



HAL
open science

Apports de la modélisation et de la télédétection dans l'étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau : Application aux périmètres irrigués du Loukkos et du Gharb (Maroc)

Siham Acharki

► To cite this version:

Siham Acharki. Apports de la modélisation et de la télédétection dans l'étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau : Application aux périmètres irrigués du Loukkos et du Gharb (Maroc). Sciences de l'environnement. Université Abdelmalek Essaâdi, 2020. Français. NNT : . tel-03029192

HAL Id: tel-03029192

<https://hal.science/tel-03029192>

Submitted on 27 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE ABDELMALEK ESSAADI
FACULTE DES SCIENCES et TECHNIQUES
TANGER

Centre d'Etudes Doctorales : « Sciences et Techniques de l'Ingénieur »
Formation Doctorale : « Sciences et Techniques de l'Ingénieur »

THESE DE DOCTORAT

Présentée

Pour l'obtention du

DOCTORAT EN SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

Par :

ACHARKI Siham

Discipline : Sciences de l'Eau et de l'Environnement

Spécialité : Télédétection et Environnement

**Apports de la modélisation et de la télédétection dans l'étude
de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau :
Application aux périmètres irrigués du Loukkos et du Gharb (Maroc)**

Soutenue le 05 Septembre 2020 devant le Jury

Président :

Pr. Bouchta El Moumni (U.A.E Tétouan)

Rapporteurs :

Pr. Brahim Damnati (F.S.T Tanger)

Pr. Jamal Eddine El Abdellaoui (F.S.T Tanger)

Pr. Pierre-Louis Frison (Université Gustave Eiffel, France)

Examineurs :

Pr. Hassan Er Raoui (F.S.T Tanger)

Pr. Rachid El Halimi (F.S.T Tanger)

Directrice de thèse :

Pr. Mina Amharref (F.S.T Tanger)

Co-encadrant :

Pr. Abdes-samed Bernoussi (F.S.T Tanger)

Invité :

M. Abdelwahab Chatri (ORMVA Loukkos)

Résumé

Dans le contexte des changements climatiques perceptibles actuellement, ce travail de thèse vise principalement à évaluer l'impact de ces changements climatiques sur les ressources en eau, et ce au niveau des périmètres irrigués du Loukkos et du Gharb au nord du Maroc. Ces périmètres se caractérisent par un climat méditerranéen à influence océanique et présentent une importante activité agricole. Les ressources en eau disponibles, dans cette région d'étude, sont par conséquent utilisées en grande partie pour l'irrigation. Pour atteindre cet objectif, la méthodologie adoptée dans ce travail de recherche, s'est appuyée sur des méthodes et des outils de la télédétection, de la statistique et de la modélisation.

Afin de générer et d'analyser les paramètres physiques de la région d'étude (notamment le MNT et l'occupation du sol), les images satellitaires optique et radar (ayant une résolution de 30 m, Aster (2011) et Landsat (1984–1985, 2001–2002, 2015–2016 et 2016–2017)) couvrant les deux périmètres ont fait l'objet d'un ensemble de prétraitement et traitement. Ce processus de traitement a été, par ailleurs, automatisé dans ce travail de thèse via l'application Web2TISat facilitant ainsi l'usage des images dans le futur. La classification par la méthode "forêt aléatoire" a donné une meilleure précision avec un indice de kappa supérieur à 0,95 et une précision globale supérieure à 96%. La comparaison et la superposition spatiale des images Landsat multi-date couvrant les deux périmètres ont permis de faire ressortir qu'il y a eu des changements spatiaux importants d'utilisation et d'occupations des terres au niveau des deux périmètres durant ces 30 dernières années avec des variations de $-52,78\%$ à $292,29\%$ sur la période allant de 1981 à 2016. Les résultats de changement montrent que, pour les deux périmètres, les superficies de couvertures des terres agricoles, bâtiment et infrastructure, eau et forêts se sont accrues au détriment des terres nues et de la végétation, qui ont connu une perte spectaculaire. Le passage à une résolution fine (10m) pourrait améliorer la classification des cultures à trois niveaux différents.

L'étude statistique des données climatiques issues de huit stations météorologiques sur une période allant de 1981 à 2016, nous a permis de tracer l'évolution spatio-temporelle de certains indicateurs climatiques (Précipitations, Température et Évapotranspiration). Toutefois, ces données montrent parfois des lacunes et des irrégularités qui entravent leur analyse directe. Pour cela, ces données ont nécessité parfois un prétraitement au préalable par des méthodes d'imputations (MICE ou k-NN). Par ailleurs, des changements ou des ruptures ont été détectés dans le passé au niveau des séries chronologiques de ces variables climatiques et validés par des tests statistiques. Pour les tendances, les séries des températures et évapotranspiration potentielle présentaient des tendances significatives à la hausse à tous les pas de temps. Tandis que pour les séries des précipitations, les tendances étaient non significatives. Les projections pour l'horizon 2021-2050, prévoient une élévation de la température allant de $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en automne à $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en été. De même qu'une réduction remarquable des précipitations atteignant 15% en hiver et 10% en période d'été. Toutefois, une augmentation des précipitations de 10% s'observerait au printemps en comparaison à la période de référence (1981-2016), ce qui pourrait affecter considérablement les ressources en eau dans ces périmètres. Nous avons automatisé tous les traitements statistiques utilisés dans ce travail à travers l'application WebTDClim.

Par ailleurs, le modèle d'automate cellulaire 2CAFDM, ayant comme données d'entrée les paramètres physiques des deux périmètres, les paramètres climatiques et en faisant références à des scénarios climatiques (de références et projetés : optimiste et pessimiste) a été utilisé et en l'adaptant aux spécificités des régions d'étude (telle que la superficie importante : 8708 km^2 répartie en 9675555 cellules). Les résultats du modèle, montrent qu'à l'échelle spatiale, la disponibilité des ressources en eau serait impactée de manière légèrement différente selon la zone. Pour les eaux souterraines, le périmètre du Gharb serait plus touché que le périmètre du Loukkos du mois de novembre au mois d'août pour les deux scénarios projetés et l'inverse se produirait pour les mois de septembre et octobre. La baisse atteindrait $15,96\%$ pour le Gharb et $10,94\%$ pour le Loukkos. Pour les eaux de surface, les résultats des simulations indiquent, à l'échelle annuelle, une diminution allant de $0,75\%$ à $33,65\%$, selon les scénarios et les périmètres. Globalement, à l'échelle saisonnière les simulations à l'horizon 2050 prévoient un léger décalage de la saison la plus humide de l'année hydrologique et présagent d'un futur qui mérite un modèle de gestion durable des ressources en eau et une adaptation des pratiques culturelles.

Mots clés : • Ressources en eau • Impact du changement climatique • Loukkos • Gharb • Automates cellulaires • 2CAFDM • Télédétection • Forêts aléatoires • Web2TISat • MICE • WebTDClim.

Abstract

In the current context of perceptible climate change, this thesis work mainly aims to assess the impact of these climate changes on water resources, at the level of irrigated perimeters of Loukkos and Gharb in northern Morocco. These perimeters are characterized by an oceanic-influenced Mediterranean climate and present significant agricultural activity. Therefore, the available water resources in this study region are used for irrigation to a large extent. To achieve this goal, the methodology adopted in this research work was based on remote sensing, statistics, and modeling methods and tools.

In order to generate and analyse the physical parameters of the study areas (Particularly, DEM and land use), the optical and radar satellite images (with a resolution of 30 m, Aster (2011) and Landsat (1984-1985, 2001-2002, 2015-2016 and 2016-2017) covering both perimeters were subjected to a set of pre-processing and processing. This treatment process was, moreover, automated in this thesis work using the Web2TISat application, thus facilitating the images use in future. Random forest classification provided better accuracy with a kappa index exceeding 0.95 and an overall accuracy exceeding 96%. Comparison and spatial overlay of multi-date optical (Landsat, 30 m) images covering both perimeters showed substantial spatial changes in land use and ground cover at both perimeters over the last 30 years with variations from -52.78% to 292.29% over the period 1981 to 2016. The change results show that, for both perimeters, the areas of agricultural land cover, building & infrastructure, water and forests have increased at expense of bare land and vegetation, which have experienced a dramatic loss. Moving to fine resolution (10m) could improve crop classification at three different levels.

The statistical study of climate data from eight meteorological stations over the period ranging from 1981 to 2016 allowed us to track the spatial and temporal evolution of some climate indicators (Precipitation, Temperature and Evapotranspiration). These data, however, reveal sometimes gaps and irregularities that hinder their direct analysis. For this purpose, these data sometimes required pre-processing using imputation methods (MICE or k-NN). Furthermore, changes or breaks have been detected in the past in time series of these climate variables and validated by statistical tests. For trends, temperature et potential evapotranspiration series showed significant upward trends in all time steps. While for precipitation series, the trends were non-significant. Projections for the period of 2021-2050, predict a temperature increase ranging from 1.7 °C in autumn to 1.9 °C in summer. As well as a notable reduction in precipitation reaching 15% in winter and 10% in summer. However, an increase in precipitation with 10% would be observed in spring in comparison with reference period (1981-2016), which could considerably affect water resources in these perimeters. We have automated all statistical processing in this work through the WebTDClim application.

In addition, the 2CAFDYM cellular automaton model, having as input data the physical parameters of both perimeters, the climatic parameters and by referring to climatic scenarios (reference and projected: optimistic and pessimistic) was used and by adapting it to study areas specificities (such as the large surface area: 8708 km² divided into 9675555 cells). The results of the model show that, on a spatial scale, the water resources availability would be impacted slightly differently depending on the area. For groundwater, Gharb perimeter would be more affected than of Loukkos perimeter from November to August for the two projected scenarios and the reverse would occur for the months of September and October. The decrease would reach 15.96% for Gharb and 10.94% for Loukkos. For surface water, the results of the simulations indicate, on an annual scale, a decrease ranging from 0.75% to 33.65%, depending on the scenarios and the perimeters. Overall, on a seasonal scale, the simulations for 2050 foresee a slight shift of the wettest season of hydrological year and predict a future that deserves a model of sustainable water resource management and an adaptation of farming practices.

Keys words: • Water resources • Climate change impact • Loukkos • Gharb • Cellular automata • 2CAFDYM • Remote sensing • Random forests • Web2TISat • MICE • WebTDClim.

Dédicace



À mes chers parents

Source de bénédiction, d'affection, de soutien...

À mes frères et ma sœur

Source de sérénité, de jouissance, de motivation...

À mon ami

Source d'encouragement, de partage, de courage...

S. Acharki

Remerciements

Rien ne vaut une sincère reconnaissance envers toutes les personnes qui nous ont épaulés, chacune à sa façon. J'ai l'honneur de les citer et de les remercier :

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de thèse Mme. Mina Amharref, enseignante chercheuse à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Tanger, pour son encadrement et ses conseils. Aussi pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce doctorat et m'avoir encadré tout au long de ces 4 ans et demi passés.

Je tiens à remercier également mon co-directeur de thèse, Mr. Abdes Samed Bernoussi, enseignant chercheur à la FST de Tanger, pour m'avoir guidé et conseillé. Merci pour vos précieux conseils avisés qui m'ont été très utiles pour améliorer et développer mon esprit critique et scientifique.

J'exprime mes vifs remerciements à Mr. Bouchta El Moumni. Merci d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse, c'est un honneur pour moi.

Messieurs Brahim Damnati, Jamal Eddine El Abdellaoui et Pierre-Louis Frison ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, je les en remercie. Merci au temps consacré à la lecture et à l'évaluation de mon manuscrit. Merci pour vos nombreuses remarques et suggestions qui m'ont permis d'améliorer significativement la qualité de mon manuscrit.

J'adresse toute ma reconnaissance à Mr. Abdelwahab Chatri, Hassan Er Raoui, Rachid El Halimi qui m'ont fait l'honneur d'être parmi le jury de cette thèse et qui ont accepté d'examiner mon travail. Vos remarques et suggestions sur le manuscrit et le contenu du travail m'ont été d'un grand intérêt.

Je présente mes profonds remerciements à Dr. Hamidou Kassogué pour son aide inestimable pour la résolution de certains problèmes techniques, pour son soutien et les très enrichissantes discussions scientifiques que nous avons eues. Ses conseils, ses suggestions et ses motivations m'ont été vraiment utiles.

Mes sincères remerciements vont à Mr. Pierre-Louis Frison, pour son aide, ses qualités pédagogiques et scientifiques ainsi que pour son agréable réception durant toute ma période de stage à LaSTIG/MATIS, Université Gustave Eiffel, France.

J'adresse mes vifs remerciements aux personnels de l'ORMVAG et l'ORMVAL. Particulièrement Messieurs : Allal Zbir, Abdelwahab Chatri, Mohamed Morchid, Youssef Bensajjay, Jamal Chikhi, Mohamed Achkar, Mustapha Zeraoui, Abdelatif Laamaym et Madame Jihan Khalil pour leur disponibilité et leur gentillesse durant toutes mes périodes de stage.

Je remercie également la famille Idir de m'avoir accueilli durant ma période de stage à l'ORMVAG. Votre bienveillance a compté pour moi.

Mes chaleureux remerciements à mes collègues : Siham Abourida, Hamid Mjadli, Mohamed Byari et Meryem Boumahdi ainsi qu'à ceux et celles de l'équipe GAT et MMC, je les remercie profondément pour leur sincère amitié et confiance.

J'adresse particulièrement mes remerciements à mes très chers parents, pour leur irremplaçable et inconditionnel soutien. Je remercie mes frères et ma sœur qui m'ont soutenue et encouragée tout au long de mes études. Un grand merci également à mon ami qui m'a conseillée, aidée, soutenue et encouragée face aux différents défis scientifiques auxquels j'ai été confronté. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon agréable admiration.

Je présente finalement mes remerciements, mon respect et ma gratitude à toutes les personnes dont le nom n'apparaît pas dans ces pages ; celles que j'ai côtoyées durant ma thèse.

Merci à Allah !

S. Acharki

Table des matières

Table des matières	ix
Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xv
Liste des acronymes et des symboles	xvii

Introduction générale	1
Chapitre 1 Ressources en eau et changement climatique : Généralités	4
1.1 Cycle hydrologique	4
1.2 Changement climatique	6
1.3 Causes du changement climatique	6
1.4 Incidences du changement climatique	9
1.4.1 Incidences observées du changement climatique	9
1.4.2 Prévisions climatiques	12
1.5 Impact du changement climatique sur les ressources en eau	15
1.5.1 État des lieux du ruissellement et débit fluvial	15
1.5.2 État des lieux des eaux souterraines	17
1.5.3 Méthodologie de l'étude d'impact du changement climatique	20
Chapitre 2 Apport de la télédétection dans l'étude des paramètres physiques de la région de Loukkos et du Gharb au Nord-Ouest du Maroc	22
2.1 Description générale de la région d'étude	22
2.1.1 Situation géographique	22
2.1.2 Contexte géologique	23
2.1.3 Contexte hydrologique	24
2.1.3.1 Ressource en eau de surface du périmètre du Gharb	24
2.1.3.2 Ressource en eau de surface du périmètre du Loukkos	25
2.1.4 Contexte hydrogéologique	25
2.1.4.1 Ressource en eau souterraine du périmètre du Gharb	26
2.1.4.2 Ressource en eau souterraine du périmètre du Loukkos	26
2.2 Généralités sur la télédétection	27
2.2.1 Acquisition et traitement des images optique et radar	28
2.2.1.1 Acquisition	28
2.2.1.2 Méthodes de prétraitement et traitement des images	29
2.2.2 Extraction des indices	29
2.2.3 Classification des images satellitaires	30
2.2.3.1 Méthodes de classification des images	30
2.2.3.2 Méthode adoptée pour l'évaluation de la précision de la classification	33
2.2.4 Méthodes de détection des changements/variations	34
2.3 Paramètres physiques du terrain et apport de la télédétection	35
2.3.1 Carte d'altitude	36

2.3.2	Cartes des sols et RFU _{max}	39
2.3.3	Cartes d'occupation du sol	43
2.3.4	Détection de variation	46
2.3.4.1	Détection de variation des indices	46
2.3.4.2	Détection de variation de la superficie d'occupation du sol	50
2.3.5	Amélioration de la carte d'occupation du sol : Apport de la télédétection optique et radar	57
2.4	Automatisation du processus de traitement des images satellitaires (Web2TISat)	58
2.4.1	Développement et mise en œuvre	58
2.4.2	Description des sections	58
2.4.3	Exemple d'application	60
Chapitre 3 Apport de la statistique dans l'analyse des changements climatiques actuels et futurs dans la région d'étude		62
3.1	Méthodologie suivie	62
3.2	Informations sur les stations et les données climatiques étudiées	64
3.2.1	Aperçu sur les stations étudiées	64
3.2.2	Description des variables étudiées	64
3.3	Traitement des données	66
3.3.1	Méthodes de comblement des lacunes	66
3.3.1.1	Méthode d'imputation multivariée par équations enchaînées (MICE)	66
3.3.1.2	Méthode des k plus proches voisins (k-NN)	67
3.3.2	Performance statistique des méthodes de comblement des lacunes	68
3.3.3	Choix de la méthode de comblement des lacunes	68
3.4	Analyse du changement passé ou des ruptures	71
3.4.1	Analyse préliminaire	71
3.4.2	Tests statistiques de détection de rupture	78
3.4.3	Résultats des tests statistiques de détection de rupture	79
3.5	Analyse des tendances	82
3.5.1	Tests statistiques d'analyse des tendances	82
3.5.2	Tendances des variables météorologiques étudiées	82
3.5.3	Distribution spatiale des tendances	90
3.6	Analyse des projections futures	92
3.6.1	Démarche	92
3.6.2	Interprétation des résultats	93
3.6.3	Variation mensuelle des variables étudiées selon les scénarios	94
3.7	Automatisation des traitements des données climatiques et projections futures (WebTDClim)	97
3.7.1	Développement et mise en œuvre	97
3.7.2	Description des sections	97
3.7.3	Exemple d'application	99
Chapitre 4 Apport de la modélisation dans l'étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau de la région d'étude : Modèle 2CAFDYM		103
4.1	Généralités sur l'automate cellulaire (AC)	103
4.1.1	Principe d'un AC	103
4.1.2	Composants d'un AC	104
4.2	Présentation du modèle 2CAFDYM	105
4.2.1	Description du modèle	106
4.2.2	Principe de fonctionnement	108
4.3	Améliorations apportées au modèle	109
4.3.1	Amélioration du package fonctionnel " <i>Data management</i> "	109
4.3.2	Amélioration du package fonctionnel " <i>Constraints</i> "	110
4.3.3	Amélioration du package fonctionnel " <i>Flow monitoring</i> "	110
4.3.4	Récapitulatif des différences	111
4.4	Application du modèle 2CAFDYM à la région d'étude	112
4.4.1	Données d'entrée de la région d'étude	112

4.4.2	Conditions initiales et contraintes de simulation pour la région d'étude	113
4.4.2.1	Conditions initiales et limites pour la région d'étude	113
4.4.2.2	Contraintes de simulation	113
4.5	Résultats de simulations et discussion	114
4.5.1	Eau évaporée	114
4.5.1.1	Variation spatiale saisonnière de l'eau évaporée	114
4.5.1.2	Bilan de variation d'eau évaporé par rapport à l'eau souterraine et de surface	117
4.5.2	Eau de surface	119
4.5.2.1	Variation spatiale saisonnière de l'eau de surface	119
4.5.2.2	Disponibilité globale d'eau de surface	123
4.5.3	Eau souterraine	124
4.5.3.1	Variation spatiale saisonnière de l'eau souterraine	124
4.5.3.2	Disponibilité globale d'eau souterraine	129
4.5.4	Variation moyenne annuelle des trois types de l'eau étudiés	131
 Conclusion générale		 135
 Annexes		 138
Annexe A Principes des prétraitements et traitements des images satellitaires		139
A.1	Acquisition des images satellitaires	139
A.1.1	Images optiques	139
A.1.2	Images radar	140
A.2	Principes des prétraitements	141
A.2.1	Correction géométrique	141
A.2.2	Correction radiométrique	142
A.2.3	Correction atmosphérique	142
A.3	Variation des indices	144
Annexe B Séries chronologiques et tests statistiques		151
B.1	Généralités sur les séries chronologiques	151
B.1.1	Définitions	151
B.1.2	Types de séries chronologiques	152
B.1.3	Composantes des séries chronologiques	152
B.1.4	Test d'hypothèse et conditions d'application	153
B.2	Tests statistiques de détection de rupture	157
B.2.1	Test de Pettitt-Whitney-Mann	157
B.2.2	Test d'homogénéité normal ou le test SNH	158
B.2.3	Test d'écart cumulatif ou de U Buishand	158
B.3	Tests statistiques d'analyse des tendances	159
B.3.1	Test de Mann Kendall	159
B.3.2	Test de Sen's	160
Références		162

Table des figures

1.1	Cycle de l'eau (http://acces.inrp.fr/eduterre-usages/hydro/cycleau/imagescycleglobal/cycle.gif).	5
1.2	Rôle de l'atmosphère dans l'effet de serre naturel et les flux d'énergie actuels en $W m^{-2}$ (http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0083/Temis-0083287/201533.pdf).	7
1.3	Total annuel des émissions anthropiques de GES (Gt _{eq} CO ₂ /an) entre 1970 et 2010. (IPCC, 2013)	8
1.4	Cartographie des évolutions de la température moyenne annuelle observée entre 1901 et 2012. (IPCC, 2013)	10
1.5	Évolution des précipitations annuelles sur les terres émergées entre 1901 et 2010 et entre 1951 et 2010. (IPCC, 2013)	11
1.6	Projections de la moyenne multi-modèles CMIP5 des changements de la température moyenne annuelle pour la période 2081-2100 selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5, par rapport à la période 1986-2005. (IPCC, 2013)	12
1.7	Prévisions d'évolution des précipitations moyennes pour la période 2081-2100 selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5, par rapport à la période 1986-2005. (IPCC, 2013)	13
1.8	Variations des températures moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario optimiste RCP 2.6 et Scénario pessimiste RCP 8.5). (MEMEE, 2016)	14
1.9	Variations des précipitations moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario optimiste RCP 2.6 et Scénario pessimiste RCP 8.5). (MEMEE, 2016)	14
1.10	Moyenne annuelle de l'écoulement prévu pour 2081-2100 par rapport à 1986-2005 selon le scénario RCP 8.5. (IPCC, 2013)	16
1.11	Recharge moyenne des nappes sur la période 1971-2000 en mm/an et évolution à l'horizon 2099 pour le scénario RCP 8.5, simulée par le modèle WaterGAP. (Portmann et al., 2013)	18
1.12	Schéma des principales étapes d'une étude d'impact. (Ducharme et al., 2003)	20
2.1	Localisation géographique des périmètres du Loukkos et du Gharb.	23
2.2	Ressource en eau de surface des périmètres du Loukkos et du Gharb.	24
2.3	Ressource en eau souterraine des périmètres du Loukkos et du Gharb.	26
2.4	Principe de la télédétection.	28
2.5	Étapes de la classification supervisée.	30
2.6	Phases de a) entraînement et b) classification du classificateur Forêt aléatoire.	32
2.7	Différentes étapes de traitement des paramètres physiques du terrain.	35
2.8	Diagramme de Voronoi pour la région d'étude (Loukkos et Gharb).	36
2.9	Répartition des altitudes au niveau des périmètres du Loukkos et du Gharb.	37
2.10	Superficie par classe d'élévation des périmètres du Loukkos et du Gharb.	37
2.11	Pourcentage de la superficie par classe d'élévation des périmètres du Loukkos et du Gharb et contrôlé par chaque station.	38

2.12	Carte des sols des périmètres du Loukkos et du Gharb.	39
2.13	Capacité de rétention en eau du sol (RFU_{max} estimée) des périmètres du Loukkos et du Gharb.	40
2.14	Superficie par types de sol des périmètres du Loukkos et du Gharb.	40
2.15	Pourcentage de la superficie par types de sol des périmètres du Loukkos et du Gharb.	41
2.16	Superficie par classe de RFU_{max} des périmètres du Loukkos et du Gharb.	42
2.17	Pourcentage par classe de RFU_{max} des périmètres du Loukkos et du Gharb.	42
2.18	Occupation du sol durant les années hydrologiques étudiées des périmètres du Loukkos et du Gharb.	46
2.19	Moyenne annuelle de l'indice AVI par périmètre et station.	47
2.20	Moyenne annuelle de l'indice NDVI par périmètre et station.	48
2.21	Moyenne annuelle de l'indice OSAVI par périmètre et station.	48
2.22	Moyenne annuelle de l'indice BSI par périmètre et station.	49
2.23	Moyenne annuelle de l'indice NDWI par périmètre et station.	50
2.24	Variation de la superficie (en %) par classe d'occupation du sol durant les périodes 1984–1985, 2001–2002 et 2016–2017 des périmètres du Loukkos et du Gharb.	51
2.25	Variation de la superficie (en %) par classe d'occupation du sol durant les périodes 1984–1985, 2001–2002, 2015–2016 et 2016–2017 pour les stations du Loukkos et du Gharb.	54
2.26	Les classes du niveau sous-sous-classe. Périmètre du Loukkos (Maroc). Le nombre de polygones et le nombre de pixels par (sous-)classes sont donnés entre parenthèse et en italique respectivement.	57
2.27	Vue d'ensemble de l'application "Web2TISat".	59
3.1	Approche méthodologique de traitement des données climatiques.	63
3.2	Variations de (a) précipitations et (b) températures moyennes saisonnières et annuelles (mm/période) pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb.	75
3.3	Variations des évapotranspirations potentielles saisonnières et annuelles (mm/période) pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb.	76
3.4	Fréquence des tendances des précipitations (P) pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb.	86
3.5	Fréquence des tendances de la température moyenne (T_{moy}) pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb.	88
3.6	Fréquence des tendances de l'évapotranspiration potentielle (ETP_{BC50}) pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb.	90
3.7	Répartition spatiale de la tendance des précipitations annuelles et saisonnières (en mm/10ans), de la température (en °C /10ans) et de l'évapotranspiration potentielle (en mm/10ans) pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb. Période 1981–2016	91
3.8	Comparaison de la répartition mensuelle des précipitations et de la température moyenne pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb.	94
3.9	Comparaison de la répartition mensuelle des précipitations et de la température moyenne pour chaque station des deux périmètres du Loukkos et du Gharb.	95
3.10	Vue d'ensemble de l'application "WebTDClm".	97
3.11	Illustration sur la région d'étude.	99
3.12	Visualisation des données climatiques (Précipitations).	100
3.13	Variation des précipitations saisonnières.	100
3.14	Test de détection des ruptures pour la station Aouamra. Période 1981–2016.	101
3.15	Répartition spatiale des températures moyennes inter-annuelles durant 1981-2016.	101
4.1	Principe d'un automate cellulaire (illustration 2D).	104
4.2	Types de voisinage dans un treillis bidimensionnel (a) Von Neumann et (b) Moore.	104
4.3	Ensemble des facteurs d'état pour une cellule c_{ij} réparti en (a) paramètres physiques du terrain, (b) paramètres climatiques et (c) paramètres de débit.	107

4.4	Principe du couplage des PPT avec les PC à travers 2CAFDYM pour la modélisation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau pour une région donnée.	108
4.5	Variation saisonnière de l'eau évaporée (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.	115
4.6	Variation saisonnière de l'eau évaporée (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb. (suite)	116
4.7	Bilan globale par mois de l'eau évaporée (E_w), souterraine (G_w), et de surface (S_w) (en m^3/m^2) en fonction des différents scénarios (référence, optimiste et pessimiste) pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.	118
4.8	Variation saisonnière de l'eau de surface (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.	120
4.9	Variation saisonnière de l'eau de surface (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb. (suite)	121
4.10	Évolution globale par heure de la disponibilité de l'eau de surface (H_Vsw en m^3) pour les différents scénarios de référence et les scénarios projetés 2021-2050 pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.	123
4.11	Variation saisonnière de l'eau souterraine (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.	125
4.12	Variation saisonnière de l'eau souterraine (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb. (suite)	126
4.13	Évolution globale par heure de la disponibilité de l'eau souterraine (H_Vgw en m^3) pour les différents scénarios de référence et les scénarios projetés 2021-2050 pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.	129
4.14	Variation annuelle des trois types de l'eau en $10^6 m^3$ selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.	131
4.15	Variation annuelle des eaux évaporées, des eaux souterraines et des eaux de surface entre les scénarios projetés (SCP) et les scénarios de référence (SCR).	133
A.1	Effets atmosphériques influençant la mesure de l'énergie solaire réfléchie.	143
A.2	Répartition spatiale de la moyenne annuelle des indices AVI et NDVI.	145
A.3	Répartition spatiale de la moyenne annuelle des indices OSAVI et BSI.	147
A.4	Répartition spatiale de la moyenne annuelle d'indice NDWI.	149
B.1	Détermination des $p - values$ à partir de la distribution d'échantillonnage de la statistique du test. (Emmert-Streib and Dehmer, 2019)	156

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques des indices radiométriques utilisés pour les images optiques. . .	30
2.2	Caractéristiques des images satellitaires étudiées.	43
2.3	Type des classes d’occupation du sol des périmètres du Loukkos et du Gharb. .	45
2.4	Indice de Kappa et précision globale de la classification d’occupation du sol des années étudiées.	45
2.5	Comparaison des superficies d’occupation du sol par année et par périmètre. . .	51
2.6	Ordre de dominance des superficies en fonction des classes pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb.	55
2.7	Variation des classes d’occupation du sol entre les périodes (1984–1985 vs 2001–2002), (2001–2002 vs 2016–2017) et (1984–1985 vs 2016–2017) des périmètres du Loukkos et du Gharb.	56
3.1	Caractéristiques des stations étudiées. Avec ^(a) Données issues d’une station classique ayant un pas de temps décadaire et ^(b) Données issues d’une station automatique ayant un pas de temps journalier.	65
3.2	Proportion des données manquantes dans la série des températures pour chaque station météorologique du périmètre du Gharb (Période 1974–2016).	69
3.3	Résultat des paramètres statistiques et de la performance pour les deux méthodes d’imputation. Cas du périmètre du Gharb.	70
3.4	Analyse statistique par station des précipitations, de la température moyenne et l’évapotranspiration potentielle durant la période 1981–2016 pour le périmètre du Gharb.	72
3.5	Analyse statistique par station des précipitations, de la température moyenne et l’évapotranspiration potentielle durant la période 1981–2016 pour le périmètre du Loukkos.	73
3.6	Ordre de dominance des précipitations, des températures et évapotranspirations potentielles saisonnières et annuelles en fonction des trois scénarios de référence.	77
3.7	Dates des ruptures communes par station pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb. Période 1981–2016.	79
3.8	Tests de détection des ruptures par station pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb. Période 1981–2016.	80
3.9	Résultat des tests de Mann-Kendall et de Sen’s des précipitations (P) et de la température moyenne (T_{moy}) pour chaque station météorologique du périmètre du Gharb. Période 1981–2016.	83
3.10	Résultat des tests de Mann-Kendall et de Sen’s des précipitations (P) et de la température moyenne (T_{moy}) pour chaque station météorologique du périmètre du Loukkos. Période 1981–2016.	84
3.11	Résultat des tests de Mann-Kendall et de Sen’s de l’évapotranspiration potentielle (ETP_{BC50}) pour chaque station météorologique des deux périmètres du Loukkos et Gharb. Période 1981–2016.	85
3.12	Valeurs de projection future obtenues pour l’horizon 2021–2050	93

4.1	Différence entre l'application du modèle 2CAFDYM dans la zone de Boukhalef (Kassogué et al., 2017a) et dans les deux périmètres du Loukkos et Gharb. . .	111
4.2	Récapitulatif des données d'entrée du modèle utilisé.	112
4.3	Caractéristiques de la station de calcul utilisée pour effectuer les simulations pour les deux périmètres.	113
4.4	Ordre de dominance entre E_w , S_w et G_w pour les deux périmètres.	119
A.1	Comparaison des types de bandes et des propriétés d'acquisition entre Landsat 7 et 8 et Sentinel 2. (Chastain et al., 2019)	140
A.2	Comparaisons des caractéristiques des données entre ASTER et SRTM.	141
A.3	Statistique descriptive des indices AVI et NDVI entre les années étudiées par périmètre et station.	146
A.4	Statistique descriptive des indices OSAVI et BSI entre les années étudiées par périmètre et station.	148
A.5	Statistique descriptive de l'indice NDWI entre les années étudiées par périmètre et station.	150
B.1	Différentes classes de séries chronologiques.	152
B.2	Types d'erreur des tests hypothèses.	155
B.3	Distribution d'échantillonnage du z-score et du t-score.	155

Liste des acronymes et des symboles

AC automate cellulaire

ANN Réseau de Neurones Artificiels

ASI Agence Spatiale Italienne

ASTER Radiomètre Spatial Avancé d'Émission et de Réflexion Thermiques

AVI indice de végétation avancé

BSI indice du sol nu

CCNUCC Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CONUS Conterminous United States

CVRMSE coefficient de variation de la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes

DLR Centre Aérospatial Allemand

EROS Système d'Observation des Ressources Terrestres

ESA Agence Spatiale Européenne

ETM+ Enhanced Thematic Mapper Plus

ETP Évapotranspiration Potentielle

E_w eau évaporée

GCM modèles climatiques à échelle mondiale

GIEC Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GUI Interface graphique

G_w eau souterraine

IDW interpolation par pondération par l'inverse de la distance

k-NN méthode des k plus proches voisins

MAE erreur absolue moyenne

MCG modèles de circulation générale

MCMC Markov chain Monte Carlo

MEMEE Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement

MNT modèle numérique du terrain

NASA Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace

NDVI indice de végétation par différence normalisé

NDWI indice d'eau par différence normalisé

NIMA Agence Nationale d'Imagerie et de Cartographie

OLI Operational Land Image

ONA Oscillation Nord-Atlantique

ORMVAG Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb

ORMVAL Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Loukkos

OSAVI indice de végétation ajusté au sol optimisé

OTB Orfeo Toolbox

PC paramètres climatiques

PD paramètres de débit

PPT paramètres physiques du terrain

RCM modèles climatiques à échelle régionale

RF forêt aléatoire ou Random Forest

RMSE racine carrée des erreurs quadratiques moyennes

SCP scénario de climat projeté

SCR scénario de climat de référence

SNH homogénéité normal

SRTM Shuttle Radar Topography Mission

SVM machine à vecteurs de support

S_w eau de surface

UTM Universal Transverse Mercator

VRT rasters virtuels

WGS84 World Geodetic System 1984

Introduction générale

Ces dernières décennies, les impacts des changements climatiques sont devenus multiples, fréquents et touchent tous les systèmes naturels notamment le cycle hydrologique. Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC a noté que, avec l'augmentation des émissions cumulatives de gaz à effet de serre, la moyenne mondiale de la température superficielle a été augmentée au cours du XXI^e siècle (IPCC, 2013). La hausse des températures accélérerait le cycle hydrologique grâce à une meilleure évaporation. De plus, l'intensité, la fréquence et la distribution spatiale des précipitations vont changer. L'élévation de la température aurait un impact significatif sur les ressources en eau d'une région donnée.

