Geocarto International, 37(13), 3761-3790.

Palmer, W.C. (1968). Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index. Weatherwise, 21: 156–161.

Panitz, H.-J. et al., (2013). COSMO-CLM (CCLM) climate simulations over CORDEX-Africa domain: analysis of the ERA-Interim driven simulations at 0.44° and 0.22° resolution. Clim Dyn, 42(11-12), 3015–3038, doi:10.1007/ s00382-013-1834-5.

Panu, U, S,. & Sharma, T, C,. (2002). Challenges in drought research: some perspectives and future directions. Hydrological Sciences Journal, 47(1), 19-30. https://doi.org/10.1080/02626660209493019

Pathak, A.A., & Dodamani, B.M. (2019). Comparison of meteorological drought indices for different climatic regions of an Indian river basin. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 1-14.

Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S.M., Domínguez-Castro, F., & Beguería, S. (2019). The impact of drought on the productivity of two rainfed crops in Spain. Natural Hazards and Earth System Sciences, 19(6): 1215-1234.

Peng, S., Robinson, W A., Li, S. (2002). North Atlantic SST forcing of the NAO and relationships with intrinsic hemispheric variability. Geophysical Research Letters 29(8): 117-1. https://doi.org/10.1029/2001GL014043

Perez, T. (2007). Impact des changements climatiques sur la biodiversité marine et côtière en Méditerranée (No. 27). UNEP-MAP-CAR/ASP.

Pervez, K., Ullah, F., Mehmood, S., & Khattak, A. (2017). Effect of Moringa oleifera Lam. leaf aqueous extract on growth attributes and cell wall-bound phenolics accumulation in maize (Zea mays L.) under drought stress. Kuwait Journal of Science, 44(4).

Plag, H. P., Rothacher, M., Pearlman, M., Neilan, R., & Ma, C. (2009). The global geodetic observing system. In Advances in Geosciences: Volume 13: Solid Earth (SE) (pp. 105-127).

Plan Directeur D'aménagement Intégré des Ressources en Eau (PDAIRE) (2007). Étude du plan de gestion de la sécheresse dans le bassin du Sebou. Agence du Bassin Hydraulique du Sebou.

Pohlert T (2018). Trend: non-parametric trend tests and change-point detection. R package version.

Pujos, A. (1957). Terres rouges, noires, grises. Soc. des Sc. Nat. et Phys. du Maroc, Trav. Sect. Pédol, 12, 71-96.

Pujos, A. (1985). Présentation de la carte des sols du Gharb à l'échelle du 1/100000 par P. Dvoux. Ibid., 13-14, 51-96 pp.

Pyarali, K., Peng, J., Disse, M. Tuo, Y. (2022). Development and application of high resolution SPEI drought dataset for Central Asia. Scientific Data 9. DOI: https://doi.org/10.1038/s41597-022-01279-5

Raynal, J. P., Texier, J. P., & Lefèvre, D. (1986). Essai de corrélation de l'Océan au continent pour le Quaternaire du Maroc. Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique, 27(2), 141-147.

Ringuelet, R. (1957). L'assainissement des Tirs du Rharb. Bulletin économique et social du Maroc.

Ripple, W. J., Wolf, C., Gregg, J. W., Levin, K., Rockström, J., Newsome, T. M., ... & Lenton, T. M. (2022). World scientists' warning of a climate emergency.

Rodwell, M J., Rowell, D P., Folland, C K. (1999). Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. Nature 398(6725): 320-323. https://doi.org/10.1038/18648

Roopaei, M,. Rad, P,. Choo, K, K, R,. (2017). Cloud of things in smart agriculture: Intelligent irrigation monitoring by thermal imaging. IEEE Cloud Comput, 4(1), 10–15. https://doi.org/10.1109/MCC.2017.5

Rousi, E., Rust, H W., Ulbrich, U., Anagnostopoulou, C. (2020). Implications of winter NAO flavors on present and future European climate. Climate 8(1): 13. https://doi.org/10.3390/cli8010013

Saaidi, E. K. (1988). Géologie du Quaternaire marocain. SMER.

Salhi, A., Martin-Vide, J., Benhamrouche, A., Benabdelouahab, S., Himi, M., Benabdelouahab, T., & Casas Ponsati, A. (2019). Rainfall distribution and trends of the daily precipitation concentration index in northern Morocco: a need for an adaptive environmental policy. SN Applied Sciences, 1, 1-15.

Salman, A.Z., Al-Karablieh, E.K. (2001). An early warning system for wheat production in low rainfall areas of Jordan. J. Arid Environ. https://doi.org/10.1006/jare.2001.0799

Scheff, J. (2019). A unified wetting and drying theory. Nature Climate Change, 9(1): 9-10.

Schilling J, Hertig E, Tramblay Y, Scheffran J (2020) Climate change vulnerability, water resources and social implications in North Africa. Regional Environmental Change 20(1): 1-12. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01597-7

Sebbar, A., Badri, W., Fougrach, H., Hsaine, M., & Saloui, A. (2011). Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). Science et changements planétaires/Sécheresse, 22(3), 139-148.

Šebenik, U., Brilly, M., Šraj, M. (2017). Drought analysis using the standardized precipitation index (SPI). Acta geographica Slovenica 57-1. DOI: https://doi.org/10.3986/AGS.729

Seif-Ennasr M, Bouchaou L, El Morjani Z E A, Hirich A, Beraaouz E H & Choukr-Allah R, 2020. Gis-based land suitability and crop vulnerability assessment under climate change in chtouka ait baha Morocco. Atmosphere, 11(11). https://doi.org/10.3390/atmos11111167

Senay, G.B., Velpuri, N.M., Bohms, S., Budde, M., Young, C., Rowland, J., & Verdin, J.P. (2015). Drought monitoring and assessment: remote sensing and modeling approaches for the famine early warning systems network. In Hydro-meteorological hazards, risks and disasters, 233-262.

Shafer, B.A. & L.E. Dezman, (1982). Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas. Proceedings of the Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins, United States.

Singh, T P., Nandimath, P., Kumbhar, V. (2021). Drought risk assessment and prediction using artificial intelligence over the southern Maharashtra state of India. Modeling Earth Systems and Environment 7:2005–2013. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00947-y

Sintayehu, D. W. (2018). Impact of climate change on biodiversity and associated key ecosystem services in Africa: a systematic review. Ecosystem health and sustainability, 4(9), 225-239.

Snoussi, M., Ouchani, T., Khouakhi, A., & Niang-Diop, I. (2009). Impacts of sea-level rise on the Moroccan coastal zone: quantifying coastal erosion and flooding in the Tangier Bay. Geomorphology, 107(1-2), 32-40.

Société Chérifienne des Pétroles (S. C. P.). Rapports annuels.

Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). International Journal of Climatology 35-13. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.4267

Stepanek, G. (2005). Software project secrets. George Stepanek.

Stigter, T. Y., Nunes, J. P., Pisani, B., Fakir, Y., Hugman, R., Li, Y., Tomé, S. et al. (2014). Comparative assessment of climate change and its impacts on three coastal aquifers in the Mediterranean. Regional Environmental Change 14. DOI: https://doi.org/10.1007/s10113-012-0377-3

Stockton, C. (1985). Current research progress toward understanding drought. Proceedings, Drought, Water Management and Food Production, 21-35.

Stour, L., Agoumi, A. (2008). Climatic drought in Morocco during the last decades. Hydroécologie Appliquée16:215-232. https://doi.org/10.1051/hydro/2009003

Sun, L,. Mitchell, S, W,. & Davidson, A,. (2012). Multiple drought indices for agricultural drought risk assessment on the Canadian prairies. International Journal of Climatology, 32(11), 1628-1639. https://doi.org/10.1002/joc.2385

Sutton, R T., Norton, W A., Jewson, S P. (2000). The North Atlantic Oscillation—what role for the ocean?. Atmospheric Science Letters, 1(2): 89-100. https://doi.org/10.1006/asle.2000.0021

Swain, S., Patel, P., & Nandi, S. (2017). Application of SPI, EDI and PNPI using MSWEP precipitation data over Marathwada, India. In 2017 IEEE International geoscience and remote sensing symposium (IGARSS).

Sylla, M. B., F. Giorgi, E. Coppola and L. Mariotti, (2013). Uncertainties in daily rainfall over Africa: assessment of gridded observation products and evaluation of a regional climate model simulation. International Journal of Climatology, 33(7), 1805–1817, doi: https://doi.org/10.1002/joc.3551.

Tabet-Aoul, M. (2008). Impacts du changement climatique sur les agricultures et les ressources hydriques au Maghreb. Les notes d'alerte du CIHEAM, (48).

Taltasse, P. (1953). Recherches géologiques et hydrogéologiques dans le Bassin lacustre de Fès-Moknès, &c.

Tekken, V., Costa, L., & Kropp, J. P. (2009). Assessing the regional impacts of climate change on economic sectors in the low-lying coastal zone of Mediterranean East Morocco. Journal of Coastal Research, 272-276.

Texier, P. J., Lefevre, D., & Raynal, J. P. (1993). La Formation de la Mamora. Le point sur la question du Moulouyen et du Salétien du Maroc Nord-Occidental. Quaternaire, 3(2), 63-73.

The World Bank Group, (2022). Morocco Climate and Development Report. Washington. Lien internet :https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/38240/Morocco_CCDR_FR_version.pdf

Thorne, P. W., & Vose, R. S. (2010). Reanalyses suitable for characterizing long-term trends. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(3), 353-362.

Thornthwaite, C W. (1984). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review 38-1. https://doi.org/10.2307/210739

Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. Earth Science Informatics, 8(3): 697-709.

Tilloy, R. (1955a). Feuilles de Rabat et de Sidi Yahya du Rharb, Note explicative. Carte Géologique du Maroc au 1/100,000. Notes et Mémoires du Service Géologique, 62 pp. Rabat.

Tilloy, R. (1955b). Note explicative de la Feuille de Souk el Arba du Rharb au 1/100000. Carte Géologique du Maroc. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc. 62 pp. Rabat.

Tilloy, R. (1955c). Note Explicative de La Feuille De Fes-Ouest au 1/100 000. Notes et Mémoires du Service Géologique, 62 pp. Rabat.

Tilloy, R. (1955d). Note Explicative de La Feuille D'Ouezzane au 1/100000. Notes et Mémoires du Service Géologique. 62 pp. Rabat.

Torrence, C., Webster, P. J. (1999). Interdecadal changes in the ENSO–monsoon system. Journal of Climate 12-8. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2679:ICITEM>2.0.CO;2

Tramblay, Y,. Badi, W,. Driouech, F,. El Adlouni, S,. Neppel, L,. Servat, E. (2012). Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco, Global Planet. Change 82–83:104–114

Tran, D. X., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Myint, S. W., Caetano, M., & Kieu, H. V. (2017). Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 124, 119-132.

Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., ... & Soden, B. (2007). Observations: surface and atmospheric climate change. Chapter 3. Climate change, 235-336.

Tsakiris, G., & Vangelis, H.J.E.W. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. European water, 9(10): 3-11.

Union, A. International Organization for Migration (IOM) (2018). The Study on Benefits and Challenges of Free Movement of Persons.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNODRR) (2021). Special report on drought 2021. Internet: https://www.undrr.org/publication/gar-special-report-drought-2021 (14. 6. 2022).

Usman, M., Ndehedehe, CE., Ahmad, B. (2021). Modeling streamflow using multiple precipitation products in a topographically complex catchment. Modeling Earth Systems and Environment. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01198-1

Van Hoolst, R., Eerens, H., Haesen, D., Royer, A., Bydekerke, L., Rojas, O., Racionzer, P. (2016). FAO's AVHRR-based Agricultural Stress Index System (ASIS) for global drought monitoring. International Journal of Remote Sensing 37;418-439. https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1126378

van Klompenburg, T., Kassahun, A., Catal C. (2020). Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. Computers and Electronics in Agriculture 177. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709

Vangelis, H., Tigkas, D., & Tsakiris, G. (2013). The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. Journal of Arid Environments, 88: 130-140.

Vatter, J., Wagnitz, P., Hernandez, E. (2019). Drought risk. The global thirst for water in the era of climate crisis. Internet: https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/drought_risk__wwf_.pdf (14. 6. 2022).

Verner, D., Treguer, D., Redwood, J., Christensen, J., McDonnell, R., Elbert, C., Belghazi, S. (2018). Climate Variability, Drought, and Drought Management in Morocco's Agricultural Sector. Washington, USA. https://doi.org/10.1596/30603

Vicente-Serrano S M, Trigo, R M (2011). Hydrological, socioeconomic and ecological impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean region. Springer Science & Business Media (46).

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. (2016). Comment on 'candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). International Journal of Climatology 36-4. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.4474

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate 23-7. DOI: https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J. et al. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural,

and hydrological application. Earth Interactions 16-10. DOI: https://doi.org/10.1175/2012EI000434.1

Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S., Dominguez-Castro, F. (2020). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? Earth-Science Reviews 201. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953

Vicente-Serrano, S., Cuadrat-Prats, J.M., Romo, A. (2006). Early prediction of crop production using drought indices at different time-scales and remote sensing data: Application in the Ebro Valley (north-east Spain). Int. J. Remote Sens. https://doi.org/10.1080/01431160500296032

Vicente-Serrano, S.M., Van der Schrier, G., Beguería, S., Azorin-Molina, C., & Lopez-Moreno, J.I. (2015). Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. Journal of Hydrology, 526: 42-54.

Wable, P. S., Jha, M. K., & Shekhar, A. (2019) Comparison of drought indices in a semi-arid river basin of India. Water resources management, 33(1): 75-102.

Walker, G T. (1924). Nouvelles Recherches sur les Grains Orageux et les Pluies en Afrique Occidentale. Par Henry Hubert. Paris (Gouvernement Général de l'Afrique Occidentable Française) 1922. https://doi.org/10.1002/qj.49705021135

Walker, G T. (1931). On periodicity in series of related terms. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character 131(818): 518-532. https://doi.org/10.1098/rspa.1931.0069

Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. Climate dynamics, 29, 411-422.

Wang, Q,. Wu, J,. Li, X,. Zhou, H,. Yang, J,. Geng, G,. An, X,. Liu, L,. & Tang, Z,. (2016). Comprehensively quantitative method of evaluating the impact of drought on crop yield using daily multi-scale SPEI and crop growth process model. Int. J. Biometeorol, 1–15. https://doi.org/10.1007/s00484-016-1246-4

Ward, M N., Lamb, P J., Portis D H., El Hamly M., Sebbari R (1999) Climate variability in northern Africa: Understanding droughts in the Sahel and the Maghreb. In Beyond El Niño. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-58369-8_6

Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M.J. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. Journal of Climate, 17(12): 2335-2351.