Dans ce contexte de changement, plusieurs études ont été menées, dans de nombreuses régions méditerranéennes concernant l'évaluation et la gestion des ressources en eau face au changement climatique. En particulier les études de (Driouech, 2010; García-Ruiz et al., 2011; Nassopoulos, 2012; Pascual et al., 2015; Trambly et al., 2014) confirment une baisse des débits fluviaux méditerranéens lors des dernières décennies et prévoient que ces régions seront soumises à la fois à une augmentation du risque des inondations, due fondamentalement à la hausse de l'intensité et la variabilité des précipitations.

À cet égard, l'utilisation des modèles climatiques a été un outil utile pour quantifier les scénarios de changement climatique futur dans des conditions propres à une région donnée. Les résultats des modèles sont ensuite réduits à des emplacements ou à des régions spécifiques et utilisés comme intrants pour évaluer l'évolution des principales composantes du bilan hydrique. Récemment, des modèles discrets (notamment le modèle 2CAFDYM (Kassogué et al., 2017b) basé sur les automates cellulaires) furent développés pour évaluer l'impact du changement climatique en offrant un large champ d'application vis-à-vis des contraintes physiques du milieu et du climat.

Parmi les questions auxquelles nous tentons de répondre dans cette thèse : Y a-t-il une variation statistiquement significative des précipitations et températures ? Quelle est leur tendance dans un contexte du changement climatique ? Comment et à quel point ce dérèglement climatique pourrait affecter la répartition spatio-temporelle de nos ressources en eau dans le futur ?.

Dans ce contexte aussi complexe, notre travail de recherche vise à estimer les impacts futurs du changement climatique sur les ressources en eau de deux périmètres irrigués du Maroc (Loukkos et Gharb), connus par une intense activité agricole. Ils se caractérisent par une disparité spatio-temporelle des précipitations qui s'exprime à la fois par un excès et un déficit en eau selon les saisons. Une telle variation du climat couplée à la variation spatiale de certains paramètres physiques tels que l'altitude (0m-928m), type de sol (8 classes), occupation du sol (6 classes) pourrait affecter la disponibilité et la qualité des ressources en eau futures. Par ailleurs, des études antérieures projettent une hausse de température conjuguées à une variabilité des précipitations pour les régions méditerranéennes comme le Maroc ([Driouech, 2010](#)).

Ce travail nous permettra à cet effet, de mettre en exergue ces impacts dans le cas de ces deux périmètres via un modèle d'évaluation de l'évolution du cycle de l'eau développé par [Kassogué et al. \(2017a,b\)](#) tout en tenant compte de certaines améliorations. Le modèle prend comme entrée les paramètres physiques du terrain de la région considérée couplés avec les paramètres climatiques. Ce couplage sous différents scénarios climatiques (de référence, pessimiste et optimiste) permet alors d'évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau.

Plus spécifiquement, cette thèse a pour objectifs de :

- Comprendre la variabilité spatio-temporelle des paramètres physiques du terrain et des paramètres climatiques dans la région d'étude.
- Produire des cartes de paramètres physiques du terrain.
- Évaluer et quantifier la dynamique du changement de l'occupation du sol afin de comprendre le contexte dans lequel vont se dérouler les simulations.
- Réaliser une approche statistique d'analyse des paramètres climatiques en cas de manque de données.
- Réaliser des simulations via le modèle 2CAFDYM afin d'estimer l'impact du changement climatique.
- Évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau des deux périmètres.

Les principaux résultats de ce travail de recherche ont fait l'objet à des publications dont trois sont déjà publiées ([Acharki et al., 2020a, 2019, 2020b](#)) et un autre en cours de publication ([Acharki et al., 2020c](#)).

Ce rapport de thèse est structuré en quatre chapitres encadré par une introduction et une conclusion générale. Certains compléments sont fournis dans les annexes.

- Le chapitre 1 fait l'objet d'une étude bibliographique sur les ressources en eau et le changement climatique dans le monde entier et dans le Maroc. En particulier, il résume plusieurs travaux antérieurs ayant étudié l'impact du changement climatique sur les ressources en eau.

- Le chapitre 2 porte d'abord sur l'apport de la télédétection dans l'étude des paramètres physiques du terrain et ensuite sur la description de notre région d'étude notamment les caractéristiques géographiques, géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques. Il concerne ainsi les méthodes et outils de la télédétection pour l'acquisition et le prétraitement des paramètres physiques du terrain. Des cartes d'illustrations sont données. Enfin, il présente l'application web "Web2TISat" visant à automatiser le processus de traitement des images satellitaires.
- Le chapitre 3 décrit les étapes de l'approche statistique permettant l'étude des paramètres climatiques. Il donne un aperçu sur les caractéristiques des stations et les données climatiques étudiées. De plus, il présente les méthodes de comblement des lacunes ainsi que les analyses effectuées pour examiner les données climatiques du passé, les tendances et les projections futures. Finalement, il présente l'application web "WebTDCLim" permettant l'automatisation du processus de traitement des données climatiques et projections futures.
- Le chapitre 4 donne brièvement le principe des automates cellulaires et ses principales composantes. En plus, il présente le modèle 2CAFDYM basé sur l'automate cellulaire que nous utiliserons. Plusieurs améliorations sont également apportées, notamment pour les packages fonctionnels. Une application à travers des simulations dans deux périmètres irrigués au nord du Maroc est considérée.
- Les annexes concernent les méthodes et outils de la télédétection pour l'acquisition et le prétraitement des images satellitaires (annexe A) et les tests statistiques utilisés pour l'analyse des paramètres climatiques (annexe B).

Une conclusion générale fournit une synthèse globale des travaux, en soulignant les principales contributions et les implications des résultats. Enfin, quelques idées pour de futures études sont suggérées.

Ressources en eau et changement climatique : Généralités

Le but de ce chapitre est de contextualiser les enjeux de cette thèse en présentant brièvement le cycle hydrologique (section 1.1), le concept de changement climatique en cours (section 1.2), ses principales causes (section 1.3), les incidences qui le caractérisent notamment sur les ressources en eau (section 1.4), l'impact du changement climatique et la démarche relative à leur modélisation (section 1.5).

1.1 Cycle hydrologique

a) Qu'est-ce que le cycle hydrologique ?

Le cycle hydrologique, souvent appelé cycle de l'eau, est l'un des composants principaux du système planétaire régulant la vie humaine, animale et végétale.

Ce cycle décrit un ensemble naturel de processus continus et dynamiques au cours desquels des masses d'eau sous forme de liquide, de vapeur ou de solide, se déplacent, circulent et sont stockées dans le système terrestre (IPCC, 2013). Il définit la séquence des transitions où l'eau de la Terre (humidité océanique, cryosphérique et continentale) s'évapore et voyage dans l'atmosphère, se condense pour former des nuages, revient à la surface de la Terre sous forme de précipitation, s'écoule vers les océans sous forme de flux, et finalement s'évapore à nouveau (figure 1.1).

b) Composantes du cycle

Le cycle hydrologique comprend les précipitations comme intrant principal, divers processus de transfert, différents stockages et rendements. Les hydrologues les qualifient de composants du bilan hydrique.

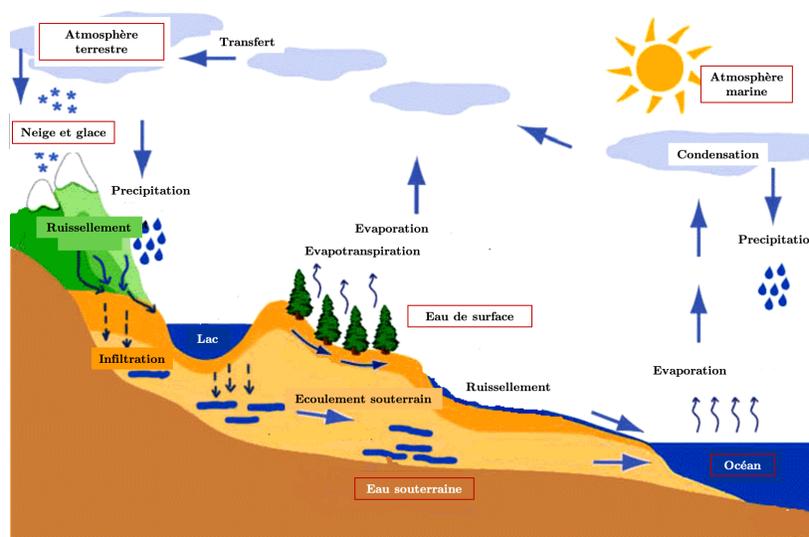


FIGURE 1.1 : Cycle de l'eau (<http://acces.inrp.fr/eduterre-usages/hydro/cycleau/imagescycleglobal/cycle.gif>).

Les *précipitations* sont constituées de vapeur d'eau condensée et se produisent principalement sous forme de pluie, mais comprennent également la neige, la grêle, la bruine, la neige fondue et les gouttes de brouillard. La neige peut s'accumuler et éventuellement se compacter pour former des glaciers et des calottes glaciaires. En cas de glace et de neige, l'eau stockée est relâchée dans le cycle avec un retard en fonction de la température. Aussi, la transpiration explique la perte de vapeur d'eau par les stomates des plantes. En plus des couches de neige et de glace, de l'eau peut être retenue sur la surface de la canopée, qui comprend le feuillage, les branches et les tiges des plantes. À partir de ce magasin dit d'*interception*, il finit par s'évaporer dans l'atmosphère sans atteindre la surface du sol. Si l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration du sol, il se produit un *ruissellement en surface*. Le taux d'*infiltration* dépend principalement de la texture et de la structure, ainsi que de la teneur en humidité initiale du sol. L'infiltration d'eau peut être retenue dans le *sol non saturé* en fonction de la quantité perdue par l'absorption par les plantes, l'évaporation, la recharge des eaux souterraines ou l'écoulement intermédiaire (Stagl et al., 2014).

L'*écoulement* caractérise le transfert de l'eau en aval du sol vers les canaux de la rivière. Le *stockage des eaux souterraines* est reconstitué lentement par percolation profonde et peut constituer un réservoir à long terme du cycle de l'eau (avec un temps de résidence allant de quelques jours à plusieurs millénaires). L'*écoulement souterrain* est le mouvement lent de l'eau dans la zone saturée d'un aquifère sous l'influence de la gravité ou de la pression hydrostatique. Le ruissellement des cours d'eau est composé des écoulements de surface, des écoulements intermédiaires, des écoulements souterrains et des précipitations directes (Stagl et al., 2014).

En résumé, le cycle de l'eau engendre plusieurs phénomènes terrestres parmi lesquels on peut citer l'évapotranspiration, l'écoulement des eaux de surface, l'écoulement des eaux souterraines et le stockage de l'eau (glaciers, couvert de glace et aquifères). L'impact du changement climatique s'étend à chacun des composants et des processus impliqués dans le cycle de l'eau.

1.2 Changement climatique

Le climat est décrit statistiquement par « *les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années (la période type définie par l'OMM est de 30 ans)* » (Carrega et al., 2004). Le climat est donc variable par définition.

Le changement climatique est défini selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) (en Anglais : IPCC) comme étant la *variation de l'état du climat, que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels, à des forçages externes ou à des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres.*

Dans cette définition, le GIEC précise bien que le changement climatique concerne non seulement la température, mais aussi d'autres variables telles que : les précipitations, l'humidité de l'air, les rayonnements, le vent, . . .etc. Soit tous les changements affectant le climat.

1.3 Causes du changement climatique

Au cours de l'histoire de la terre, le climat a significativement varié sur diverses échelles de temps marquées par des périodes successives de réchauffement (ex. Crétacé, période la plus chaude où il y a eu beaucoup de CO₂ provenant de l'activité magmatique des dorsales) et de refroidissement (comme glaciations quaternaires dues à la diminution d'énergie solaire reçue au sol par modification des paramètres orbitaux comme l'excentricité, l'obliquité et la précession des équinoxes (Sciama, 2008)). Certes, le phénomène de dérèglement climatique n'est pas de nouveau et constitue un caractère intrinsèque du système terrestre. Cependant, ce dernier semble s'être accéléré et caractérisé par une remarquable amplitude et globalité dans l'ère dite «Anthropocène». On précise que l'évolution du climat actuel représente le réchauffement climatique naturel postérieur à la dernière glaciation qui caractérisait la fin du Pléistocène.

En fait, ce changement climatique peut être la résultante de divers facteurs :

- D'une part de forçages externes naturels du système climatique tels que les éruptions volcaniques ou poussières soulevées par les impacts d'astéroïdes ou des changements de luminosité du soleil ou au contraire par une baisse d'activité du soleil, des variations de l'axe de rotation.
- D'autre part de forçages d'origine humaine qui comprennent les émissions de GES ou encore les émissions de particules polluantes dans l'atmosphère, notamment liées à l'industrie et au transport (IPCC, 2013).

a) Bilan radiatif et effet de serre

Le climat est régi par le bilan thermique de la Terre. Cette énergie thermique reçue provient essentiellement du rayonnement solaire qui est constitué de 40% de lumière visible, 10% de rayons ultraviolets et 50% de rayons infrarouges (Sciama, 2008).

Comme le montre la figure 1.2, une partie de ce rayonnement est réfléchi et renvoyé vers l'espace par l'atmosphère (nuages et aérosols) et la surface terrestre (en fonction de son albédo). Tandis que le reste émis par la surface de la Terre est transformé majoritairement en rayons thermiques (infrarouges) selon la loi de Stefan-Boltzmann (théorie du corps noir) avant d'être de nouveau réémis vers l'atmosphère. Ceci ce fait à l'exception d'une partie de ces radiations ayant une plus grande longueur d'onde que celle du rayonnement direct. Elle est ainsi empêchée de repartir vers l'espace à travers l'absorption par des gaz dits effet de serre (constituant moins de 1% de la composition atmosphérique). C'est cette phase qui modifie de façon naturelle l'équilibre thermique (forçage radiatif) et engendre ainsi le réchauffement de la basse couche de l'atmosphère. On parle alors d'un processus naturel qui a été décrit pour la première fois par le physicien Fourier en 1824. Ce processus permet de maintenir la température moyenne actuellement observée à la surface de la Terre à 15 °C et sans lequel, la température serait similaire à celle de la lune -18 °C et empêcherait le développement de la vie telle que nous le connaissons.

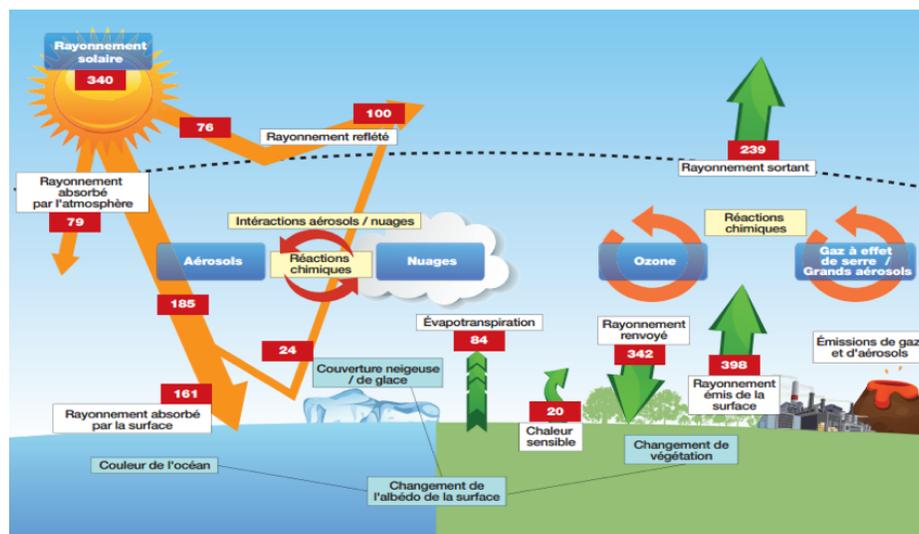


FIGURE 1.2 : Rôle de l'atmosphère dans l'effet de serre naturel et les flux d'énergie actuels en $W m^{-2}$ (<http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0083/Temis-0083287/201533.pdf>).

En revanche, depuis la révolution industrielle, les activités humaines dues au développement économique et social des pays notamment riches, exhalent dans l'atmosphère de grandes quantités de gaz à effet de serre dont les concentrations augmentent de façon brutale. Ce qui contribue à l'accroissement de la quantité d'énergie d'infrarouge piégée dans la basse atmosphère et réchauffe plus la surface de la terre. Cette quantité d'énergie perturbe ainsi le bilan radiatif et le cycle naturel du carbone en engendrant parallèlement des modifications importantes de propriétés de surface sur certaines régions du globe. Ce processus est nommé effet de serre additionnel ou anthropique.

b) Émissions anthropiques de GES déjà observées

Les émissions de GES provoquées par les activités humaines ont connu des concentrations considérablement accrues conduisant à une perturbation significative du forçage radiatif. Selon les études scientifiques, ce forçage a une conséquence directe déjà visible sur la température de la surface terrestre au cours des trois décennies précédentes. Entre 2000 et 2010, les émissions mondiales de GES ont atteint un cumul de 49 Gt_{éq} CO₂ par an ; doublant quasiment la quantité émise dans les années 1970 (27 Gt_{éq} CO₂), avec une augmentation en moyenne de 1,0 Gt_{éq} CO₂, soit une hausse de 2,2% par an. Elle était de 0,4 Gt_{éq} CO₂ entre 1970 et 2000, soit un accroissement de 1,3% par an (IPCC, 2013) .

D'après la figure 1.3 qui illustre l'évolution du taux annuel d'émissions anthropiques de GES entre 1970 et 2010, nous remarquons que la teneur en dioxyde de carbone (CO₂) occupe la première place en matière des émissions émises dans l'atmosphère puisqu'elle s'est élevée à 38 Gt_{éq} CO₂/an. Ce qui représente 76 % des d'émissions anthropiques totales de GES en 2010. La NOAA a signalé qu'au 5 avril 2016, une concentration record en dioxyde de carbone dans l'atmosphère de la Terre a été enregistrée depuis l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï. Cette concentration est de l'ordre de 406,45 ppm contre 403,26 ppm pour le même mois de l'année qui précède, soit un écart de plus de 3 ppm. Les scientifiques concluent que ce pic est dû à une combinaison des activités humaines et du phénomène climatique El Niño (NOAA, 2016). En 12 mai 2019, l'observatoire de Mauna Loa a une fois de plus enregistré une concentration record de dioxyde de carbone dans l'atmosphère de la Terre soit 415,39 ppm. Selon le dernier bulletin de l'OMM, pour la toute première fois, la barre journalière des 415 ppm a donc été franchie.

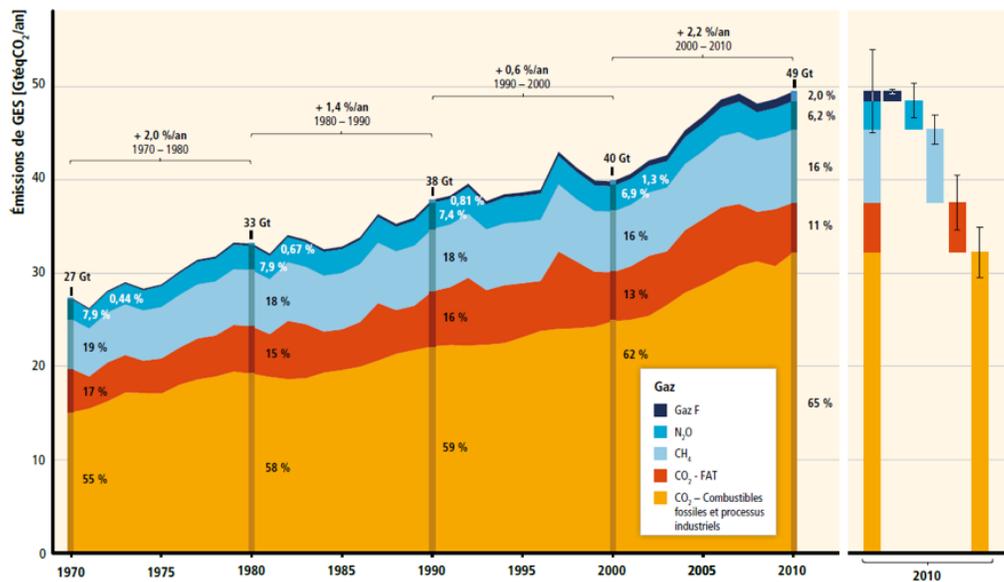


FIGURE 1.3 : Total annuel des émissions anthropiques de GES (Gt_{éq} CO₂/an) entre 1970 et 2010. (IPCC, 2013)

Ce gaz reste alors le GES le plus abondant dans l'atmosphère. Sa concentration est passée de +0,54 ppm/an en 1960 à +3,05 ppm/an en 2015. Ensuite viennent les émissions de méthane (CH_4) résultant essentiellement des activités agricoles, constituant ainsi le deuxième plus important GES avec 7,8 Gt_{éq} CO₂/an soit 16%. Ensuite, les émissions en dioxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O) dans l'atmosphère, issues notamment des océans, des sols, de la combustion de la biomasse, des engrais et de divers processus industriels. Ceux-ci ont atteint 3,1 Gt_{éq} CO₂/an c'est-à-dire 6,2% des émissions totales de GES. Et enfin, nous trouvons que les émissions de gaz fluorés (HFC, PFC) représentent seulement 2,0% des émissions totales, ce qui signifie 1,0 Gt_{éq} CO₂/an.

Le Maroc est considéré comme un faible émetteur de GES avec une part de 0,2% du total des émissions de GES au niveau mondial (MEMEE, 2016). Mais, il est en revanche très vulnérable et exposé aux effets du changement climatique. Il serait alors intéressant de connaître à quel point le Maroc contribue au réchauffement climatique.

Selon le rapport de la troisième communication nationale publié par le Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement (MEMEE), le Maroc émettait en moyenne 93,94 Mt_{éq} CO₂ et 100,55 Mt_{éq} CO₂ respectivement en 2010 et 2012, soit 3,10 tonnes d'équivalent CO₂ par habitant en 2012 contre 2,95 tonnes par habitant en 2010. En 2012, le dioxyde de carbone, provenant essentiellement de la combustion d'énergie fossile, reste prépondérant avec près de 66,5 Mt_{éq} CO₂. Ensuite, il est suivi du méthane CH_4 avec 783 kt et enfin le N_2O avec 57 kt. À signaler que les émissions nettes par habitant devraient progresser à un rythme annuel moyen de 2,59% à l'horizon 2040 (MEMEE, 2016).

1.4 Incidences du changement climatique

1.4.1 Incidences observées du changement climatique

Au cours des dernières décennies, diverses évolutions du climat ont été observées impactant ainsi tous les continents et les océans.

Ces évolutions se caractérisent :

- Dans un premier lieu, par une augmentation conséquente des températures moyennes de surface de la Terre qui atteignaient 0,85 °C entre 1880 et 2012, avec des écarts importants par région (IPCC, 2013). Ceci est illustré dans la figure 1.4, où on remarque aussi que le réchauffement est minimal à l'équateur (ex. -0,6 °C dans l'atlantique nord) et augmente au fur et à mesure qu'on s'en éloigne (les plus fortes variations sont aux pôles ; +2,5 °C en Asie centrale, en Afrique du Nord-ouest, en Amérique du sud-est et au Canada). Selon l'agence américaine NOAA, le mois de février 2016 a été le mois le plus chaud à la surface des continents avec un nouveau record de +2,31 °C et même +2,66 °C à la surface des terres de l'hémisphère nord par rapport à la moyenne mondiale des mois de février au XXe siècle.
- Dans un deuxième lieu, par un réchauffement des océans, qui constitue l'essentiel de l'augmentation de la quantité d'énergie. Un nouveau record mondial a été enregistré en 2018 où le contenu thermique des océans a atteint de nouveaux pics entre 0 et 700 mètres de profondeur (relevés remontant à 1955) et entre 0 et 2000

mètres (relevés remontant à 2005), "pulvérisant les records de 2017" (OMM, 2019).

- Dans un troisième lieu, par une réduction de la cryosphère : la banquise arctique a notamment diminué à une vitesse de 3,5% et 4,1% par décennie sur la période 1979-2012. Le GIEC prévoyait une montée du niveau moyen de mer de plus de 1 mètre en 2100 soit une hausse globale du niveau des océans de 26 à 82 cm à l'horizon 2100 par rapport à la fin du XXe siècle (IPCC, 2013). Or, les travaux de DeConto and Pollard (2016) montrent que la fonte des glaces de l'Antarctique s'enclencherait durablement si les émissions de GES actuelles se poursuivaient sans interruption. Elle pourrait à elle seule contribuer à la hausse du niveau moyen de mer à plus de 2 mètres d'ici 2100 et attendrait plus de 15 mètres à l'horizon de 2500.

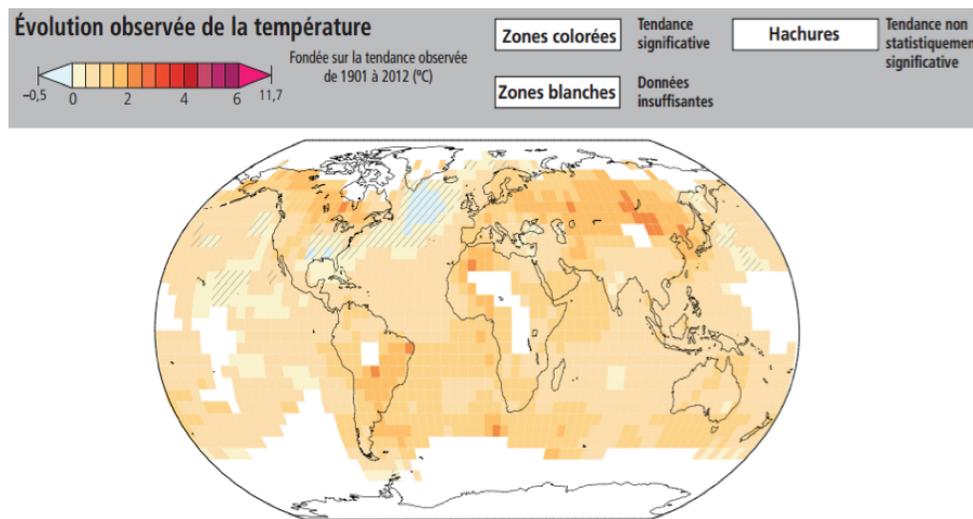


FIGURE 1.4 : Cartographie des évolutions de la température moyenne annuelle observée entre 1901 et 2012. (IPCC, 2013)

Après avoir parlé de la caractérisation des évolutions du climat, nous exposons dans ce qui suit les incidences à l'échelle mondiale puis à l'échelle du Maroc.

a) Incidences observées à l'échelle mondiale

En règle générale, l'augmentation des températures réchauffe tacitement les océans et l'atmosphère. Cela implique un accroissement : (i) de la vitesse d'évaporation des masses d'eau et des terres humides ; (ii) des quantités de neige fondue des glaciers et des zones enneigées ; (iii) de la transpiration de la végétation. Ce dernier paramètre est aussi sous la dépendance d'autres facteurs (énergie radiative, humidité de l'air et vent) et anticiperait alors à une intensification du cycle hydrologique.

En raison de la hausse de la température, l'évapotranspiration est également contras-tée avec une augmentation aux hautes et moyennes latitudes. Jung et al. (2010) pré-voient une diminution dans les zones tropicales du fait d'un assèchement des sols dans ces régions. Douville et al. (2012) mettent en évidence pour la première fois l'influence des émissions anthropiques sur ces changements d'évapotranspiration .

Les travaux de [Lafaysse \(2011\)](#) ont conclu que l'évolution des précipitations est une réponse à la modification des pertes énergétiques radiatives de l'atmosphère. D'ailleurs, de nombreuses mesures effectuées par les scientifiques indiquent que la hausse des températures entraîne donc globalement une augmentation des précipitations, mais réparties de manière non-uniforme sur la planète et dans le temps (figure 1.5). Certaines régions ont reçu plus de précipitations dans les parties orientales de l'Amérique, dans l'Europe du nord, dans le nord et centre de l'Asie. Tandis que d'autres en recevaient moins comme les zones méditerranéennes ([Lafaysse, 2011](#)) et tropicales sèches et désertiques ([Quintana Seguí, 2008](#)). Plusieurs études ont concordé avec ce résultat que ce soit à l'échelle mondiale, régionale ou locale.

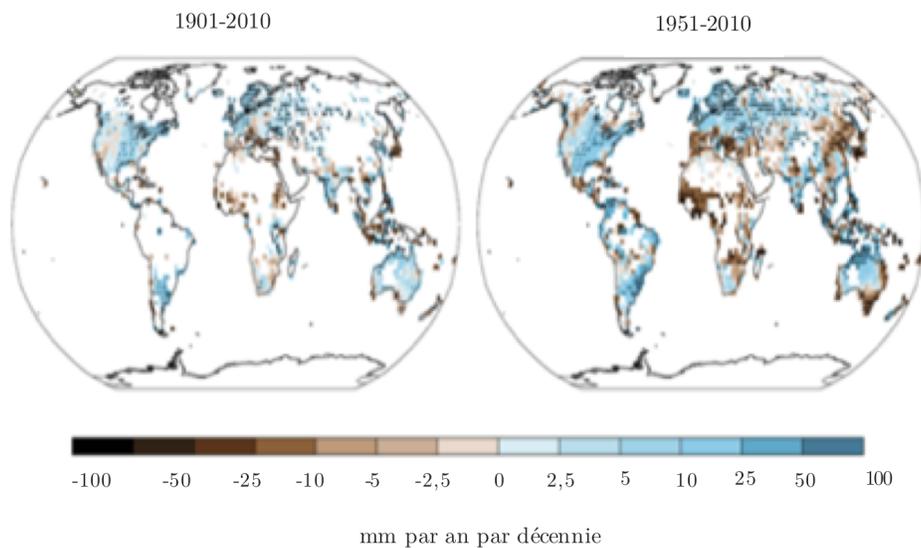


FIGURE 1.5 : Évolution des précipitations annuelles sur les terres émergées entre 1901 et 2010 et entre 1951 et 2010. ([IPCC, 2013](#))

b) Incidences observées au Maroc

Le Maroc, vu sa position météorologique et géographique, est l'un des pays méditerranéens considérés les plus susceptibles d'être affectés par les différents effets néfastes du dérèglement climatique. Cela a été confirmé par plusieurs études ([Antipolis, 2008](#); [Bates et al., 2008](#); [Driouech, 2010](#); [MEMEE, 2016](#)). En particulier celle de [Driouech \(2010\)](#) a montré qu'au cours des dernières décennies le climat marocain a progressé du climat humide au climat semi-aride au nord du pays. En outre, les régions qui étaient classées sous climat humide et subhumide reculent au profit des régions à climat semi-aride et aride.

En effet, la température moyenne annuelle a augmenté de $0,16$ °C par décennie durant la période 1961-2008 notamment sur l'extrême nord du territoire marocain, alors qu'elle a varié pendant la période 1998-2007 par rapport à 1971-1980 entre 1 °C et 3 °C selon les régions ([MEMEE, 2016](#)). Parallèlement à cette hausse, une forte tendance à la baisse des précipitations comprise entre $0,1$ et $0,2$ mm/jour par décennie a été constatée ([Driouech, 2010](#)), et qui a été généralement suivie par des périodes relatives de sécheresse dont la durée de vagues de chaleur est estimée de 11 jours pendant les 45

ans passés (IRES, 2011). De même, l'étude de Trambly et al. (2012) montre une baisse significative notamment au nord du Maroc. Tandis que l'étude de Raymond et al. (2016) montre un résultat différent qui est une augmentation significative des précipitations saisonnières moyennes comprise entre 1 mm et 4 mm par saison (60 à 250 mm en 63 ans) sur la période 1950-2013.