Wernli, R. (1977). Les foraminifères planctoniques de la limite moi-pliocène dans les environs de Rabat (Maroc). Ecolg. Geo ;. Helv. 70/1, 143-191.

Wernli, R. (1979). Le Pliocène de la Mamora (Maroc): stratigraphie et foraminifères planctoniques.

Wernli, R. (1988). Micropaléontologie du Néogène post-nappes du Maroc septentrional et description systématique des foraminifères planctoniques. Notes et Mémoires du Service géologique, (331). 270 pp.

Whisler, F.D., Acock, B., Baker, D.N., Fye, R.E., Hodges, H.F., Lambert, J.R., Lemmon, H.E., McKinion, J.M., Reddy, V.R. (1986). Crop Simulation Models in Agronomic Systems. Adv. Agron. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60282-5

Wickramasinghe, L., Weliwatta, R., Ekanayake, P., Jayasinghe, J. (2021). Modeling the Relationship between Rice Yield and Climate Variables Using Statistical and Machine Learning Techniques. Journal of Mathematics 2021. https://doi.org/10.1155/2021/6646126

Wilhite, D. (2006). Drought monitoring and early warning: Concepts, progress and future challenges. Internet: https://public.wmo.int/en/resources/library/drought-monitoring-and-early-warning-concepts-progress-and-future-challenges (14. 6. 2022).

Wilks, D. (2006). Statistical methods in the atmospheric sciences. Oxford, United Kingdom

Windahl, E,. & de Beurs, K,. (2016). An intercomparison of Landsat land surface temperature retrieval methods under variable atmospheric conditions using in situ skin temperature. Int J Appl Earth Obs Geoinf, 51, 11–27. https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.04.003

Woillez, M N. (2019). Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : Obsrvations, projections et impacts. DOI: https://doi.org/10.3917/afd.woill.2019.01.0001

World Bank. (2017). Beyond scarcity: Water security in the Midle East and North Africa. (Ed M. Development): World Bank Group.

World Bank. (2020a). Global economic prospects, June 2020. The World Bank.

World Bank. (2020b). Poverty and Shared Prosperity Reversals of Fortune, Washington. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1602-4

World Meteorological Organization (WMO) & Global Water Partnership (GWP) (2016). Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (WMO) (2006). Suivi de la sécheresse et alerte précoce : principes, progrès et enjeux futurs.

World Meteorological Organization (WMO) (2012). Standardized precipitation index. User guide. Internet: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7768 (14. 6. 2022).

World Meteorological Organization (WMO) (2017). Statement on the State of the Global Climate in 2016. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4453. Accessed 15 January 2022

Wu, H., Hubbard, K G., Wilhite, D A. (2004). An agricultural drought risk-assessment model for corn and soybeans. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 24:723-741. https://doi.org/10.1002/joc.1028

Xing, Z., Yan, D., Wang, D., Liu, S., & Dong, G. (2018). Experimental analysis of the effect of forest litter cover on surface soil water dynamics under continuous rainless condition in North China. Kuwait Journal of Science, 45(2).

Xu, K., Yang, D., Yang, H., Li, Z., Qin, Y., & Shen, Y. (2015). Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective. Journal of Hydrology, 526: 253-264.

Yang, Q., Li, M., Zheng, Z., & Ma, Z. (2017). Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. Science China Earth Sciences, 60(4): 745-760.

Yevjevich, V. M. (1967). Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Ph. D. thesis, Colorado State University. United States.

Yihdego, Y., Vaheddoost, B., Al-Weshah, R. A. (2019). Drought indices and indicators revisited. Arabian Journal of Geosciences 12-3. DOI: https://doi.org/10.1007/s12517-019-4237-z

Zamrane, Z. (2016). Recherche d'indices de variabilité climatique dans des séries hydroclmatiques au Maroc: identification, positionnement temporel, tendances et liens avec les fluctuations climatiques: cas des grands bassins de la Moulouya, du Sebou et du Tensift (Doctoral dissertation, Université Montpellier; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc). Faculté des sciences Semlalia).

Zamrane, Z., Mahé, G., Laftouhi, N E. (2021). Wavelet Analysis of Rainfall and Runoff Multidecadal Time Series on Large River Basins in Western North Africa. Water 13(22):3243. https://doi.org/10.3390/w13223243

Zarei, A, R,. & Mahmoudi, M, R,. (2020). Assessment of the effect of PET calculation method on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). Arabian Journal of Geosciences, 13(4), 1-14. https://doi.org/10.1007/s12517-020-5197-z

Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, M. (2017). Combined analysis of temperature and rainfall variability as they relate to climate indices in northern Algeria over the 1972–2013 period. Hydrology Research 48-2. DOI: https://doi.org/10.2166/nh.2016.244

Zhang Y, Liu T, Li K, Zhang J (2017) Improved visual correlation analysis for multidimensional data. Journal of Visual Languages & Computing 41: 121-132. https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2017.03.005

Zhang, A., Jia, G. (2013). Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. Remote Sensing of Environment 134:12-23. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.023

Zhang, W., Wang, L., Xiang, B., Qi, L., He, J. (2015). Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter. Climate Dynamics 44(5): 1351-1366. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2155-z

Zhong, L., Hua, L., & Yan, Z. (2020) Datasets of meteorological drought events and risks for the developing countries in Eurasia. Big Earth Data, 1-33.

Zhou, X., & WANG, Y. C. (2011). Dynamics of land surface temperature in response to land-use/cover change. Geographical Research, 49(1), 23-36

ANNEXES

Annexe 1 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Sidi Slimane

Année	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1933	44,6	58,9	64,4	4,9	15,0	18,4	0,0	2,7	0,0	37,2	154,8	214,5
1934	1,5	29,1	102,3	78,4	24,8	0,2	0,0	0,0	0,0	3,2	158,4	30,1
1935	33,1	32,4	3,1	10,2	29,5	1,1	0,0	0,0	15,1	41,1	18,2	68,1
1936	53,4	119,7	139,1	69,5	102,2	0,0	0,0	0,7	0,0	23,9	106,2	52,6
1937	53,0	1,8	69,7	24,4	6,0	0,0	0,0	0,0	18,0	113,9	37,2	110,2
1938	31,9	20,3	14,7	72,2	31,2	0,7	0,0	0,0	18,0	52,0	50,3	102,3
1939	38,6	71,2	32,4	58,1	16,1	25,3	0,0	0,0	31,0	70,1	28,2	123,3
1940	94,3	92,5	63,4	8,5	18,5	16,6	0,0	0,0	6,5	164,2	46,6	20,9
1941	135,9	90,6	63,4	98,4	18,5	0,0	14,5	1,8	1,8	3,2	122,8	5,9
1942	68,0	125,3	55,2	51,8	21,9	6,8	0,0	0,0	5,7	35,4	92,6	144,6
1943	24,7	1,9	33,9	42,4	8,6	0,0	0,5	0,1	2,6	103,7	36,5	129,6
1944	5,8	11,8	46,0	31,0	25,9	46,6	0,0	2,4	19,5	8,7	49,6	45,4
1945	90,8	0,0	2,9	0,0	4,8	8,1	0,0	0,0	0,0	28,2	40,3	95,3
1946	95,0	8,6	87,9	82,7	51,5	0,0	0,0	0,0	0,0	40,6	57,6	46,1
1947	105,7	118,0	82,4	5,8	49,2	0,0	0,0	0,0	25,1	17,5	72,7	39,7
1948	80,1	31,9	8,7	54,9	18,0	0,2	0,0	0,0	0,0	23,1	0,0	78,7
1949	63,5	36,7	39,7	105,7	11,7	0,0	0,0	0,5	2,9	0,0	106,2	99,3
1950	41,3	8,2	27,5	7,4	21,1	0,0	0,0	0,0	1,6	28,4	9,6	153,7
1951	104,9	90,9	62,3	10,3	21,0	1,6	0,0	0,0	12,1	30,0	111,1	23,3
1952	127,8	16,3	36,5	48,7	56,0	0,0	0,0	0,4	0,0	23,0	61,0	105,0
1953	159,0	44,0	20,0	26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,0	32,0	15,0	24,0
1954	67,0	63,0	112,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	22,0	51,0
1955	101,0	242,0	97,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	64,0	71,0	41,0
1956	43,0	151,0	104,0	121,0	3,0	0,0	0,0	0,0	5,0	55,0	17,0	85,0
1957	0,0	20,0	63,0	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,0	94,0	157,0	52,0
1958	8,0	24,0	63,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	0,0	34,0	183,0
1959	31,0	37,0	32,0	37,0	57,0	0,0	0,0	0,0	0,0	90,0	77,0	91,0
1960	133,0	46,0	124,0	5,0	17,0	19,0	0,0	0,0	0,0	80,0	70,0	98,0
1961	51,7	4,7	58,0	6,0	7,1	23,7	0,0	0,0	11,0	23,6	137,8	27,9
1962	31,1	9,3	137,6	20,6	0,0	7,0	0,0	0,0	3,9	28,2	196,7	82,5
1963	137,5	173,9	10,5	35,8	38,4	2,3	0,0	0,0	5,5	6,3	55,0	154,2
1964	25,2	40,8	51,9	68,6	0,0	13,3	0,0	0,0	0,7	3,0	95,4	76,3
1965	44,0	43,9	67,3	26,2	7,8	2,4	0,0	0,0	45,0	177,3	83,1	64,4
1966	27,9	60,3	23,8	15,7	3,9	0,2	0,0	0,0	3,4	81,3	39,9	16,5
1967	24,0	55,3	19,9	80,9	35,5	7,7	0,0	0,0	2,3	31,6	123,3	50,0
1968	6,0	145,1	65,0	25,3	17,4	20,0	0,0	1,9	0,8	0,0	154,1	116,8
1969	71,0	172,0	110,5	65,3	40,4	15,9	4,4	0,0	36,3	46,9	103,5	106,7
1970	156,6	3,3	70,4	19,3	15,8	8,6	0,0	0,0	0,0	13,3	25,9	99,7
1971	117,1	14,9	99,0	134,7	61,4	13,3	0,3	0,0	0,0	0,0	102,3	63,4
1972	77,6	92,4	65,6	9,0	81,2	1,7	0,0	1,4	6,9	91,8	18,1	47,6
1973	71,0	46,6	52,3	12,2	16,0	0,0	0,0	0,4	0,0	7,6	28,8	158,9

1974	24,6	68,4	58,6	147,4	0,3	19,3	0,0	0,0	1,0	22,7	9,6	0,0
1975	42,9	53,6	135,5	82,9	24,8	18,8	0,0	0,0	1,7	4,0	33,8	128,1
1976	20,0	50,5	35,8	69,2	145,5	1,0	0,0	0,0	20,9	114,2	7,3	116,9
1977	187,8	103,3	21,3	0,0	38,8	1,5	5,9	0,0	3,7	63,6	44,1	49,0
1978	83,4	71,3	36,8	118,4	87,9	15,2	0,0	0,0	0,0	7,3	5,9	121,1
1979	86,8	146,1	54,8	47,2	4,0	1,9	19,5	0,0	3,8	116,0	23,6	10,7
1980	57,7	13,7	91,3	26,2	31,0	1,8	0,0	0,0	0,7	48,9	54,8	5,3
1981	24,2	13,5	31,7	33,4	14,8	2,6	0,0	0,0	0,8	3,4	0,0	74,7
1982	73,5	52,8	9,1	120,7	21,2	0,0	0,6	0,0	2,0	86,8	82,4	39,7
1983	0,0	134,4	50,0	23,3	15,2	0,0	0,0	0,0	0,3	5,9	75,2	74,7
1984	12,2	12,5	99,0	45,3	121,5	0,0	0,0	0,0	5,0	8,5	83,3	18,5
1985	85,8	15,1	0,8	22,0	23,4	0,9	0,0	0,0	7,5	0,0	67,3	56,1
1986	98,6	166,0	44,3	45,5	0,0	5,7	0,0	0,0	3,3	6,5	48,8	7,6
1987	85,5	94,5	8,8	8,1	1,6	0,0	0,1	10,2	3,2	33,9	129,8	64,4
1988	91,0	47,2	19,2	32,3	25,4	4,6	0,0	0,0	0,0	45,4	99,7	4,5
1989	28,5	56,5	44,4	75,7	6,4	0,0	0,0	0,5	0,0	43,4	76,4	122,1
1990	50,6	2,5	36,5	51,6	39,0	31,4	0,0	0,0	2,0	34,4	51,1	87,0
1991	13,6	101,7	102,9	10,9	0,0	6,8	0,0	7,7	59,0	42,2	15,1	21,5
1992	0,5	34,2	93,5	101,7	16,5	27,5	0,0	0,0	8,4	53,6	17,5	16,1
1993	13,5	26,2	59,5	66,2	24,2	0,1	0,0	0,0	2,6	40,5	124,6	22,0
1994	45,6	93,9	4,0	18,1	7,4	0,5	0,0	0,0	7,6	47,1	54,9	0,0
1995	11,1	33,2	11,3	26,9	2,2	52,9	13,7	0,0	5,0	2,0	50,0	93,0
1996	250,0	49,0	84,0	16,0	55,0	0,0	0,0	0,0	33,4	37,8	22,2	209,2
1997	140,0	1,5	5,3	38,7	6,4	15,0	4,2	0,3	11,3	45,6	154,8	81,0
1998	61,8	50,5	8,4	20,7	20,5	18,5	0,0	3,3	3,8	10,3	0,0	40,0
1999	65,9	41,7	22,0	14,5	7,3	0,0	0,0	0,0	8,7	58,0	21,3	20,1
2000	49,4	0,0	0,8	72,2	48,0	0,0	0,0	0,0	13,0	53,7	42,0	105,5
2001	84,2	23,0	30,9	0,0	25,3	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0	6,9	139,2
2002	4,3	7,6	99,4	89,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	45,1	216,2	43,7
2003	69,4	24,3	106,8	28,6	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	102,0	50,6	154,4
2004	0,0	25,1	39,3	49,2	109,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,1	15,0	42,7
2005	1,5	57,2	11,8	1,0	13,0	0,0	0,0	0,0	1,8	17,5	99,7	12,9
2006	107,6	120,3	63,9	12,1	11	2,3	0	4,5	10,9	14,8	45	33,5
2007	35,7	29,2	38,1	54,6	10,5	0	0		1,6	32,5	60,7	12
2008	49,2	26,2	10,7	49,6	27	0	0	0	33,5	108,8	105,8	105,2
2009	93,5	94,8	52,5	13,8	3	0	0	0	44	5	9	39
2010	121	138	94	16	2	5	2	0	31	69	190	56
2011	54	51	39	73	38	39	0	0	3	33	132	6
2012	24	13	15	68	8	0	0	0	0	93	113,4	9
2013	96	40	113,2	38,1	36,3	0	0	0	51,1	4,2	62,6	83,4
2014	114,7	45,3	21,3	42,4	0	0	0	0	8,5	20	170	61
2015	77,6	20,7	96,9	6,9	3,1	0	0	0	6,8	51,3	14,8	0
2016	25,1	49	46,6	16,5	39	0	0	1,4	0	33,7	79,1	66
2017	24,2	32,4	25,7	0,3	3,3	0	0	0	0	10,9	40	32,3

Annexe 2 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Kénitra

Année	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1916	12,7	27,2	152,2	37,3	24,5	0	0	0	6,4	9,5	119	68,6
1917	221	59,7	86,4	0	49,5	5,1	0	0	0	10,2	0	130,8
1918	82,9	39,6	112,1	62,2	28,2	1,3	0	0	3,8	54,9	115,2	24,4
1919	66,7	79	64,8	29,2	0	3,2	0	0	25,4	20,3	109,9	44,5
1920	81,3	43,2	62,9	10,2	13,5	0,4	0	0	4,2	52,2	178,7	176,5
1921	31,8	100,1	32,3	81,7	1,9	1	0	0	43,8	24,4	113	62,9
1922	47,4	38,2	99,9	18	45,8	21	0	2,5	10,2	104,8	3,8	116,8
1923	15,9	40	55,6	153	9,5	2,5	0	0	34,8	43,4	169,5	10,3
1924	65,9	138,2	116	53	0,3	0	0	0	1,3	19,8	86,8	49
1925	2,7	76,1	112	12,2	19,8	0	0	0	0	58,4	201	9,7
1926	24,4	95,1	50,9	38	35,5	0	0	0	0	139,7	285	86
1927	60,3	60,9	28	33,3	7,9	6,3	0	6,3	3	56,2	155	337,3
1928	18,4	31,2	94	53,6	83,1	0	0	0	3	29	90,1	126,2
1929	24,1	95,9	45,8	51	32,8	2	0	0	24,4	56,7	38,1	47,4
1930	138,4	76,6	46,1	119	16,1	78	4,8	0	9,4	1,4	114,1	75,7
1931	48,1	54,9	79,6	53	12,8	0,4	0	0,8	29	106,7	27,5	7,4
1932	32,4	97,4	135,6	44,5	14,8	12	0	0	12,4	19,5	79,8	58,6
1933	67,3	39,1	61,2	10,8	0	1,7	0	0	0	60,1	306,7	275,6
1934	0,7	37,7	90	110	31	4	0	4	0	6	211,5	51
1935	55	31	12	6,5	98,5	16	0	0	26	82	40	78
1936	64,8	110	144	76,9	109,5	0	0	0	6	49	164	115,6
1937	73,7	19,9	87,5	19,4	18,4	0,5	0	0	15	230,2	47,3	202,2
1938	53,8	10,2	19,3	52,9	62,7	3	0	0	22,5	52,6	18	224,9
1939	59,5	59,6	44,3	38,1	17,2	3,9	0	0,7	32,5	88	109,4	206,9
1940	124,4	87,1	151,7	8	24,7	22,6	0	0	35	211,9	92,2	69,5
1941	141	87,2	81,6	104,9	9	0	2,5	0	0	18,9	140,9	8,7
1942	88,9	134,4	58,3	80,8	6,9	2,8	0	0	14,4	89,3	130	158,4
1943	56	0	41,2	34,3	36,1	0	0	0	2,6	206,8	36,3	193,8
1944	10	172,6	24,4	22,1	21,7	14,8	0	11,8	21,6	9,3	29,3	102,4
1945	123,3	0	20,3	0,3	0	0	0	0	0	32,8	59,5	133,8
1946	87,6	34,6	95,9	67	58,2	13,1	1,3	0	13	58,3	101,9	75,3
1947	157,5	169,7	113	3	22,5	2	1,9	1,9	19,1	14,6	144,1	55
1948	86,7	36,7	8,3	65	17	1	0	0	0,3	68,7	0,6	107,1
1949	79	40,4	9,5	124,7	33,9	32,2	0,7	0	6,6	2,3	148,5	103
1950	51,7	18	41,1	7,9	17,7	0	1	0	1,7	21,8	4,8	165,2
1951	89,8	128,4	72	10,6	35	0,5	0	0	12,6	24,8	151	165,2
1952	134,7	26,6	57,4	64,1	26	0	0	0	4,7	4,4	91	34,3
1953	115	56,6	14,8	9,7	0	2,9	0	0	26	41	15,6	144,1
1954	95,5	85,7	131	26,7	0	0,5	0	0	0	35,1	28,1	74,8
1955	171,6	224,7	108,2	0,4	12,2	3	0	0	0	84,6	58,2	67,9
1956	71	161,1	114,7	93,7	3,9	9,2	0	0	8,3	0,4	119,1	39,2
1957	129	2	38	113	22	0	0	1	1	82	92	214
1958	59,2	26,2	53,5	36,3	46,7	3,7	0	9	0	13,1	48,8	249,2
1959	39,3	61,5	60	36,3	39,1	2	2	4,5	0	33,5	113,2	88,5
1960	143,6	52,5	102,7	9,5	16,2	10,8	0	0,5	0,4	107	71	183
1961	32,8	14,8	49,3	31	33	18	0	0	2	17	177	71

1962	45,9	24,3	195,5	26,3	4,5	4,8	0	0	2,6	56,7	299,9	54,4
1963	178,3	211,4	10,1	35,7	31,6	0,2	0	0	0,1	12,6	119,6	386,3
1964	34,3	45,6	100,5	79,5	13,2	0	0,3	0	4,4	8,4	116	175,4
1965	51,9	67,8	53,8	58,3	0	1,4	0	0,1	58,2	120,4	112	91,4
1966	53,6	107,8	8,5	19,8	13,6	6,3	0	0,1	3,3	95,6	82,7	15,8
1967	29,9	65,5	15,1	28,6	55,1	4,4	0	0	2,7	72,8	214,4	64,7
1968	8,8	138,1	47,5	24,9	35,7	5,9	0	0,9	7,5	2,3	254,1	112,1
1969	94,1	194,6	112,6	96,9	19,5	20	5,2	0	44,9	94	111,1	174
1970	174,1	2,2	62,4	42,2	21,8	11,5	0	0	0	65,3	46,1	141,7
1971	111,6	15,5	108,7	213	99,3	11,5	0,2	0,5	0,4	0,1	149,7	96,8
1972	101,5	83,1	108,5	40,6	86,3	1,4	0	0	29,4	129,6	50	66,7
1973	51,7	37,7	73,4	5,5	33,5	0	0	3,6	0,1	6,4	14,5	197,6
1974	23,8	61,8	78,4	144,4	1,3	19,8	0	0	0,2	24,7	22,4	0
1975	74,9	46,2	68,6	22,7	15,8	1,2	0	0	8	1,5	48,9	189,9
1976	42,2	33,4	45,2	105,7	27,5	0,5	0	0,4	30,6	148	6,5	163,4
1977	151,7	105,2	7	0,9	3,3	2,3	0	0	0	35,6	90,8	68,3
1978	152,3	78	39,9	52,4	16,4	5,7	0	0,4	0,5	13,5	36,6	185,2
1979	96,4	125,7	52,6	14,7	3,1	0,8	0,2	0	0	164	19,9	30,4
1980	118,9	6,3	138,9	30,9	32,5	0,2	0	0	14,5	73,9	107,7	27,2
1981	29	24,8	27,2	62,6	39,1	2	0	0	11,5	6,6	0	155
1982	107,8	49,9	37,2	110,8	5	0	0,4	0	0,7	27,7	110,6	50,8
1983	0	231,2	32,3	30,8	3,1	0	0	0,5	0	5,1	93,4	148
1984	47,3	42	95,1	32,5	169,9	1,9	0	0	0,2	15,5	259,4	44,6
1985	135,8	39,2	17	34,2	43,9	1,9	0	0	9,5	0	136,8	113,4
1986	132,2	289,2	45,9	63,9	0,2	24,4	0,3	0	13,1	2,9	111	18,4
1987	124,3	107,8	8,5	39,5	0,3	8,1	3,6	8,5	5,9	88,9	154,2	107,8
1988	121,9	59	6,5	35,4	11,2	16,7	0	0	0,2	37,1	116,2	6,3
1989	80,7	104,3	92	94,4	4,7	0	0	1	0	34,3	172,1	122,3
1990	92,2	0	50	40,4	2,2	0,2	0	0	2,2	78,7	55,2	164
1991	21,7	161,2	93,5	14,6	0,4	4,4	0	0,2	61,9	81	9,6	23,4
1992	6,6	35,7	41,9	69,5	11,4	18,9	0	1,3	6,4	53,1	13	37,9
1993	19,4	8,4	57,6	112	26,3	1,5	0	2,6	2,3	93,6	187,4	26,4
1994	66,7	95,7	16	30,9	30,8	0	1	0	2,2	49,3	85,6	0,6
1995	12,2	38,8	15,4	39,8	0	13,8	0,4	0,6	41,8	5,3	105	153,7
1996	398,4	92,7	71,7	16,6	35,9	7,9	0	0	29,8	54,7	46,2	378,1
1997	156,5	0	0,2	66,5	1,6	3,5	0	0,5	83,2	52,4	173,3	221,7
1998	91,8	59,9	4,7	24,9	16,1	8	0	0,9	3,3	6,3	0	119,2
1999	116,3	70,8	27,9	1,9	2,7	0,4	0	0	22,5	77,3	90,3	43,9
2000	63,4	0	0	80,7	8,8	0	0	0,2	16,2	101,2	59,5	170,5
2001	139,4	48,6	48,5	0,7	22,2	0,5	0	0,2	46,8	32,9	16,8	118,2
2002	9,4	2,3	128,5	105,5	8,3	0,2	0	0,4	0,1	78,8	370,9	83,7
2003	67,1	51,3	66,3	54,4	4,4	0	0	0	0,7	128,8	81,7	188,7
2004	5,6	65,5	62,8	56,2	65,6	0	0	0	0	115	28,6	87,1
2005	1,5	85,5	21,3	0,8	3,6	0	0	0	0,3	47	176,9	25
2006	197,8	118,6	43,4	13,8	21,8	0	0	0	25,2	31,5	67,1	25,2
2007	60,1	44,6	72,1	23,1	18	0	0	0	2,5	25,1	122,9	39,6
2008	54,6	25,4	17,2	65,8	42,9	0	0	0	48,6	107,2	160	123,1
2009	202,8	140,2	93,1	30,2	0	0	0	0	141,6	14,3	36	226,9

2010	255,7	191,3	77,5	45,4	9,1	11,4	2,6	0	0	127,5	216	119,6
2011	100,4	81,5	80,9	58,3	24,3	8,5	0	0	0	60,6	165	12,8
2012	26,7	121,1	91,8	0,6	0	0	0	0	36,5	119,7	13,1	115,8
2013	41,8	29,3	69,3	23,1	0	0	0	145,6	125,7	138	10,7	143,8
2014	54,2	83,6	58,5	13,4	0	0	0	21,1	21,9	59,7	58,3	94,5
2015	31,5	58,6	0,1	7,3	0	0	0	12,6	58,1	338,8	124,1	30,1
2016	98,9	58,1	4,9	22,8	0	0	0	8	26,3	35	0	80,3
2017	62	139,8	0	0	0	0	0	0	68,4	224,8	137,7	84,7

Annexe 3 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Souk Larbaa

Années	**Janv.**	**Fév.**	**Mars**	**Avr.**	**Mai**	**Juin**	**Juil.**	**Août**	**Sept.**	**Oct.**	**Nov.**	**Déc.**
1918	85	24	90	120,5	45	9,5	0,5	0	2	44	66,8	23,5
1919	78,3	70	41,1	29,5	0	59,3	1	0	46,4	17	140,1	78,6
1920	55,9	48,9	76,4	12,5	12,9	0	0	0	41,3	29,9	162	103
1921	34,5	237,4	13	19,9	11	13,1	0	0	30,2	38,8	126	63,1
1922	30,2	68,2	81,1	15,5	37,9	27,7	0	32	1,3	128,6	11,6	87
1923	25,5	66	69	162	0	27,2	0,2	2,1	26,8	34	196,6	9,5
1924	80,8	157,4	111,5	63,2	2,4	0	0	0,2	0	6,3	88,5	50
1925	3,8	88,4	82,7	34	18	18,3	0	0	0,3	50,9	141,9	79,5
1926	40,6	75,3	52,2	30,6	27,4	1,5	0	0	0	123	288,1	78,3
1927	78,9	57,8	57,8	7,7	10,6	3	3,3	0	4,6	52,2	201,5	286,7
1928	28,2	68	122,1	43,2	93,8	0	0	0	4,1	33,6	115,6	147,7
1929	30,4	109	42,4	41,7	25,3	0	0	0	12,5	57,7	37,9	72,9
1930	115,4	202,9	66,5	135,8	12,8	109,3	0	2,2	10	11,6	98,5	85,8
1931	45,1	46,2	158,9	110,6	2,8	1,8	0	0	22,9	147,6	33,8	4,5
1932	23,5	112,6	94,7	52	9,2	16,9	0	0	22,6	36,1	40,3	76,5
1933	54,6	28	93,7	15,3	0	4,4	0	0	1,7	47,9	244,2	260,4
1934	3,6	19	86,6	118,2	15,7	0	0	0	0	4,6	149,9	65,5
1935	32	26,9	11,1	6,1	91,2	1,4	0	0	32,5	91,2	78,2	93,4
1936	140,8	137,6	154	71,6	129,4	0	0,5	6,7	3,7	36,5	95,5	57,9
1937	64,3	8,4	98,4	26,2	0	0	0	0	10,6	196,1	42,4	146,9
1938	50,6	13,4	21,9	79,1	81,8	12,3	0	0	12,6	31,8	35	176,4
1939	81,1	64,1	24,9	60,8	13,2	6,4	0	1,9	32,8	96,3	52,8	128,2
1940	129,7	88,3	128	9,4	20,8	17,7	0	0	1,3	213,9	82,4	21,2
1941	160,1	98,1	30,2	87,1	12,8	0	0	0	12,4	1,3	171,9	30,8
1942	90	151,2	81,8	81,4	10,4	2,7	0	0	14	108,6	133,9	157,5
1943	45,6	0	64,1	46,3	60,5	0	1,5	0	9	60,6	9,9	191,4
1944	5	114,3	24,3	24,3	29,8	59,3	0	4,2	19,3	17,2	60,4	70,4
1945	114,3	0	14,3	0	0	5,5	0	0	0	19,9	84,3	134,7
1946	64,9	39,2	112,1	110,4	76,3	0,3	0	0	6,7	92,3	122,4	66,1
1947	171,6	187,8	110,7	0,5	33,7	1,9	1	0	26,6	28,9	94	40,3
1948	127,7	53,6	11	80,5	31,8	0	0	0	0	40,7	0,2	101,4
1949	60	40,5	18,9	116,1	26,8	9,6	0	0	4,2	2	150	87,1
1950	54,3	35,6	73,2	8,8	19,6	0	0	0,2	6,3	16,3	2,4	264
1951	159,8	137,7	75,1	23,6	23,3	1,3	0	0	7,9	30,9	209,2	51,6
1952	103,8	22,6	38	65,5	51,8	0	0	8	5,7	22,5	79,5	146,8
1953	150,3	34,5	41	38,5	0	3,5	0	0	21,1	46,3	22,9	49,9
1954	67,7	85,9	167,6	21	1,8	0	0	0	0	23,7	60,9	117,2