1.4.2 Prévisions climatiques

a) Prévisions climatiques à l'échelle mondiale

Selon le dernier rapport du GIEC, la température reste la première variable qui caractérise le changement à venir à l'échelle planétaire et pour cela on pourrait s'attendre à une augmentation des températures dans les prochaines décennies comprise entre 0,3 °C et 4,8 °C selon les scénarios (IPCC, 2013).

La figure 1.6 présente les résultats de simulations de plus de 35 modèles climatiques concernant la température moyenne annuelle pour la période 2081-2100 relativement à la période 1986-2005. De manière générale, ce réchauffement sera nettement plus fort sur les continents que sur les océans (Quintana Seguí, 2008). Il pourrait ainsi grimper jusqu'à 10 °C notamment en Arctique (dans le cas du scénario RCP 8.5). On remarque que ce réchauffement de la basse troposphère est plus marqué aux hautes latitudes de l'hémisphère nord qu'aux basses latitudes et aussi plus fort en altitude dans la troposphère tropicale.

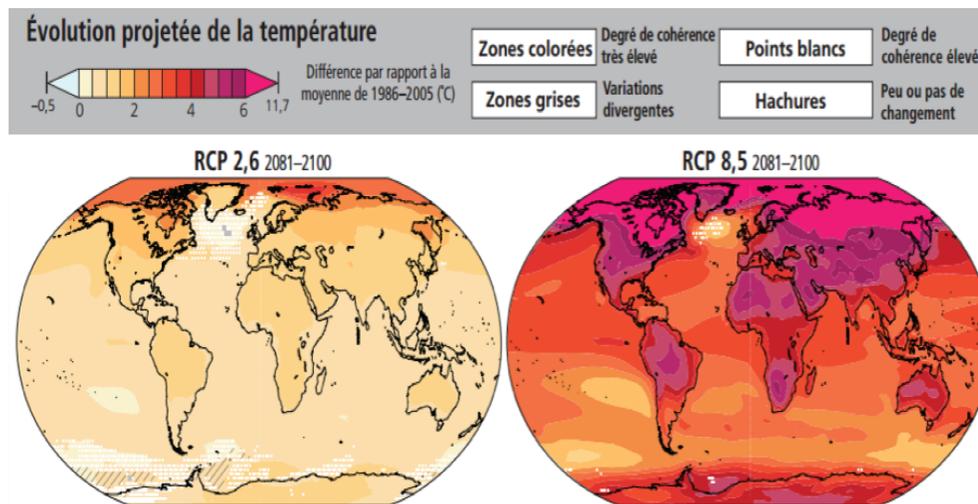


FIGURE 1.6 : Projections de la moyenne multi-modèles CMIP5 des changements de la température moyenne annuelle pour la période 2081-2100 selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5, par rapport à la période 1986-2005. (IPCC, 2013)

Concernant les changements de précipitations, les résultats de simulations montrent qu'ils ne seront pas uniformes comme illustrés dans la figure 1.7. Toutefois, dans certaines régions le contraste de précipitation accroîtra fortement (ex. certaines hautes latitudes et dans certaines parties des tropiques notamment au niveau des océans Indien et Pacifique). Tandis que dans d'autres régions déjà sujettes au stress hydrique, le contraste de précipitation diminuera (ex. dans certaines zones subtropicales et aux

zones de basses et moyennes latitudes) (Quintana Seguí, 2008).

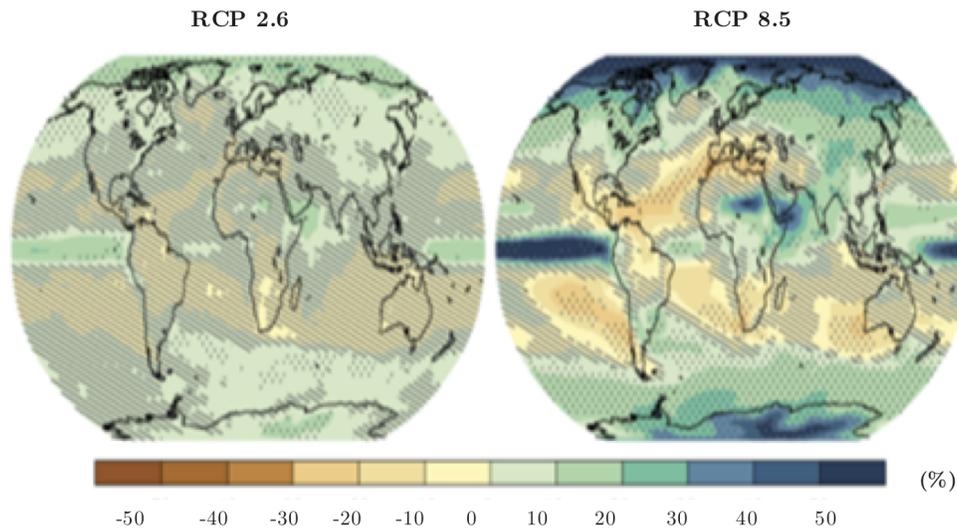


FIGURE 1.7 : Prévisions d'évolution des précipitations moyennes pour la période 2081-2100 selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5, par rapport à la période 1986-2005. (IPCC, 2013)

En termes de changements d'évapotranspiration, les études scientifiques suggèrent une augmentation évidemment plus importante sur les continents surtout aux hautes latitudes. Ce qui s'explique en partie par la diminution de l'humidité dans les premiers centimètres de sol. Les précipitations ne compensent pas l'augmentation de l'évapotranspiration aux moyennes latitudes induisant une diminution des écoulements dans ces régions. Dans l'atmosphère, les changements d'humidité spécifique sont significatifs vers une hausse et les changements d'humidité relative projetés sont plus contrastés mais restent très faibles sur l'ensemble du globe (Magand, 2014).

En général, ces changements se traduiront par une consommation accrue d'eau, par l'évapotranspiration, et probablement l'interception. Ceux-ci affecteront l'équilibre du cycle hydrologique, c'est-à-dire l'eau de surface et la répartition des précipitations entre l'évapotranspiration, le ruissellement et l'écoulement des eaux souterraines.

b) Prévisions climatiques au Maroc

Le rapport de la 3^{ème} communication nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) récemment publiée par le MEMEE prévoit une augmentation des températures moyennes annuelles de l'ordre de 1 °C à 1,5 °C pour les périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100 par rapport à la période de référence 1986-2005 (figure 1.8). Ce résultat concorde avec les travaux établis par Trambly et al. (2013) qui soupçonnent que les températures augmenteraient de 4 °C à 5 °C dans les régions méditerranéennes pour la période 2041-2062 par rapport à la période de référence 1984-2010. Aoubouazza and Rajel (2013) estiment une augmentation d'environ 1,7 °C à 2,6 °C en 2050 par rapport à la période de référence 1960-2004. Filahi et al. (2017) prévoient une augmentation de 2 °C à 3 °C en 2036-2065 par rapport à la période de référence 1975-2004 (sous le scénario RCP8.5) et que le réchauffement le plus important serait observé dans les régions de l'est du Maroc.

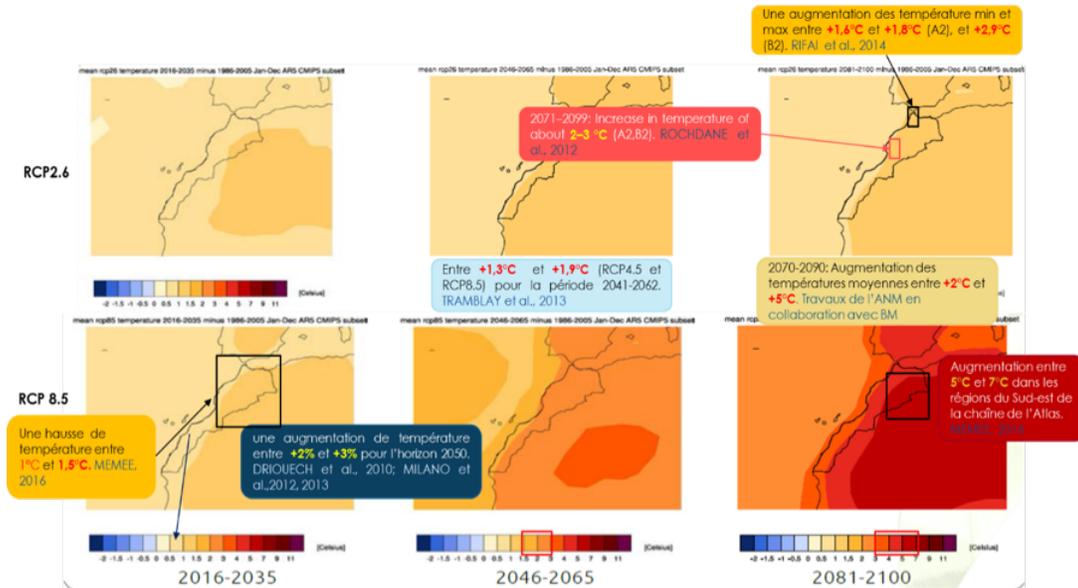


FIGURE 1.8 : Variations des températures moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario optimiste RCP 2.6 et Scénario pessimiste RCP 8.5). (MEMEE, 2016)

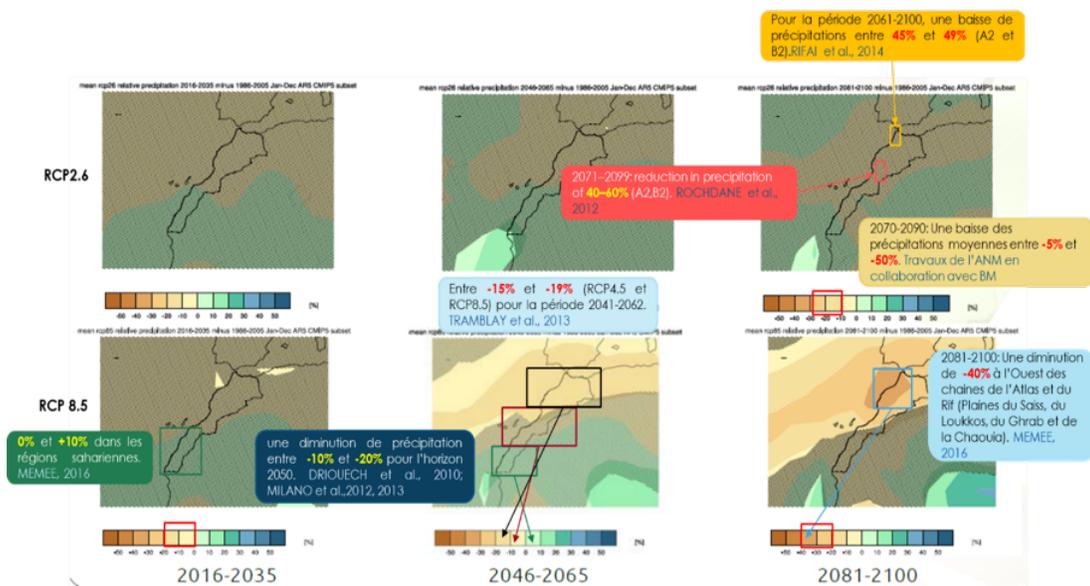


FIGURE 1.9 : Variations des précipitations moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario optimiste RCP 2.6 et Scénario pessimiste RCP 8.5). (MEMEE, 2016)

En outre, des études antérieures ont prévenu une diminution des précipitations à l’horizon 2050. D’une part, [Aoubouazza and Rajel \(2013\)](#) prévoient une tendance de baisse d’environ 15% à 22% dans la partie nord du Maroc et entre 9 % et 16% dans le sud en 2050 par rapport à la période de référence 1960-2004. D’autre part, le rapport du MEMEE prévoit une variation en moyenne entre -20% à 0% à l’échelle nationale, à l’exception des régions sahariennes (0% à +10%). Elle pourrait atteindre -40% sur l’ouest des chaînes de l’Atlas et du Rif (Plaines du Saïss, du Loukkos, du Ghrab et de la Chaouïa). MEMEE, 2016

Ghrab et de la Chaouia) à l'horizon de la fin du siècle (figure 1.9) (MEMEE, 2016). Filahi et al. (2017) constatent que les précipitations totales ont nettement diminué dans les différentes simulations, suivant un gradient nord-sud (i.e. variation de -15% à -25% sous le scénario RCP4.5).

1.5 Impact du changement climatique sur les ressources en eau

Les effets des variations climatiques sont multiples et touchent tous les systèmes naturels notamment le cycle hydrologique. Il ressort de plusieurs études scientifiques (Bates et al., 2008; Driouech, 2010; IPCC, 2013), que ce cycle de l'eau a également subi dans le passé divers impacts dûs à ce changement. Il en subit en ce moment du fait de la diminution des précipitations conjuguée à la hausse des températures et donc l'augmentation de l'évaporation. On s'attend encore dans le futur à un grand effet sur ce cycle de l'eau à cause du réchauffement climatique prédit par les scientifiques (IPCC, 2013).

Cela revient à dire que dans de nombreuses régions ces modifications affectent la qualité et la quantité des ressources en eau. Néanmoins, les ressources en eau sont influencées non seulement par le dérèglement climatique, mais aussi par les activités humaines dues à l'urbanisation et l'industrialisation rapide telles que : l'irrigation, la déforestation et le pompage abusif des eaux souterraines.

Afin d'évaluer ces impacts sur les ressources en eau, de nombreuses études ont recouru à la modélisation qui est devenue un outil indispensable face à la multitude et à la complexité des phénomènes mis en jeu. C'est également un moyen pour mobiliser l'ensemble des connaissances scientifiques relatives au climat.

1.5.1 État des lieux du ruissellement et débit fluvial

a) Eaux de surface à l'échelle mondiale

Les changements de ruissellement et d'infiltration par rapport au changement climatique sont d'autant plus difficiles à caractériser qu'ils dépendent aussi de l'anthropisation des bassins versants (Magand, 2014). D'une part, García-Ruiz et al. (2011) jugent que l'évaluation du rôle de la température dans l'évolution des ressources en eau est généralement plus difficile que celle des précipitations. Zhang et al. (2014) évaluent la sensibilité des eaux de ruissellement au changement global de la température moyenne à l'aide d'expériences climatiques archivées dans le modèle CMIP5 et par rapport aux résultats de CMIP3. Les résultats de ces travaux montrent que la sensibilité des eaux de ruissellement est relativement indépendante des scénarios d'émissions en CMIP5 et CMIP3.

Par conséquent, la figure 1.10 montre que la structure spatiale du changement est assez similaire à celle des précipitations avec une très forte augmentation en hautes latitudes et dans les zones tropicales humides (y compris les zones peuplées de l'est et du sud de l'Asie, l'Afrique de l'ouest et au sud de la péninsule d'Arabie) et une diminution sur la plupart des latitudes moyennes et tropicales sèches (ex. le pourtour méditerranéen, l'Afrique du sud, l'ouest des États-Unis, et le nord-est du Brésil). À l'échelle mondiale, le ruissellement augmenterait en moyenne de 2,9% par °C de réchauffement

en modèle CMIP5, par opposition à 1,9% en CMIP3 (Zhang et al., 2014).

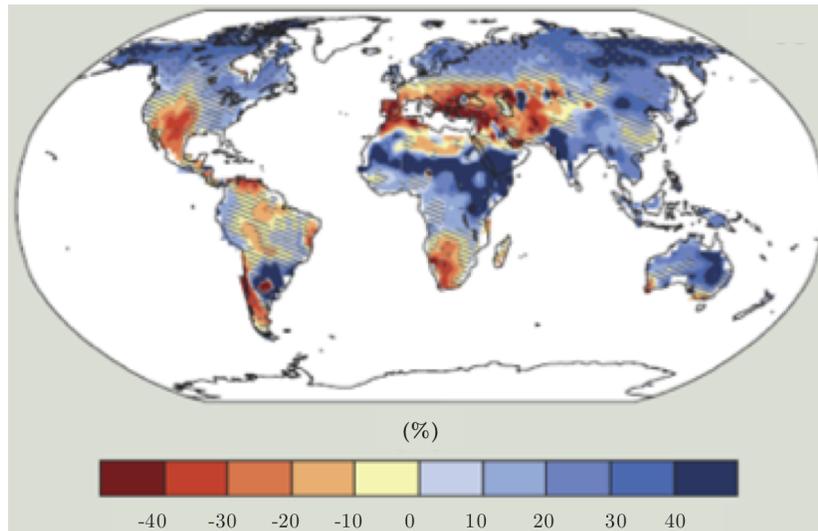


FIGURE 1.10 : Moyenne annuelle de l'écoulement prévu pour 2081–2100 par rapport à 1986–2005 selon le scénario RCP 8.5. (IPCC, 2013)

C'est ainsi que, dans le cas de la région Méditerranéenne, certaines études comme (Arnell, 2004; Bates et al., 2008; García-Ruiz et al., 2011; Milano et al., 2013; Naspoulos, 2012) ont confirmé une baisse des débits fluviaux méditerranéens lors des dernières décennies. Elles prévoient aussi que cette région sera soumise à une augmentation du risque des inondations, due fondamentalement à la hausse de l'intensité et la variabilité des précipitations (Kundzewicz et al., 2013). Pourtant, l'étude de Arnell and Lloyd-Hughes (2014) montre une diminution constante dans l'ampleur des inondations autour de la Méditerranée d'ici 2050, et une diminution des ressources en eau notamment pour les bassins du Maroc, de l'Algérie, du Proche-Orient et du sud de l'Espagne (Candela et al., 2016). García-Ruiz et al. (2011) constatent également une diminution progressive de l'écoulement moyen dans cette région, avec des variations importantes dans les caractéristiques du régime fluvial, y compris une baisse dans les débits élevés de la fonte des neiges au printemps et une intensification des faibles débits en été.

b) Eaux de surface au Maroc

Au Maroc, l'effet du changement climatique se fait directement ressentir sur les ressources en eau avec une tendance significative à la baisse des ressources en eau de surface, comme il ressort des études nationales réalisées à ce jour :

- Milewski et al. (2019) évaluent l'impact des changements climatiques et anthropiques sur les ressources en eau du bassin versant du Souss, en combinant les données des satellites GRACE et TRMM (2002-2016), le modèle hydrologique SWAT (1979-2014), et les projections climatiques (IPCC AR5). Leurs résultats indiquent une diminution globale des précipitations prévues, de 5,1% en 2020 à 10,6% en 2050 et une augmentation de la température d'ici 2050 : 1,2 °C, ce qui entraîne une diminution du ruissellement (2020 : 6,8%, 2050 : 13,8%).
- Marchane et al. (2017) étudient les impacts possibles du changement climatique sur le ruissellement dans le bassin versant de Rheraya (225 km²), en employant un

ensemble de cinq modèles de climat régionaux Med-CORDEX et deux modèles de bilan hydrologique mensuel pour deux scénarios RCP 4.5 et 8.5, par rapport à la période 1989-2009. Pour la période 2049-2065, les deux scénarios indiquent une température plus élevée (1,4 à 2,6 °C) et une diminution des précipitations totales (22% à 31%). Leurs résultats montrent aussi une diminution significative du ruissellement en surface (19% à 63%, selon le scénario et le modèle hydrologique), principalement en raison d'une baisse importante des quantités de neige, liée à la réduction des précipitations et à la hausse des températures.

- [Tramblay et al. \(2014\)](#) quantifient la réponse hydrologique aux projections du changement climatique sur un bassin versant de 1800 km² (Makhazine situé dans le nord du Maroc). Les résultats ont été analysés selon un ensemble de six modèles climatiques à échelle régionale (RCM) de 25 km sous le scénario d'émission A1B et un modèle hydrologique GR4J. Pour la période projetée 2041–2068, ils prévoient une baisse des ressources en eau de surface allant de 9% à 54% au cours de la saison hivernale et printanière (de novembre à mai) en conséquence de la réduction des précipitations, ce qui concorde avec les travaux de [Milano et al. \(2013\)](#) à l'échelle méditerranéenne (en projetant une diminution comprise entre 30% et 50% à l'horizon 2050).
- [Boukrim et al. \(2012\)](#) analysent les données hydro-pluviométriques du bassin versant Ouergha pendant la période 1957-2008. L'étude indique une réduction des débits des oueds comprise entre 40,8% et 49,5% et constate que la moitié des précipitations a été évaporée et évapotranspirée.
- [Bouabid and Chafai Elalaoui \(2010\)](#) étudient la relation entre les écoulements de surface et les précipitations dans quatre sous bassins versants du Sebou au nord du Maroc en utilisant les modèles hydrologiques IHACRES et HEC-HMS. Les résultats indiquent une corrélation significative entre les écoulements et les précipitations.
- [Driouech \(2010\)](#) évalue l'effet du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant Moulouya, en utilisant le scénario d'émission A1B issu du modèle ARPEGE-climat, ainsi que le modèle hydrologique GR2M. À l'horizon 2050, les futures projections montrent une diminution des débits notamment en saison hivernale variant de 20% à 30% en réponse à une baisse des précipitations comprise entre 10% et 20% et une augmentation de l'Évapotranspiration Potentielle (ETP).

1.5.2 État des lieux des eaux souterraines

a) Eaux souterraines à l'échelle mondiale

En ce qui concerne les ressources en eau souterraine, le changement climatique devrait aussi avoir son impact de façon notable ([Taylor et al., 2012](#)). Comme déjà dit, la diminution des précipitations conjuguée à la hausse des températures et donc de l'évaporation, aura pour conséquence l'augmentation de l'assèchement des sols induisant ainsi une faible infiltration des eaux. En plus de la réduction du ruissellement, ceci pourrait entraîner une baisse de la recharge des nappes souterraines. Ce qui pourrait conduire ainsi à une baisse du débit de base provenant des eaux souterraines vers les cours d'eau et les sources. En parallèle, l'augmentation de la demande en eau et l'élévation du niveau marin amoindriraient les aquifères côtiers, en les exposant à une

intrusion ascendante d'eau salée. Dans d'autres régions où les précipitations accroîtraient, cela pourrait avoir d'autres effets. C'est le cas d'un site dans le Kenya du nord où une augmentation moyenne des précipitations de 111% se traduit par une hausse de la recharge des nappes de 60% (Portmann et al., 2013).

Bien que plusieurs études scientifiques aient traité les impacts du retrait des eaux souterraines ainsi que celui d'usages des terres, les effets des changements sur les eaux souterraines ont reçu moins d'attention (Taylor et al., 2012). D'ailleurs, les ressources en eaux souterraines sont liées au changement climatique à travers leur interaction directe avec les ressources en eau de surface, comme les lacs et les rivières, et indirectement par le processus de recharge. En outre, l'effet direct du changement climatique sur les ressources en eaux souterraines dépend de la variation du volume et la distribution de la recharge des nappes (Kumar, 2012).

Il est à noter que prédire comment ce dérèglement climatique affecte ces ressources reste difficile vu les incertitudes du climat futur.

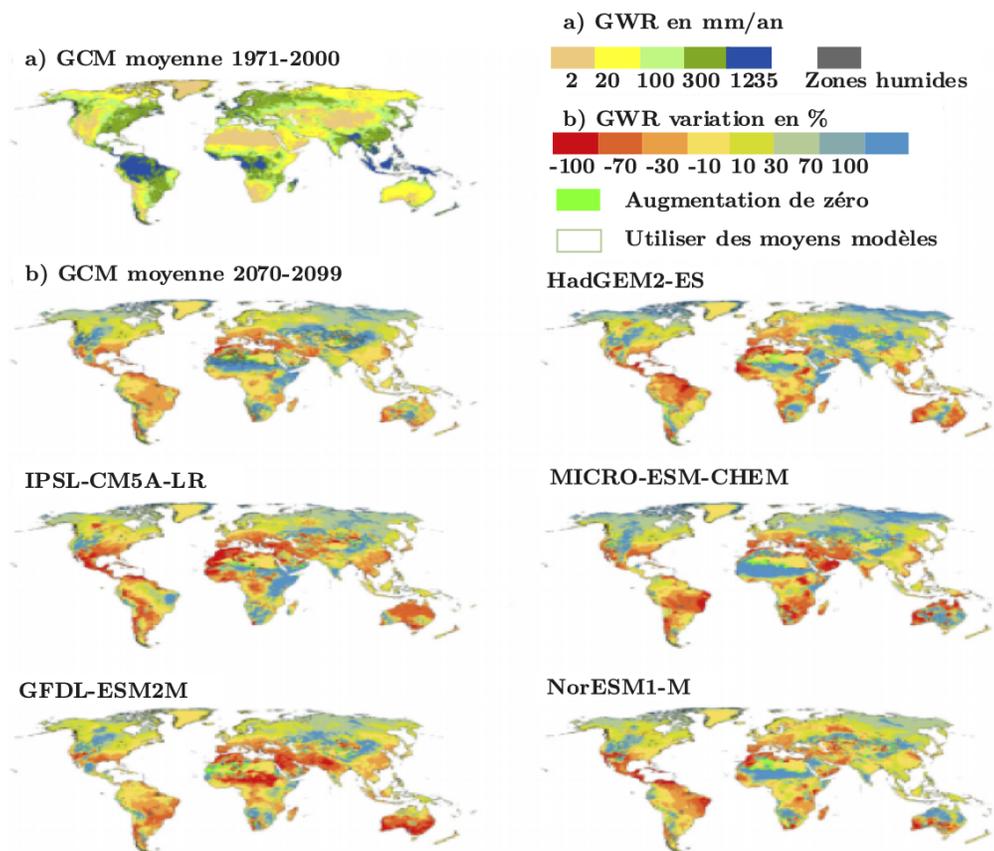


FIGURE 1.11 : Recharge moyenne des nappes sur la période 1971-2000 en mm/an et évolution à l'horizon 2099 pour le scénario RCP 8.5, simulée par le modèle WaterGAP. (Portmann et al., 2013)

Selon certaines projections de la figure 1.11, la recharge des nappes diminuerait de plus de 10% en 2080 par rapport à la période 1971-2000. De plus, pour chaque degré de hausse de température un supplément de 4% de la surface du globe est affecté par une réduction de plus de 30% et plus de 1% est affecté par une diminution significative de plus de 70% (Portmann et al., 2013). Selon Nassopoulos (2012), il atteindrait jusqu'à

70% en 2050 dans le nord-est du Brésil, le sud-ouest de l'Afrique et la rive sud de la mer méditerranée.

b) Eaux souterraines au Maroc

Un certain nombre d'études traitent l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de surface (sous-section 1.5.1). En revanche, peu d'études mettent l'accent sur les eaux souterraines. Citons :

- [El Asri et al. \(2019\)](#) étudient la plaine de Ghis-Nekkor en utilisant les résultats des modèles climatiques régionaux opérationnels du projet Cordex-Afrique pour évaluer les changements climatiques futurs (Période de référence : 1982-2012). Cette étude montre une tendance à la baisse des précipitations d'environ 18% et une augmentation de la température moyenne de 0,5 °C selon le scénario RCP 4.5. Les résultats indiquent aussi que, pour les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, une réduction de la recharge des nappes souterraines serait attendue d'environ 40% pour la période 2020-2080 en conséquence de la diminution projetée des précipitations, car le régime climatique serait également aride d'ici 2080.
- [El ibrahimi et al. \(2015\)](#) étudient l'impact des variations pluviométriques sur l'alimentation des réserves d'eaux souterraines des nappes phréatiques superficielles de la plaine de Saïss à travers l'analyse statistique des données pluviométriques et piézométriques. Cette analyse indique une réduction importante du niveau statique de la nappe dont la variation est 1,7 m/an au cours de la période 1978-2013.
- [Jilali \(2014\)](#) adopte un modèle numérique pour étudier la réponse du système des eaux souterraines à la variabilité climatique dans l'aquifère non confiné de Figuig. Les futures projections prévoient une diminution de la recharge ce qui implique une diminution du niveau des eaux souterraines comprise entre 0,07 et 6,2 mètres en 2099.
- [Aoubouazza and Rajel \(2013\)](#) constatent une réduction des niveaux piézométriques dans la plupart des aquifères : 40 m dans la région de Souss, 30 m dans le Haouz et 60 m dans la zone Saïss. Cette baisse résulterait du déséquilibre entre les prélèvements d'eau et la recharge des nappes de ces aquifères.
- [Moss et al. \(2010\)](#) proposent d'étudier l'évolution de données climatiques et piézométriques sur l'aquifère Chaouia. Par la suite, la quantification de l'impact de ces variabilités sur les eaux souterraines a été évaluée par un modèle numérique. Leurs simulations montrent que les ressources en eaux souterraines sont moins sensibles à la variation des précipitations.
- [Carneiro et al. \(2009\)](#) examinent l'impact du changement climatique sur l'aquifère, peu profond et non confiné du Saïdia en utilisant le modèle numérique dépendant de la densité FEMWATER. Les résultats prévoient une baisse des ressources en eau souterraine de -50% à -60% en raison de la décroissance significative de la recharge ainsi qu'une réduction au niveau de l'aquifère Triffa adjacent avec une élévation de la salinité.

1.5.3 Méthodologie de l'étude d'impact du changement climatique

Classiquement, la méthodologie adoptée pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'hydrologie spécialement les ressources en eau passe par une longue et complexe chaîne de modélisation. Laquelle est initiée par les climatologues modélisant le climat à l'échelle globale ensuite régionale et poursuivie par les hydrologues modélisant le cycle hydrologique et ses différents composants.

Les principales étapes présentées dans la figure 1.12 peuvent être résumées en quatre étapes comme suit :

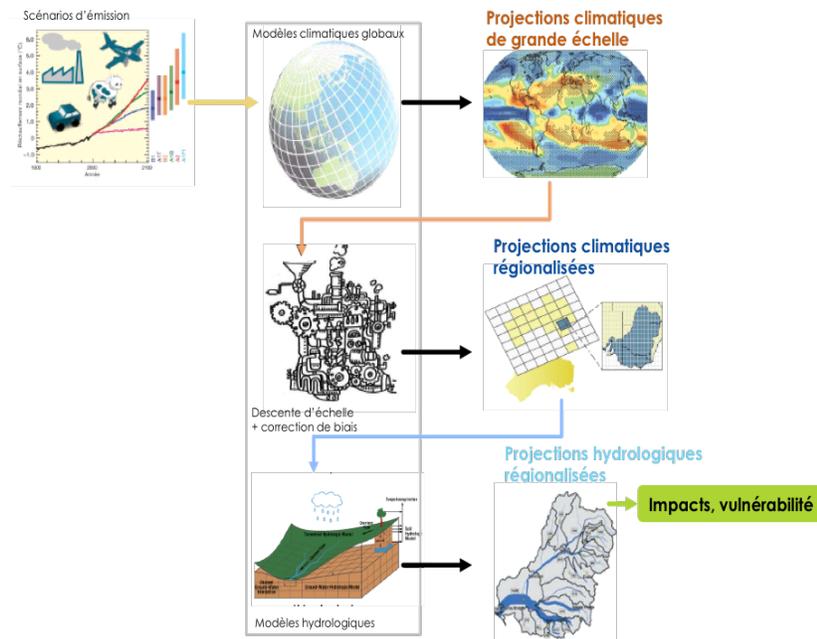


FIGURE 1.12 : Schéma des principales étapes d'une étude d'impact. (Ducharne et al., 2003)

- Nombreux forçages radiatifs correspondant à plusieurs scénarios d'émissions et profils d'évolution de GES pour le XXI^e siècle sont proposés par le GIEC à partir de perspectives socio-économiques de développement.
- L'intégration d'un ou des scénarios et/ou profils d'évolution en entrée d'un ou différents modèles de circulation générale (MCG) permet de simuler les conditions climatiques atmosphériques du futur à grande échelle c'est-à-dire qu'elles sont conçues pour fonctionner à une résolution grossière.
- La mise en échelle des sorties de MCG à l'aide des méthodes dites de descente d'échelle, visant à obtenir ces mêmes variables atmosphériques, mais à une échelle spatiale plus fine soit quelques centaines ou milliers de (km²). Ce qui permet ainsi d'introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les MCG, tout en corrigeant les défauts statistiques pouvant être issus de ce processus.
- La transformation des sorties de projections climatiques des modèles climatiques à échelle mondiale (GCM) ou des RCM (température, évapotranspiration potentielle, et précipitations) en débits, indicateurs du fonctionnement hydrologique

du système, en se basant sur un ou plusieurs modèles hydrologiques, préalablement calés sur une période observée. Ce qui permet alors d'estimer les impacts du changement climatique sur les bilans hydrologiques. C'est ce dernier maillon de cette chaîne qui nous intéresse dans notre étude.

En conclusion, dans ce chapitre, nous avons traité quelques généralités sur le concept de changement climatique et son impact sur les ressources en eau. De nombreuses études ont conclu qu'il y a une disparité dans les impacts des changements climatiques à l'échelle mondiale. La distribution des impacts variera en fonction de la capacité à réagir aux impacts et de la disponibilité des ressources nécessaires à cet effet selon les pays. En outre, plusieurs études ont montré que les évolutions des eaux de surface et des eaux souterraines au cours des dernières décennies au Maroc ont été fortement affectées par les variations des précipitations. À partir de 2040, les modèles climatiques prévoient d'importants changements climatiques au Maroc ainsi que dans le reste du monde, avec des impacts potentiels sur le cycle hydrologique.