1955	157,4	239,9	127	8,5	12,9	4,1	0	0	0	71,1	95,2	132,1
1956	112,7	196,1	120,7	127,9	5,4	18,4	0,3	0	27,5	1,2	85,4	77,1
1957	115,5	1,7	34	69,4	78,3	0	0	0	0	85,7	109,5	149,6
1958	55,5	14	39,2	83	25,4	1,7	0	17,3	0	17,2	29,7	251,4
1959	55,5	49,3	65,8	19	70	0	0	1,1	21,5	30,5	89,5	104,5
1960	211	54	184,5	9	82,5	1,5	0	0	0	0	68,5	156
1961	59	2	9,5	18	40	13,3	0	0	13	0	199	72,6
1962	26,9	24,9	220,8	18,1	7,6	5,3	0	0	6	33,3	244,7	82,5
1963	182,3	216,8	11,5	4	22,2	1,5	0	0	2	9	106,1	358,2
1964	23,2	64,7	78,9	89,4	23,5	0	0	0	0	29	110,3	88,9
1965	87,6	42,5	42,3	29,9	0	2,1	0	0	30	140,2	68,1	75,9
1966	26,2	152,1	2,6	24,1	10,5	3,5	0	0	5,8	86,1	51,2	8,5
1967	41,5	87,9	20,2	89,7	12,4	15,4	0	0	0	58,7	110	34,4
1968	1,8	169,9	35,2	31,4	23,9	6,8	0	0	3,5	8,5	210,1	127
1969	102,1	193,1	91,5	95,3	12,1	6,6	3,5	0	27,5	48,5	177,1	195,5
1970	244,2	0	55,5	40,7	38,4	2,5	0	0	0	52,4	49,2	113,8
1971	143,2	10	122,4	170,9	143,4	4,2	0	0	0	0	92,7	128,8
1972	81,1	101,9	100,3	59,9	53	0	0	0	28	71,2	21,5	28,6
1973	0	36	63,6	0	38,4	0	0	0	1	4,9	20,6	116,9
1974	25,7	65,4	62,1	156,1	6,1	14,8	0	0	3	12,9	15,9	0
1975	85	49,8	139,7	53,9	13,5	4,5	0	0	0	0	24,3	174,6
1976	54	43,9	49,8	98,9	136,8	0	0	0	11,5	141,6	5,5	197,8
1977	227,9	91,6	9,7	1,5	6,8	0	0	0	0	46,3	63,7	64,3
1978	84,5	96,3	25,3	116,4	58,1	26,6	0	0	0	7,2	17,5	219,7
1979	88,2	181,8	74	31,6	0	1,5	1,6	0	0	129	21,1	37,1
1980	61,6	16,4	59,8	34,2	29,2	0,4	0	0	0,6	32,4	132	24,9
1981	10,1	14,6	40	85,2	42,4	2,2	0	0	1,9	2,1	0	176,6
1982	65,3	83,5	20,2	85,5	8,9	0,4	2,5	0	6,5	63,9	79	32,9
1983	0	145,9	18	28	9	0	0	0,5	1,9	2	174,8	180,8
1984	29,8	36,6	65,4	17,3	154,7	2,2	0	0	1,9	9,5	187,9	23,7
1985	65,5	36,5	7,5	13	18,5	2	0	0	7	0	91	62,5
1986	112	166,5	62	64	0	3	0	0	0	2,5	65,5	30
1987	131	64,5	6,5	25	2	6	0	16,5	7,5	46	108,5	90,5
1988	102	24,5	37	35	16	3	0	0	0	27,8	167	0
1989	35,5	102	58,7	109,5	11	0	0	0	0	59	194	131
1990	61	0	65,5	53,5	19	5	0	0	0	48	45	146
1991	3	110	107	5,5	0	3	0	11,5	63	46,8	22	27,5
1992	7	35,5	45,5	79	13,5	35,5	6,5	0	2	76	6,5	12,3
1993	11,6	15,6	34	63	94,5	0	0	0	20	79	131,5	13,5
1994	35	87,5	0	60,5	15	0	0	0	6	34,5	81,5	0
1995	14	20	15,5	30,5	0	21,5	1	0	18	21	62	152
1996	385	63	92	34	93	6	0	0	20,5	55	42,5	300
1997	131	0	0	81	11	4,5	0	5,5	11	57,5	218,5	186,5
1998	92,5	56	2	23	50	12,5	0	0	25	8	0	52,5
1999	69,5	46,5	22	14,5	7,3	0	0	0	12	84	92	25
2000	55	0	2,5	82,5	31,5	0	0	0	16,5	87	39,5	138
2001	128,5	50,5	27,5	0	13	0	0	0	60,5	14,5	23	87,8
2002	9,7	6,5	93,5	98,5	14	0	0	0	1	89	256	63,5

2003	65	31,5	64	42,5	0	0	0	0	0	117	64,5	166
2004	10	58	81,5	69,5	83,5	0	0	0	0	116	43,5	114
2005	0	57,5	42	0	5	0	0	0	2	41	98	27,5
2006	134,5	122	67	24,5	4,5	0	0	0	11	11	43,5	30,5
2007	36,3	37,5	64,5	26,1	30,5	0	0	0	0	47,7	105,8	34,1
2008	66,5	35,3	8,9	82,1	17,5	0	0	0	53	96,1	159,8	96,3
2009	95,3	195,7	49,5	42,7	0	0	0	0	65,3	16,1	40,9	257
2010	204	181,8	112,7	28,5	11,5	2,8	0,5	0	7	159,5	156,1	113,2
2011	78,9	55,8	55,3	77,2	30,7	10,4	0	0	0	37,5	108,6	4,5
2012	29	5,5	3	65,9	4	0	0	0	73	78,8	104,4	17,3
2013	146,3	35,5	150,5	42	23,8	0	0	0	30,5	24,3	64,8	18,5
2014	110,6	27,4	17,6	45,2	7	0	0	0	3,3	36,9	227,9	77,3
2015	72,82	28,6	39,8	3	7,5	0	0	0	0	28,9	17,5	0
2016	26,4	51,8	32,9	13,8	26,7	0	0	0,8	0	53	157,1	120,2
2017	40,8	53,3	35,8	5,1	12,6	0	0	0	0	10	49,7	70,6

Annexe 4 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Lalla Mimouna

Année hydrologique	**Oct.**	**Nov.**	**Déc.**	**Janv.**	**Fév.**	**Mars**	**Avr.**	**Mai**	**Juin**	**Juill.**	**Août**	**Sept.**
1983-84	8,4	238	166,1	47,8	42,6	79,9	20,8	135,1	2,4	0	1,1	5,5
1984-85	36,8	257,4	15	117,9	62,7	17,7	50,9	40,6	2,1	3,9	0	1,1
1985-86	0	98,4	110,2	87,7	137,9	60,5	72	0	0,5	0	0	6,5
1986-87	9,2	70,8	37,6	177,8	142,3	12,1	50,4	9,5	1,6	0,2	20,9	30,2
1987-88	114	104,4	84,2	122,1	42,1	35,6	19	22,6	51,6	1,3	0	3,3
1988-89	39,3	103,4	20,2	83,9	136	101,3	90,8	7,1	0	0	1	5,7
1989-90	46,5	357,3	204,3	78,7	0	32,2	65,8	2,4	3,3	1,5	0	2,4
1990-91	73,3	73,3	199,7	24,2	205,8	113	57,3	0,5	1,3	0	3,9	94,1
1991-92	170,1	56,7	57,3	3,9	41	29,5	68,4	8,5	42,1	0	0,3	5,9
1992-93	50,9	14,5	64,9	17,3	35,6	61,3	87	49,4	1,1	0	0	10,2
1993-94	132,6	182,8	24,6	91,3	94,1	0	65,6	42,5	0	0,1	0	54,8
1994-95	68,3	69,6	1,6	40,8	60,8	37,7	35,4	3,2	10	2,5	0	4,6
1995-96	2,4	145,1	328,4	483,6	79	71,7	67	99,9	0	0	0	9,5
1996-97	42,7	133,4	459,4	207,2	0	0	99,5	12,7	2,7	16,4	19,6	52,1
1997-98	37,9	316,7	220,6	98,4	120,4	6,4	50,3	22,5	9,4	0	0,4	38,8
1998-99	24,4	0,9	69	94,5	31,2	20	26,1	32,4	0	0,1	3,7	35,6
1999-00	159,8	60,4	76	37,9	0	13,2	156,3	30,6	0	0,1	0	26,1
2000-01	73,1	74,5	301,6	191,6	43,3	37,9	2,8	54	5,1	0,1	0,6	67,7
2001-02	8,8	8,9	241,8	23,6	22,9	189,5	101,7	30,1	0,9	0	0	40,5
2002-03	93,4	400,1	123,9	107	63,7	76,7	85,3	21,1	0	0	0	1,8
2003-04	266,2	131,2	194,4	20,6	59,3	74,9	63,1	82,3	0	0,3	0,6	0,6
2004-05	112,7	9,7	83,3	0	41,6	39,8	0,6	7,1	0	0	0	17,9
2005-06	49,6	72,7	71,3	146,5	112,7	134,5	25,6	7,1	6,3	0,9	12,4	14,9
2006-07	65,2	408,5	48	64,7	124,5	58,2	142,2	36,7	0	0	0,1	2
2007-08	98,1	101,2	60,5	96,6	53,7	13,1	68,1	39,7	0	0	0	24
2008-09	210,3	171,4	209,9	171	203	48,6	54,7	4	1	0	0	40,4
2009-10	43,6	56	287,3	157,6	228,3	92	63,6	33,3	19,3	1,6	0	3,4
2010-11	126,4	221	170,1	79,1	122,5	64,2	60,6	25,4	8,8	0	2,4	3,8

2011-12	62,1	106,3	14,1	33,8	4,2	3,8	88,3	6,1	2	0	0	58,6
2012-13	76,4	262,8	48	116,1	38,3	183,7	45,5	34	0,3	0	0	15,2
2013-14	67,4	63,6	55,9	131,7	46,2	32,1	58,1	26	23	0,3	0	0,1
2014-15	32,2	268,3	101,4	69,4	0,5	0	0	0	0	0	0	0
2015-16	30,6	0	0	67,9	63,6	43	24,9	41,2	4,2	0,7	0,4	1,2
2016-17	56,4	212	85	40	85	41	31	11	0	0	8	0

Annexe 5 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Mechra Bel Ksiri

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	2	174,8	180,8	29,8	36,6	63,4	17,3	154,7	2,2	0	0	1,9
1984-85	9,5	187,9	23,7	65,5	36,5	7,5	13	18,5	2	0	0	2
1985-86	0	91	65,5	112	166,5	62	64	0	3	0	0	7
1986-87	9,50	54,50	24,70	150,80	87,60	9,80	17,60	2,70	0,20	2,60	0,00	0,00
1987-88	44,80	152,70	105,80	136,50	34,40	23,90	50,10	11,30	9,10	0,00	0,00	5,10
1988-89	45,60	129,50	23,00	43,10	121,00	60,40	122,50	13,00	0,00	0,00	0,50	0,00
1989-90	99,60	126,40	186,30	87,10	0,00	42,20	83,70	26,50	3,00	0,00	0,00	3,60
1990-91	55,20	70,00	155,90	5,60	137,70	164,50	6,50	0,70	0,00	0,00	20,00	1,40
1991-92	61,80	12,30	24,00	1,00	59,20	57,50	84,80	16,40	37,50	0,00	0,00	89,10
1992-93	75,00	24,40	23,60	12,40	13,00	39,80	72,90	34,10	0,00	0,00	0,00	4,20
1993-94	74,20	150,90	19,00	62,60	145,30	0,00	27,20	14,60	0,00	0,00	0,00	31,10
1994-95	44,30	64,50	0,00	17,50	31,80	12,90	64,40	0,00	30,40	4,60	0,00	4,40
1995-96	0,80	67,50	131,40	329,90	61,40	113,00	26,60	104,80	2,00	7,50	2,40	10,10
1996-97	58,90	30,20	312,10	172,50	0,00	0,00	46,80	4,30	6,40	0,00	11,00	23,20
1997-98	79,80	230,80	193,50	104,70	88,80	1,30	20,20	56,30	10,80	0,00	0,00	21,90
1998-99	12,30	0,00	84,90	78,30	39,90	24,50	11,00	2,40	0,30	0,00	0,00	23,40
1999-00	80,30	43,50	23,20	68,10	0,00	1,60	87,30	49,50	0,00	0,00	0,00	13,50
2000-01	77,60	70,50	166,30	145,10	34,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,60
2001-02	41,60	10,50	147,50	7,00	11,00	77,90	89,50	5,80	0,00	0,00	0,00	48,00
2002-03	103,40	305,90	52,70	60,20	47,50	76,30	45,80	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00
2003-04	109,70	68,80	168,10	17,90	39,80	83,00	34,30	166,40	0,00	0,00	0,00	0,00
2004-05	119,00	30,80	42,90	0,00	52,50	19,80	0,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2005-06	36,40	107,60	14,50	120,00	111,90	49,10	19,50	11,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2006-07	11,00	43,50	30,50	36,30	37,50	64,50	26,10	30,50	0,00	0,00	0,00	11,00
2007-08	47,70	105,80	34,10	66,50	35,30	8,90	82,10	17,50	0,00	0,00	0,00	0,00
2008-09	96,10	159,80	96,30	95,30	195,70	49,50	42,70	0,00	0,00	0,00	0,00	53,00
2009-10	16,10	40,90	257,00	204,00	181,80	112,70	28,50	11,50	2,80	0,50	0,00	65,30
2010-11	159,50	156,10	113,20	78,90	55,80	55,30	77,20	30,70	10,40	0,00	0,00	7,00
2011-12	37,50	108,60	4,50	29,00	5,50	3,00	65,90	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2012-13	78,80	104,40	17,30	146,30	35,50	150,50	42,00	23,80	0,00	0,00	0,00	73,00
2013-14	24,30	64,80	18,50	110,60	27,40	17,60	45,20	7,00	0,00	0,00	0,00	30,50
2014-15	36,90	227,90	77,30	72,82	28,60	39,80	3,00	7,50	0,00	0,00	0,00	3,30
2015-16	28,90	17,50	0,00	26,40	51,80	32,90	13,80	26,70	0,00	0,00	0,80	0,00
2016-17	53,00	157,10	120,20	40,80	53,30	35,80	5,10	12,60	0,00	0,00	0,00	0,00
2017-18	10,00	49,70	70,60	105,00	42,80	134,00	91,20	2,10	0,00	0,00	0,00	0,00

Annexe 6 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Zirara

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	4,90	91,90	69,80	13,30	20,80	85,30	71,70	94,90	1,70	0,00	0,00	0,00
1984-85	6,70	92,40	10,80	80,30	11,80	4,20	27,20	23,30	0,50	0,00	0,00	2,00
1985-86	0,00	74,60	75,50	89,00	118,80	36,60	64,20	0,00	15,40	0,00	0,00	8,40
1986-87	10,60	53,10	14,40	85,80	89,70	7,00	13,50	6,50	1,00	0,00	0,00	3,90
1987-88	31,50	128,00	65,90	78,10	43,60	12,50	26,50	32,00	0,00	0,00	0,00	7,30
1988-89	54,60	74,00	4,00	33,80	50,40	45,00	79,20	19,80	0,00	2,50	0,00	0,00
1989-90	101,20	84,60	116,60	58,30	0,00	38,10	35,40	29,20	0,00	0,00	0,00	0,00
1990-91	60,60	54,60	123,10	13,20	103,60	90,60	30,60	0,00	8,00	0,00	0,90	2,00
1991-92	36,80	16,10	24,20	1,20	36,90	92,20	92,70	6,00	25,40	0,00	5,50	58,70
1992-93	78,00	19,00	11,50	10,20	35,20	49,80	55,50	24,00	6,00	0,00	0,00	8,50
1993-94	44,00	120,50	16,50	50,00	107,50	7,50	15,50	13,50	0,00	0,00	0,00	0,00
1994-95	33,00	63,90	0,00	13,00	22,00	10,70	42,00	0,00	40,00	0,00	0,00	22,50
1995-96	2,50	45,50	100,20	300,20	51,00	74,50	7,50	109,00	0,00	13,50	5,00	15,30
1996-97	40,50	17,50	227,50	141,00	1,50	0,00	54,50	5,00	24,50	2,00	0,00	28,50
1997-98	58,00	138,00	99,00	68,00	92,00	3,00	25,00	22,50	14,00	0,00	0,00	35,00
1998-99	12,00	0,00	32,00	81,50	35,50	14,50	10,50	22,00	0,00	0,00	0,00	17,00
1999-00	96,00	35,00	20,00	36,00	0,00	2,00	75,00	44,00	0,00	0,00	0,00	8,00
2000-01	38,50	48,00	93,50	76,80	29,00	31,00	0,00	17,00	0,00	0,00	0,00	11,00
2001-02	2,00	1,00	123,00	2,00	6,00	64,00	92,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2002-03	51,00	224,00	47,00	71,00	39,00	98,00	45,00	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2003-04	102,00	75,00	160,00	0,00	36,00	51,00	54,00	105,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2004-05	86,00	12,00	47,00	3,00	50,00	15,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2005-06	18,50	98,50	33,00	98,00	119,00	52,00	20,00	18,00	6,00	0,00	2,00	4,00
2006-07	8,50	39,10	41,50	46,00	36,00	43,00	88,00	12,00	0,00	0,00	0,00	10,00
2007-08	38,00	86,00	11,00	56,00	34,00	8,00	63,00	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2008-09	110,00	106,00	129,00	100,00	91,00	39,00	12,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,00
2009-10	9,00	18,00	143,00	121,00	138,00	94,00	16,00	2,00	5,00	2,00	0,00	31,00
2010-11	69,00	190,00	56,00	54,00	51,00	39,00	73,00	38,00	39,00	0,00	0,00	3,00
2011-12	33,00	132,00	6,00	24,00	13,00	15,00	68,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2012-13	93,00	113,40	9,00	96,00	40,00	113,20	38,10	36,30	0,00	0,00	0,00	51,10
2013-14	4,20	62,60	83,40	114,70	45,30	21,30	42,40	0,00	0,00	0,00	0,00	8,50
2014-15	20,00	170,00	61,00	77,60	20,70	96,90	6,90	3,10	0,00	0,00	0,00	6,80
2015-16	51,30	14,80	0,00	25,10	49,00	46,60	16,50	39,00	0,00	0,00	1,40	0,00
2016-17	33,70	79,10	66,00	24,20	32,40	25,70	0,30	3,30	0,00	0,00	0,00	0,00

Annexe 7 : Précipitations moyennes mensuelles à la station Mnasra

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	4,3	209,1	171,5	33,3	29,5	61,3	21,4	134,2	0,9	0	0	0
1984-85	10,3	281,5	22,4	86,7	41,8	12,6	41,2	24,8	1,6	0	0	0,5
1985-86	0	114,1	93,9	117,7	262,6	35,2	45,3	0	34,7	0	0	13
1986-87	3,1	77,6	25,3	125,3	114,8	7,4	16	0	2	0	8	4,2

1987-88	74,9	149	123,6	145,9	32,3	9	29	12,2	0	0	0	4,2
1988-89	38,6	171,2	14,4	59,5	90,7	83,5	76,6	13	0	0	3,6	0
1989-90	43,4	170,7	126,2	74	0	63,2	54,8	4,2	0	2,2	0	0
1990-91	69,2	61,5	163,4	13,2	147,6	161,4	16,5	1	3,4	0	0	2,5
1991-92	109,6	17,3	27,9	8,9	23	37,2	79,9	25	40,4	0	0	59,4
1992-93	63,7	6,5	42,3	15,3	12,5	79	88,6	33,2	0	0	0	6,7
1993-94	108,1	207,9	39,3	48,8	83,5	0,5	19,5	32,2	0	0	0	29,5
1994-95	52,6	90,5	3,5	13,5	49,6	24,3	27,5	0	10,2	1,5	0	8,7
1995-96	3	88,5	205,3	388	80,1	77	38,7	76,7	6,5	0	0	15
1996-97	82,5	54,5	337,9	123,2	0	0	48,5	0,3	3,5	1	1	23,5
1997-98	31,5	198,7	220,5	141,5	115	3	22,5	12,7	5,5	0	0,5	47,5
1998-99	15	0	90,1	94,9	53,6	19,7	13,5	0,5	0	0	0	4,5
1999-00	96,2	87,2	35,2	62,8	0	4,5	86	11	0	0	0	24,7
2000-01	152,2	61	161,5	101,5	28,5	33	17	0	0	0	0	16,8
2001-02	25,4	10	105,8	6	12	112,2	104,7	19	0	0	0	52
2002-03	77,4	360	76,8	66,6	39,9	60,5	62,5	1,5	0	0	0	0
2003-04	133,1	100	192,2	9	50,5	122,5	18,7	70	0	0	0	1,5
2004-05	186,2	29,2	62,5	4	47	54,5	0	12	0	0	0	0
2005-06	25	87	24,5	223,2	147,2	55,6	20,5	13,2	2	0	0	3,2
2006-07	31,4	61	37,5	46,6	52,6	57	32,5	23,5	0	0	0	16,5
2007-08	13,5	77,9	60,8	61	31,7	13,9	73	50,8	0	0	0	1,5
2008-09	124,7	181,7	148,5	147	129,8	98,8	47,4	0	0	0	0	34,1
2009-10	18,5	39,5	229,2	197,5	145,3	61	34,5	11	6	4	0	52
2010-11	164,5	173	156,5	88	39,5	61,5	66,5	40	1,5	0	0	3,5
2011-12	36,5	119,7	13,1	32,3	8,6	9,7	91,8	0,6	0	0	0	0
2012-13	125,7	138	10,7	115,8	26,7	121,1	69,3	23,1	0	0	0	145,6
2013-14	21,9	59,7	58,3	143,8	41,8	29,3	58,5	13,4	0	0	0	21,1
2014-15	58,1	338,8	124,1	94,5	54,2	83,6	0,1	7,3	0	0	0	12,6
2015-16	26,3	35	0	30,1	31,5	58,6	4,9	22,8	0	0	0	8
2016-17	68,4	224,8	137,7	80,3	98,9	58,1	0	0	0	0	0	0

Annexe 8 : Températures maxima et minima moyennes à la station Lalla Mimouna

Maxima

Année hydrologique	**Oct.**	**Nov.**	**Déc.**	**Janv.**	**Fév.**	**Mars**	**Avr.**	**Mai**	**Juin**	**Juill.**	**Août**	**Sept.**
1983-84	25,84	21,52	18,42	15,27	16,01	17,35	21,35	18,55	23,19	28,05	26,37	24,47
1984-85	23,56	18,86	18,30	15,35	18,76	17,60	21,66	19,98	23,11	26,69	26,81	26,55
1985-86	25,41	20,89	17,91	16,21	15,94	17,17	17,06	23,77	23,01	28,01	25,50	26,38
1986-87	23,86	20,29	17,10	17,51	17,40	20,11	22,34	22,54	25,23	27,91	27,45	28,69
1987-88	23,04	19,72	18,85	16,21	17,64	19,04	19,59	21,29	24,21	27,69	28,04	29,41
1988-89	24,42	21,09	18,15	17,13	18,00	19,44	18,10	23,79	25,70	29,22	28,89	26,85
1989-90	26,16	20,68	18,94	16,44	19,06	21,62	19,71	23,92	24,10	29,53	28,97	27,35
1990-91	23,47	19,72	16,63	16,32	15,30	17,67	19,60	23,07	26,48	29,39	28,16	26,88
1991-92	21,94	19,28	17,92	16,71	18,52	19,59	20,51	25,73	22,18	28,45	28,37	27,22
1992-93	21,21	19,77	17,84	16,58	18,78	19,87	19,59	21,02	24,65	28,30	27,08	24,20

1993-94	21,72	18,48	16,45	16,10	17,08	20,88	20,14	22,10	25,90	27,51	27,15	25,22
1994-95	23,11	21,09	18,77	17,17	18,39	20,08	22,24	24,98	24,96	29,03	27,72	25,86
1995-96	26,95	22,12	18,44	17,05	16,03	19,21	20,99	23,41	28,21	29,43	26,00	25,40
1996-97	23,62	20,14	17,63	17,79	19,35	23,79	23,64	22,89	24,16	26,41	27,34	27,75
1997-98	25,22	21,00	17,95	17,56	20,45	22,84	19,26	21,43	26,90	27,73	28,43	25,95
1998-99	23,06	20,89	17,12	15,96	16,07	18,59	22,06	23,39	26,27	27,62	27,76	25,65
1999-00	23,49	19,43	16,55	16,29	18,54	21,12	18,82	22,45	26,84	28,29	29,58	27,61
2000-01	21,81	18,67	17,98	16,89	18,25	20,62	21,73	23,16	26,49	26,07	27,36	25,54
2001-02	25,82	20,55	19,37	18,54	18,95	19,89	18,22	21,61	20,49	26,88	25,85	25,59
2002-03	24,42	19,13	18,34	16,32	16,27	20,76	20,53	26,37	27,40	27,89	30,72	28,84
2003-04	22,16	20,04	15,96	16,68	17,74	18,62	20,33	21,54	29,75	29,81	29,77	26,47
2004-05	24,33	20,44	16,60	15,85	16,31	20,73	21,24	24,58	29,72	27,35	29,62	27,40
2005-06	25,22	19,24	17,19	14,28	16,30	17,99	20,43	25,76	26,24	30,04	29,72	27,64
2006-07	25,66	21,85	17,44	16,08	17,63	18,77	20,02	23,04	26,12	28,86	28,05	26,31
2007-08	25,27	21,70	17,79	16,97	19,90	18,93	22,39	21,58	27,28	28,15	27,04	26,36
2008-09	22,61	17,92	15,96	14,98	17,20	21,05	19,03	24,69	27,24	29,35	28,54	27,10
2009-10	26,35	21,47	18,88	17,33	18,62	19,55	23,28	23,51	24,58	28,59	31,34	27,97
2010-11	23,14	19,18	18,82	18,05	18,59	20,59	25,63	28,20	32,47	31,72	32,39	30,68
2011-12	29,54	21,35	17,88	17,91	17,33	22,75	19,97	29,61	30,00	33,06	34,31	30,63
2012-13	26,29	21,28	18,49	16,96	17,03	19,08	23,20	24,40	29,30	32,91	34,78	30,37
2013-14	27,74	21,14	19,22	17,63	17,05	20,44	23,98	29,17	29,39	30,50	32,38	29,58
2014-15	30,08	21,39	16,83	16,98	16,00	20,04	23,97	30,16	31,30	34,60	32,30	29,10
2015-16	26,90	29,10	23,02	19,53	18,55	18,80	22,90	26,16	31,50	34,90	37,20	31,90
2016-17	26,10	20,90	19,20	17,90	17,60	20,00	24,60	25,10	29,50	29,30	30,10	27,10