Apport de la télédétection dans l'étude des paramètres physiques de la région de Loukkos et du Gharb au Nord-Ouest du Maroc

Dans ce deuxième chapitre, nous allons décrire le contexte général de notre région d'étude ; qui est regroupée en deux périmètres irrigués du Loukkos et du Gharb. Ensuite, nous présenterons l'utilité de la télédétection puis nous en mettrons l'accent sur comment acquérir et classifier les images obtenues par l'optique/radar. Nous présenterons aussi les paramètres physiques du terrain caractérisant notre région d'étude. Ainsi, nous entamerons les différentes phases de traitement de ces paramètres physiques du terrain. Puis, nous détecterons les variations rencontrées en passant d'une année à une autre, plus particulièrement pour le paramètre d'occupation du sol, afin de mieux comprendre le contexte de variation dans lequel les simulations vont se dérouler. Ensuite, nous discuterons l'amélioration de la carte d'occupation du sol. Enfin, nous présenterons l'application web "Web2TISat" qui vise à automatiser le processus de traitement des images satellitaires.

2.1 Description générale de la région d'étude

2.1.1 Situation géographique

Notre région d'étude est située au nord-ouest du Maroc et délimitée à l'ouest par l'océan atlantique (cf. figure 2.1). Elle se compose de deux périmètres irrigués. Cette région est considérée comme l'une des plus importantes régions agricoles du Maroc. Dans l'ensemble, elle s'étend sur une superficie de 8708,3 km², soit 1,95% du territoire marocain.

Le premier périmètre (Gharb) s'étend des longitudes $X_{min} = 710549$ à $X_{max} = 829526$ (mètres) et des latitudes $Y_{min} = 3775754$ à $Y_{max} = 3863693$ (mètres) du système de coordonnées WGS84/UTM Zone 29N. Il couvre une superficie de 6135,41 km² et se compose d'une zone côtière (cordon dunaire, dépressions inondées, dunes intérieures), de bordures continentales et de la plaine alluviale centrale du Sebou. Durant les épisodes pluvieux, des zones marécageuses peuvent apparaître au centre du périmètre.

Le deuxième périmètre (Loukkos) s'étend sur une superficie de 2572,89 km² et délimite dans le même système de coordonnées par les longitudes $X_{min}= 746683$ et $X_{max}= 820017$ et les latitudes $Y_{min}= 3852613$ et $Y_{max}= 3918176$. Il présente les caractéristiques des bassins d'oueds côtiers : un relief de collines marneuses entourant une plaine basse initialement marécageuse en quelques endroits.

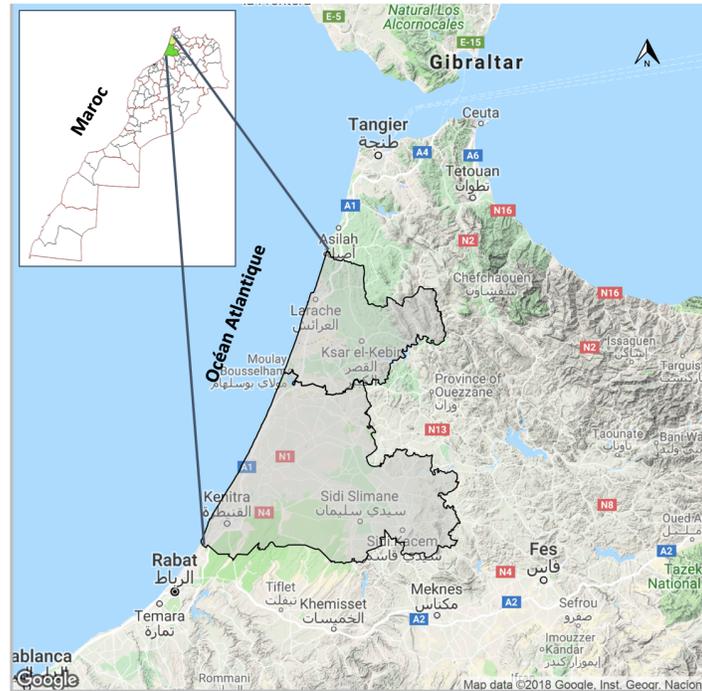


FIGURE 2.1 : Localisation géographique des périmètres du Loukkos et du Gharb.

2.1.2 Contexte géologique

Sur le plan géologique, notre région d'étude se caractérise globalement par la succession des terrains de nature lithologique ci-dessous :

- D'abord, les terrains d'âge Miocène caractérisés par une transgression ayant donné naissance à des niveaux de base principalement gréseux, suivi de niveaux marneux. Cette période s'est traduite en général par un exhaussement responsable de la mise en place de nappes de charriage rifaines et pré-rifaines.
- Ensuite, des terrains d'âge Pliocène traduisant la naissance des sables et grès à la suite d'une sédimentation marine.
- Vient ensuite la série de dunes villafranchienne déposée au cours de la régression survenue après le Moghrebien. Cette série est caractérisée, dans la partie ouest, par une couverture en formation rouge argilo-sableuses (Hamri), et dans la partie Est par une couverture en formation caillouteuse à ciment argilo-sableux.
- Enfin, les terrains au cours du Quaternaire récent caractérisés par une succession de dépôts marins transgressifs et de dépôts continentaux présentant généralement des affleurements très discontinus. Cette phase est l'origine de la morphologie actuelle, notamment en ce qui concerne la succession de vallées parallèles à la côte Atlantique.

2.1.3 Contexte hydrologique

Les eaux superficielles représentent l'essentiel des ressources en eau de notre région d'étude. Dans cette sous-section, nous décrivons le réseau hydrologique de chaque périmètre (figure 2.2).

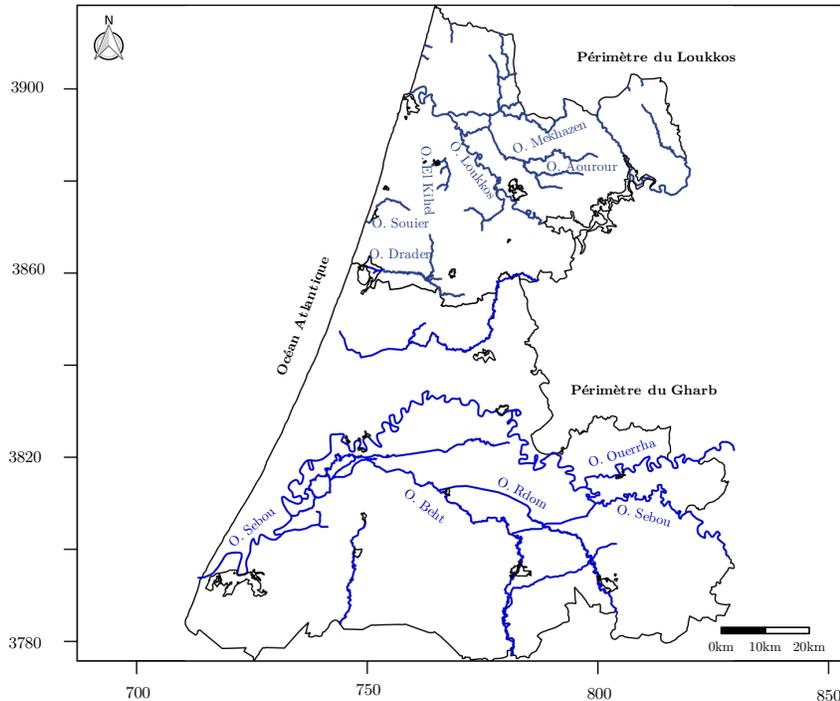


FIGURE 2.2 : Ressource en eau de surface des périmètres du Loukkos et du Gharb.

2.1.3.1 Ressource en eau de surface du périmètre du Gharb

Le périmètre du Gharb est traversé par le Sebou qui est l'oued le plus abondant du Maroc ainsi que par ses principaux affluents. Les apports annuels générés par ces cours d'eau sont de l'ordre de six milliards de m^3 soit environ 27% du potentiel hydraulique national mobilisable (AT-PMGI, 2015).

- L'Oued Sebou, avec une longueur totale de 614 km depuis sa source, intercepte plusieurs affluents dont les plus importants sont les oueds Inaouène, Lébène et surtout Ouergha sur la rive droite et les oueds Rdom et Beht sur la rive gauche. Le bassin du Sebou s'étend sur une superficie de 40.000 km^2 .
- L'Oued Rdom affluent de l'Oued Beht, lui-même affluent du Sebou. Il draine un bassin versant d'une superficie de 1796 km^2 .

Ce périmètre se caractérise aussi par la présence de deux cordons dunaires qui longent l'Atlantique, séparés par une dépression jouant le rôle de drain des eaux de surface et des nappes supérieures et ceci dans la zone côtière. Les plus significatives de ces dépressions constituent des zones protégées (en raison des oiseaux protégés qu'elles abritent) : lagune de la Merja Zerga située juste au Nord du bassin et lac de Sidi Boughaba près de Mahdia.

Afin de régulariser les débits des oueds du Gharb et limiter par conséquent les risques d'inondation, quelques barrages furent aménagés (AT-PMGI, 2015) :

- Barrage El Kansera : régularise en partie Oued Beht avec une capacité de 270 millions de m^3 /an.
- Complexe Sebou (Barrages : Idriss 1^{er}, Allal Al Fassi et Garde Sebou) : permet de régulariser un volume de 1300 millions de m^3 /an.
- Barrage Al Wahda (M'Jaara) : sur Oued Ouergha, est d'une capacité de 3,8 milliards de m^3 /an et régularise 1,7 milliards de m^3 /an.

2.1.3.2 Ressource en eau de surface du périmètre du Loukkos

Le périmètre du Loukkos est principalement irrigué à partir des ressources en eau du bassin versant de l'Oued Loukkos. Ce dernier draine une partie des versants ouest et sud-ouest des massifs du Rif et se jette dans l'Océan Atlantique. Son réseau hydrographique est comme suit (Es Saouini, 2015; Ormval, 2009) :

- L'Oued Loukkos proprement dit drainant une superficie de 2100 km^2 .
- L'Oued Aourour qui draine la partie centrale sur une superficie de 200 km^2 .
- L'Oued Makhazine draine une surface de 880 km^2 . Il reçoit les eaux des Oueds Teffaha et Khoujid avant son entrée dans la plaine.
- L'Oued Drader débouche dans la lagune de Merja Zerga.

Les principaux barrages sont (Pravema, 2012) :

- Barrage Oued El Makhazine : constitue la principale infrastructure de régulation du bassin avec près de 40.000 hectares de terres irriguées. Ce barrage a une capacité de l'ordre de 699,4 Mm^3 .
- Barrage Dar Khrofa : est d'une capacité de 480 Mm^3 . Il permettra de régulariser 140 Mm^3 par an et assurera l'irrigation de plus de 21.000 hectares des terres agricoles de ce périmètre.
- Barrage de garde du Loukkos : situé sur le tronçon final de l'estuaire du fleuve ; il permet en conséquence de stopper l'intrusion de l'eau de mer. Il assure le niveau de l'eau nécessaire à de bonnes conditions de pompage aux fins d'irrigation. Il a une capacité de 1,6 Mm^3 .

2.1.4 Contexte hydrogéologique

Les ressources en eaux souterraines constituent une partie importante du patrimoine hydraulique des deux périmètres. La figure 2.3 montre la répartition de ces nappes. Nous mentionnons que pour les nappes du Gharb, nous les avons digitalisé en nous basant sur des cartes de l'ORMVAG de 1997. Cependant pour Loukkos, nous avons estimé les limites des nappes.

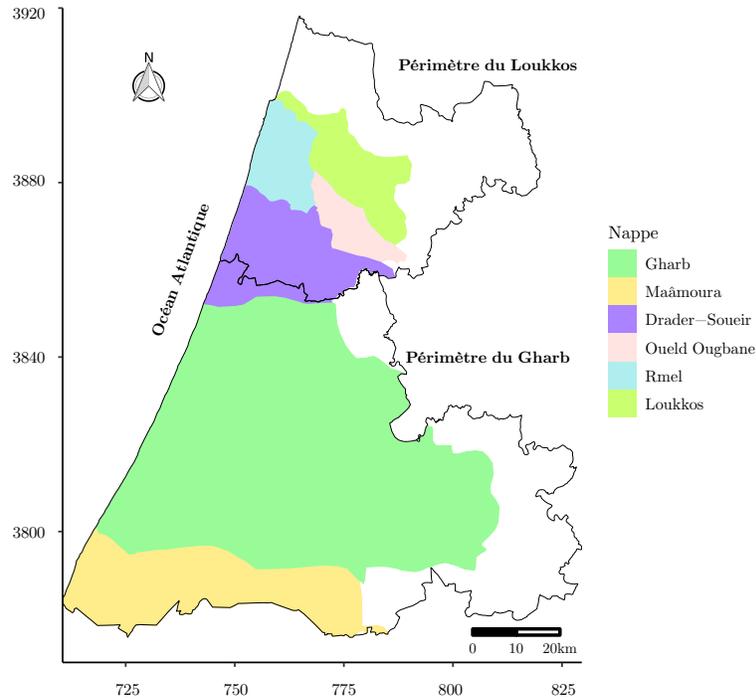


FIGURE 2.3 : Ressource en eau souterraine des périmètres du Loukkos et du Gharb.

2.1.4.1 Ressource en eau souterraine du périmètre du Gharb

Le périmètre du Gharb est subdivisé en trois nappes qui représentent 20% environ du potentiel hydraulique national (AT-PMGI, 2015).

- La nappe du Gharb s'étend sur une superficie d'environ 4000 km². Elle est située dans la partie centrale de la région et comprend deux systèmes aquifères superposés : la nappe profonde qui circule dans des sédiments sablo-argileux et la nappe superficielle circulant dans des alluvions argileuses et limoneuses, elle est de moindre importance. La nappe profonde a de bonnes caractéristiques hydrodynamiques : ses perméabilités varient entre 10^{-4} et $6 \cdot 10^{-3}$ m/s et ses transmissivités sont comprises entre $3 \cdot 10^{-4}$ et $1,5 \cdot 10^{-2}$ m²/s (Amharref et al., 2007).
- La nappe de Maâmoura : s'agit d'une nappe moyenne avec laquelle il y a des échanges d'eau avec la nappe du Gharb. Elle est située au sud de la province de Kénitra et constitue la principale ressource en eau de la région. Elle s'étend sur une superficie de 390 km et sa profondeur varie entre 5 et 30 m. Sa perméabilité est de $3 \cdot 10^{-4}$ m/s, sa transmissivité de 10^{-2} m²/s et son coefficient d'emménagement compris entre 10^{-3} et $3,5 \cdot 10^{-2}$ (Lepoutre and Combes, 2018).
- La nappe du Drader-Soueir : est une nappe à cheval entre les deux périmètres du Gharb et Loukkos. Pour plus d'informations, voir sous-section 2.1.4.2.

2.1.4.2 Ressource en eau souterraine du périmètre du Loukkos

Le périmètre du Loukkos est limité au nord et à l'est par des formations rifaines, au sud par des marnes bleues et à l'ouest par l'Océan Atlantique. Il est subdivisé en quatre principaux aquifères adjacents suivants (Ormval, 2009) :

- La nappe alluviale d'Oued Loukkos : s'étend le long de l'oued Loukkos sur une superficie d'environ 200 km². Elle circule dans les alluvions plio-quadernaires constituées essentiellement de galets et de sables. La profondeur de l'eau est généralement faible, la réserve totale de la nappe est de 54 Mm³.
- La nappe libre de Rmel : constitue la réserve la plus importante en eau souterraine dans la partie nord-ouest du Maroc et s'étend sur une superficie de 245 km² avec un volume de 120 Mm³. Elle circule dans les grès coquilliers du Plio-Villafranchien et dans les sables dunaires du Quaternaire. L'épaisseur saturée de la nappe varie généralement entre 20 et 100 m et la profondeur de l'eau varie dans l'ensemble entre 5 et 20 m (Es Saouini, 2015). D'après Knitar et al. (2019), les perméabilités de cette nappe varient entre 5 10⁻⁶ m/s (ouest et sud) et 3,5 10⁻⁴ m/s au centre, ses transmissivités sont comprises entre 10⁻⁴ et 10⁻² m²/s, sa productivité est > 2 l/s (10 l/s Aouamra), son sens d'écoulement est du sud au nord-est et vers l'Océan Atlantique au nord-ouest.
- La nappe Oued Ougbane : s'étend sur une longueur de 16 km environ du nord-ouest au sud-est sur une superficie de l'ordre de 58 km². Elle circule dans les alluvions plio-quadernaires qui sont constituées essentiellement par des galets à intercalations marneuses. La réserve totale de la nappe est estimée à 33 Mm³. Ses perméabilités oscillent entre 5 et 6 10⁻⁵ m/s, ses transmissivités varient de 1,3 à 3 10⁻³ m/s (Nord), sa productivité entre 10 et 15 l/s, son sens d'écoulement est du sud-ouest au nord-est (Knitar et al., 2019).
- La nappe du Drader-Soueir : s'étend sur environ 600 km² entre le bassin du Sebou et le bassin hydrologique d'Oued Loukkos. Elle a une capacité de 111 Mm³. L'aquifère se compose de formations détritiques du plio-quadernaire de nature sableuse, gréseuse et calco-gréseuse. L'épaisseur de l'aquifère varie de quelques mètres à plus de 50 m.

2.2 Généralités sur la télédétection

En termes généraux, la télédétection est définie comme une technique permettant d'identifier, de classer et de déterminer des objets, ainsi que d'obtenir des informations sur leurs propriétés physiques grâce à l'analyse des données sur les objets collectées à l'aide de capteurs sans contact direct avec ceux-ci. En termes plus appropriés à nos besoins, la télédétection est une technologie d'échantillonnage des rayonnements électromagnétiques réfléchis et émis (EM) provenant des écosystèmes terrestres et aquatiques de la Terre et de l'atmosphère. Cela se fait généralement en enregistrant des images d'avions et de satellites pour aider à identifier ou à mieux comprendre les caractéristiques de la surface de la Terre.

Le principe de la télédétection est illustré en figure 2.4. Dans tous les cas, les capteurs vont mesurer l'énergie radiative émise par la scène observée. Avec les capteurs actifs comme le Radar (détection et télémétrie radio) ou le Lidar (détection et la télémétrie de la lumière), une onde électromagnétique est envoyée et la mesure porte sur celle renvoyée en retour par la scène. Ils sont ainsi leur propre source de signal. à l'inverse, les capteurs passifs mesurent soit l'énergie radiative émise par la scène (capteurs thermiques dans l'infrarouge), soit l'énergie solaire réfléchie (capteurs multispectraux). Ils nécessitent ainsi une source de lumière externe.

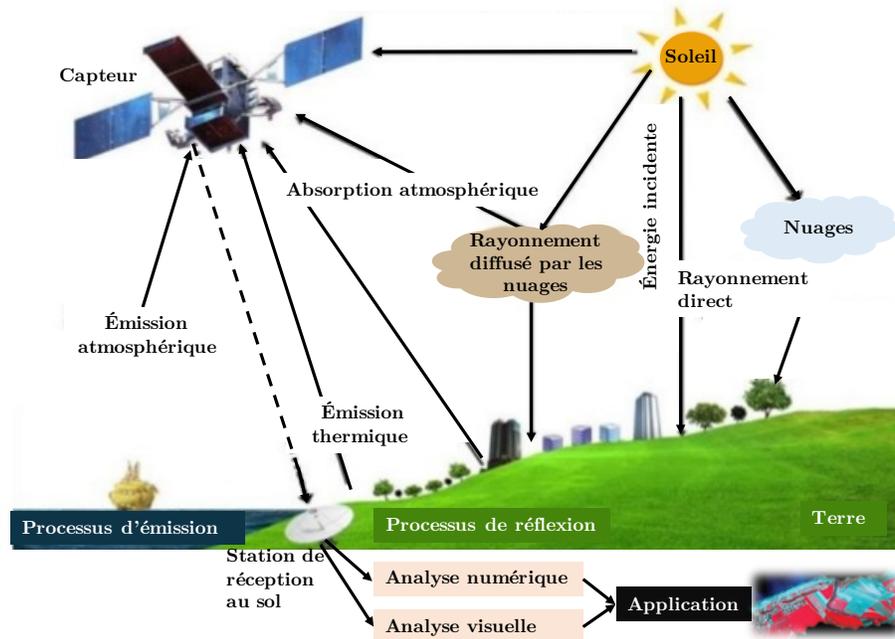


FIGURE 2.4 : Principe de la télédétection.

Intérêt de la télédétection : La télédétection par satellite est de plus en plus utilisée comme source d'information complémentaire aux réseaux de surveillance in situ et, dans de nombreux cas, elle est la seule possible. Les capteurs par satellite sont maintenant capables de mesurer directement et indirectement presque toutes les composantes du cycle hydrologique. Ces capteurs sont donc capables de fournir des informations cruciales à l'appui de la gestion de l'eau et du suivi de l'évolution des risques et de leurs impacts (Sheffield et al., 2018).

Il existe également un long héritage de récupérations par télédétection de la variation de l'état de la végétation et donc de la productivité et de la santé des plantes, avec des applications dans la surveillance et la planification agricoles. La large couverture (jusqu'à globale) des données satellitaires permet également d'évaluer les risques dans le contexte de la sécurité régionale en eau, l'exploration minière et des eaux souterraines, les études environnementales, l'utilisation des terres, les études forestières, etc.

2.2.1 Acquisition et traitement des images optique et radar

2.2.1.1 Acquisition

Pour une région donnée, les images satellitaires sont choisies selon le thème d'étude et peuvent être acquises soit gratuitement ou en les payant. Les informations contenues dans une image dépendent de plusieurs critères notamment le satellite ayant pris l'information, l'objet sur lequel l'information a été prise et les conditions au moment de la prise.

Comme mentionné ci-dessus, dans cette thèse nous utilisons les images issues des capteurs : Sentinel 2, Landsat, Sentinel 1, ASTER et SRTM. Les jeux de données Sentinel 1 et 2 sont disponibles sur plusieurs plates-formes : le scihub Copernicus (<https://sci->

hub.copernicus.eu/) au niveau européen, le scihub Peps (<https://peps.cnes.fr>) et le service en aval Theia (<https://www.theia-land.fr/>) au niveau national français. Les jeux de données Landsat, ASTER et SRTM sont disponibles sur la plateforme Usgs (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Des informations générales sur ces capteurs sont présentées en annexe A, section A.1.

2.2.1.2 Méthodes de prétraitement et traitement des images

Les méthodes de prétraitement des images radar peuvent être regroupées en deux types : réduction du bruit et correction d'image. Quels que soient les processus utilisés dans une méthode de détection de rivage, le processus commence naturellement par des étapes préliminaires visant à réduire le bruit et à améliorer la qualité de l'image. La qualité d'un rivage détecté dépend en partie de la qualité des méthodes de prétraitement appliquées. En utilisant une méthode de prétraitement mieux adaptée à l'ensemble des données, il est possible d'améliorer le résultat de la détection (Li et al., 2014; Toure et al., 2019). Pour une meilleure reconnaissance du terrain, il est essentiel de réduire le bruit tout en préservant les informations de bord. Pour cette raison, les filtres adaptatifs, tels que le filtre médian, sont largement utilisés. Ils conviennent particulièrement lorsque le bruit est composé de lignes fines ou de points isolés dispersés dans l'image. Des détails sur les phases de traitement des images radar sont disponibles dans (Frison and Lardeux, 2018) et les références y citées.

Dans le cas d'une analyse multispectrale, il est nécessaire d'effectuer des corrections radiométriques et géométriques. Pour minimiser les effets des conditions atmosphériques sur les valeurs radiométriques générées par interpolation lors de la correction géométrique, des corrections radiométriques doivent précéder les corrections géométriques (Li et al., 2014; Toure et al., 2019). Les corrections géométriques peuvent être de deux types : rectification et géoréférencement. La rectification est une correction d'image oblique afin d'obtenir une image verticale corrigée pour la totalité ou la plupart des contraintes inhérentes à la prise de vue et à la distorsion produite par l'environnement. Le géoréférencement est l'application d'un système de coordonnées à une image pour la mettre à l'échelle spatiale réelle.

2.2.2 Extraction des indices

Dans la littérature, différents indices ont été développés. Les indices radiométriques utilisés dans cette thèse sont récapitulés dans le tableau 2.1.

L'indice d'eau par différence normalisé (NDWI) (McFeeters, 1996), permet de détecter l'eau ou les zones bien arrosées/irriguées. L'indice du sol nu (BSI) (Rikimaru et al., 2002), permet de quantifier la composition minérale du sol et est utilisé pour améliorer la détection de végétation. L'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) (Rouse et al., 1974), est l'indice le plus utilisé en télédétection pour analyser de la végétation verte (Veloso et al., 2017). Cependant, il est sensible aux perturbations atmosphériques et signaux de la couverture du sol au-dessous de la végétation (Huete et al., 2002). L'indice de végétation avancé (AVI) (Rikimaru et al., 2002), est utilisé pour surveiller les variations des cultures et des forêts. Toutefois, il est sensible à la densité de végétation par rapport à NDVI. L'indice de végétation ajusté au sol optimisé (OSAVI) (Rondeaux et al., 1996), est utilisé dans les zones de végétation relativement clairsemée où le sol est visible à travers la canopée (Rondeaux et al., 1996).

Tableau 2.1 : Caractéristiques des indices radiométriques utilisés pour les images optiques.

Catégorie	Indice	Formule	Référence
Eau	NDWI	$NDWI = \frac{R_G - R_{NIR}}{R_G + R_{NIR}}$	(McFeeters, 1996)
Sol	BSI	$BSI = \frac{(R_{SWIR-1} + R_R) - (R_{NIR} + R_B)}{(R_{SWIR-1} + R_R) + (R_{NIR} + R_B)}$	(Rikimaru et al., 2002)
Végétation	AVI	$AVI = \sqrt[3]{(1 - R_R)(R_{NIR} - R_R)R_{NIR}}$	(Rikimaru et al., 2002)
	NDVI	$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_R}{R_{NIR} + R_R}$	(Rouse et al., 1974)
	OSAVI	$OSAVI = \frac{R_{NIR} - R_R}{R_{NIR} + R_R + 0,16}$	(Rondeaux et al., 1996)

R_B , R_G , R_R , R_{NIR} et $R_{(SWIR-1)}$ sont respectivement les valeurs de réflectance dans les bandes visible bleue, verte, rouge, proche infrarouge et infrarouge moyen.

2.2.3 Classification des images satellitaires

L'objectif de la classification est d'obtenir une représentation simplifiée des données d'un ensemble de régions homogènes et naturelles appelées classes.

2.2.3.1 Méthodes de classification des images

Traditionnellement, deux types de classification peuvent être distingués : les méthodes supervisées et non supervisées. Les résultats obtenus par le premier type produisent généralement une plus grande fiabilité, mais ils nécessitent toutefois davantage d'étapes de traitement pour la construction des données de formation. Pour plus de détails sur les méthodes de classification voir (Li et al., 2014; Toure et al., 2019) et les références y citées.

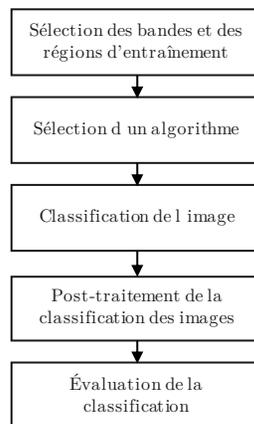


FIGURE 2.5 : Étapes de la classification supervisée.

La classification supervisée est également appelée classification de formation 'Training'. Il s'agit du processus d'identification d'autres pixels inconnus avec le pixel échantillon reconnu. Dans ce type de classification, un certain nombre de régions d'entraînement (ROI) sont sélectionnées pour chaque classe de l'image. En calculant cela, chaque pixel et chaque échantillon d'apprentissage sont comparés et les pixels les plus similaires sont

classés dans les mêmes classes d'échantillons selon des règles différentes. Le processus principal de la classification supervisée comprend les éléments décrites en figure 2.5.

En général, l'interprétation automatique des images de télédétection est basée sur l'analyse statistique telles que le maximum de vraisemblance et la classification k-means. Au cours des dernières années, des méthodes telles que le Réseau de Neurones Artificiels (ANN), la machine à vecteurs de support (SVM), la forêt aléatoire ou Random Forest (RF), l'algorithme génétique et la méthode orientée objet se sont développées rapidement avec certains fruits obtenus. Cependant, de manière générale, toutes ces méthodes nécessitent l'extraction manuelle des caractéristiques de l'image ou la conception des règles d'interprétation, entraînant ainsi de longs cycles de conception et limitant le potentiel d'amélioration de l'algorithme. En outre, la précision et l'efficacité de l'interprétation automatique des images de télédétection ne peuvent répondre aux besoins de la plupart des applications. Étant donné que l'application de télédétection dépend fortement du travail manuel, l'efficacité de la télédétection est fortement limitée par l'expérience et les compétences de l'opérateur.

Quelle que soit la méthode de classification, l'évaluation et la validation des cartes résultantes restent davantage un enjeu pour les chercheurs et les ingénieurs. Dans cette étude, la méthode RF a été choisie pour effectuer une classification basée sur les pixels. Nous présentons dans ce qui suit son principe.

Principe de l'algorithme de classification "forêt aléatoire" (RF)

La méthode de classification "forêt aléatoire" est un algorithme d'apprentissage automatique non paramétrique (Breiman, 2001). Il génère des arbres de décision en utilisant des sous-ensembles de données d'entraînement agrégées par *bootstrap*, autrement connu sous le nom de *bagging* (ensachage). Ce processus d'ensachage consiste à rééchantillonner l'ensemble d'entraînement d'origine avec remplacement, ce qui se traduit par une plus grande diversité d'arbres de décision, améliorant ainsi la stabilité et la précision du classificateur (Mellor et al., 2015). Lors de la construction d'arbres, les arbres de décision individuels sont construits en divisant un sous-ensemble de données d'entraînement (échantillon *bagging*) à chaque nœud de l'arbre de décision, en sous-ensembles de plus en plus homogènes, en utilisant des variables d'entrée (explicatives ou prédictives) tirées au hasard (figure 2.6). La variable prédictive de division des nœuds sélectionnée dans le sous-ensemble de variables est celle qui entraîne la plus grande augmentation de la pureté des données (variance ou coefficient de Gini) avant et après la division des nœuds de l'arbre (Gislason et al., 2006; Mellor et al., 2015). La pureté est ici définie comme l'homogénéité relative des données d'entraînement dans chaque sous-nœud après la division du nœud. La construction de l'arbre de décision se poursuit jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de gains dans la pureté des données d'entraînement. La classe prédite d'une observation est calculée sur la base du vote majoritaire (classification de variable continue) ou d'une moyenne (classification par catégorie) parmi tous les arbres de décision construits dans la forêt, et la fonction de discrimination est définie par l'équation suivante (Tian et al., 2016) :

$$H(x) = \operatorname{argmax}_Y \sum_{i=1}^k I(h_i(X, \theta_k) = Y) \quad (2.1)$$

où $I(\cdot)$ est la fonction indicatrice, $h(\cdot)$ est un arbre de décision individuel, Y est la variable de sortie, argmax_Y indique la valeur Y lors de la maximisation $\sum_{i=1}^k I(h_i(X, \theta_k) =$

Y), X est un modèle d'entrée, et θ_k sont des vecteurs aléatoires indépendants et identiquement distribués, et où chaque arbre est coulé un vote unitaire pour la classe la plus populaire à l'entrée.