Minima

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	15,09	13,52	8,98	7,25	7,20	8,65	12,41	11,54	15,69	17,97	18,19	16,62
1984-85	12,94	11,98	8,75	7,06	10,78	8,11	11,66	12,73	16,56	19,22	18,24	18,67
1985-86	15,27	12,29	9,77	8,57	10,10	9,75	9,42	14,82	16,58	19,14	18,09	18,41
1986-87	14,76	10,76	8,14	9,03	9,41	10,14	12,84	13,75	16,86	19,72	18,93	19,67
1987-88	15,03	11,84	11,37	9,58	9,17	9,49	11,94	13,65	16,24	18,96	19,70	18,20
1988-89	15,32	13,76	6,87	6,55	9,48	10,07	10,81	14,60	17,25	20,19	20,59	18,25
1989-90	17,58	13,51	12,62	8,04	9,60	12,35	11,12	14,94	16,87	20,51	20,01	19,89
1990-91	15,59	11,50	10,00	6,69	7,83	10,92	11,09	13,25	17,49	19,78	20,10	18,79
1991-92	14,09	10,36	9,49	6,81	9,00	10,14	11,85	15,75	15,38	19,44	19,45	17,83
1992-93	14,62	10,12	9,82	5,98	8,62	10,83	10,99	13,74	16,95	19,38	19,63	16,38
1993-94	14,16	11,77	9,04	7,34	8,45	10,99	10,46	14,23	17,10	19,47	19,35	16,16
1994-95	15,97	12,33	8,14	7,34	9,38	10,58	12,80	16,21	17,98	19,85	19,78	16,87
1995-96	16,24	13,89	12,19	11,89	9,38	11,50	12,78	15,31	19,33	20,17	18,33	17,42
1996-97	14,59	12,29	11,58	11,10	10,41	11,83	14,95	15,64	17,39	18,91	19,80	19,90
1997-98	17,79	14,48	10,93	10,01	12,19	11,94	11,86	14,02	17,50	19,16	20,39	18,62
1998-99	14,08	11,66	7,35	7,05	7,12	9,27	12,03	14,86	16,89	19,18	19,02	17,20
1999-00	16,76	10,48	9,05	6,38	8,25	10,25	10,83	14,77	17,79	18,95	19,99	18,44
2000-01	13,96	10,69	10,33	9,80	9,40	11,92	12,15	14,35	17,39	18,14	18,63	18,14

2001-02	16,84	11,30	11,01	9,46	8,83	10,80	11,14	13,31	13,39	18,55	18,11	17,31
2002-03	16,30	12,04	11,40	8,09	7,87	11,93	12,54	16,09	18,44	18,81	20,39	18,66
2003-04	15,33	12,18	9,22	9,29	9,73	10,05	11,93	13,58	18,93	19,35	20,33	18,22
2004-05	15,96	10,85	8,56	5,00	5,29	11,00	11,76	15,13	18,25	19,66	19,89	17,96
2005-06	16,04	10,76	9,09	6,71	8,09	9,78	12,58	15,72	18,05	19,76	20,84	19,48
2006-07	16,92	13,64	8,32	6,79	9,70	8,73	11,41	13,58	16,60	18,29	18,91	17,69
2007-08	15,46	11,46	8,75	8,90	10,88	9,42	12,20	13,63	16,79	18,56	18,16	17,86
2008-09	14,75	9,87	8,65	8,72	8,82	12,36	10,65	15,04	18,21	18,94	20,02	18,15
2009-10	16,53	12,48	10,94	10,34	12,04	11,86	14,37	14,47	17,13	19,96	21,52	19,07
2010-11	14,72	11,63	11,45	8,09	5,92	8,18	12,60	15,51	17,03	18,27	19,26	17,22
2011-12	14,13	10,48	5,11	4,09	2,12	6,16	9,23	13,28	15,00	17,47	19,08	17,88
2012-13	14,57	12,68	8,28	8,17	6,00	11,57	10,99	12,06	14,77	18,93	19,72	18,81
2013-14	15,33	8,89	5,66	7,92	7,51	7,82	11,25	13,57	15,79	17,99	17,49	17,55
2014-15	15,44	12,55	8,30	5,72	6,89	8,07	11,38	13,88	17,00	19,80	19,90	16,60
2015-16	16,20	16,60	6,41	9,15	7,99	6,52	10,16	13,47	17,00	20,30	20,50	18,00
2016-17	16,70	11,00	7,90	6,90	6,90	7,60	11,40	13,20	19,00	19,30	19,70	18,00

Annexe 9 : Températures maxima et minima moyennes à la station Mechra Bel Ksiri

Maxima

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	31,00	22,10	18,00	17,30	17,50	18,90	23,90	20,20	26,10	34,60	32,90	34,00
1984-85	27,40	19,90	18,70	16,00	20,60	19,90	25,40	23,90	28,90	32,30	34,20	30,50
1985-86	25,20	18,70	15,90	15,80	16,00	18,40	18,60	26,60	26,40	30,70	32,70	32,40
1986-87	28,30	22,60	18,90	18,90	19,00	23,70	27,10	28,70	31,90	33,30	35,00	34,90
1987-88	26,30	21,20	19,60	16,30	18,10	21,90	22,90	27,60	27,50	35,40	35,80	35,90
1988-89	28,10	22,90	18,80	17,30	19,10	22,80	20,50	27,20	30,50	36,60	35,90	35,60
1989-90	29,70	22,10	20,50	26,90	20,80	23,70	22,10	27,80	29,20	34,90	36,30	32,30
1990-91	26,10	22,90	17,70	17,00	16,10	19,30	22,70	27,00	31,70	35,60	35,20	33,10
1991-92	24,90	21,40	19,60	18,40	21,60	22,70	24,80	29,30	25,80	33,60	35,50	33,00
1992-93	24,30	22,50	19,00	18,40	21,00	22,50	23,20	24,90	29,30	34,70	33,30	32,20
1993-94	23,60	19,40	17,60	16,80	18,40	23,50	23,10	26,70	32,00	36,10	34,20	28,60
1994-95	27,50	23,60	20,30	18,70	21,00	24,10	26,20	32,00	29,60	35,80	34,80	30,50
1995-96	31,50	24,80	19,00	17,60	17,10	21,10	27,10	25,80	32,20	35,00	35,00	30,90
1996-97	28,50	22,30	18,20	18,20	22,50	27,30	27,10	27,00	28,60	31,70	32,50	29,90
1997-98	26,70	24,00	18,00	17,80	21,40	24,80	21,40	22,80	28,00	31,70	31,60	30,00
1998-99	25,00	21,60	18,50	17,00	17,00	20,00	24,00	26,00	27,00	30,00	30,00	28,00
1999-00	23,70	20,50	19,20	17,80	21,00	23,00	20,50	24,10	29,00	30,00	33,00	28,00
2000-01	27,10	21,10	23,40	18,00	19,50	22,20	22,00	25,00	28,00	29,00	30,00	26,70
2001-02	27,10	21,70	23,00	18,00	19,05	22,20	20,40	25,00	28,00	29,00	30,00	26,70
2002-03	28,40	24,30	19,60	15,80	17,90	21,00	26,70	29,40	35,70	39,80	37,40	30,00
2003-04	22,20	18,40	15,30	14,30	21,70	20,10	25,80	30,40	38,20	38,20	38,50	25,30
2004-05	26,70	17,40	18,90	14,30	19,80	20,70	28,20	28,90	34,70	32,40	33,20	33,00
2005-06	32,20	21,40	18,60	18,50	17,60	21,80	28,90	33,60	34,80	37,80	38,90	32,00
2006-07	33,00	24,60	16,60	20,70	20,00	22,00	24,90	33,60	34,80	34,30	35,60	33,00

2007-08	27,20	23,30	19,00	18,50	20,70	20,90	24,60	28,80	32,90	33,50	30,30	28,50
2008-09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2009-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2010-11	26,50	20,00	17,50	18,33	18,84	21,59	21,59	28,82	34,24	33,26	34,34	30,00
2011-12	30,25	21,66	18,39	18,39	18,01	23,75	21,56	31,31	32,34	34,98	36,08	32,02
2012-13	26,86	21,61	18,71	17,70	17,58	19,89	24,22	25,70	31,79	34,66	36,52	31,63
2013-14	28,25	22,25	19,56	17,88	17,92	21,15	25,65	30,35	30,57	31,70	34,30	31,52
2014-15	30,90	21,50	17,11	17,40	16,35	20,90	25,25	31,01	32,17	36,28	33,83	31,40
2015-16	27,96	24,49	23,57	20,43	19,47	19,85	23,98	25,72	36,00	40,00	42,70	30,45
2016-17	33,80	27,10	24,30	23,30	24,20	27,90	33,60	34,30	39,80	33,20	34,70	38,20
2017-18	31,32	23,55	17,43	15,71	16,81	18,73	21,28	23,88	25,84	29,65	34,56	30,73

Minima

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	15,10	12,90	9,50	10,00	9,70	7,60	10,10	10,50	13,40	15,60	16,10	15,80
1984-85	11,60	10,10	8,70	5,30	10,10	7,80	10,50	11,60	15,30	16,50	18,40	15,20
1985-86	14,40	13,00	7,10	6,30	8,40	9,60	11,30	15,20	15,20	20,40	14,10	17,80
1986-87	14,50	9,90	5,80	6,70	7,50	8,10	10,90	12,00	15,90	18,40	16,80	17,40
1987-88	13,90	10,00	9,70	6,80	7,10	7,80	9,70	12,30	15,10	18,70	19,80	19,20
1988-89	14,20	11,90	4,80	4,30	7,60	9,10	9,20	14,00	16,20	20,30	20,20	17,60
1989-90	16,40	11,90	11,00	5,80	8,20	10,50	9,20	14,00	15,70	20,70	20,40	16,70
1990-91	14,00	9,40	8,20	3,70	5,50	9,60	9,30	12,20	17,00	19,20	20,30	19,10
1991-92	11,20	7,70	7,50	3,80	8,20	8,90	11,20	14,00	14,00	18,70	18,80	18,40
1992-93	12,90	8,10	6,90	3,10	6,50	9,70	9,10	12,50	16,00	19,50	18,90	16,90
1993-94	12,50	10,30	7,10	5,10	6,60	9,70	8,70	13,60	16,70	19,50	19,70	15,20
1994-95	15,20	10,20	5,00	4,50	7,60	9,40	11,90	14,50	16,20	19,50	19,60	15,00
1995-96	15,40	13,00	10,60	10,50	7,00	9,60	13,20	15,40	19,00	20,50	19,90	15,80
1996-97	11,80	3,20	2,90	1,90	1,40	3,80	6,40	7,30	10,20	14,80	14,10	15,90
1997-98	14,00	9,00	5,90	9,20	16,40	17,20	11,10	16,00	22,30	22,00	21,20	18,50
1998-99	15,40	9,00	8,00	5,50	5,20	8,70	11,30	12,80	16,00	17,90	17,30	15,70
1999-00	13,00	9,50	9,50	4,50	6,50	9,70	9,00	13,00	15,60	17,30	21,70	15,70
2000-01	15,00	9,30	9,50	8,50	7,40	10,40	10,20	12,60	16,00	16,70	17,60	16,80
2001-02	15,80	9,30	9,40	8,50	7,40	10,40	9,00	12,60	16,00	16,70	18,00	16,80
2002-03	15,80	13,40	12,10	4,10	5,40	11,10	12,00	20,10	25,70	26,40	22,10	17,40
2003-04	14,90	13,60	11,20	9,40	10,40	11,00	16,80	17,00	25,60	22,30	22,20	16,70
2004-05	15,70	10,60	10,40	9,40	3,80	9,30	17,70	16,80	18,60	19,00	20,70	20,00
2005-06	19,20	14,70	7,90	6,40	8,00	11,30	15,20	19,10	18,30	20,20	24,20	17,90
2006-07	16,80	14,10	5,50	5,10	8,70	7,60	10,00	19,10	18,30	19,10	24,20	18,00
2007-08	14,90	10,70	6,30	7,60	8,70	7,40	11,00	12,30	24,00	18,76	19,00	19,00
2008-09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2009-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2010-11	18,00	14,60	7,30	8,04	5,93	8,72	8,72	16,03	17,58	19,00	20,10	18,80
2011-12	15,72	10,64	5,50	4,68	2,49	8,72	9,53	14,74	17,95	18,28	19,45	17,50
2012-13	14,88	11,86	6,97	7,17	6,11	10,49	11,19	11,73	15,67	19,25	20,02	18,41
2013-14	14,88	8,66	6,41	7,42	7,08	8,37	11,53	13,92	15,94	17,79	18,60	19,14

2014-15	16,30	12,20	7,90	6,30	5,90	9,10	12,14	15,54	18,15	20,72	20,59	18,00
2015-16	16,02	10,90	8,59	9,09	8,95	7,18	10,93	14,25	18,60	20,70	21,70	17,26
2016-17	16,30	11,20	9,20	4,80	9,50	9,40	13,20	15,50	19,50	19,40	26,10	18,80
2017-18	17,65	10,31	6,98	7,25	6,50	10,32	11,20	12,83	16,13	18,05	20,56	18,16

Annexe 10 : Températures maxima et minima moyennes à la station Zirara

Maxima

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	34,50	23,70	20,30	17,20	18,70	20,10	25,60	21,90	29,10	30,40	34,30	33,40
1984-85	28,40	21,70	20,10	17,50	22,20	21,10	27,10	25,70	31,20	33,40	29,40	32,00
1985-86	30,90	23,70	19,90	17,60	18,10	20,10	20,30	30,20	29,70	36,30	33,40	33,50
1986-87	28,90	23,30	18,80	19,20	19,10	23,90	27,20	28,10	31,90	33,40	33,10	32,30
1987-88	28,30	22,20	17,70	13,50	17,60	22,40	25,10	23,90	27,10	33,80	36,00	36,30
1988-89	28,10	23,20	19,00	17,70	19,00	21,90	20,90	28,60	31,80	34,10	35,90	35,70
1989-90	29,30	22,50	19,80	16,80	20,20	23,70	22,60	27,90	30,10	35,30	37,50	34,20
1990-91	27,40	22,30	18,10	14,30	16,80	18,90	21,70	27,20	32,90	36,80	36,70	33,20
1991-92	24,30	21,50	20,50	17,70	20,40	21,50	24,50	29,40	37,10	35,90	36,30	32,10
1992-93	24,10	21,80	19,70	18,60	20,50	23,10	23,80	26,50	33,50	34,60	28,90	35,30
1993-94	24,90	20,30	17,90	17,90	18,70	22,80	25,20	27,40	32,40	37,50	35,30	29,30
1994-95	26,70	24,20	20,00	19,20	21,20	24,60	25,90	32,10	30,60	35,70	35,80	31,00
1995-96	31,50	24,70	19,70	18,00	17,60	20,80	24,90	28,30	34,90	36,60	36,60	31,40
1996-97	27,70	24,20	18,00	19,00	21,80	26,80	26,30	27,50	30,30	33,50	33,90	29,50
1997-98	29,80	31,20	19,10	17,40	22,80	25,30	24,10	26,30	32,30	35,40	35,90	34,10
1998-99	28,70	24,80	19,10	17,90	18,60	22,30	28,10	30,70	34,40	35,20	34,20	31,40
1999-00	27,70	22,10	18,90	20,70	24,00	26,40	23,60	28,50	34,00	35,40	35,60	31,20
2000-01	27,00	22,50	19,70	19,00	21,00	25,60	27,00	29,10	35,00	34,00	36,10	33,40
2001-02	24,00	20,70	20,60	19,30	21,20	25,00	27,50	29,40	37,00	35,20	36,20	34,10
2002-03	30,20	23,50	23,10	21,40	26,00	23,50	23,00	27,30	27,60	34,00	33,40	31,40
2003-04	29,48	20,70	21,00	18,00	18,50	19,30	28,30	29,90	33,08	36,20	39,48	34,73
2004-05	26,50	20,96	19,60	17,90	20,79	22,90	22,86	26,41	35,60	35,87	35,35	36,30
2005-06	28,74	24,56	19,70	18,45	19,57	24,70	28,67	32,00	36,25	35,26	39,90	36,53
2006-07	30,00	22,53	18,32	9,60	17,36	20,35	26,90	32,90	30,06	37,29	40,90	37,37
2007-08	30,32	23,53	23,53	14,22	20,93	23,30	23,27	26,80	29,00	38,48	39,74	34,45
2008-09	28,55	23,06	20,68	18,58	21,93	25,16	27,47	26,26	30,77	36,84	39,00	30,60
2009-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2010-11	30,00	22,00	19,00	23,17	24,85	27,04	28,78	42,01	56,04	39,02	29,09	28,00
2011-12	30,85	22,02	18,41	18,66	18,07	23,88	22,11	32,47	34,32	37,32	37,59	30,00
2012-13	27,66	22,06	19,21	18,09	17,85	20,99	24,77	26,78	33,33	36,98	38,19	33,04
2013-14	29,53	22,75	19,84	18,50	18,79	21,66	26,21	31,75	31,98	33,73	35,75	32,68
2014-15	31,50	22,60	17,00	17,60	16,80	21,10	25,30	31,80	33,91	37,90	35,37	31,91
2015-16	28,40	24,70	27,70	21,20	20,50	20,40	24,70	26,40	38,30	41,90	44,20	31,60
2016-17	35,70	28,00	26,00	24,10	26,60	29,20	35,10	36,30	41,90	35,00	35,50	39,90

Minima

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	13,70	10,90	6,50	3,60	4,40	6,60	10,70	10,60	14,60	16,30	17,00	16,80
1984-85	12,50	10,60	5,50	4,60	9,00	6,30	9,80	11,00	16,00	19,40	18,40	16,80
1985-86	14,90	9,40	6,20	6,00	8,20	7,10	7,30	13,20	15,50	18,30	17,80	17,80
1986-87	13,70	9,10	3,90	6,70	7,70	7,20	10,80	11,70	14,50	17,60	20,10	17,40
1987-88	10,80	7,00	7,40	4,60	6,20	6,30	9,40	11,10	15,60	17,30	22,20	18,40
1988-89	12,80	17,70	4,00	4,00	5,70	9,60	8,50	10,30	10,80	10,90	14,50	17,70
1989-90	17,00	12,90	10,40	4,10	6,30	10,20	9,40	13,60	15,20	18,70	19,30	15,30
1990-91	10,70	7,40	7,90	1,40	3,10	6,50	8,60	11,80	16,70	19,10	23,80	18,30
1991-92	12,60	7,20	6,80	3,30	6,80	8,80	10,50	14,90	14,00	16,90	18,20	18,40
1992-93	10,90	7,40	6,50	2,40	6,40	10,30	10,30	11,50	14,30	17,50	18,30	17,30
1993-94	13,40	9,80	6,60	3,90	4,20	9,30	7,70	12,50	16,50	18,50	18,00	15,30
1994-95	16,80	12,10	4,60	3,60	8,40	9,70	13,50	17,40	18,00	20,60	20,30	16,80
1995-96	19,70	15,50	12,20	10,20	6,80	9,70	11,70	14,50	18,70	20,30	20,30	17,60
1996-97	14,00	9,70	9,90	8,40	7,90	10,70	12,10	14,60	17,20	18,20	19,70	16,60
1997-98	16,50	13,70	7,30	7,20	9,80	9,00	10,40	12,30	17,40	19,60	20,70	18,00
1998-99	12,00	9,60	4,40	5,00	7,40	8,10	10,70	13,90	16,00	19,20	19,80	18,70
1999-00	16,00	8,00	5,40	4,70	7,00	8,60	9,00	13,80	17,10	18,90	19,40	16,10
2000-01	11,40	7,20	6,50	6,10	4,40	9,50	9,30	11,80	15,00	17,00	17,30	17,00
2001-02	16,00	8,90	7,40	8,00	5,00	9,00	9,80	9,00	16,00	17,80	21,50	16,10
2002-03	15,40	8,90	7,40	6,50	20,00	9,80	11,80	11,70	17,20	16,50	18,60	16,70
2003-04	14,19	8,90	6,80	4,50	3,70	8,00	17,00	15,10	14,77	21,50	22,90	22,36
2004-05	14,70	9,83	5,00	2,74	4,78	5,93	5,40	12,40	17,30	18,35	19,16	21,80
2005-06	17,35	9,03	4,61	1,29	2,00	7,70	7,60	13,35	16,32	13,32	20,06	23,00
2006-07	16,10	9,10	6,65	4,30	8,11	7,07	15,90	10,06	15,03	15,55	18,10	22,17
2007-08	10,74	7,93	7,93	2,64	3,96	7,60	8,90	23,26	17,40	22,87	17,58	17,28
2008-09	10,00	6,90	6,42	3,19	4,31	7,40	9,00	13,80	15,00	19,00	16,50	11,20
2009-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2010-11	15,00	8,03	5,50	7,94	5,98	3,88	13,80	10,05	13,62	16,62	19,15	17,00
2011-12	15,25	10,56	4,32	3,19	1,41	8,57	9,27	14,05	17,97	18,99	19,81	17,50
2012-13	14,67	11,70	5,58	6,17	4,96	10,38	10,92	11,59	16,10	19,22	20,00	17,99
2013-14	15,00	9,27	6,44	6,82	6,90	8,45	11,29	14,26	16,70	18,25	18,96	19,60
2014-15	15,50	12,50	7,60	5,60	5,90	8,50	11,40	15,06	17,86	20,37	20,90	18,60
2015-16	15,30	8,50	4,60	6,70	7,70	6,20	9,70	13,50	17,10	19,70	20,70	17,00
2016-17	15,10	9,30	7,00	2,00	8,50	7,30	11,30	14,20	18,20	18,20	26,50	17,60

Annexe 11 : Températures maxima et minima moyennes à la station Mnasra

Maxima

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	27,00	21,90	19,20	16,00	17,30	18,10	22,80	20,00	24,20	28,10	27,20	27,90
1984-85	25,50	19,50	18,80	16,30	20,10	18,70	23,80	21,60	24,90	28,10	28,60	26,40
1985-86	25,40	22,40	18,10	16,40	17,20	18,80	18,80	25,30	24,50	28,30	29,00	28,00
1986-87	27,10	24,90	17,60	17,80	18,20	21,10	28,70	23,30	25,50	27,30	28,70	28,90

1987-88	29,60	19,60	18,70	16,00	17,90	21,40	20,30	21,30	24,60	26,10	28,10	29,20
1988-89	25,40	22,00	19,10	17,90	18,40	20,40	18,10	25,00	25,70	29,50	29,40	30,50
1989-90	26,30	21,40	19,30	16,50	19,00	21,80	20,70	24,00	24,40	28,30	29,70	27,70
1990-91	24,00	21,00	17,10	16,70	15,90	18,30	20,40	25,20	25,40	29,10	28,80	28,30
1991-92	22,30	20,10	16,90	17,40	19,20	20,00	22,20	25,90	23,20	28,50	30,40	27,40
1992-93	20,10	22,40	18,60	16,50	19,70	22,40	20,60	21,40	23,80	27,90	26,60	29,90
1993-94	23,50	19,90	18,20	16,90	18,60	22,00	20,90	22,00	28,20	31,00	28,60	24,90
1994-95	23,00	22,00	18,90	18,70	18,90	23,70	25,10	28,10	24,30	29,70	28,40	27,30
1995-96	25,90	21,30	16,20	16,50	16,90	18,10	20,20	23,00	28,60	29,10	28,10	24,20
1996-97	23,50	20,30	20,00	16,90	18,70	20,30	21,60	22,00	24,70	27,90	27,50	25,10
1997-98	22,90	20,50	19,70	18,20	17,80	23,70	25,10	25,00	27,80	27,70	29,50	27,90
1998-99	23,50	24,20	16,40	17,10	16,20	20,00	23,80	25,60	27,60	29,50	30,30	26,30
1999-00	25,90	21,60	18,50	17,80	21,00	23,00	20,50	24,10	29,00	30,10	31,50	28,00
2000-01	23,60	24,10	16,30	17,30	16,40	24,80	22,20	23,40	25,80	31,20	30,10	25,10
2001-02	26,30	23,20	21,60	20,30	20,70	21,50	21,60	22,60	24,40	25,70	25,90	25,40
2002-03	25,00	21,90	19,40	17,30	17,90	21,00	24,00	25,40	26,70	32,70	30,50	26,70
2003-04	23,40	20,80	17,60	17,60	18,50	18,70	20,90	21,80	28,00	28,70	21,90	28,70
2004-05	24,70	21,10	17,20	16,40	16,70	21,80	20,40	24,10	28,30	26,30	27,90	26,95
2005-06	27,10	20,00	17,30	15,40	16,90	18,60	21,50	25,50	25,70	29,30	29,80	27,90
2006-07	26,10	23,30	18,20	17,10	17,50	19,10	21,00	23,20	25,00	27,40	26,80	31,80
2007-08	25,70	22,50	18,50	18,00	20,10	20,60	23,60	23,80	27,00	27,80	29,20	26,45
2008-09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2009-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2010-11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2011-12	26,01	20,58	17,50	16,80	16,22	21,23	19,12	26,35	25,72	27,21	27,72	26,49
2012-13	24,02	20,64	17,79	17,24	16,66	18,92	20,90	21,85	25,58	26,53	28,95	26,82
2013-14	24,46	20,14	18,12	17,29	16,88	19,26	22,35	24,52	25,72	25,53	26,50	27,38
2014-15	27,20	20,70	16,32	16,55	15,70	18,70	20,90	25,85	26,38	28,05	28,04	26,25
2015-16	25,37	21,84	21,46	19,28	18,68	17,77	20,57	22,45	31,90	34,20	36,30	25,76
2016-17	32,30	26,40	25,20	24,20	24,40	26,60	30,80	31,20	34,20	26,50	27,90	34,40

Minima

Année hydrologique	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.
1983-84	14,20	13,40	10,50	6,40	7,20	8,20	12,20	12,60	15,50	18,40	17,50	18,20
1984-85	12,40	11,50	7,70	6,10	9,10	6,80	10,50	11,40	15,60	18,70	17,10	16,20
1985-86	13,80	10,60	8,00	7,80	9,90	9,30	9,00	13,50	16,30	18,30	17,00	16,70
1986-87	14,30	9,60	5,50	7,80	8,50	8,80	11,50	12,00	14,70	17,90	16,50	17,60
1987-88	13,60	8,80	9,20	7,70	7,60	6,10	9,90	12,10	14,50	15,60	18,30	13,80
1988-89	13,60	12,70	4,50	4,10	7,90	8,90	10,40	13,20	16,40	18,30	19,40	15,30
1989-90	15,40	11,80	11,10	6,20	8,40	10,50	9,90	14,00	16,20	19,90	19,10	16,30
1990-91	14,00	10,30	7,90	3,90	6,70	10,20	9,80	11,80	16,80	18,40	18,70	18,30
1991-92	13,10	7,50	7,00	4,60	6,30	8,80	9,50	14,70	13,70	17,30	19,40	16,80
1992-93	14,50	7,60	6,70	2,60	5,30	9,40	9,20	11,30	15,60	18,40	18,20	17,70
1993-94	12,90	9,00	7,80	5,10	7,10	9,90	8,70	13,90	17,90	19,60	18,40	15,50
1994-95	14,80	10,50	4,90	4,70	7,10	8,90	11,20	14,90	16,90	19,70	20,50	16,40

1995-96	16,40	13,40	9,30	9,60	7,70	10,50	10,20	14,30	17,90	18,40	16,30	16,80
1996-97	15,60	11,80	11,70	9,40	9,30	8,50	9,80	14,80	16,60	17,30	20,60	16,60
1997-98	14,60	12,90	7,70	9,70	10,50	8,40	11,20	11,10	15,90	19,70	12,80	16,90
1998-99	15,00	8,70	7,00	5,80	5,50	12,10	9,90	12,80	16,10	18,50	18,60	17,90
1999-00	15,40	9,00	8,00	4,50	6,50	9,70	9,00	13,10	15,50	17,30	17,00	15,70
2000-01	15,20	8,60	7,20	5,90	5,80	11,50	10,10	13,30	16,80	14,10	18,20	18,00
2001-02	15,10	9,30	8,70	6,40	6,60	9,40	11,40	10,40	12,40	13,20	12,70	16,80
2002-03	10,70	7,50	6,80	6,50	6,30	6,70	8,00	8,50	10,00	12,80	12,90	10,30
2003-04	6,40	4,40	4,90	7,00	8,00	9,90	11,60	13,70	17,90	18,80	19,00	7,60
2004-05	15,20	8,10	7,10	2,00	3,80	8,70	8,30	11,30	13,70	13,30	13,80	11,50
2005-06	12,30	4,30	6,20	5,50	7,80	9,00	11,60	14,80	17,20	18,90	18,70	15,90
2006-07	15,00	11,10	5,00	4,10	8,50	8,80	10,60	12,00	15,00	17,70	18,20	19,50
2007-08	14,30	10,10	7,00	7,80	9,00	10,00	12,10	11,90	16,40	17,80	19,70	17,90
2008-09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2009-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2010-11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2011-12	14,79	10,49	5,26	4,13	2,65	8,18	10,59	13,79	17,03	17,43	18,52	16,90
2012-13	14,93	11,87	6,87	7,59	6,71	11,30	11,31	12,67	15,86	18,48	19,22	17,10
2013-14	14,89	8,91	5,94	7,73	7,97	8,46	11,71	14,26	15,75	17,68	17,97	18,30
2014-15	15,50	12,20	7,90	6,30	7,50	9,30	12,03	14,57	17,26	19,30	19,55	17,70
2015-16	15,43	10,27	6,65	8,46	8,20	7,15	10,62	13,95	17,40	19,90	20,00	16,50
2016-17	15,70	10,50	8,30	4,70	9,20	9,40	12,60	15,00	18,40	18,60	23,40	17,50

Annexe 12 : Série chronologique des rendements céréaliers.