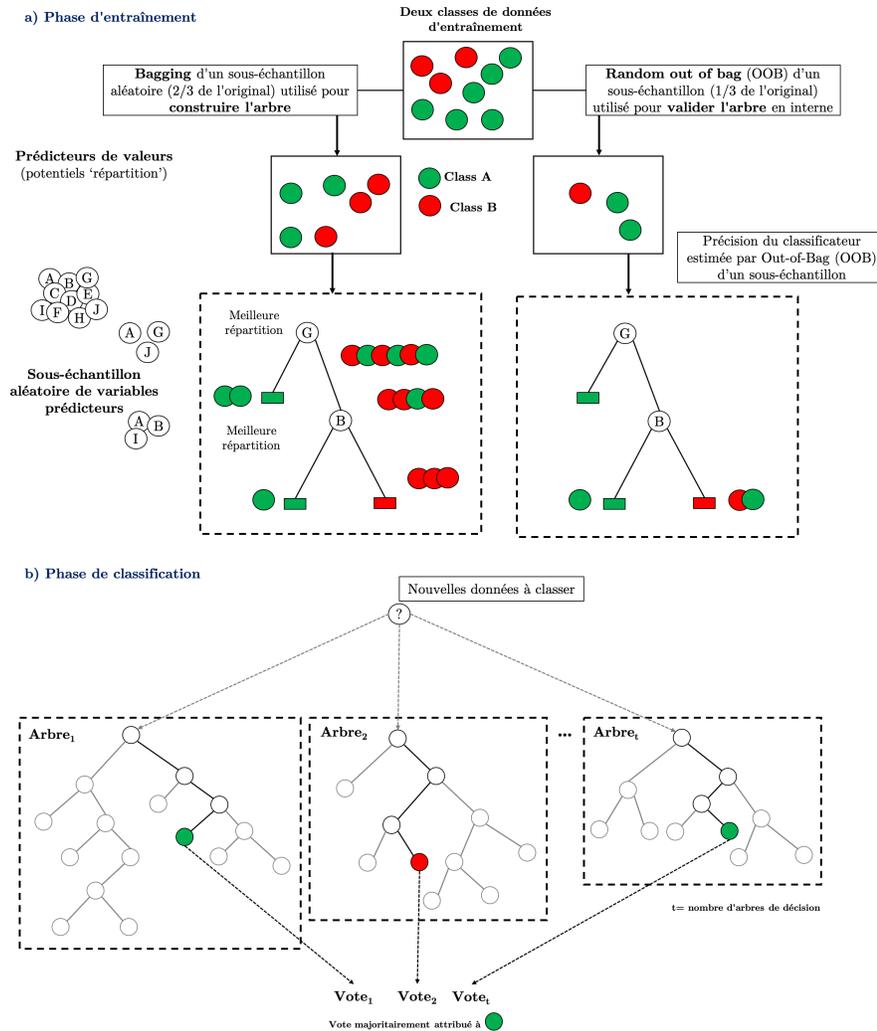


FIGURE 2.6 : Phases de a) entraînement et b) classification du classificateur Forêt aléatoire.

Pour chaque nouvelle série d'entraînements générée pour faire pousser un arbre, un tiers des échantillons est exclu de façon aléatoire, ce qu'on appelle les échantillons hors sac *Out-Of-Bag* (OOB). Les échantillons restants (dans le sac) sont utilisés pour construire l'arbre. Ces échantillons OOB peuvent être utilisés pour évaluer la performance du modèle (les précisions et les taux d'erreur moyennés de toutes les prédictions), et il a été prouvé que les estimations OOB sont non biaisées (Breiman, 2001; Gislason et al., 2006; Mellor et al., 2015).

Trois paramètres clés du modèle RF doivent être définis lors de la formation du classificateur aléatoire des forêts : *nodesize*, *ntree* et *Mtry*. La valeur de *nodesize* est par défaut de un, ce qui représente la taille minimale des nœuds terminaux de l'arbre ; *ntree* spécifie le nombre d'arbres de décision contenus dans une forêt aléatoire ; *Mtry* : spécifie

le nombre de variables prédictes (ou d'entrée) sélectionnées au hasard et utilisées à chaque fractionnement de l'arbre de décision.

Par rapport aux autres algorithmes d'apprentissage automatique et de classification traditionnels, les avantages de la forêt aléatoire ont été largement cités dans la littérature (Breiman, 2001; Gislason et al., 2006; Mellor et al., 2015; Tian et al., 2016). Parmi ses principaux avantages, on cite : sa capacité à exploiter les forces d'un groupe individuel de classificateurs tout en évitant les faiblesses d'un seul classificateur. Elle peut fonctionner efficacement sur de grandes bases de données (même contenant des valeurs aberrantes), traiter un grand nombre de variables d'entrée (y compris un mélange de données catégorielles et continues) et fournir une estimation interne non biaisée de l'erreur de généralisation et de l'importance des variables d'entrée (Breiman, 2001).

Dans ce qui suit, nous exposons la méthode employée afin d'évaluer la précision d'une classification donnée.

2.2.3.2 Méthode adoptée pour l'évaluation de la précision de la classification

a) Coefficient de Kappa

La statistique de Kappa peut constituer une mesure plus sophistiquée pour concorder les classificateurs et donner ainsi une meilleure discrimination entre classes que la précision globale. Il est généralement exprimé en pourcentage (%).

Le calcul de la statistique kappa k est le suivant :

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_i + *x_i + i)}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_i + *x_i + i)} \quad (2.2)$$

$N \sum_{i=1}^r x_{ii}$ signifie somme totale des échantillons corrects. $\sum_{i=1}^r (x_i + *x_i + i)$: signifie somme du total de la colonne totale de la ligne.

Monserud and Leemans (1992) suggèrent que les valeurs inférieures à 0,4 représentent un accord faible ou très médiocre, les valeurs de 0,4 à 0,55 représentent un accord équitable, les valeurs de 0,55 à 0,7 représentent un bon accord, les valeurs de 0,7 à 0,85 représentent un très bon accord et des valeurs supérieures. 0,85 représente un excellent accord entre les images. Dans de rares cas, Kappa peut être négatif (Monserud and Leemans, 1992). C'est un signe que les deux observateurs ont convenu moins que ce à quoi on pourrait s'attendre par hasard. Il est rare que nous obtenions un accord parfait.

b) Évaluation de l'exactitude

L'évaluation de l'exactitude de la technique supervisée est réalisée au moyen d'une matrice de confusion ou d'erreur. Une matrice de confusion contient des informations sur les classifications réelles et prédites effectuées par un système de classification. Le pixel qui a été classé dans l'image est comparé au même site sur le terrain. Le résultat d'une évaluation de la précision fournit généralement aux utilisateurs une précision globale de la carte et la précision de chaque classe de la carte. Le pourcentage d'exactitude globale (en anglais : Overall accuracy) est calculé via la formule suivante :

$$Pg = \frac{Ntc}{Nte} \times 100\% \quad (2.3)$$

avec Pg : précision globale ; Ntc : nombre total d'échantillons corrects ; et Nte : nombre total d'échantillons.

2.2.4 Méthodes de détection des changements/variations

La détection des changements par télédétection est le processus d'identification des différences d'état d'un objet ou d'un phénomène (Ban, 2016). Ce processus comprend l'observation et l'évaluation à des moments différents afin de documenter la progression spectrale et temporelle des phénomènes biophysiques et physiques.

Ces dernières années, plusieurs états de l'art (Hussain et al., 2013; Lu et al., 2004; Mishra et al., 2017; Panuju et al., 2020) ont été publiés sur ce sujet qui est toutefois complexe en raison de plusieurs facteurs tels que les incertitudes liées au phénomène mesuré. La détection des changements dans les images optiques peut être classée de différentes manières, comme les méthodes basées sur les pixels et les objets, les techniques supervisées et non supervisées, les approches basées sur les paires d'images et les séries temporelles,... etc. Hussain et al. (2013) ont différencié les méthodes de détection des changements en méthodes basées sur les pixels et sur les objets. Ensuite, ils les ont classées en plusieurs techniques, à savoir comparaison directe, transformation d'images, classification, apprentissage automatique, comparaison basée sur les SIG, analyse de mélange spectral, comparaison directe d'objets, analyse de changement d'objet multitemporel et techniques d'exploration de données. Chaque technique à son tour a été divisée en plusieurs classes. Par exemple, la comparaison directe est répartie en : a) différenciation des images qui est mesurée directement à partir des valeurs radiométriques du pixel ou sur les images extraites / dérivées / transformées telles que les indices de texture ou de végétation. b) rapport des images, dont l'ordre des images dans la division n'est pas important car les résultats des changements sont exprimés en ratios. c) et analyse de régression. Panuju et al. (2020) ont montré que la détection des changements peut générer des cartes de changements binaires, de types de changements, d'ampleur et de direction des changements, de probabilité de changements ou de trajectoires temporelles. Voir (Ban, 2016; Hussain et al., 2013; Mishra et al., 2017; Panuju et al., 2020) pour plus de détails sur ces méthodes de détection de changement.

Ici, nous nous intéressons principalement à la détection des changements de paires d'images. L'objectif de cette détection est de détecter les changements importants au niveau de chaque catégorie d'occupation du sol.

2.3 Paramètres physiques du terrain et apport de la télédétection

Le modèle 2CAFDYM employé dans le chapitre 4 utilise comme données d'entrée des paramètres physiques du terrain (PPT). Ces PPT sont constitués de trois paramètres de base à collecter (modèle numérique du terrain (MNT), type du sol et occupation du sol) à partir desquels sont déterminés d'autres paramètres.

Pour notre région d'étude, la restitution des images/cartes de ces trois paramètres (PPT) de base a nécessité diverses phases de traitement récapitulées dans la figure 2.7. Nous avons automatisé ces traitements via l'application web "Web2TISat", ses principales fonctionnalités sont présentées en section 2.4.

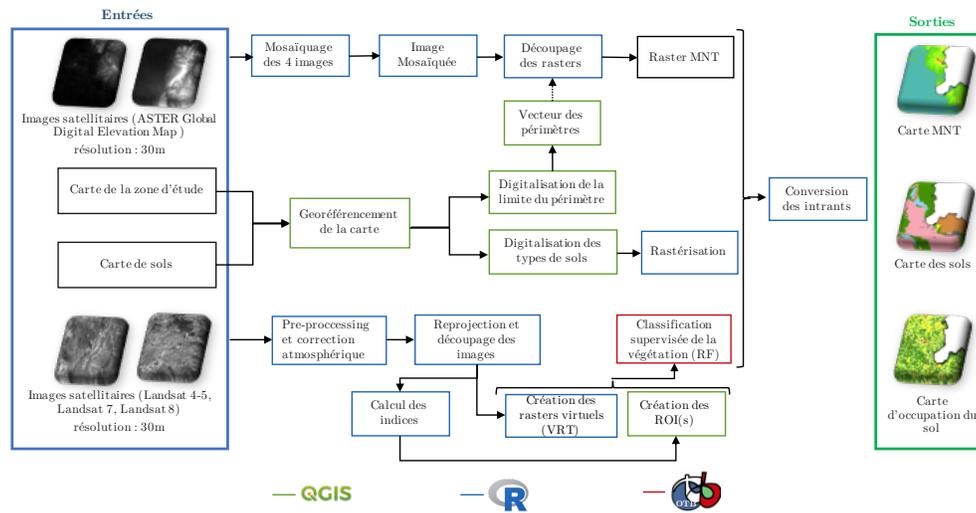


FIGURE 2.7 : Différentes étapes de traitement des paramètres physiques du terrain.

Ensuite, toutes les images de ces paramètres PPT générées sous format Geotiff, nous les avons ré-échantillonnée sous le logiciel R pour correspondre à la même résolution qui est de 30 m. Puis, nous les avons converties sous format image raster de type ASCII.

En ce qui concerne les données climatiques, nous avons structuré la région d'étude en polygone selon les critères de Voronoï ou Thiessen dont les centres/noyaux sont les stations météorologiques (figure 2.8).

Dans ce qui suit, certains résultats seront discutés par rapport à ces polygones avec leur *nom* (*site* suivi du *nom de la station*). Il s'avère ainsi nécessaire de donner un bref aperçu sur la répartition de ces polygones/stations. Pour plus d'informations sur les caractéristiques de ces stations voir chapitre 3 sous-section 3.3.1.

À mentionner que nous avons développé un script permettant d'extraire le nombre de pixels pour chaque classe des paramètres (PPT). Ceci nous a permis de calculer la superficie de chaque classe par rapport à la superficie totale de chaque périmètre.

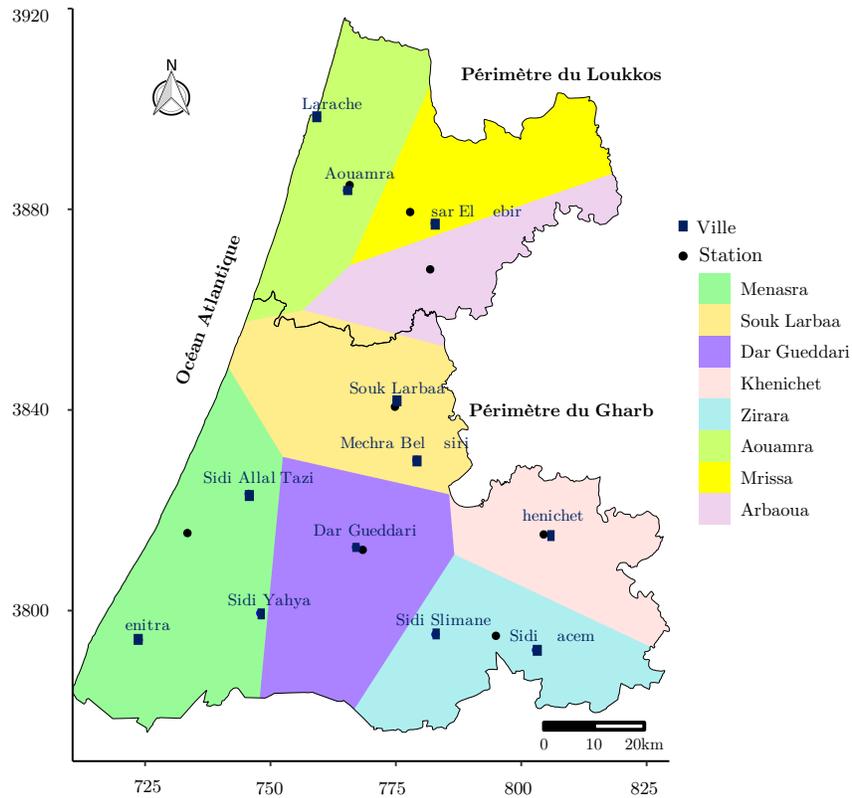


FIGURE 2.8 : Diagramme de Voronoi pour la région d'étude (Loukkos et Gharb).

2.3.1 Carte d'altitude

Les images utilisées pour le calcul de l'altitude ont été téléchargées à partir de la plateforme USGS EarthExplorer (Usgs, 2018). Nous avons considéré quatre images couvrant notre région d'étude prises par le satellite ASTER Global Digital Elevation Map avec une résolution de 30 m et acquises le 17 octobre 2011.

Nous avons mosaïqué ces quatre images à l'aide du logiciel Qgis (QGIS Development Team, 2017). Ensuite, l'image résultante a été projetée du système de projection World Geodetic System 1984 (WGS84) (EPSG : 4326) au système WGS84/UTM Zone 29 (EPSG : 32629). Finalement, nous l'avons découpée en région d'étude en générant ainsi un raster MNT. Chaque pixel de ce raster MNT contient une valeur précise de l'altitude variant entre 0 et 928 m. La figure 2.9 illustre les variations des altitudes regroupées en onze classes de valeurs.

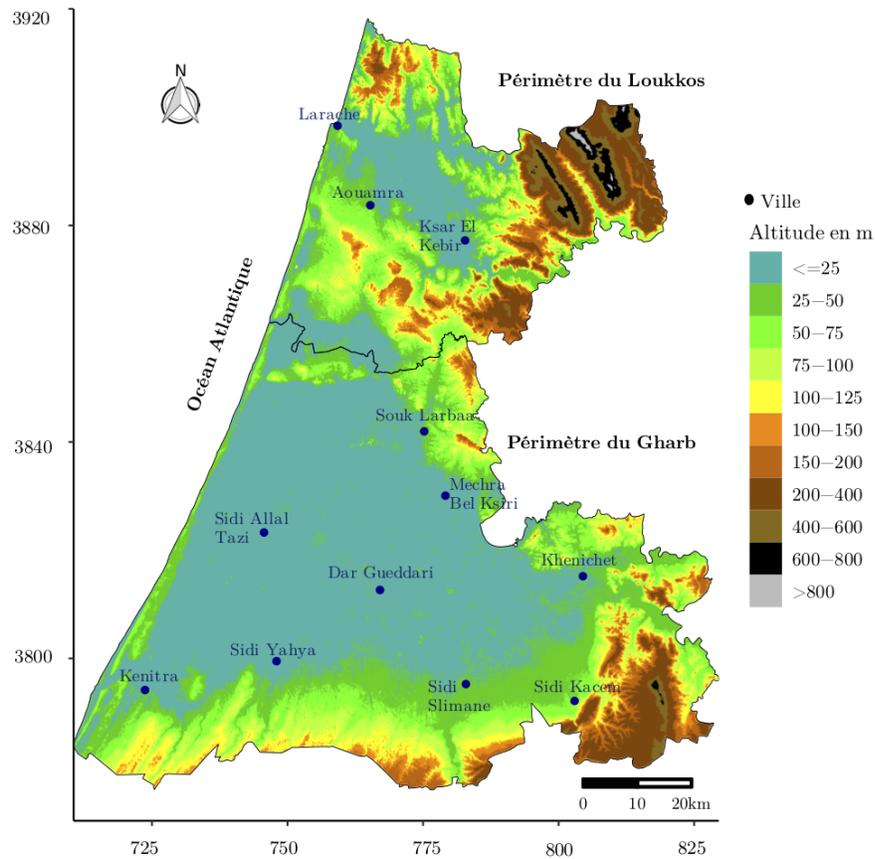


FIGURE 2.9 : Répartition des altitudes au niveau des périmètres du Loukkos et du Gharb.

La figure 2.10 illustre la superficie de chaque classe d'élévation. En outre, le pourcentage de la superficie de chaque classe d'élévation et leurs polygones/stations est montré dans la figure 2.11.

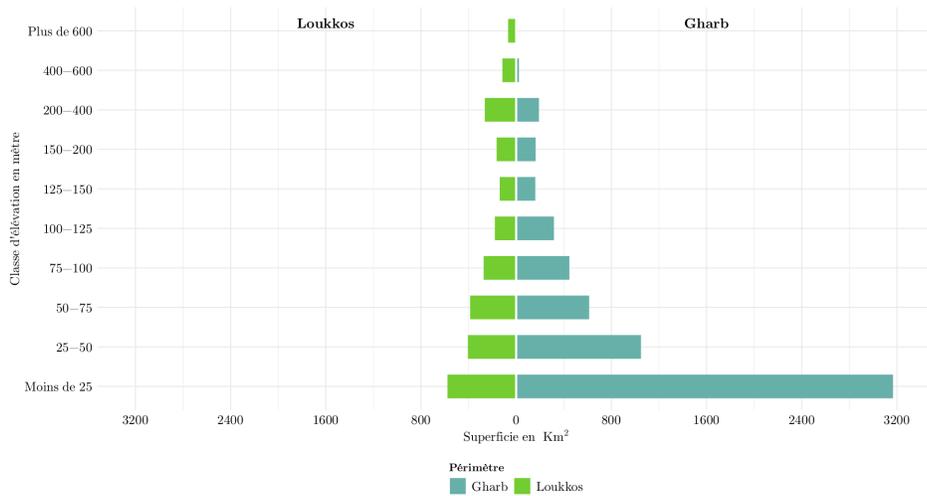


FIGURE 2.10 : Superficie par classe d'élévation des périmètres du Loukkos et du Gharb.

- Cas du périmètre Gharb :** nous remarquons que 85% de la superficie totale a une élévation inférieure à 100m. La classe ≤ 25 m occupe la part la plus importante avec 51,62% de la superficie totale. Ce qui donne un caractère topographique plat au périmètre du Gharb. Les pixels ayant une élévation supérieure à 400 m n'occupent que 0,43% de la superficie totale.
- Cas du périmètre Loukkos :** nous constatons que les pixels ayant des valeurs inférieures à 100 m occupent 63% de la superficie totale du périmètre. La classe ≤ 25 m représente 22,44% de la superficie totale alors que les deux autres classes (25-50 m et 50-75 m) ont un pourcentage similaire de l'ordre de 15%. La topographie du périmètre Loukkos est un peu plus accidentée que celle du périmètre du Gharb. Les pixels ayant une élévation supérieure à 400 m n'occupent que 7,14% de la superficie totale.

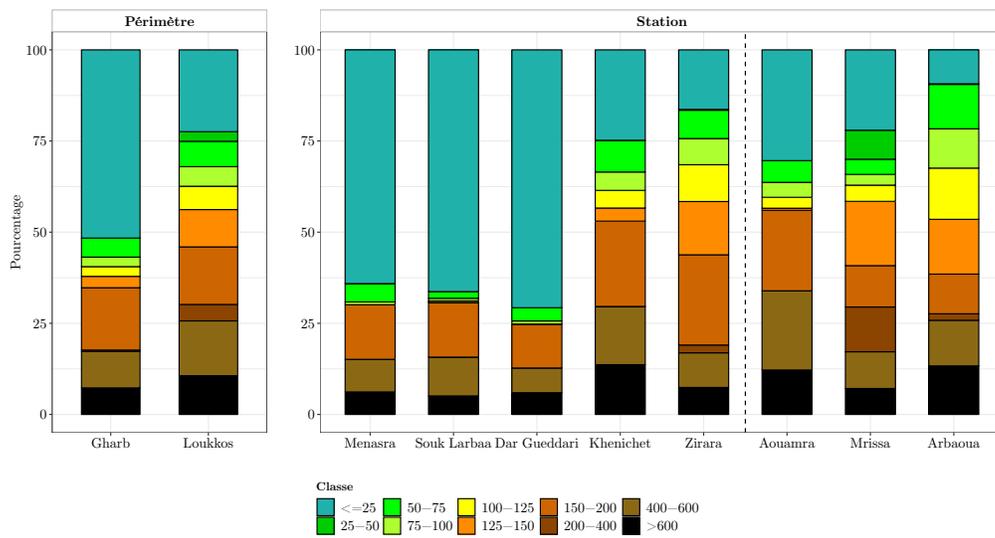


FIGURE 2.11 : Pourcentage de la superficie par classe d'élévation des périmètres du Loukkos et du Gharb et contrôlé par chaque station.

- Polygones/Stations du périmètre Gharb :** nous trouvons que pour trois polygones parmi cinq (Menasra, Souk Larbaa et Dar Gueddari) les pixels ayant une élévation inférieure ou égale à 25 m varient entre 64% et 71% de la superficie totale du polygone concerné. Alors que pour les deux autres polygones (Khenichet et Zirara), le pourcentage ne dépasse pas 25% de leur superficie totale. Ils sont caractérisés par des élévations supérieures à 100 m.
- Polygones/Stations du périmètre Loukkos :** les polygones du Loukkos diffèrent l'un de l'autre en termes du poids relatif d'élévation. Pour Aouamra, plus de 80% de sa superficie a une élévation inférieure à 100 m. Nous observons que 22% de la superficie de Mrissa est occupée par la classe ≤ 25 m suivie par les deux classes 200-400 m et 400-600 m soit un total de 29,91% de la superficie totale. Pour Arbaoua, 50% de sa superficie totale est occupée par les classes d'élévation suivantes : [200-400], [150-200], [75-100] et [50-75].

2.3.2 Cartes des sols et RFU_{max}

Les cartes des sols de la région d'étude ont été obtenues auprès de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb (ORMVAG) et l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Loukkos (ORMVAL). Nous avons scanné les cartes acquises, ensuite nous les avons géoréférencées pour passer aux différentes phases de traitement récapitulées dans la figure 2.7. Plus précisément, nous avons effectué une digitalisation de chaque type de sol. Les zones non définies ont été complétées par les types de sols les plus proches. Finalement, nous avons attribué les valeurs de la réserve facilement utilisable RFU_{max} à chaque type de sol en nous basant sur les travaux réalisés par (Amharref et al., 2007; Kili et al., 2008). Ces travaux ont estimé la RFU_{max} des différents types de sols par différentes méthodes dans le but d'estimer la recharge de la nappe phréatique du Gharb.

Les figures 2.12 et 2.13 montrent les cartes des sols et de la RFU_{max} de la région d'étude (allant de 20mm à 120mm). Huit types de sol sont alors mis en exergue, à savoir : les sols minéraux bruts, les sols calcimagnésiques, les sols à sesquioxydes (Rmel), les sols hydromorphes, les sols isohumiques, les sols peu évolués et les vertisols. Pour plus de détails sur ces types de sol, voir (Harbouze, 2009). Cette vaste gamme pédologique a un fort potentiel agricole ce qui met les deux périmètres (Loukkos et Gharb) parmi les plus grands périmètres agricoles du Maroc. La carte du Gharb date de 1970 et a une échelle de 1/100000. Elle représente huit classes de sol. Tandis que celle du Loukkos contient seulement cinq classes.

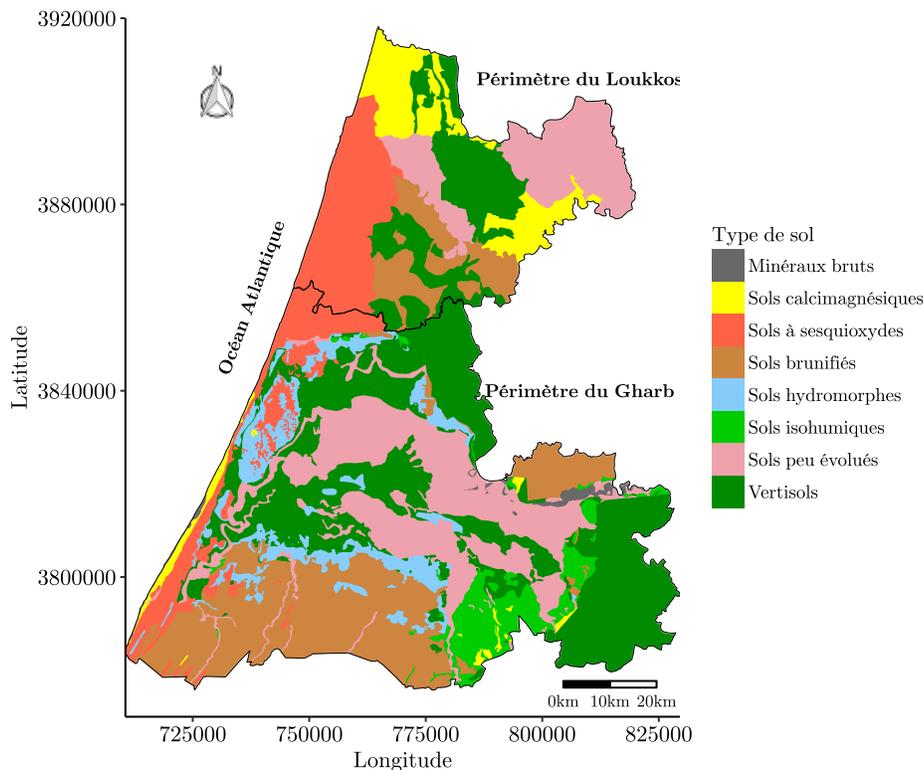


FIGURE 2.12 : Carte des sols des périmètres du Loukkos et du Gharb.

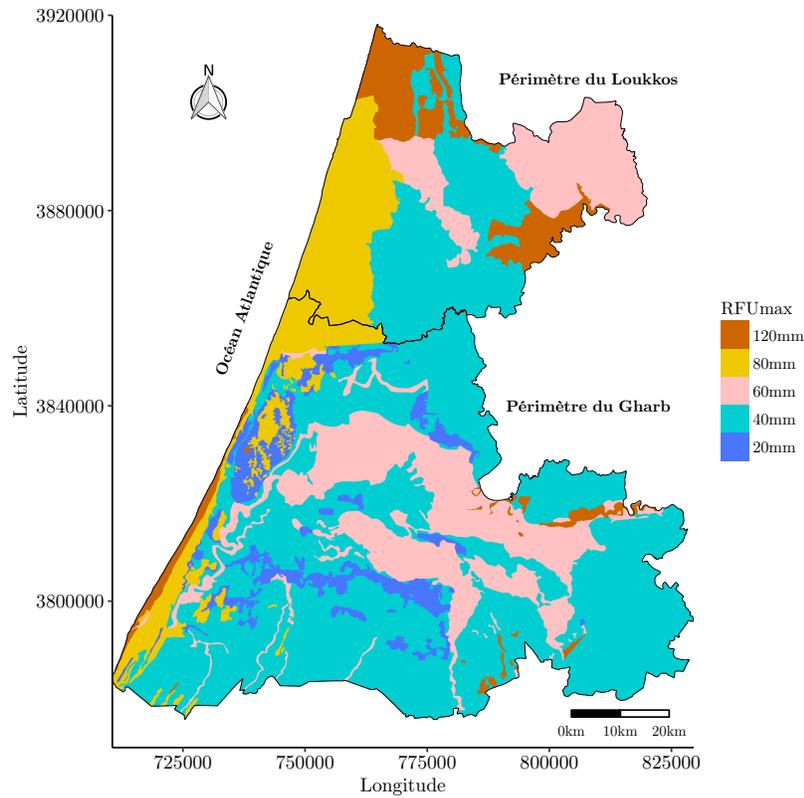


FIGURE 2.13 : Capacité de rétention en eau du sol (RFU_{max} estimée) des périmètres du Loukkos et du Gharb.

Les figures 2.14 et 2.15 illustrent respectivement la superficie de chaque type de sol et le pourcentage de la superficie de chaque classe de type de sol et leurs polygones/stations.

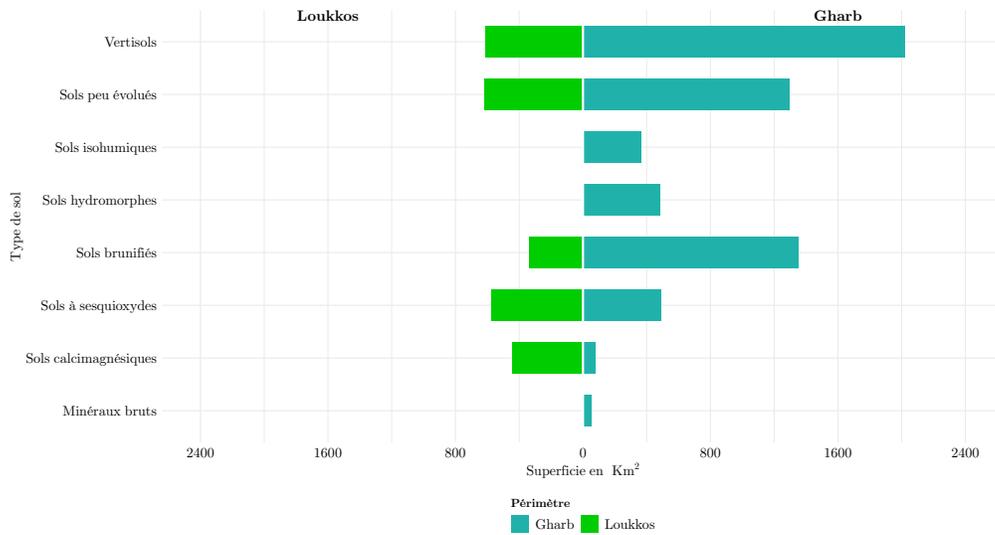


FIGURE 2.14 : Superficie par types de sol des périmètres du Loukkos et du Gharb.

- **Cas du périmètre Gharb :** les vertisols (appelés aussi tirs) sont les sols les plus dominants dans ce périmètre. Ils occupent 32,88% de la superficie totale du périmètre suivis par 22,05% pour les sols brunifiés, 21,13% pour les sols peu évolués, 7,94% pour les sols à sesquioxydes, 7,87% pour les sols hydromorphes, 5,97% pour les sols isohumiques, 1,27% pour les sols calcimagnésiques et 0,89% pour les minéraux bruts.
- **Cas du périmètre Loukkos :** les sols peu évolués et les vertisols s'étendent sur des surfaces comparables respectivement avec 23,99% et 23,67% de la superficie totale. Finalement, viennent les sols à sesquioxydes, les sols calcimagnésiques et les sols brunifiés avec 22,3%, 17,10% et 13,03% respectivement.

Pour les deux périmètres, nous constatons que l'importance relative des sols varie d'un polygone à l'autre.

- **Polygones/Stations du périmètre Gharb :** les vertisols sont les plus dominants dans Souk Larbaa, Khenichet et Zirara respectivement avec 48,43%, 42,46% et 38,78% de leur superficie totale. Tandis que les sols brunifiés occupent une importante superficie dans Menasra et Dar Gueddari avec 34,29 et 33,92% de leur superficie totale. Nous notons l'absence des sols à sesquioxydes dans Dar Gueddari, Khenichet et Zirara. Aussi, les sols calcimagnésiques ne se trouvent pas dans Souk Larbaa et Dar Gueddari. Les sols hydromorphes sont présents dans l'ensemble des polygones avec des valeurs variant entre 1,65% (Zirara) et 13,41% (Menasra), à l'exception de Khenichet. Pour tous les polygones, les minéraux bruts sont caractérisés par de faibles valeurs et ne dépassent pas 5%.
- **Polygones/Stations du périmètre Loukkos :** chaque polygone diffère de l'autre en terme de l'ordre de dominance des sols. Par exemple, les sols les plus dominants dans Aouamra, Mrissa et Arbaoua sont respectivement les sols à sesquioxydes (soit 53,66%), les sols peu évolués (soit 53,03%) et les sols calcimagnésiques (soit 34,56%).

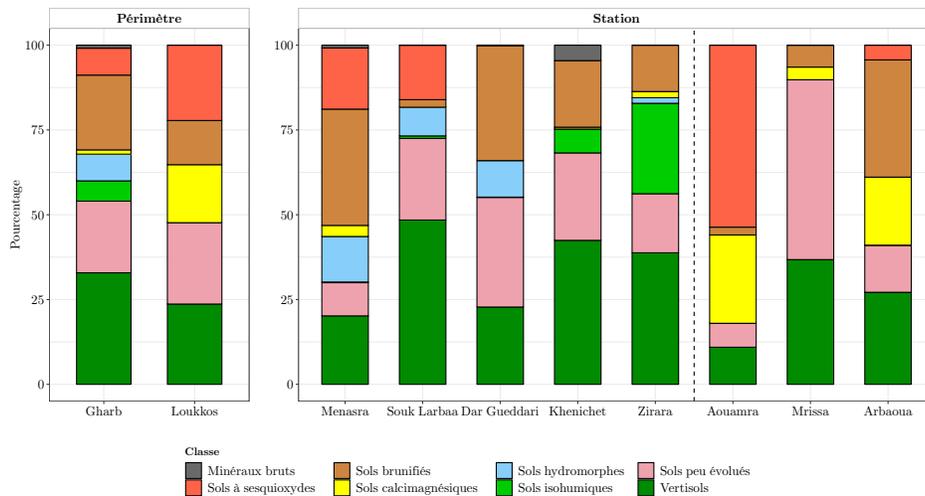


FIGURE 2.15 : Pourcentage de la superficie par types de sol des périmètres du Loukkos et du Gharb.

La superficie de chaque classe de RFU_{max} est indiquée dans la figure 2.16. La figure 2.17 montre le pourcentage de la superficie de chaque classe de RFU_{max} en fonction des deux périmètres et leurs polygones/stations.

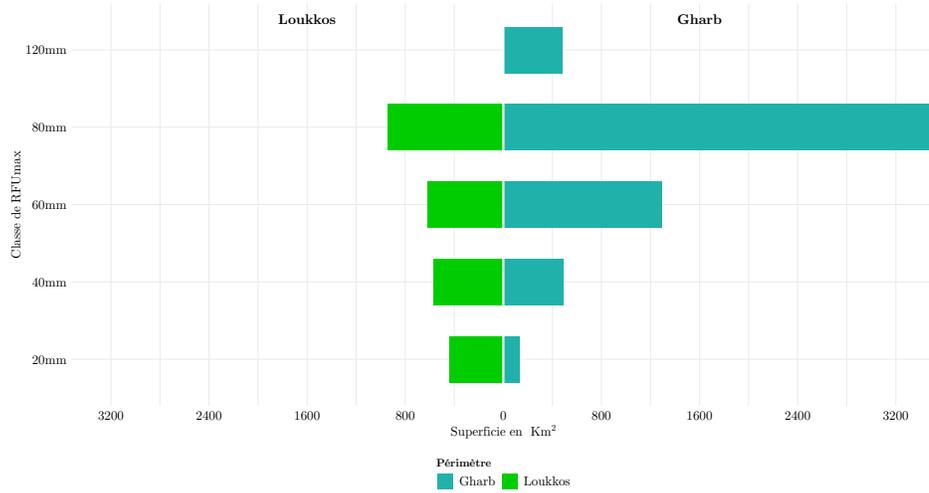


FIGURE 2.16 : Superficie par classe de RFU_{max} des périmètres du Loukkos et du Gharb.

- **Cas du périmètre Gharb :** la Rfu_{80mm} couvre une superficie importante avec 60,90% de la superficie totale du périmètre suivi par la Rfu_{60mm} avec 21,13%, alors que les autres Rfu ont un pourcentage inférieur à 8%.
- **Cas du périmètre Loukkos :** similaire au périmètre du Gharb, la Rfu_{80mm} occupe la grande superficie par rapport aux autres Rfu qui ont approximativement des pourcentages proches. Par rapport au périmètre du Gharb, nous notons l'absence de Rfu_{120mm} .

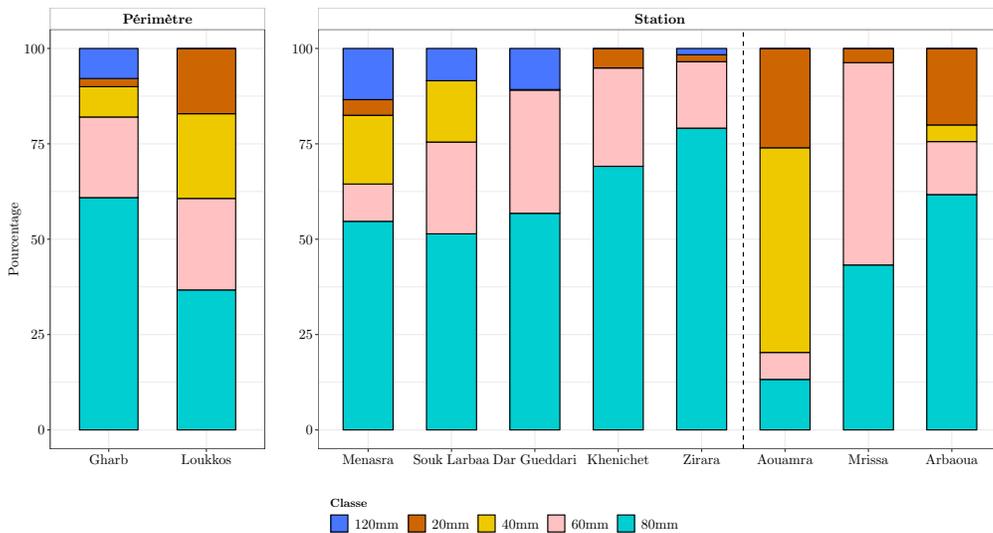


FIGURE 2.17 : Pourcentage par classe de RFU_{max} des périmètres du Loukkos et du Gharb.

- **Polygones/Stations du périmètre Gharb** : pour tous les polygones, la Rfu_{80mm} couvre une importante superficie allant de 51,40% (Souk Larbaa) à 79,12% (Zirara) de la superficie totale de la zone concernée.
- **Polygones/Stations du périmètre Loukkos** : plus que la moitié de la superficie de chaque polygone est couverte par un différent type de Rfu_{max} . Par exemple, Aouamra, Mrissa et Arbaoua sont respectivement couvertes par Rfu_{40mm} , Rfu_{60mm} et Rfu_{80mm} . Nous notons l'absence de Rfu_{120mm} dans les trois polygones.

2.3.3 Cartes d'occupation du sol

a) Acquisition des images : Les cartes d'occupation du sol ont été réalisées à partir des images satellitaires Landsat (4-5TM, 7 ETM+ et 8OLI) ayant une résolution de 30 m, un path/row de 201/36. Elles ont été obtenues à partir de la plateforme USGS. Le tableau 2.2 énumère les dates d'acquisition de toutes les images Landsat utilisées pour les deux périmètres sur quatre années hydrologiques différentes notamment 1984–1985, 2001–2002, 2015–2016 et 2016–2017.

Les trois premières années sont considérées pour les climats de référence et la quatrième année pour les climats projetés (optimiste et pessimiste) (cf. chapitre 4). Pour chaque année hydrologique choisie, nous avons acquis plusieurs images allant de 5 à 7 images couvrant l'année hydrologique étudiée. Le choix des images a été opéré de façon à ce que ces images soient les plus disponibles, représentatives des périodes choisies et ne contiennent pas des nuages.

Tableau 2.2 : Caractéristiques des images satellitaires étudiées.

A_{hydro}	Nb_{img}	Date d'acquisition	Satellite	Sensor
1984–1985	5	03-09-1984, 14-03-1985, 15-04-1985, 04-07-1985, 21-08-1985	Landsat 4-5	TM
2001–2002	7	29-11-2001, 01-02-2002, 22-04-2002, 16-15-2002, 24-05-2002, 11-07-2002, 27-07-2002	Landsat 4-5 Landsat 7	TM et ETM+
2015–2016	6	28-11-2015, 22-05-2016, 07-06-2016, 23-06-2016, 09-07-2016, 25-07-2016	Landsat 8	OLI/TIRS
2016–2017	5	27-09-2016, 07-04-2017, 10-06-2017, 12-07-2017, 28-07-2017	Landsat 8	OLI/TIRS

A_{hydro} : année hydrologique et Nb_{img} : nombre d'images

b) Prétraitement des images : nous avons effectué un prétraitement et un traitement à ces images. à signaler, que l'image de chaque année hydrologique choisie a été classifiée séparément. Le prétraitement, généralement, concerne la correction géométrique et la correction atmosphérique, puisque les images issues du satellite Landsat ont été corrigées géométriquement. D'abord, nous les avons reprojété du système de projection WGS84/UTM Zone 30 (EPSG : 32630) au système WGS84/UTM Zone 29 (EPSG : 32629). En outre, pour la correction atmosphérique, nous avons développé un script sous R en nous référant à l'article (Goslee, 2011).

Cette correction atmosphérique est divisée en deux phases : une phase consiste à convertir le nombre numérique DN en radiance TOA et l'autre phase sert à convertir la réflectance TOA en valeurs de réflectance de surface en utilisant l'algorithme de soustraction d'objet sombre (DSO1).

c) Classification des images : une fois les images ont été corrigées atmosphériquement, nous avons procédé à la création des rasters virtuels (VRT) contenant les multi-bandes. Sur ces rasters, nous avons utilisé l'algorithme des forêts aléatoires (Random Forests) développé par [Breiman \(2001\)](#) comme classification supervisée sous le logiciel Orfeo Toolbox (OTB) ([OTB, 2018](#)). Cette technique de classification consiste à combiner l'approche d'arbre de décision et celui d'agrégation. Ceci permet de déterminer pour tous les pixels des images Landsat utilisées une classe bien déterminée.

d) Création des régions d'intérêt : la création des régions d'intérêt fiables a constitué un défi. Surtout, que d'une part, chacune des quatre images Landsat a été classifiée séparément. Ce qui signifie que nous avons besoin d'un ensemble des données d'entraînement pour chaque image. D'autre part, nous ne possédons aucune étude de terrain durant les années (1984–1985 et 2001–2002). Nous notons que pour les périodes 2015–2016 et 2016–2017, nous nous sommes basés sur la connaissance du terrain et des photos prises durant les mois de mars à mai 2018.

Pour pallier à ce problème, nous avons réalisé une interprétation visuelle des couleurs sur les images satellitaires : (i) False color composite (Bandes [NIR-R-G] : B4, B3 et B2 pour Landsat 4 à 7 et B5, B4 et B3 pour Landsat 8) et (ii) Pseudo naturel color (Bandes [$SWIR_2$ -NIR-G] : B7, B4 et B2 pour Landsat 4 à 7 et B7, B5 et B3 pour Landsat 8). Ensuite, une identification de la signification des différentes couleurs a été faite en se référant à des images à haute résolution de Google Earth. Cette identification, combinée aux indices mentionnés dans le tableau 2.1 (cf. sous-section 2.3.3), nous a permis de reconstruire des régions d'intérêt plus ou moins fiables. Le nombre des pixels d'entraînement résultant variait par classe pour chaque image était entre 2245 et 4580.

L'ensemble de données utilisés a été réparti au hasard en deux sous-ensembles : 70 % du jeu de données ont été affectés à l'initialisation du modèle de classification, tandis que 30% de données restantes ont été utilisés pour la validation et l'évaluation des performances du modèle. Cette répartition a été effectuée au niveau du polygone afin d'avoir un ensemble indépendant de pixels entre les étapes d'entraînement et de validation (aucun pixel appartenant au même polygone dans les sous-ensembles d'entraînement et de validation).

e) **Résultat de la classification** : nous avons pu identifier six classes, à savoir : Eau, bâtiment et infrastructure, végétation, terres agricoles, forêts et sol nu (comme décrit dans le tableau 2.3). Les cartes d'occupation du sol produites pour les années 1984–1985, 2001–2002, 2015–2016 et 2016–2017 sont illustrées en figure 2.18 avec un indice de kappa supérieur à 0,95 et une précision globale supérieure à 96% (cf. tableau 2.4). Selon Girard and Girard (2010), une classification est jugée acceptable quand la valeur de précision globale dépasse 75%, nos résultats ainsi indiquent une meilleure précision de classification "forêts aléatoires". Une vérification et validation sur le terrain sont vivement suggérées.

Tableau 2.3 : Type des classes d'occupation du sol des périmètres du Loukkos et du Gharb.

Classe	Désignation
Eau	Réservoir, rivière, canal,... etc.
Bâtiment et infrastructure	Zones résidentielles, complexes industriels et commerciaux, infrastructures de transport, zones urbaines ou agglomérées mixtes et autres zones bâties,... etc.
Végétation	Prairies artificielles, prairies, prairies de protection pour les terres cultivées
Terres agricoles	Terres agricoles en pente,... etc.
Forêt	Terres arbustives, jeunes forêts nouvellement plantées, forêts mixtes de résineux et de feuillus, forêts de feuillus, forêts de protection des terres cultivées,... etc.
Sol nu	Terres nues

Tableau 2.4 : Indice de Kappa et précision globale de la classification d'occupation du sol des années étudiées.

Période	1984–1985	2001–2002	2015–2016	2016–2017
Indice de Kappa	0,97	0,97	0,96	0,95
Précision globale (%)	97,69	98,19	97,52	96,79

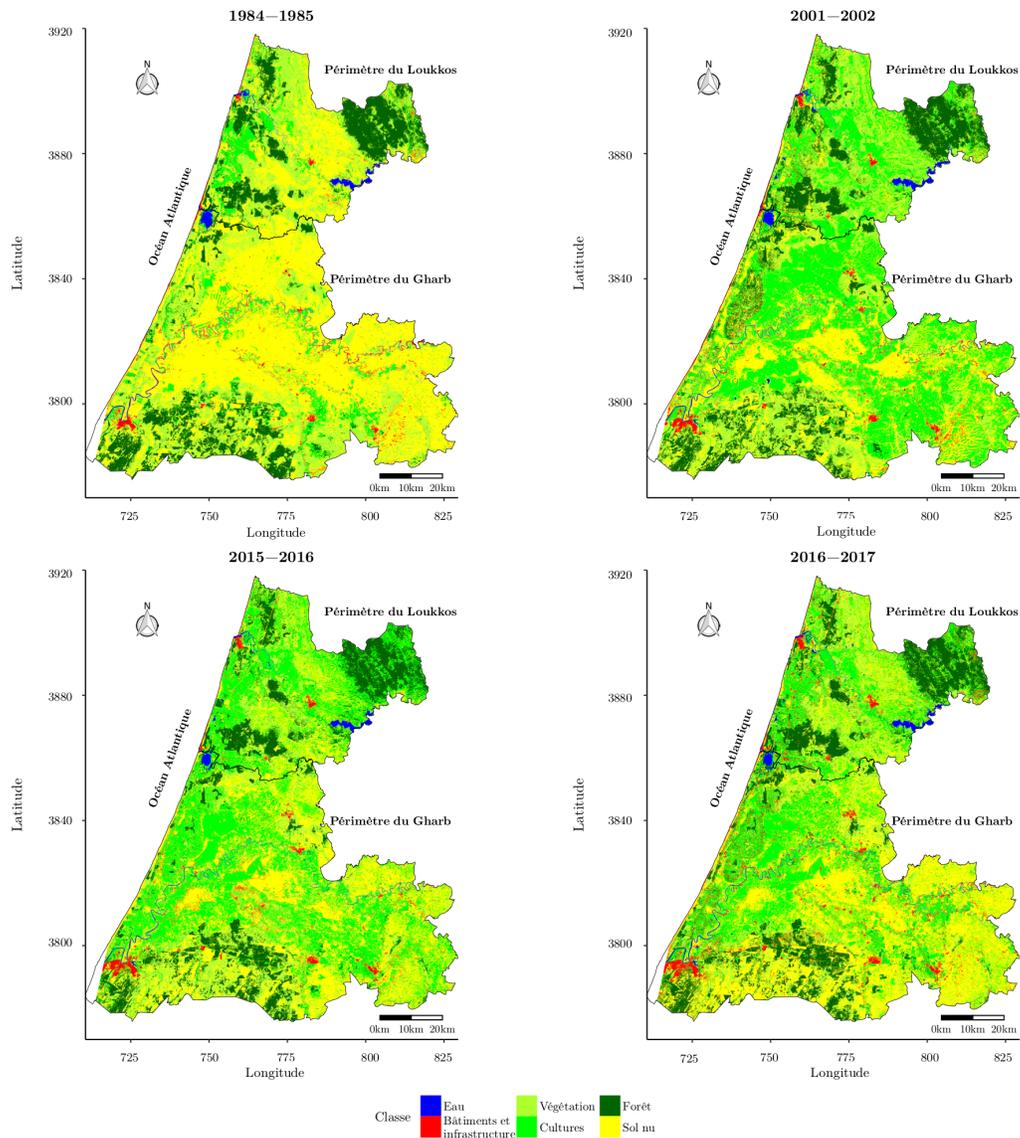


FIGURE 2.18 : Occupation du sol durant les années hydrologiques étudiées des périmètres du Loukkos et du Gharb.

2.3.4 Détection de variation

Au cours des dernières décennies, l'amélioration des techniques de télédétection et la disponibilité accrue de données ont facilité l'analyse de détection de variation d'occupation du sol.

2.3.4.1 Détection de variation des indices

Généralement, l'analyse des résultats a montré que tous les indices étudiés varient à la fois dans l'espace et dans le temps pour les deux périmètres.

a) Analyse de l'indice AVI

La variation des valeurs moyennes annuelles de l'indice AVI par année, périmètre et stations étudiées est montré dans la figure 2.19. D'après cette figure, nous constatons que pour toutes les périodes la valeur de l'indice AVI du Loukkos est légèrement supérieure à celle du Gharb à l'exception de 2016–2017 où les valeurs de AVI étaient similaires.

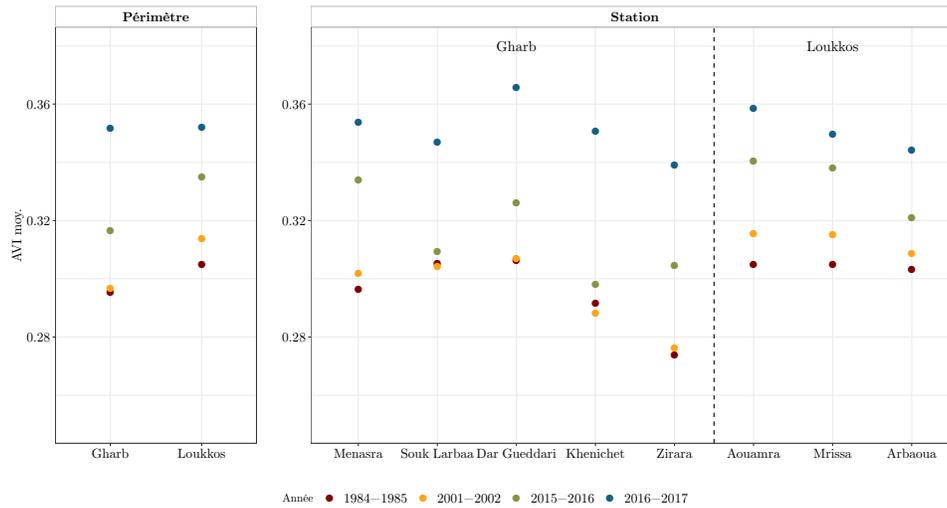


FIGURE 2.19 : Moyenne annuelle de l'indice AVI par périmètre et station.

Pour les deux périmètres, l'indice AVI a enregistré une augmentation au titre des quatre années étudiées en passant de 0,29 (0,30) en 1984–1985 à 0,35 en 2016–2017. Ladite augmentation pourrait s'expliquer par l'extension des forêts et des terres cultivées/irriguées. Nous observons que la valeur de l'AVI moyen décroît de l'ouest vers l'est pour le périmètre du Loukkos quelle que soit l'année. Tandis que le gradient de variation diffère d'une année à l'autre pour périmètre du Gharb. Par exemple en 2016–2017, la valeur de l'AVI moyen croît de l'ouest au centre, ensuite elle diminue en allant vers l'est.

En outre, nous observons que les moyennes annuelles de l'indice AVI varient entre 0,27 (Zirara) et 0,36 (Dar Gueddari et Aouamra) avec un coefficient de variation de 9,49% à 18,06% et un écart-type variant entre 0,03 et 0,06 (cf. tableau A.2). La valeur minimale de l'indice AVI est observée pour Menasra durant 2016–2017 avec une valeur de 0. Tandis que la valeur maximale est de l'ordre de 0,63 pour Souk Larbaa durant la même année.

b) Analyse de l'indice NDVI

La figure 2.20 montre la variation des valeurs moyennes annuelles de l'indice NDVI par année, périmètre et stations étudiées. Nous remarquons généralement que les moyennes annuelles de l'NDVI varient entre 0,31 (Zirara) et 0,47 (Mrissa) avec un coefficient de variation de 19,77% à 34,68% et un écart-type variant entre 0,07 et 0,16 (cf. tableau A.2). Au cours des années d'observation, la plus faible valeur de NDVI a été enregistrée en 2016–2017 pour Arbaoua soit -0,44 et la plus élevée en 2015–2016 pour Mrissa soit 0,89. En outre, l'indice NDVI du périmètre Loukkos est supérieur à celui du Gharb.

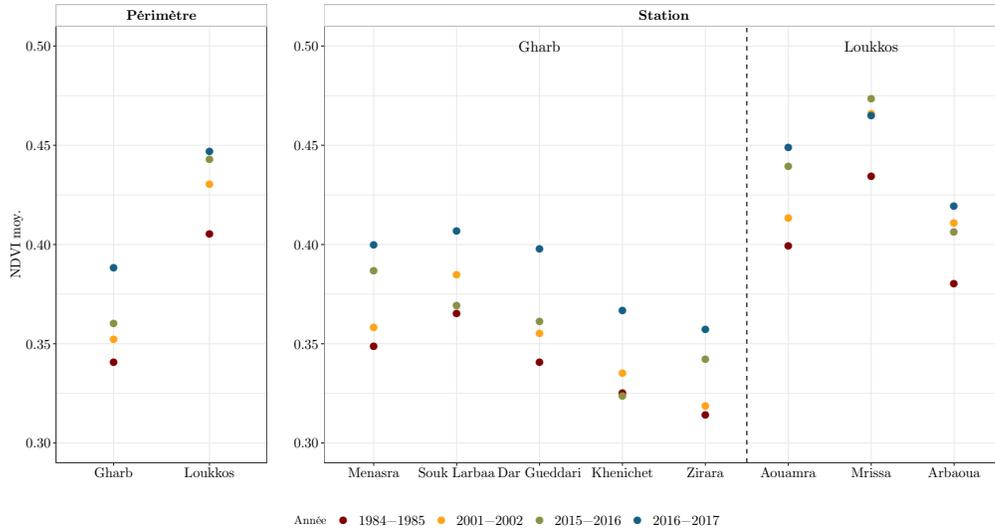


FIGURE 2.20 : Moyenne annuelle de l'indice NDVI par périmètre et station.

L'indice NDVI moyen indique une augmentation relative avec un écart de 4 entre 1984-1985 et 2016-2017. Cela pourrait être dû à une expansion des terres cultivées et irriguées ce qui conduit à l'augmentation de la teneur en chlorophylle de la végétation. Ce résultat est cohérent avec l'étude de [Royo \(2015\)](#), qui a utilisée des images Landsat-5 TM+ et a trouvé une augmentation positive de la végétation, de 1987 à 2011, et que le changement le plus fort a été observé en 2011.

c) Analyse de l'indice OSAVI

La figure 2.21 montre la variation des valeurs moyennes annuelles de l'indice OSAVI par année, périmètre et stations étudiées.

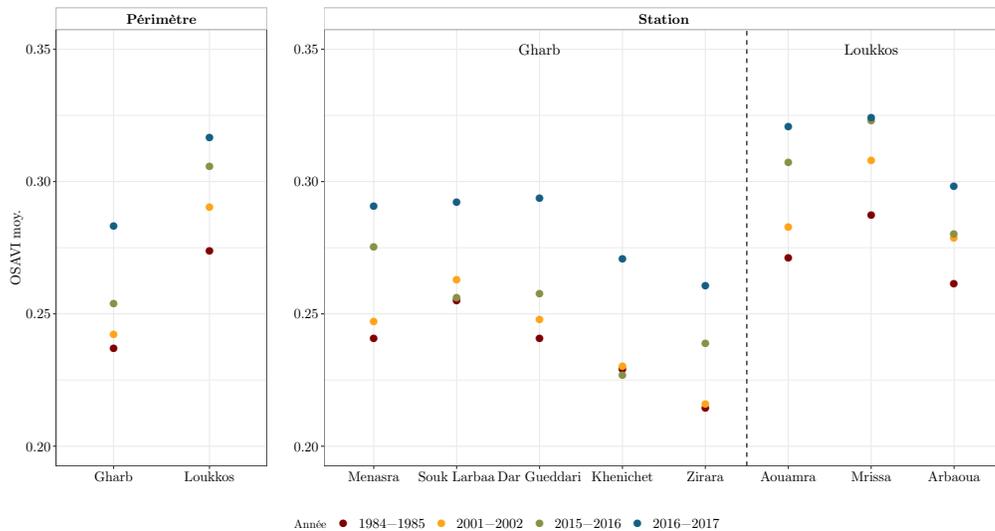


FIGURE 2.21 : Moyenne annuelle de l'indice OSAVI par périmètre et station.

Comme pour le cas des indices AVI et NDVI, nous remarquons que l'indice OSAVI du périmètre Loukkos est plus grand que celui du Gharb pour toutes les périodes. Nous constatons aussi que la valeur de l'OSAVI moyen décroît de l'ouest vers l'est et cela avec une légère croissance au centre quel que soit le périmètre. De plus, nous observons que les moyennes annuelles de l'OSAVI varient entre 0,21 (Zirara) et 0,32 (Mrissa) avec un coefficient de variation allant de 18,93% à 33,28% et un écart-type compris entre 0,05 et 0,11 (cf. tableau A.4). Ce qui signifie que, quelle que soit l'année, Mrissa contenait des pixels ayant une végétation dense et saine. Alors que Zirara contenait des pixels ayant une végétation pas dense et moins saine. Globalement, la valeur minimale de l'indice OSAVI est observée pour Souk Larbaa durant 2016–2017 avec $-0,20$. Tandis que la valeur maximale est de l'ordre de 0,67 pour Aouamra durant la même année.

d) Analyse de l'indice BSI

La figure 2.22 illustre la variation des valeurs moyennes annuelles de l'indice BSI par année, périmètre et stations étudiées. Entre les stations du Gharb : l'ordre de dominance diffère par station. Nous remarquons aussi que la valeur de BSI de Zirara est la plus élevée par rapport aux autres stations durant toutes les années étudiées. Nous observons que les moyennes annuelles de BSI sont comprises entre 0,02 (Mrissa) et 0,13 (Zirara) avec un coefficient de variation allant de 62,84% à 556,69% et un écart-type variant entre 0,06 et 0,13 (cf. tableau A.2). Ce qui indique que, quelque soit l'année, Mrissa présentait moins de sols nus disponibles alors que Zirara présentait plus de sols nus. La valeur minimale est observée pour Aouamra en 2016–2017 avec $-0,51$, ce qui indique que cette zone . Alors que la valeur maximale est de l'ordre de 0,39 pour Menasra durant la même année.

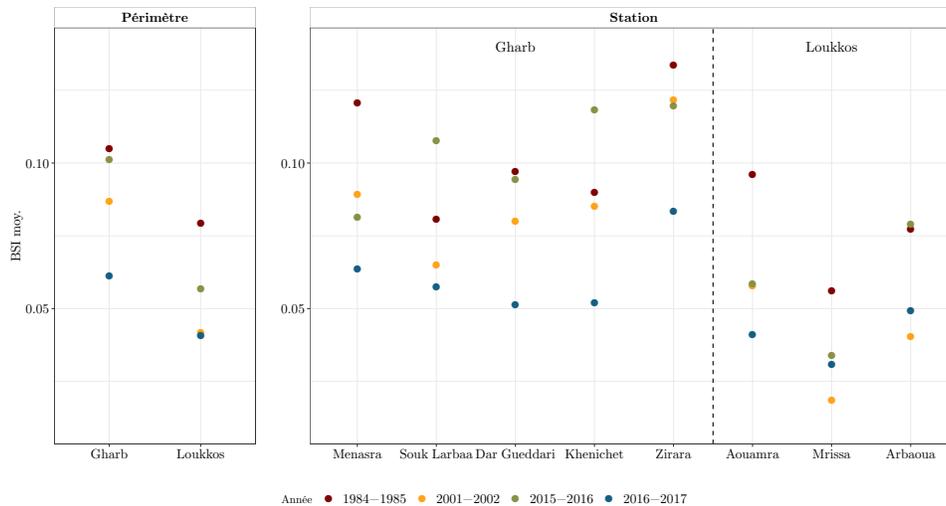


FIGURE 2.22 : Moyenne annuelle de l'indice BSI par périmètre et station.

d) Analyse de l'indice NDWI

La figure 2.23 illustre la variation des valeurs moyennes annuelles de l'indice NDWI par des périodes, périmètres et stations étudiées. Globalement, pour toutes les années, nous constatons que contrairement aux autres indices, l'indice NDWI du périmètre du Gharb est plus grand que celui du Loukkos. Ce qui pourrait être expliqué soit

par la nature des sols, soit par la présence des nombreux oueds et merjas. En outre, nous remarquons que les moyennes annuelles de NDWI quant à elles sont comprises entre $-0,57$ (Mrissa) et $-0,41$ (Khenichet) avec un coefficient de variation allant de $-31,89\%$ à $-12,37\%$ et un écart-type variant entre $0,06$ et $0,15$ (cf. tableau A.3). La valeur minimale est observée pour Aouamra durant 2015–2016 avec $-0,87$. Alors que la valeur maximale est de l'ordre de $0,5$ pour Arbaoua en 2016–2017. Nous observons que 2001–2002 a été marquée par la plus grande valeur de moyenne. Ceci concorde avec l'étude de [Royo \(2015\)](#) qui a trouvé que la période 1987-2002 représente le changement positif le plus important de la NDWI, probablement parce qu'en 2002, après la réforme hydraulique du Maroc, la quantité totale d'eau corporelle a augmenté de 13% .

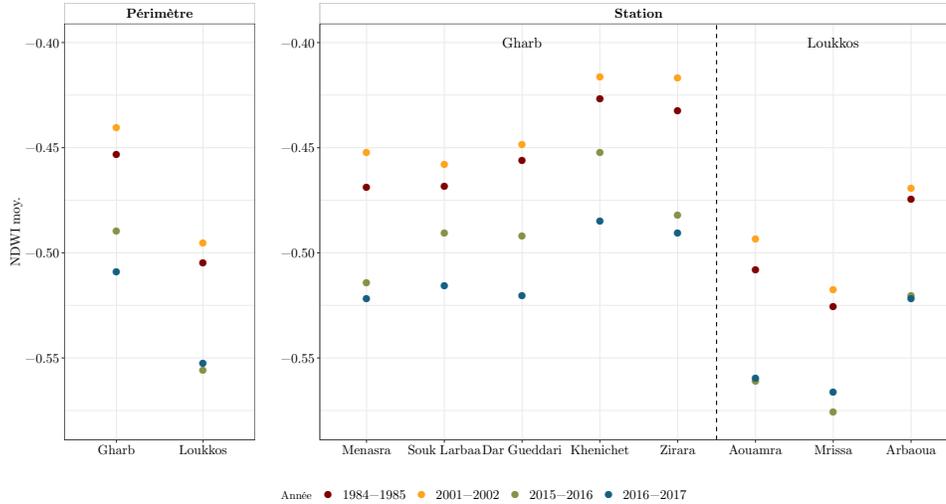


FIGURE 2.23 : Moyenne annuelle de l'indice NDWI par périmètre et station.

2.3.4.2 Détection de variation de la superficie d'occupation du sol

Cette sous-section présente les résultats obtenus par la classification "forêts aléatoires" ainsi que les statistiques des changements d'occupation du sol durant 1984–1985, 2001–2002 et 2016–2017. Tout au long de cette sous-section, nous utilisons les formules suivantes :

$$Sup_{C_k} = \sum_{i=1}^n P_{x_C} \times Sup_{px} \quad (2.4)$$

$$Sup_{C_p} = \frac{Sup_{C_k}}{Sup_{tot}} \times 100 \quad (2.5)$$

$$Vari = \frac{Sup_f - Sup_i}{Sup_i} \times 100 \quad (2.6)$$

$$\tau_{vari} = -1 + \sqrt[N_{f_i}]{\frac{Sup_f}{Sup_i}} \quad (2.7)$$

avec Sup_C : superficie de la classe (ex. eau, végétation...); P_{x_C} : nombre de pixels observés par classe d'occupation du sol; Sup_{px} : superficie de chaque pixel (dans notre cas 90 m^2); Sup_{tot} : superficie totale du périmètre/station étudié(e); $Vari$: variation de la superficie sur toute la période (%); Sup_f : superficie de la classe de l'année finale; Sup_i : superficie de la classe de l'année initiale; τ_{vari} : taux annuel moyen de variation

(%); et N_{fi} : nombre d'années entre les deux périodes étudiées.

a) Variation de la superficie d'occupation du sol

Le tableau 2.5 et la figure 2.24 montrent l'étendue de la superficie de chaque classe d'occupation du sol en termes de km^2 et %.

Tableau 2.5 : Comparaison des superficies d'occupation du sol par année et par périmètre.