Campagne agricole	Rendement (q/Ha)	Production (q)	Superficie (Ha)
1984-85	28,1	6367460	226600
1985-86	20	4523200	226160
1986-87	30	6740100	224670
1987-88	28	6002640	214380
1988-89	21,5	4479955	208370
1989-90	24	4288560	178690
1990-91	21	4280430	203830
1991-92	16	3220000	201250
1992-93	13	2560610	196970
1993-94	33	6975540	211380
1994-95	4	841280	210320
1995-96	21,2	2544699,6	120033
1996-97	14	171570	12255
1997-98	22,6	3987340	176431
1998-99	17,1	2911104	170240
1999-00	21,6	2471990	114444
2000-01	29	6631372	228668
2001-02	22	4695944	213452
2002-03	27,8	4723915	169925
2003-04	35,1	7654467	218076
2004-05	21,7	4877313	224761

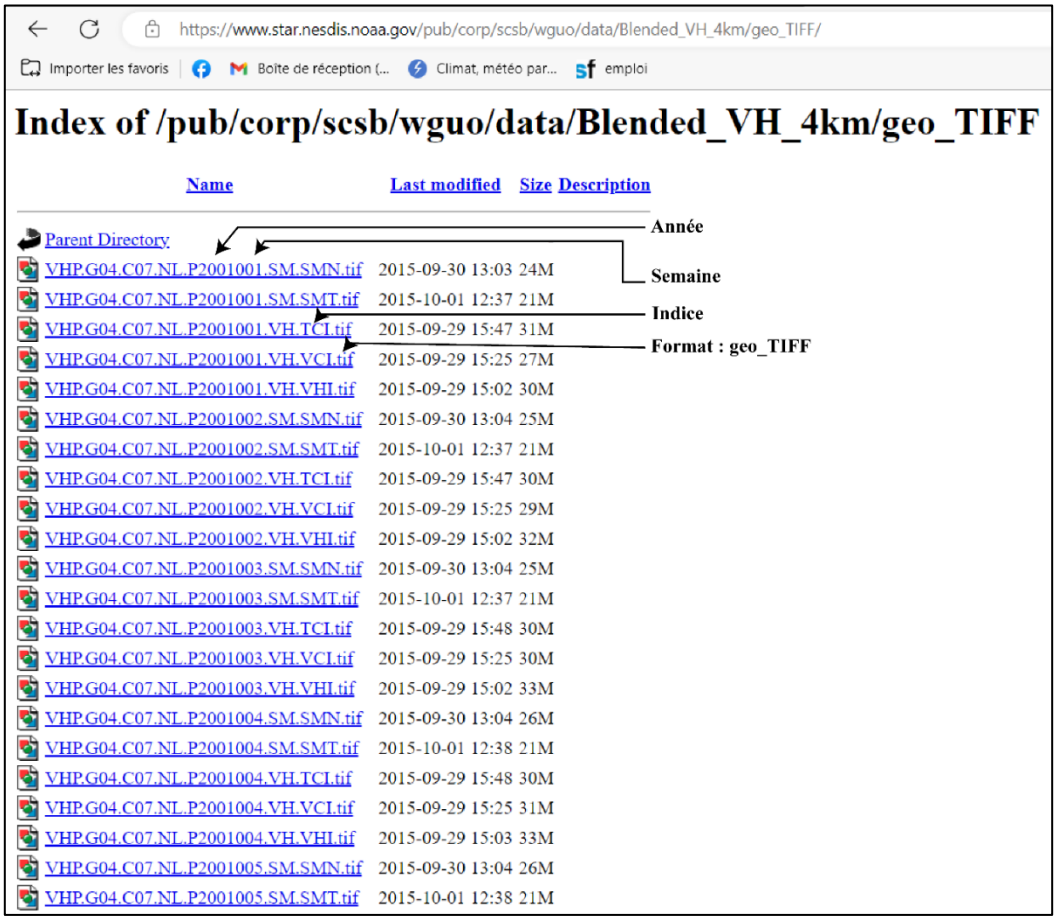
2005-06	31	7392570	238470
2006-07	12	992400	82700
2007-08	23	4905900	213300
2008-09	27,3	4217522	154488
2009-10	19,3	3052237	158147
2010-11	27,7	6155355,5	222215
2011-12	18,3	4137630	226100
2012-13	22,5	4972500	221000
2013-14	27,9	6385752	228880
2014-15	24,9	4669198	187518
2015-16	23,1	1098174	47540
2016-17	33	7208120	216450

Annexe 13 : Série chronologique des rendements cerclières dans chaque province du bassin Bas Sebou.

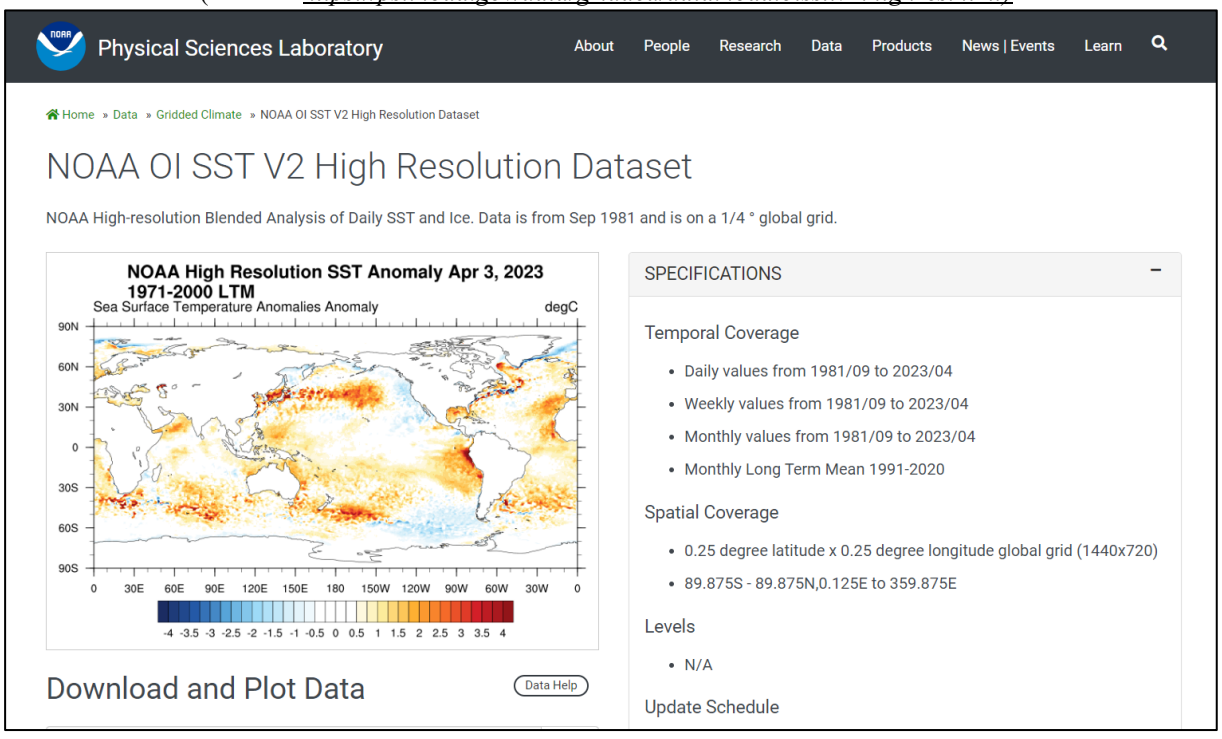
Campagne agricole	Province	Autres céréales		Blé dur		Blé tendre		Orge	
		Superficie (Ha)	Production-T (Tonnes)	Superficie (Ha)	Production-T (Tonnes)	Superficie (Ha)	Production-T (Tonnes)	Superficie (Ha)	Production-T (Tonnes)
2000-01	**Kénitra**			25 800,00	51 380,00	152 800,00	402 640,00	14 200,00	20 020,00
	Sidi Kacem	400,00	240,00	14 500,00	23 930,00	65 000,00	117 650,00	11 000,00	14 410,00
2001-02	**Kénitra**			24 100,00	43 930,00	171 200,00	472 790,00	18 900,00	30 630,00
	Sidi Kacem	300,00	120,00	19 000,00	25 840,00	65 100,00	126 290,00	12 400,00	19 720,00
2002-03	**Kénitra**			11 700,00	22 490,00	74 100,00	192 500,00	11 900,00	23 320,00
	Sidi Kacem	300,00	165,00	37 100,00	71 210,00	143 200,00	352 970,00	18 800,00	34 130,00
2003-04	**Kénitra**			14 100,00	43 802,38	76 800,00	230 893,98	14 400,00	25 461,14
	Sidi Kacem	300,00	170,00	35 800,00	103 175,92	149 100,00	467 100,04	18 300,00	30 891,00
2004-05	**Kénitra**			12 200,00	24 400,00	80 900,00	181 060,00	15 100,00	25 641,00
	Sidi Kacem			35 000,00	69 680,00	153 300,00	337 260,00	17 300,00	28 715,00
2005-06	**Kénitra**			16 779,15	51 181,40	120 817,54	419 226,92	9 203,32	24 903,64
	Sidi Kacem	300,00	270,00	40 094,08	137 902,45	155 472,36	566 100,71	18 653,71	44 977,47
2006-07	**Kénitra**			10 100,00	11 027,00	146 000,00	117 569,50	7 000,00	5 420,50
	Sidi Kacem			33 800,00	17 171,50	160 000,00	154 100,00	22 400,00	13 363,00
2007-08	**Kénitra**			10 800,00	17 703,50	129 700,00	227 852,86	8 600,00	7 291,10
	Sidi Kacem			37 800,00	77 248,18	172 400,00	331 242,19	24 800,00	36 469,93
2008-09	**Kénitra**			13 300,00	22 101,82	114 400,00	180 858,68	7 859,90	12 927,10
	Sidi Kacem	300,00	270,00	44 000,00	90 137,60	132 400,00	273 279,90	31 877,20	53 106,74
2009-10	**Kénitra**	100,00	30,00	9 850,00	15 990,56	78 000,00	122 411,28	11 900,00	15 368,19
	Sidi Kacem			20 200,00	32 645,42	84 900,00	125 058,38	14 900,00	17 967,61

2010-11	**Kénitra**			10 700,00	27 636,00	92 700,00	289 090,00	9 345,32	21 561,73
	Sidi Kacem			23 100,00	58 240,00	142 200,00	413 754,00	10 680,37	23 291,11
2011-12	**Kénitra**			4 800,00	4 998,00	103 700,00	161 917,00	4 470,00	6 373,64
	Sidi Kacem			9 000,00	14 520,00	166 200,00	281 406,26	4 900,00	6 806,00
	Sidi Slimane			3 900,00	11 080,00	52 000,00	122 060,00	2 300,00	3 600,00
2012-13	**Kénitra**			6 365,00	10 190,41	87 464,00	219 954,31	6 700,00	12 629,32
	Sidi Kacem			8 400,00	17 909,59	150 584,26	416 910,58	4 708,00	6 359,59
	Sidi Slimane			1 300,00	2 309,69	55 900,00	151 277,15	1 600,00	2 466,18
2013-14	**Kénitra**			5 624,00	14 982,72	85 312,00	228 399,46	6 630,00	16 403,04
	Sidi Kacem			9 854,00	27 563,61	154 266,00	436 826,05	6 833,00	18 051,93
	Sidi Slimane			2 127,00	4 943,87	54 185,00	131 611,03	2 585,00	5 739,07
2014-15	**Kénitra**			10 070,00	20 541,43	75 400,00	174 055,83	9 400,00	18 487,46
	Sidi Kacem			16 100,00	35 123,82	125 300,00	351 013,50	13 400,00	35 412,72
	Sidi Slimane			2 600,00	7 094,10	47 300,00	157 906,32	3 700,00	10 372,58
2015-16	**Kénitra**			15 684,00	32 684,40	61 422,00	166 084,60	7 327,00	11 911,10
	Sidi Kacem			19 275,00	16 670,60	116 155,00	154 809,30	11 912,00	20 693,50
	Sidi Slimane			1 466,00	1 033,90	39 853,00	29 293,60	5 971,00	1 369,60
2016-17	**Kénitra**			5 800,00	18 864,00	79 500,00	244 968,00	8 800,00	15 637,00
	Sidi Kacem			12 200,00	41 148,00	129 600,00	444 598,00	9 400,00	25 466,00
	Sidi Slimane			4 500,00	14 625,00	40 200,00	122 892,00	3 500,00	7 700,00

Annexe 14 : Interface du site web de la base de données VH.
(Source : https://www.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/data/Blended_VH_4km/geo_TIFF/)



Annexe 15 : Interface du site web de la base de données SST.
(Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html)*



Annexe 16 : Interface du site web de la base de données SLP et GPH-500.
(Source : *https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html)*