Péri.	Classe	1984–1985		2001–2002		2016–2017	
		km^2	%	km^2	%	km^2	%
Gharb	Eau	40,71	0,66	40,97	0,67	47,56	0,78
	Bâtiment et infra.	135,10	2,20	142,91	2,33	221,85	3,62
	Végétation	1525,19	24,86	1269,89	20,70	720,23	11,74
	Terres agricoles	524,74	8,55	2555,58	41,65	2058,48	33,55
	Forêts	557,21	9,08	571,31	9,31	647,91	10,56
	Sol nu	3311,93	53,98	1514,23	24,68	2398,85	39,10
	No data	40,53	0,66	40,53	0,66	40,53	0,66
	Total	6135,41	100,00	6135,41	100,00	6135,41	100,00
Loukkos	Eau	33,80	1,31	41,29	1,60	37,67	1,46
	Bâtiment et infra.	28,74	1,12	26,65	1,04	63,07	2,45
	Végétation	802,71	31,20	711,12	27,64	533,53	20,74
	Terres agricoles	348,77	13,56	943,83	36,68	936,14	36,38
	Forêts	603,19	23,44	660,15	25,66	645,06	25,07
	Sol nu	755,69	29,37	189,85	7,38	357,42	13,89
	Total	2572,89	100,00	2572,89	100,00	2572,89	100,00

Péri. : périmètre; km^2 : superficie en (km^2); % : superficie en (%).

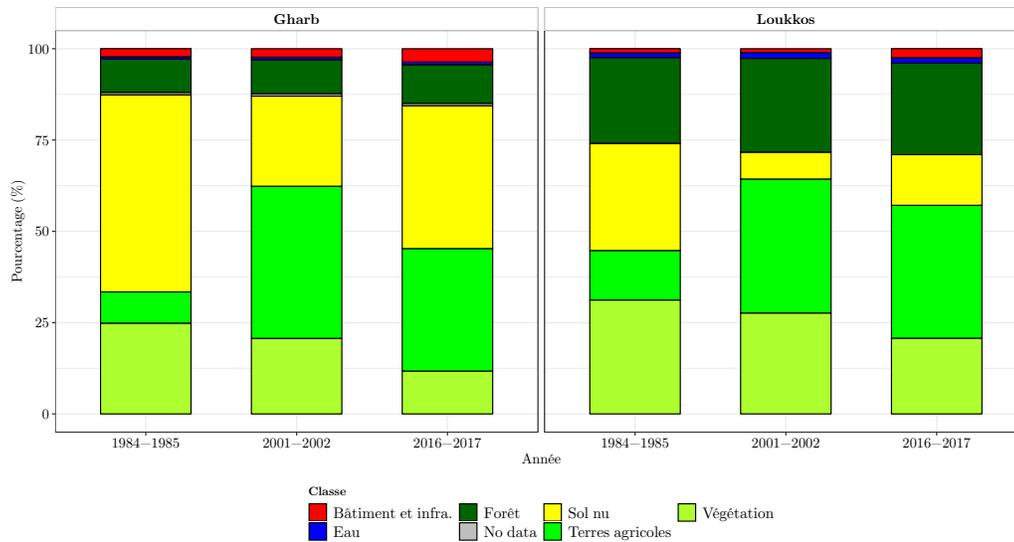


FIGURE 2.24 : Variation de la superficie (en %) par classe d'occupation du sol durant les périodes 1984–1985, 2001–2002 et 2016–2017 des périmètres du Loukkos et du Gharb.

- **Cas du périmètre Gharb**

En 1984–1985 : le périmètre du Gharb connaissait une dominance de sol nu avec 53,98% (3311,93 km²). Tandis que la végétation, les forêts, les terres agricoles, le bâtiment et infrastructure et l'eau ne couvraient que 24,86%, 9,08%, 8,55%, 2,20% et 0,66% (soit 40,71 km² d'eau) respectivement.

En 2001–2002 : la superficie des terres agricoles est passée de 524,74 km² à 2555,58 km² tandis que celle du sol nu a diminué de moitié en passant de 3311,93 km² à 1514,23 km². De plus, la végétation couvrait la troisième place par 20,70% de la superficie totale. Alors que les forêts, le bâtiment et infrastructure et l'eau couvraient respectivement 9,31%, 2,33% et 0,67% (40,97 km²).

En 2016–2017 : la superficie de sol nu occupait 39,10% de la superficie totale (soit 2398,85 km²), mais elle reste plus inférieure que celle détectée en 1984–1985. Cette classe est suivie par celle des terres agricoles avec 33,55% ensuite de la végétation de 11,74%, des forêts de 10,56%, du bâtiment et infrastructure de 3,62% et de l'eau de 0,78% (soit 47,56 km²).

- **Cas du périmètre Loukkos**

En 1984–1985 : le périmètre du Loukkos était recouvert de végétation et sol nu avec 31,20% (802,71 km²) et 29,37% (755,69 km²) de la superficie totale. Alors que les forêts, les terres agricoles, l'eau et le bâtiment et infrastructure ne couvraient que 23,44%, 13,56%, 1,31% et 1,12% respectivement.

En 2001–2002 : la superficie des terres agricoles constituait 36,68% de la superficie totale (943,83 km²). Comparée à 1984–1985, la végétation, le sol nu et le bâtiment et infrastructure sont marqués par un déclin, alors que les forêts, l'eau connaissent une légère augmentation. Cette décroissance du bâtiment et infrastructure pourrait être expliquée soit par le recul vraiment de construction entre les deux périodes étudiées, soit par une confusion entre cette classe et une autre classe lors de la classification des images. Quant à l'augmentation des forêts, cela pourrait être due à la valorisation et la régénération des forêts de chênes lièges.

En 2016–2017 : par rapport à 2001–2002, la superficie des terres agricoles, des forêts, de la végétation et de l'eau ont légèrement baissé. Tandis que le bâtiment et infrastructure et le sol nu ont connu une augmentation.

- **Cas des stations du Gharb**

En 1984–1985 : les superficies de sol nu et de végétation occupaient la première et deuxième place au niveau de toutes les stations du Gharb (e.i varie de 40,24% de la superficie de Menasra à 77,00% de la superficie de Khenichet). Les autres places changent en fonction de la station étudiée. Par exemple, la superficie couverte par les terres agricoles est supérieure à celle des forêts pour Souk Larbaa (un écart de +5,89%) et Zirara (un écart de +6,56%), tandis qu'elle est inférieure pour Menasra (un écart de -9,93%) et Dar Gueddari (un écart de -4,33%). L'eau couvrait la plus petite superficie pour toutes les stations à l'exception de Khenichet où la superficie des forêts est classée en dernière place avec 0,49 km².

En 2001–2002 : les terres agricoles couvraient une grande partie de la superficie totale de chaque station avec une superficie allant de $421,30 \text{ km}^2$ (25,95% pour Menasra) à $716,37 \text{ km}^2$ (59,09% pour Souk Larbaa). En comparaison à 1984–1985, la variation de la superficie de cette classe est très remarquable. Le couvert végétal occupe la deuxième place avec $232,11 \text{ km}^2$ et $421,30 \text{ km}^2$ respectivement pour Souk Larbaa et Menasra, alors que c'est le sol nu pour les autres stations. Similaire à la période 1984–1985, l'eau est classée en dernière place avec une superficie allant de $0,14 \text{ km}^2$ pour Zirara à $17,15 \text{ km}^2$ pour Menasra.

En 2016–2017 : le sol nu constitue la plus grande superficie par rapport à la superficie totale de Khenichet ($512,41 \text{ km}^2$), Dar Gueddari ($554,23 \text{ km}^2$) et Zirara ($577,99 \text{ km}^2$). Tandis que ce sont les terres agricoles qui occupent la plus grande superficie pour Souk Larbaa et Menasra avec $550,39 \text{ km}^2$ et $575,72 \text{ km}^2$ respectivement. En comparaison à 2015–2016, l'eau a connu une légère augmentation.

- **Cas des stations du Loukkos**

En 1984–1985 : chaque station a un ordre de dominance qui diffère de l'autre. Par exemple, le sol nu couvrait une superficie importante des stations Mrissa et Aouamra, ce qui représente $273,64 \text{ km}^2$ et $296,00 \text{ km}^2$ respectivement. Tandis que c'est la végétation qui couvrait plus de superficie pour Aouamra soit $359,85 \text{ km}^2$ (35,79% de sa superficie totale).

En 2001–2002 : par rapport à 1984–1985, la superficie des terres agricoles a connu une augmentation. Par ailleurs, la plus grande augmentation est observée pour Arbaoua en passant de $48,42 \text{ km}^2$ à $270,5 \text{ km}^2$. Nous remarquons aussi que la superficie de l'eau occupait une faible superficie variant entre $1,35 \text{ km}^2$ pour Mrissa et $28,35 \text{ km}^2$ pour Arbaoua.

En 2016–2017 : pour toutes les stations du Loukkos, la superficie dominante était la classe terres agricoles ($254,57 \text{ km}^2$ pour Arbaoua et $379,58 \text{ km}^2$ pour Aouamra), suivie de la végétation pour Aouamra ($232,71 \text{ km}^2$) et Arbaoua ($168,31 \text{ km}^2$) alors que de forêts pour Mrissa ($272,38 \text{ km}^2$). Ensuite, viennent les superficies de sol nu, de bâtiment et infrastructure et de l'eau. Par contre, pour Arbaoua l'eau occupait plus de superficie que le bâtiment et infrastructure (presque la moitié).

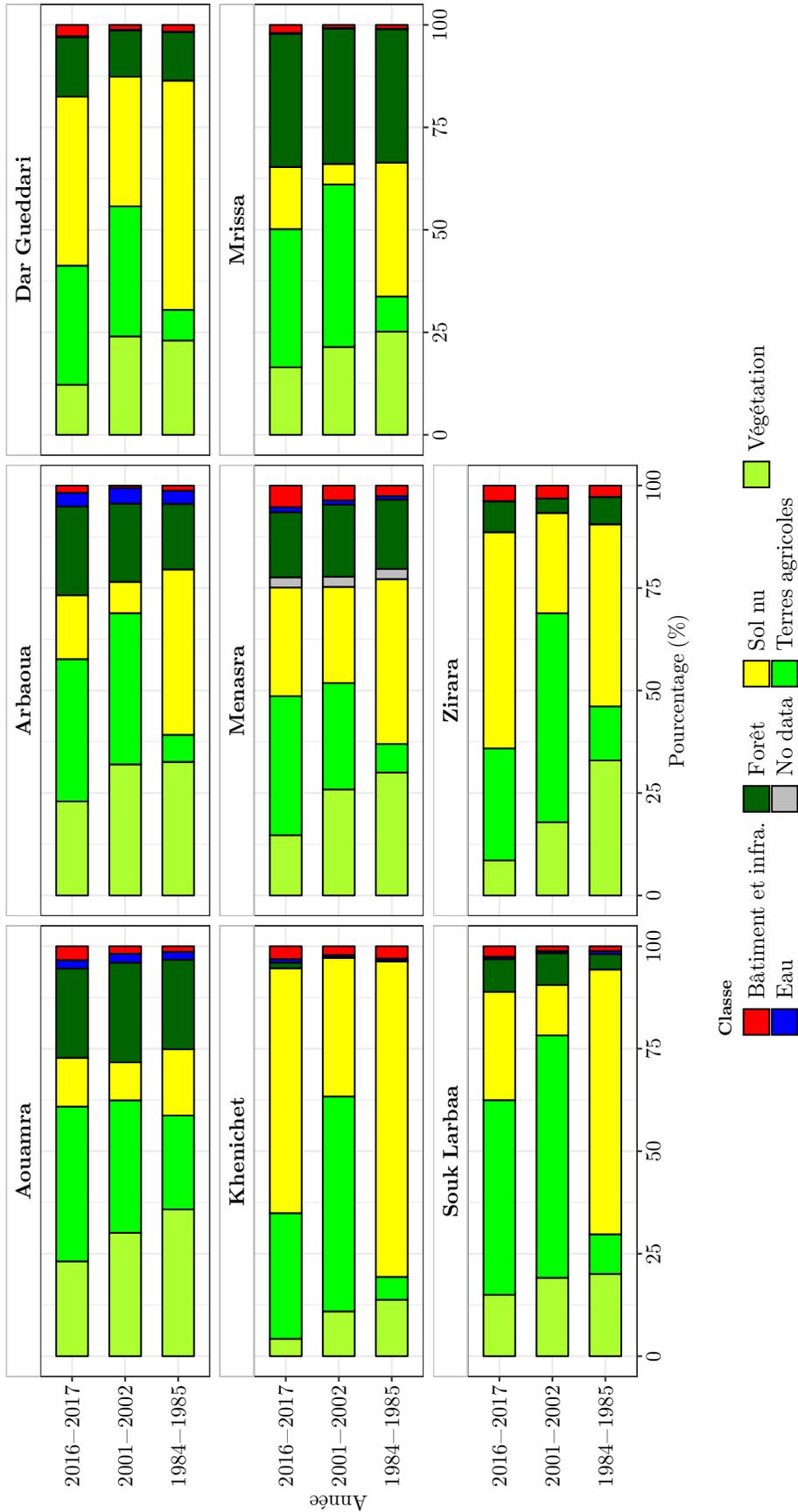


FIGURE 2.25 : Variation de la superficie (en %) par classe d'occupation du sol durant les périodes 1984-1985, 2001-2002, 2015-2016 et 2016-2017 pour les stations du Loukkos et du Gharb.

Tableau 2.6 : Ordre de dominance des superficies en fonction des classes pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb.

Ordre de dominance	Classe	Stations	Allure
Sup2016–2017 > Sup2001–2002 > Sup1984–1985	Bâtiment et infrastructure Eau Forêts Terres agricoles	Menasra, Zirara et Aouamra Menasra, Zirara, Dar Gueddari et Mrissa Souk Larbaa, Khenichet et Arbaoua Menasra et Aouamra	
Sup2001–2002 > Sup2016–2017 > Sup1984–1985	Eau Terres agricoles	Aouamra et Arbaoua Toutes les stations du Gharb excepté Menasra. Aouamra et Mrissa	
Sup2001–2002 > Sup1984–1985 > Sup2016–2017	Forêts Végétation	Menasra, Aouamra et Mrissa Dar Gueddari	
Sup1984–1985 > Sup2016–2017 > Sup2001–2002	Eau Sol nu	Souk Larbaa Toutes les stations du Loukkos et du Gharb excepté Menasra	
Sup2016–2017 > Sup1984–1985 > Sup2001–2002	Bâtiment et infrastructure Eau Forêts Sol nu	Souk Larbaa, Dar Gueddari, Khenichet, Mrissa et Arbaoua Khenichet Dar Gueddari et Zirara Zirara	
Sup1984–1985 > Sup2001–2002 > Sup2016–2017	Végétation	Toutes les stations du Loukkos et du Gharb excepté Dar Gueddari	

Sup : superficie

◇ Comparaison entre les années par rapport à chaque classe

Le tableau 2.6 récapitule l'ordre de dominance des superficies par année et classe.

b) Modification des taux d'occupation du sol

Le tableau 2.7 indique le taux et le pourcentage de variation de chaque classe d'occupation du sol sur les trois périodes de 18, 16 et 33 ans respectivement pour la période (de 1984–1985 à 2001–2002), (de 2001–2002 à 2016–2017) et (de 1984–1985 à 2016–2017). Au cours de ces périodes étudiées, les valeurs négatives/positives représentent respectivement la diminution/augmentation de la proportion de la classe d'occupation du sol. Afin de calculer la variation de la superficie sur toute la période et la moyenne de la variation annuelle, nous avons utilisé les équations (2.6) et (2.7).

Tableau 2.7 : Variation des classes d'occupation du sol entre les périodes (1984–1985 vs 2001–2002), (2001–2002 vs 2016–2017) et (1984–1985 vs 2016–2017) des périmètres du Loukkos et du Gharb.

Péri.	Classe	1984 vs 2001		2001 vs 2017		1984 vs 2017	
		Vari.	τ_{vari}	Vari.	τ_{vari}	Vari.	τ_{vari}
Gharb	Eau	0,63	0,04	16,07	0,94	16,81	0,47
	Bâtiment et infra.	5,78	0,31	55,24	2,79	64,21	1,51
	Végétation	-16,74	-1,01	-43,28	-3,48	-52,78	-2,25
	Terres agricoles	387,02	9,19	-19,45	-1,34	292,29	4,23
	Forêts	2,53	0,14	13,41	0,79	16,28	0,46
	Sol nu	-54,28	-4,25	58,42	2,92	-27,57	-0,97
Loukkos	Eau	22,16	1,22	-8,77	-0,57	11,44	0,33
	Bâtiment et infra.	-7,27	-0,42	136,70	5,53	119,49	2,41
	Végétation	-11,41	-0,67	-24,97	-1,78	-33,53	-1,23
	Terres agricoles	170,62	5,69	-0,82	-0,05	168,41	3,04
	Forêts	9,44	0,50	-2,29	-0,14	6,94	0,20
	Sol nu	-74,88	-7,39	88,26	4,03	-52,70	-2,24

Péri. : périmètre; τ_{vari} : moyenne de variation annuelle (%); et Vari. : variation de la superficie sur toute la période (%).

1984 vs 2001 : comparaison de la période 2001–2002 par rapport à 1984–1985

2001 vs 2017 : comparaison de la période 2016–2017 par rapport à 2001–2002

1984 vs 2017 : comparaison de la période 2016–2017 par rapport à 1984–1985

Les résultats permettent de conclure que, pour les deux périmètres, une variation très remarquable a été manifestée pour toutes les classes d'occupation du sol. Particulièrement pour la classe terres agricoles qui a augmentée au cours des 33 dernières années notamment entre 1984–1985 et 2001–2002. Cette classe a connu ainsi la plus forte croissance par rapport aux autres classes, atteignant une variation de +9,19%/an pour le périmètre du Gharb (soit 387,02%, 2030,84 km²) et de +5,69%/an pour le périmètre du Loukkos (soit 170,62% et 595,06 km²). Alors que la diminution la plus importante s'est produite respectivement dans la classe végétation pour le périmètre du Gharb (-3,48%/an), en particulier dans la période (de 2001–2002 à 2016–2017) et dans la classe sol nu pour le périmètre du Loukkos (-7,39%/an) particulièrement durant la période (de 1984–1985 à 2001–2002). Cela pourrait être lié à l'utilisation des terres non cultivées et/ou l'augmentation de l'urbanisation. Parallèlement, il existait des travaux de construction de nouvelles autoroutes et routes.

Pour la classe eau, l’augmentation était régulière pour le périmètre du Gharb tandis qu’elle a connu une baisse remarquable pour la période (de 2001–2002 à 2016–2017) pour le périmètre du Loukkos. Ceci est cohérent avec les résultats trouvés pour l’indice NDWI (cf. section 2.3.4.1, figure 2.23), dans lesquels nous avons constaté que la moyenne de NDWI du Loukkos en 2001–2002 est plus supérieure à celle en 2016–2017. En outre, les résultats révèlent que les différentes classes d’occupation du sol varient de façon significative d’un polygone à l’autre.

c) Remarque

Il a été difficile de discuter les résultats de variation obtenus par rapport à la littérature, en raison de la grande hétérogénéité des sources, des localisations géographiques et de l’étendue des zones d’étude et des différentes méthodes appliquées.

2.3.5 Amélioration de la carte d’occupation du sol : Apport de la télédétection optique et radar

Nous analysons la possibilité d’améliorer la cartographie des cultures dans un périmètre irrigué du nord du Maroc en nous basant sur la combinaison des données multi-temporelles de deux satellites (Sentinel-1 et Sentinel-2) avec l’inclusion de neuf indices radiométriques. Le périmètre concerné (Loukkos), en plus de sa position stratégique, se caractérise par un climat méditerranéen avec une forte valeur écologique. Il présente une intense activité agricole avec une grande diversité de cultures, dont le fonctionnement pourrait être affecté par le changement climatique. Afin de quantifier les besoins en eau, nous avons utilisé les séries d’images satellitaires acquises pour la période du 09/2017 au 08/2018. Les cartes produites suivant une nomenclature hiérarchique à trois niveaux de classification (figure 2.26) illustrent notre approche. Pour plus de détails voir l’article (Acharki et al., 2020b).

Niveau SSC	Eau	Bâti	Sol	Pra	BO (55) <i>16002</i>	Maï (36) <i>29956</i>	PoT (29) <i>3943</i>	Pas (33) <i>5030</i>	FLC (16) <i>5244</i>	FrR (51) <i>98352</i>	Ara	Càs	Avo (40) <i>57659</i>	Agr (32) <i>74725</i>	Kaki (5) <i>1895</i>	Oli (6) <i>6293</i>	Riz	Plh	ChL	Euc	Pin	
Niveau SC	Eau	Bâti	Sol	Pra	CéF (91) <i>45958</i>		Mar (129) <i>112569</i>		Oié (56) <i>42942</i>	CIn (52) <i>14229</i>	Arb (83) <i>140572</i>		Riz	Plh	ChL (20) <i>20791</i>	Euc (32) <i>70140</i>	Pin (10) <i>20320</i>					
Niveau C	Eau (28) <i>14415</i>	Bâti (51) <i>34854</i>	Sol (51) <i>37663</i>	Pra (51) <i>55092</i>	Cul (411) <i>356270</i>					Riz (17) <i>114306</i>	Plh (17) <i>33096</i>	For (62) <i>111221</i>										

FIGURE 2.26 : Les classes du niveau sous-sous-classe. Périmètre du Loukkos (Maroc). Le nombre de polygones et le nombre de pixels par (sous-)classes sont donnés entre parenthèse et en italique respectivement.

La dénomination des (sous-)classes est donnée ci-après : Niveau Classe (C) : **Bâti** : Bâtiments et infrastructures ; **Sol** : Sol nu ; **Pra** : Prairie ; **Cul** : Cultures ; **Riz** : Rizière ; **Plh** : Plantes hydrophiles ; **For** : Forêt. Niveau Sous-classe (SC) : **CéF** : Céréales et fourrages ; **Mar** : Maraîchage ; **Oié** : Oléagineux ; **CIn** : Cultures industrielles ; **Arb** : Arboriculture ; **ChL** : Chêne-liège ; **Euc** : Eucalyptus. Niveau Sous-sous-classe (SSC) : **BO** : Blé & Orge ; **Maï** : Maïs ; **PoT** : Pomme de terre ; **Pas** : Pastèque ; **FLC** : Fève, Laitue & Choux ; **FrR** : Fruits rouges ; **Ara** : Arachide ; **Càs** : Canne à sucre ; **Avo** : Avocatier ; **Agr** : Agrumes ; **Oli** : Olivier.

Nos résultats indiquent que les classifications faites à partir de données Sentinel-2 présentent des performances significativement supérieures à celles basées sur les données Sentinel-1. L’ajout d’indices radiométriques déduits des canaux optiques n’apportent pas d’amélioration par rapport à l’utilisation des 10 canaux à 10 et 20 m de résolution spatiales de Sentinel-2. La combinaison des données n’améliore pas significativement les performances. Des classifications basées sur les 10 canaux de Sentinel-2 sont donc un très bon compromis en termes de volume de données à traiter et performance de classification. Elles permettent de discriminer toutes les classes avec une bonne performance

(F-Score > 85%). Nos travaux montrent le fort potentiel des données Sentinel-2, dont la période d'acquisition de 5 jours augmente significativement la possibilité d'acquisitions hors couverture nuageuse.

Nos travaux futurs se concentreront sur la classification de certains types de culture séparément tels que (blé et orge) et (fève, laitue et choux) ainsi que l'étude des profils temporels de chaque type de culture. Une comparaison entre les superficies réelles des cultures dominantes (obtenues à partir de la base de données d'historique d'état des cultures) et celles résultantes par le radar et/ou optique est recommandable.

2.4 Automatisation du processus de traitement des images satellitaires (Web2TISat)

L'application "Web2TISat" a pour principe de télécharger des jeux de données, de les traiter, classifier les images, comparer les performances de classification, créer des graphiques interactifs et exporter les jeux de données sous-jacents sans connaissances particulières en programmation. En outre, cette application permettra aux scientifiques et praticiens de gagner beaucoup de temps.

2.4.1 Développement et mise en œuvre

L'application "Web2TISat" a été développée à l'aide des packages Shiny ([Chang et al., 2019](#)), ShinydashboardPlus ([Granjon, 2019](#)) et ShinyWidgets ([Perrier et al., 2019](#)). La combinaison de ces packages permet le développement d'une page Web interactive et conviviale avec des widgets d'entrée et de sortie basés sur le langage statistique R ([R Development Core Team, 2017](#)). Shiny est conçu pour permettre aux applications interactives d'être déployées rapidement et facilement. Ceci utilise un concept de réactivité qui met à jour automatiquement les objets de sortie lorsqu'un utilisateur modifie les objets d'entrée. ShinydashboardPlus permet de générer facilement des applications sous forme de tableaux de bord via une extension de Bootstrap : AdminLTE. ShinyWidgets intègre des bibliothèques JavaScripts et CSS dans Shiny et assure un meilleur contrôle des boutons d'interaction avec l'utilisateur. Généralement, toute application Shiny comprend deux différents composants qui communiquent l'un avec l'autre : (1) ('ui. R') qui est un script d'interface utilisateur décrivant la structure et les fonctionnalités de l'application Web ; et (2) ('serveur.R') qui est un script de base de données détaillant toutes les instructions de préparation de données, de calcul, de traitement statistique et d'analyse. Ces instructions dans "Web2TISat" consistent en téléchargement des jeux de données, prétraitement, classification, analyse et visualisation des images satellitaires ainsi que des résultats.

2.4.2 Description des sections

La page d'accueil de "Web2TISat" est montrée dans la figure 2.27.

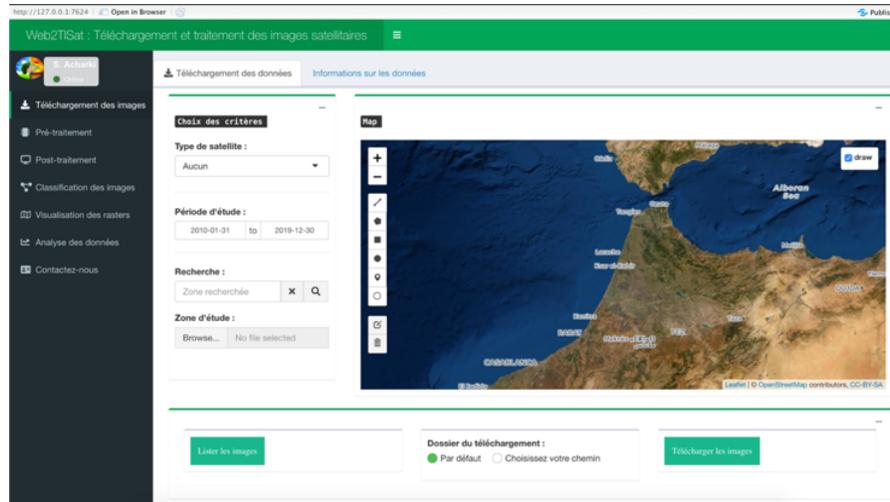


FIGURE 2.27 : Vue d'ensemble de l'application "Web2TISat".

Les sept sections sont comme suit :

- ✧ **Téléchargement des images** : L'utilisateur peut télécharger des jeux de données d'entrée géographiques en choisissant le type de satellite, la période et la zone d'étude. Toutefois, l'utilisateur doit s'enregistrer avant de pouvoir commencer à lister ou télécharger les images. Pour cela, une fois le type de satellite est choisi, un onglet s'affiche contenant le nom d'utilisateur et le mot de passe. L'utilisateur doit le remplir selon la plateforme de téléchargement des images (Copernicus ou Usgs). En cliquant sur le bouton « Lister les images », un tableau s'affiche contenant toutes les informations nécessaires sur les images à télécharger. Les téléchargements sont automatiquement enregistrés soit par défaut dans un répertoire nommé « Download » soit dans un répertoire de travail défini par l'utilisateur.
- ✧ **Pré-traitement** : Cette section vise à simplifier le processus de traitement des images dans une seule interface graphique. L'utilisateur est face à deux alternatives. La première alternative permet de réaliser toutes les phases de prétraitement simultanément. Dans ce cas, l'utilisateur doit préciser la méthode de correction atmosphérique, le système de projection, la méthode de ré-échantillonnage (bilinéaire ou plus proche voisin), la résolution, le format de l'image (GTiff ou VRT) ainsi que le fichier de la zone à découper sous format shp. La deuxième alternative vise à réaliser chaque phase de prétraitement séparément de l'autre. L'utilisateur est amené à choisir d'abord le répertoire d'importation et d'exportation des images. Ensuite, il spécifie la phase de prétraitement et le critère préalable. Parmi les phases de prétraitement disponibles nous citons : La décompression des images, la correction atmosphérique, la re-projection, le mosaïquage, le ré-échantillonnage, le découpage de la zone d'étude, la dissociation des bandes et le regroupement des bandes.
- ✧ **Post-traitement** : Cette section est composée de quatre sous-onglets. 1) Interprétation visuelle permet à l'utilisateur d'afficher les bandes en noir et gris ainsi qu'en mode composition colorée telle que fausse couleur, agriculture, ... etc. 2) Pan-sharpening vise à appliquer la méthode de Brovey (Chavez et al., 1991) afin d'améliorer la résolution spatiale des images multi-spectrales. D'autres méthodes seront ajoutées. 3) Calcul des indices : l'utilisateur peut calculer un ou plusieurs

indices de végétation, du sol, d'eau et d'urbain comme NDVI (Rouse et al., 1974).

4) Extraction des valeurs : L'utilisateur importe d'abord le fichier raster et shapefile. Ensuite, il choisit le type de raster à importer (MNT, type de sol, occupation du sol, indice, . . .etc) et la méthode d'extraction (simple ou bilinéaire). Une fois l'extraction est terminée, un tableau s'affiche contenant les différentes classes du raster, les paramètres statistiques (min, max, moy et écart-type), le nombre de pixels, la superficie en mètre et en hectare et le nom du polygone.

- ✧ **Classification des images** : L'utilisateur importe l'image à classifier ainsi que le fichier contenant les régions d'intérêt. à préciser, l'utilisateur doit créer ses régions d'intérêt hors cette application, par exemple via Qgis (QGIS Development Team, 2017). Il choisit ensuite une méthode de classification parmi celles proposées dans la liste déroulante (classification supervisée ou non supervisée). Il mentionne aussi la méthode de ré-échantillonnage et le nombre d'itérations. Après avoir lancé la classification, une estimation du temps de classification par la méthode choisie s'affiche ainsi qu'un tableau de division des données en train et en test. En plus, dans le sous-onglet Rapport de classification, un rapport s'affiche contenant des tableaux de matrice d'erreur, des statistiques globales et par classe pour chaque modèle de classification. Si l'utilisateur sélectionne « toutes » comme méthode de classification supervisée, il trouve dans le sous-onglet Comparaison des modèles deux types de graphiques. Le premier graphe permet de comparer les valeurs de 'précision globale' et de 'kappa' (Foody, 1992) selon les méthodes de classification. Le deuxième graphe permet de comparer les valeurs de F-Score par classe et méthode de classification.
- ✧ **Visualisation des rasters** : Dans cette section, l'utilisateur peut générer des graphes en important d'abord le raster et le fichier shapefile concernés, ensuite en choisissant la catégorie de ce raster. Parmi ces catégories, nous citons : paramètres physiques du terrain (MNT, occupation du sol et type du sol), types d'eau résultant du modèle 2CAFDYM (Acharki et al., 2020c; Kassogué et al., 2017a) (eau évaporée, eau de surface et eau souterraine), indices de végétation, . . .etc. Les graphiques exportés peuvent être enregistrés en trois formats (pdf, png et jpeg).
- ✧ **Analyse des données** : L'utilisateur sélectionne un fichier sous format csv ou excel dans l'explorateur de fichiers. Si le fichier choisi est de type csv, il définit les paramètres du fichier à savoir : le type de séparateur (virgule, tabulation, espace), le type de quote (simple, double, aucune) et la présence/absence des noms de colonnes (header). Quand le fichier est de type excel, il définit le nom de la feuille à analyser. Cet onglet contient des sous-onglets notamment profil temporel, calcul des superficies par classe, détection de variation de l'occupation du sol et disponibilité et bilan global.
- ✧ **Contactez-nous** : Cette section contient des informations sur le développeur.

2.4.3 Exemple d'application

Des illustrations sont présentées dans l'article (Acharki et al., 2020a) afin de montrer les fonctionnalités de l'application "Web2TISat" ainsi que le type de calcul et de graphique qu'elle est en mesure de fournir.

En conclusion, dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement l'intérêt de la télédétection et les caractéristiques de notre région d'étude. Ensuite, nous avons généré des cartes de paramètres physiques du terrain (altitude, type de sol et occupation du sol) ainsi nous avons examiné leurs superficies. Ceci nous a permis de déduire que chaque périmètre diffère l'un de l'autre en termes du poids relatif des paramètres physiques. Puis, nous avons fait ressortir l'évolution de l'occupation du sol, et par la suite nous avons discuté de manière approfondie la détection de variation de l'occupation du sol. Nous avons considéré que cette détection est nécessaire pour améliorer notre compréhension sur le contexte de déroulement des simulations. Les résultats de détection de variation ont montré qu'un changement très remarquable a été manifestée pour toutes les classes d'occupation du sol au cours des trente-trois dernières années. Puis, nous avons proposé une démarche de classification des cultures à trois niveaux (classe, sous-classe et sous-sous-classe) en nous concentrant plus sur la combinaison des images radar et optique et/ou indices. Enfin, nous avons présenté l'application web "Web2TISat" permettant l'automatisation de téléchargement des pré-traitements et traitements des images satellitaires.

Apport de la statistique dans l'analyse des changements climatiques actuels et futurs dans la région d'étude

Dans ce chapitre, nous visons à réaliser une analyse statistique des variables météorologiques, et ceci constituera une première étape pour appréhender les effets du changement climatique sur les ressources en eau d'une région donnée. Cette analyse se déroule en quatre étapes : le traitement des données manquantes (section 3.3), l'analyse du passé par le biais des tests de détection des ruptures (section 3.4.2) et l'analyse des tendances (section 3.5) ainsi que des projections futures (section 3.6). En section 3.7, nous allons présenter l'application web "WebTDCLim" visant l'automatisation du processus de traitement des données climatiques et projections futures.

3.1 Méthodologie suivie

L'approche méthodologique adoptée dans cette étude se base sur l'analyse statistique spatio-temporelle de séries chronologiques de certaines variables climatiques à savoir les précipitations, les températures moyennes et les évapotranspirations potentielles¹ mesurées au niveau de huit stations météorologiques bien réparties dans notre région d'étude. Cette analyse statistique s'effectue en quatre étapes comme illustrées dans la figure 3.1 :

- **(1) Le traitement des lacunes de données** : le comblement des données manquantes est effectué par les méthodes d'imputation multiple (MICE) et la méthode des k plus proches voisins (k-NN). La performance statistique de la méthode d'imputation choisie est évaluée en moyennant quelques indicateurs de performance telle que l'erreur absolue moyenne (MAE), la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) et le coefficient de variation de la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes (CVRMSE). (cf. section 3.3)
- **(2) L'analyse du changement passé ou des ruptures** : la détection des dates de ruptures au niveau des données traitées a été faite en utilisant trois tests statistiques, à savoir : le test de [Pettitt \(1979\)](#), le test de [Buishand \(1982\)](#) et le test d'homogénéité normal (SNH) [Alexandersson \(1986\)](#). Cette approche de

¹Calculées par la méthode de ([Blaney and Criddle, 1950](#))

détection de rupture permet d’obtenir des hypothèses sur les dates où il y avait eu dans le passé un changement significatif de la moyenne des variables climatiques. Pour les trois tests si l’hypothèse nulle est vérifiée, cela indique que la série est homogène donc absence de rupture dans la série. (cf. section 3.4)

- **(3) L’analyse des tendances** : l’analyse des tendances a été réalisée en se basant sur les tests de Sen (1968) et de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945). Ceci nous permettra de mieux appréhender les évolutions futures en se basant sur la période de référence 1981–2016. Pour améliorer l’analyse visuelle des tendances annuelles et saisonnières des variables climatiques étudiées une interpolation spatiale a été faite par la technique d’interpolation par pondération par l’inverse de la distance (IDW) qui est parmi les méthodes d’interpolation les plus utilisées. (cf. section 3.5)
- **(4) L’analyse des prévisions futures** : pour la période de projection 2021–2050, nous avons appliqué sur notre période de référence choisie les résultats du modèle climatique ARPEGE-Climat version 4 (Driouech, 2010), qui correspond à un modèle atmosphérique spectral global dérivé du modèle de prévision météorologique numérique ARPEGE/IFS ayant une résolution spatiale de 50km. Ce dernier est développé conjointement par Météo-France et le Centre européen de prévision météorologique à moyen terme (Déqué et al., 1994). Ceci nous permettra de prévoir les évolutions futures en nous basant sur la période de référence 1981–2016. (cf. sous-section 3.6)

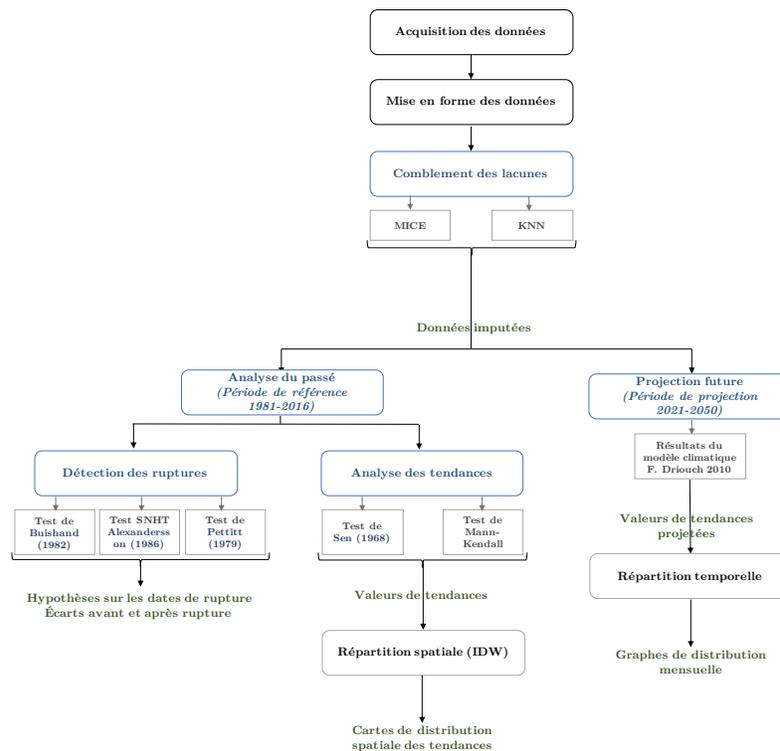


FIGURE 3.1 : Approche méthodologique de traitement des données climatiques.

Pour implémenter l’ensemble des algorithmes et traitements, nous avons utilisé le langage R (R Development Core Team, 2017) et le système d’information géographique

Qgis ([QGIS Development Team, 2017](#)). En outre, nous avons automatisé tous ces traitements à travers l'application "WebTDClim". Nous détaillons ses principales fonctionnalités en section 3.7.

3.2 Informations sur les stations et les données climatiques étudiées

3.2.1 Aperçu sur les stations étudiées

Les données analysées ont été recueillies auprès des stations météorologiques de l'ORMVAG et l'ORMVAL sur un pas de temps décadaire pour une période de 35 ans (1981–2016) qui est la période commune entre toutes les stations étudiées. Nous avons réparti cette période en trois périodes de référence (scénario de climat de référence (SCR)) : $SCR_{1981-1994}$, $SCR_{1994-2005}$ et $SCR_{2005-2016}$, afin de les adapter avec la répartition des cartes d'occupation du sol.

En raison de la disponibilité des données, nous avons considéré et traité les données de huit stations qui couvrent les deux périmètres. Ces stations sont réparties comme montrées en figure 2.8 (cf. chapitre 2). Trois stations sont localisées dans le périmètre du Loukkos et les cinq autres sont situées dans le périmètre du Gharb. Comme précédemment illustré dans la figure 2.8, à chaque station, nous associons un champ de distribution des données climatiques en nous basant sur le diagramme de Voronoi appliqué aux positions des stations comme germes. Les caractéristiques des stations étudiées sont mentionnées dans le tableau 3.1.

Notons que les données ont été issues, selon la période de mesure, à partir de deux types de stations : (i) des stations classiques contenant un pluviomètre et un thermomètre ; (ii) des stations automatiques équipées d'un pluviomètre électronique de type auget basculeur, un thermo-hygromètre, un pyranomètre, un anémomètre et une girouette.

3.2.2 Description des variables étudiées

Les variables utilisées sont : les précipitations, la température moyenne et l'évapotranspiration potentielle.

- La précipitation annuelle (ou saisonnière) est égale à la somme des précipitations mensuelles avec le nombre total de mois de cette année (ou saison). Les précipitations mensuelles sont calculées comme le cumul des précipitations décadaires ;
- La température moyenne mensuelle utilisée (T_{moy}) est la moyenne arithmétique de la température minimale et maximale du mois [Eq. 3.1]. La température moyenne d'une année (ou d'une saison) est la moyenne des températures moyennes mensuelles sur le nombre total de mois de l'année (ou saison) [Eq. 3.2]. Les formules sont données par :

$$T_{moy_m} = \frac{1}{2}(T_{max_m} + T_{min_m}); \quad m = 1, \dots, 12 \quad (3.1)$$

Tableau 3.1 : Caractéristiques des stations étudiées. Avec ^(a) Données issues d'une station classique ayant un pas de temps décadaire et ^(b) Données issues d'une station automatique ayant un pas de temps journalier.

Périmètre	Abr.	Station	Coordonnées géographiques			Disponibilité des observations		Type climat*
			X (m)	Y (m)	Z (m)	Précipitations	Températures	
Gharb	Mena.	Menasra	733.442,49	3.815.464,27	11,29	1974-1975 à 2010-2011 ^a 2011-2012 à 2015-2016 ^b	1974-1975 à 2007-2008 ^a 2011-2012 à 2015-2016 ^b	Humide
	SLa.	Souk Larbaa	774.814,99	3.840.634,55	26,99	1974-1975 à 2012-2013 ^a 2013-2014 à 2015-2016 ^b	1975-1976 à 2001-2002 ^a 2013-2014 à 2015-2016 ^b	Semi-aride
	DGu.	Dar Gueddari	768.389,82	3.812.113,06	12,36	1974-1975 à 2015-2016 ^a	1974-1975 à 2006-2007 ^a	Semi-aride
	Khen.	Khenichet	804.478,34	3.815.186,19	33,17	1974-1975 à 2015-2016 ^a	1974-1975 à 2001-2002 ^a	Semi-aride
	Zir.	Zirara	794.942,47	3.794.980,93	36,26	1979-1980 à 2010-2011 ^a 2011-2012 à 2015-2016 ^b	1979-1980 à 1993-1994 ^a et 2000-2001 à 2006-2007 ^a 2011-2012 à 2015-2016 ^b	Semi-aride
Loukkos	Aoua.	Aouamra	765.778,55	3.884.822,11	27,58	1981-1982 à 2015-2016 ^a	1981-1982 à 2015-2016 ^a	Humide
	Mri.	Mriissa	777.847,15	3.879.447,45	11,34	1981-1982 à 2015-2016 ^a	1974-1975 à 2015-2016 ^a	Humide
	Arb.	Arbaoua	781.842,63	3.868.021,46	78,81	1974-1975 à 2015-2016 ^a	1981-1982 à 2015-2016 ^a	Humide

Abr. :abréviation ; X : longitude ; Y : latitude ; et Z : altitude.
* défini via l'indice d'aridité sur la période 1981-2016.

$$T_{moy_{a/s}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_{moy_j}; \quad N = 12 \text{ pour l'année et } N = 3 \text{ pour la saison} \quad (3.2)$$

- Pour l'évapotranspiration potentielle, nous avons choisi une des méthodes simples basées sur la température moyenne et la durée du jour qui est la formule donnée par Eq. 3.3 de (Blaney and Criddle, 1950), en raison de la non-disponibilité de certains paramètres utilisés par les autres méthodes, tels que l'humidité relative et le rayonnement solaire. L'équation s'écrit comme suit :

$$ETP = p_{BC50}[(0,46 \times T_{moy}) + 8,13] \quad (3.3)$$

où : T_{moy} est la température moyenne mensuelle en (°C); T_{min_m} et T_{max_m} sont respectivement la température minimale et maximale de l'air mensuelle en (°C); N est le nombre de mois; ETP est l'évapotranspiration potentielle en mm/mois; et p_{BC50} est le pourcentage annuel moyen des heures de jour (Doorenbos and Pruitt, 1977).

3.3 Traitement des données

3.3.1 Méthodes de comblement des lacunes

Afin de combler les données incomplètes aux niveaux des différentes stations, nous avons appliqué deux méthodes d'imputation : la méthode d'imputation multivariée par équations enchaînées (MICE) et la méthode des k plus proches voisins (k-NN). Le choix s'est porté sur ces deux méthodes en raison de leurs flexibilités et leurs utilisations dans divers domaines (Buuren and KarinGroothuis-oudshoorn, 2011). Également, la performance de ces deux méthodes a été mesurée par des tests statistiques d'évaluation de la performance (cf. sous-section 3.3.2).

3.3.1.1 Méthode d'imputation multivariée par équations enchaînées (MICE)

L'approche MICE fait partie de la famille d'imputation multiple, approche développée par Rubin (1987), et plus précisément des modèles conditionnels permettant de proposer un modèle plus proche de la nature des données (Buuren and KarinGroothuis-oudshoorn, 2011). Cette approche est également nommée "imputation multiple de régression séquentielle" et "spécification entièrement conditionnelle". Il s'agit d'une approche d'imputation semi-paramétrique. Son principe repose sur l'imputation des variables incomplètes. D'une part de façon successive, variable par variable, de telle sorte qu'elle attribue à chaque variable un modèle de régression spécifique. D'autre part, de façon itérative pour obtenir la convergence selon l'algorithme d'imputation MICE (van Buuren, 2012) décrit ci-dessous :

- ✧ 1. Spécifier un modèle d'imputation $P(Y_j^{mis} | Y_j^{obs}, Y_{-j}, R)$ pour la variable Y_{-j} avec $j = 1, \dots, p$.
- ✧ 2. Pour chaque j , remplir les imputations de départ \dot{Y}_{-j}^0 par tirages au sort parmi Y_j^{obs} .
- ✧ 3. Répéter la procédure pour $t=1, \dots, T$.

- ✧ 4. Répéter la procédure pour $j=1, \dots, p$.
- ✧ 5. Définir $\dot{Y}_{-j}^t = (\dot{Y}_1^t, \dots, \dot{Y}_{j-1}^t, \dot{Y}_{j+1}^{t-1}, \dots, \dot{Y}_p^{t-1})$ en tant que données actuellement complètes, à l'exception de \dot{Y}_j .
- ✧ 6. Tirer $\dot{\phi}_j^t \sim P(\phi_j^t | Y_j^{obs}, \dot{Y}_{-j}, R)$.
- ✧ 7. Tirer les imputations $\dot{Y}_{-j}^t = P(Y_j^{mis} | Y_j^{obs}, \dot{Y}_{-j}, R, \dot{\phi}_j^t)$.
- ✧ 8. Fin de répétition j .
- ✧ 9. Fin de répétition t .

Les paramètres de l'algorithme MICE sont comme suit :

P est la probabilité qui permet de simuler la distribution Bayésienne a posteriori de la variable manquante ; Y est une matrice de dimension $n \times p$ contenant les réalisations de p variables pour n unités expérimentales ; Soit R le vecteur des indicatrices de réponse dont les composantes r_{ij} ($i = 1, \dots, n$ et $j = 1, \dots, p$) valent 1 si Y est observé et 0 sinon ; Les parts observées et manquantes de Y sont notées Y_j^{obs} et Y_j^{mis} respectivement ; \dot{Y} représente les valeurs n_0 de vecteur imputé en Y ; Y_{-j} : toutes les colonnes de Y à l'exception de Y_j ; ϕ_j : représente les paramètres inconnus du modèle d'imputation ; et Q la quantité d'intérêt scientifique (par exemple, un coefficient de régression).

Sur le plan pratique, cette méthode d'imputation multiple se fait en plusieurs étapes. D'abord, le choix d'un modèle de régression pour la variable étudiée. Ensuite, l'attribution à chaque valeurs de données manquantes une valeur aléatoire à partir des données observées et ceci de façon itérative. Enfin, l'estimation des valeurs imputées en fonction du coefficient de régression estimé sur chaque jeu de données.

Afin d'implémenter l'algorithme MICE, basé sur l'approche de Markov chain Monte Carlo (MCMC), nous avons utilisé le package MICE (version 3.3.0) (Buuren et al., 2018) sous le logiciel de programmation R (R Development Core Team, 2017).

3.3.1.2 Méthode des k plus proches voisins (k-NN)

La méthode des k plus proches voisins (k-NN) est une méthode non-paramétrique largement utilisée comme méthode d'interpolation des données et également comme méthode d'imputation. Elle permet l'estimation des valeurs manquantes en fonction de leurs voisines les plus proches. Le choix du paramètre k (l'ordre du voisinage) a un effet important sur la performance de la méthode d'imputation k-NN (Feng et al., 2014). La distance entre la $i^{\text{ème}}$ et la $j^{\text{ème}}$ observation peut être définie selon l'équation ci-dessous (Kowarik and Templ, 2016) :

$$d_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^p \omega_k \delta_{i,j,k}}{\sum_{k=1}^p \omega_k} \quad (3.4)$$

où ω_k est le poids et $\delta_{i,j,k}$ est la contribution de la $k^{\text{ème}}$ variable. Pour les variables continues, la distance absolue est calculée comme suit :

$$\delta_{i,j,k} = \frac{|x_{i,k} - x_{j,k}|}{r_k} \quad (3.5)$$

où $x_{i,k}$ est la valeur de la $k^{ième}$ variable de la $ième$ observation et r_k est la plage de la $k^{ième}$ variable.

Les variables ordinales sont converties en variables entières, puis la distance absolue divisée par la plage est calculée. Les catégories sont donc traitées comme si elles étaient équidistantes. Nous avons utilisé le Package VIM (Kowarik and Templ, 2016) sous le logiciel de programmation R.

3.3.2 Performance statistique des méthodes de comblement des lacunes

L'évaluation de la performance des deux modèles d'imputation a été faite en se basant sur les trois indicateurs statistiques ci-dessous (MAE, RMSE et CVRMSE). Le modèle ayant des valeurs minimales en ces indicateurs est le meilleur :

- ✧ L'erreur absolue moyenne [MAE, Eq.3.6] et la racine carrée des erreurs quadratiques moyennes [RMSE, Eq. 3.7] mesurent la grandeur moyenne des erreurs sans tenir compte de leur sens (erreurs positives et négatives). Leurs valeurs calculées peuvent varier de 0 à l'infini.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_{obs} - X_{imp}|}{N} \quad (3.6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{obs} - X_{imp})^2}{N}} \quad (3.7)$$

- ✧ Le CVRMSE [appelé coefficient de variation de la RMSE, Eq. 3.8] a été développé pour éliminer les dépendances d'échelle, surtout quand il existe des différences considérables dans la variabilité des séries temporelles de la température à l'intérieur et entre les régions (Yozgatligil et al., 2012).

$$CVRMSE = \frac{RMSE}{\overline{X_{obs}}} \quad (3.8)$$

Les paramètres dans les équations précédentes sont décrits comme suit :

X_{obs} : les valeurs de T_{min} ou T_{max} contenant des données manquantes ; X_{imp} : les valeurs de T_{min} ou T_{max} complétées par une méthode d'imputation ; N : le nombre de données définies ; et $\overline{X_{obs}}$: la moyenne des valeurs T_{min} ou T_{max} sur l'ensemble des données étudiées. Il est à mentionner que les indices MAE et RMSE sont exprimés en °C.

Tous les indicateurs étudiés ont été prétraités et structurés en utilisant les fonctions statistiques usuelles sous le langage R (R Development Core Team, 2017).

3.3.3 Choix de la méthode de comblement des lacunes

Au niveau du Gharb, ce sont notamment les séries chronologiques des températures qui présentent des lacunes. Pour cela, les données manquantes des températures (min et max) des cinq stations ont été reconstituées par les méthodes d'imputation présentées auparavant durant la période d'étude 1974 à 2016.

Avant de procéder au comblement des données manquantes, nous avons analysé leurs pourcentages (cf. tableau 3.2). Cette analyse a montré que la majorité des stations étudiées présentent entre 20% et 33% de valeurs manquantes. Seule Menasra présente une proportion faible inférieure à 10% de lacunes. Ce phénomène pourrait être dû au dysfonctionnement d'instrument de mesure classique particulièrement avant l'installation des stations automatiques.

Tableau 3.2 : Proportion des données manquantes dans la série des températures pour chaque station météorologique du périmètre du Gharb (Période 1974–2016).

Abr.	Station	Période	Nbre d'obs.	Proportion val.	
				T_{min}	T_{max}
Mena.	Menasra	1974–2016	504	7,14%	7,14%
SLa.	Souk larbaa	1975-2016	492	25,20%	25,20%
DGu.	Dar Gueddari	1974–2016	504	21,63%	19,84%
Khen.	Khenichet	1974–2016	504	33,33%	33,33%
Zir.	Zirara	1979–2016	444	25,68%	24,77%

Abr : abréviation ; Nbre d'obs. : nombre d'observations ; Proportion val. : proportion des valeurs manquantes ; T_{min} : température minimale (°C) ; et T_{max} : température maximale (°C)

Comme présenté dans la sous-section 3.3.1, le choix de la méthode d'imputation s'est basé sur un certain nombre de paramètres statistiques (Moyenne (Moy), écart-type (Sd), coefficient de variation (CV) et pente (cf. tableau 3.3)). Une méthode d'imputation est dite plus robuste par rapport à d'autres méthodes si l'écart-type (Sd) et le coefficient de variation (CV) sont les plus petits. Au niveau des moyennes des données, une valeur plus faible indique une meilleure performance de la méthode appliquée.

D'après les résultats du traitement des données des températures (T_{max} et T_{min}) des cinq stations (cf. tableau 3.3), nous remarquons que pour la plupart des stations, la moyenne des valeurs résultante de la méthode d'imputation MICE est plus proche de la moyenne observée que celle obtenue par la méthode k-NN.

De même, les valeurs de l'écart-type et du coefficient de variations issues de la méthode MICE sont beaucoup plus faible que celles de la méthode k-NN et même des données observées. À l'exception des séries de la température maximale pour Dar Gueddari et de la température minimale pour Zirara. Ces résultats montrent, à priori, que la méthode d'imputation MICE est plus performante que la méthode k-NN.

Par ailleurs, les résultats de calcul des indicateurs de la performance statistique des méthodes d'imputation (cf. tableau 3.3) confirment aussi que la méthode MICE est la plus performante ; puisque les faibles valeurs des indicateurs de performance MAE et RMSE ont été obtenues par cette méthode.

Nous constatons aussi que Menasra, qui est la seule station présentant une faible proportion des lacunes (7%), montre également les plus faibles valeurs des paramètres de performance MAE et RMSE. Cette constatation pourrait nous amener à dire que les valeurs des paramètres de performance seraient proportionnelles au pourcentage de données manquantes.

Tableau 3.3 : Résultat des paramètres statistiques et de la performance pour les deux méthodes d'imputation. Cas du périmètre du Gharb.

St.	Var.	M _{imput.}	Paramètres statistiques				Performance statistique		
			Moy	Sd	Cv	Pente	MAE	RMSE	CVRSME
Menasra	T _{min}	Observée	11,88	1,03	8,67	0,02			
		MICE	11,85	1,00	8,44	0,01	0,81	3,05	0,90
		k-NN	11,96	1,03	8,64	0,02	0,93	3,47	1,01
	T _{max}	Observée	22,77	0,76	3,33	0,02			
		MICE	22,77	0,74	3,27	0,02	1,63	6,11	0,98
		k-NN	22,82	0,75	3,29	0,02	1,67	6,27	0,99
	T _{moy}	Observée	17,32	0,69	4,01	0,02			
		MICE	17,31	0,68	3,91	0,01	1,22	4,58	0,97
		k-NN	17,39	0,71	4,07	0,02	1,30	4,87	1,02
Souk Larbaa	T _{min}	Observée	12,46	1,43	11,52	0,05			
		MICE	12,46	1,27	10,20	0,03	3,06	6,18	0,88
		k-NN	12,77	1,36	10,68	0,06	3,36	6,79	0,95
	T _{max}	Observée	25,19	0,91	3,62	0,04			
		MICE	24,98	0,90	3,61	0,01	5,97	12,05	0,99
		k-NN	25,45	0,91	3,57	0,05	6,40	12,96	0,99
	T _{moy}	Observée	18,83	0,95	5,05	0,04			
		MICE	18,72	0,87	4,67	0,02	4,51	9,11	0,92
		k-NN	19,11	0,97	5,06	0,05	4,87	9,87	1,02
Dar Gueddari	T _{min}	Observée	12,36	1,51	12,26	0,10			
		MICE	12,48	1,36	10,93	0,06	2,51	5,57	0,81
		k-NN	12,80	1,56	12,22	0,10	2,79	6,24	1,03
	T _{max}	Observée	25,41	1,38	5,46	0,08			
		MICE	25,28	1,06	4,21	0,03	5,04	11,12	0,77
		k-NN	25,50	1,05	4,12	0,05	5,12	11,45	0,76
	T _{moy}	Observée	18,64	1,55	8,31	0,05			
		MICE	18,88	1,03	5,47	0,05	3,85	8,39	0,67
		k-NN	19,15	1,18	6,15	0,07	4,06	8,91	0,76
Khenichet	T _{min}	Observée	12,42	1,31	10,61	0,09			
		MICE	12,51	1,13	9,02	0,04	4,23	7,34	0,81
		k-NN	12,91	1,28	9,90	0,07	4,63	8,02	0,93
	T _{max}	Observée	26,06	1,40	5,39	0,09			
		MICE	26,22	1,24	4,72	0,04	8,85	15,33	0,87
		k-NN	26,49	1,29	4,90	0,07	9,12	15,80	0,91
	T _{moy}	Observée	19,24	1,05	5,46	0,09			
		MICE	19,36	0,91	4,73	0,04	6,54	11,33	0,86
		k-NN	19,70	1,08	5,48	0,07	6,87	11,90	1,01
Zirara	T _{min}	Observée	11,69	1,26	10,83	0,02			
		MICE	11,74	0,89	7,64	0,02	2,89	5,72	0,71
		k-NN	12,06	0,88	7,27	0,04	3,21	6,31	0,69
	T _{max}	Observée	26,62	0,89	3,36	0,04			
		MICE	26,68	0,74	2,78	0,04	7,15	13,39	0,83
		k-NN	26,92	0,91	3,38	0,05	6,78	13,65	1,02
	T _{moy}	Observée	19,12	1,02	5,35	0,03			
		MICE	19,21	0,65	3,39	0,03	5,04	9,55	0,63
		k-NN	19,49	0,78	3,98	0,05	5,03	9,98	0,76

St : station ; T_{min} : température minimale (°C) ; T_{max} : température maximale (°C) ; Var. : variable ; M_{imput.} : méthode d'imputation ; Moy : moyenne arithmétique (°C) ; Sd : écart-type (°C) ; et Cv : coefficient de variation (%).

3.4 Analyse du changement passé ou des ruptures

Généralement, certaines séries chronologiques climatiques contiennent des inhomogénéités ou irrégularités qui peuvent conduire implicitement à des interprétations erronées des résultats examinés. Cela requiert alors un processus d'homogénéisation afin de détecter et de corriger les irrégularités. Dans la littérature, plusieurs méthodes d'homogénéisation ont été décrites et ont été classées en plusieurs types en fonction de leurs caractéristiques : les tests non-paramétriques, les tests classiques (techniques traditionnelles), les modèles de régression et les approches bayésiennes (Ribeiro and Caineta, 2016). Dans cette section, la période de référence étudiée est 1981–2016.

3.4.1 Analyse préliminaire

Les tableaux 3.4 et 3.5 présentent l'analyse statistique des variables météorologiques (précipitations, températures moyennes de l'air et évapotranspiration potentielle). Nous avons calculé sur chacune des huit stations les caractéristiques statistiques (moyenne, coefficient de variation et écart-type) saisonnières et annuelles pour la période 1981–2016. Pour le calcul, nous avons considéré l'année hydrologique répartie en saisons : l'automne (septembre, octobre, novembre), l'hiver (décembre, janvier, février), le printemps (mars, avril, mai) et l'été (juin, juillet, août).

a) Précipitations

L'analyse des tableaux 3.4 et 3.5 a révélé que durant la période 1981–2016 les pluviométries moyennes annuelles pour les huit stations sont comprises entre 413,63 mm dans la zone Sud du périmètre du Gharb (Zirara) et 647,19 mm dans la zone côtière du périmètre du Loukkos (Aouamra). Le coefficient de variation de ces précipitations atteint un minimum de 32,23% et un maximum de 36,75%, avec un écart-type variant entre 133,33 mm et 225,52 mm. Les valeurs de ces paramètres montrent que notre région est caractérisée par une forte variabilité annuelle absolue avec un gradient pluviométrique décroissant de l'ouest vers l'est traduisant ainsi l'effet de la continentalité.

Nous observons que pour le périmètre du Loukkos, Mrissa a la plus faible quantité des précipitations ainsi que la plus forte variation de précipitations, ce qui signifie que les précipitations annuelles sont irrégulières. Tandis que pour le périmètre du Gharb, Zirara a la plus faible quantité et la plus faible variation de précipitations.

Lorsque les valeurs des stations sont moyennées par périmètre, les valeurs des précipitations variaient de 478,79 mm à 631,51 mm respectivement pour le périmètre du Gharb et du Loukkos. À noter que les plus faibles valeurs des précipitations ont été enregistrées durant 2015–2016 pour Zirara avec 206,7 mm et durant 1994–1995 pour Mrissa avec 261,10 mm. Tandis que les plus grandes valeurs ont été observées durant 1995–1996 pour Menasra avec 980,8 mm et durant 2009–2010 pour Arbaoua avec 1191,7 mm. Nous remarquons aussi que le gradient pluviométrique est décroissant en allant de l'ouest vers l'est aussi bien pour le périmètre du Gharb que pour celui du Loukkos dû à effet de la continentalité. Les précipitations les plus abondantes se situent dans les stations côtières (Menasra et Aouamra). Ces résultats inter-annuels sont globalement cohérents avec ceux des travaux réalisés antérieurement pour la période 1935–2005 (Sebbar, 2013).

Tableau 3.4 : Analyse statistique par station des précipitations, de la température moyenne et l'évapotranspiration potentielle durant la période 1981-2016 pour le périmètre du Gharb.

Péri/St	Para	Automne			Hiver			Printemps			Été			Annuel		
		Moy	CV	Sd	Moy	CV	Sd	Moy	CV	Sd	Moy	CV	Sd	Moy	CV	Sd
Gharb	P	152,03	53,66	81,59	209,20	59,41	124,28	111,80	51,26	57,31	5,76	153,58	8,84	478,79	33,90	162,33
	T _{moy}	20,38	4,58	0,93	12,59	7,87	0,99	17,47	4,82	0,84	25,20	3,35	0,84	18,91	3,07	0,58
	ETP _{BC50}	406,36	2,30	9,36	292,64	2,74	8,02	432,68	2,36	10,23	568,37	1,91	10,84	1700,06	1,23	20,88
Menasra	P	191,36	57,99	110,97	250,78	61,65	154,60	115,60	51,80	59,88	4,55	194,84	8,87	562,29	34,12	191,87
	T _{moy}	18,90	9,75	1,84	12,36	11,08	1,37	16,35	5,32	0,87	22,22	7,17	1,59	17,46	5,56	0,97
	ETP _{BC50}	389,94	2,98	11,61	290,51	3,24	9,41	418,65	2,39	10,01	528,91	3,18	16,84	1628,02	1,80	29,33
Souk Larbaa	P	162,11	55,14	89,38	216,71	62,48	135,41	113,37	53,96	61,18	5,48	166,70	9,14	497,67	36,23	180,31
	T _{moy}	20,12	8,84	1,78	13,12	11,03	1,45	17,46	9,23	1,61	25,05	6,92	1,73	18,94	6,18	1,17
	ETP _{BC50}	403,40	3,30	13,32	297,84	3,30	9,83	432,38	3,62	15,66	566,44	2,95	16,73	1700,05	2,03	34,50
Dar Gueddari	P	144,34	56,45	81,47	208,34	58,19	121,24	108,55	59,68	64,78	4,96	196,31	9,73	466,19	36,60	170,63
	T _{moy}	20,56	8,53	1,75	12,45	11,34	1,41	17,95	9,09	1,63	25,93	7,67	1,99	19,22	6,71	1,29
	ETP _{BC50}	408,19	3,79	15,48	291,42	3,14	9,14	438,42	3,85	16,90	578,04	3,92	22,64	1716,06	2,56	43,98
Khenichet	P	138,21	56,16	77,61	194,70	63,72	124,07	113,94	53,79	61,28	7,30	195,20	14,26	454,15	36,75	166,91
	T _{moy}	21,35	7,94	1,69	12,76	15,26	1,95	17,82	9,14	1,63	26,61	6,52	1,73	19,63	5,30	1,04
	ETP _{BC50}	416,83	3,59	14,97	294,31	4,58	13,47	437,03	3,88	16,94	587,11	2,64	15,52	1735,27	1,74	30,23
Zirara	P	124,13	55,93	69,43	175,45	57,24	100,43	107,55	53,28	57,30	6,50	173,59	11,28	413,63	32,23	133,33
	T _{moy}	21,00	7,69	1,61	12,23	12,39	1,51	17,79	8,25	1,47	26,19	5,64	1,48	19,30	4,20	0,81
	ETP _{BC50}	413,45	3,24	13,38	289,15	4,42	12,78	436,94	3,31	14,45	581,35	3,40	19,78	1720,88	1,93	33,19

Péri : périmètre ; St : station ; Var. : variable ; P : précipitations (mm) ; T_{moy} : température moyenne de l'air (°C) ; ETP_{BC50} : évapotranspiration potentielle (mm)
Moy, CV et Sd représentent respectivement moyenne, coefficient de variation et écart-type.

Tableau 3.5 : Analyse statistique par station des précipitations, de la température moyenne et l'évapotranspiration potentielle durant la période 1981–2016 pour le périmètre du Loukkos.

Péri/St	Var.	Automne			Hiver			Printemps			Été			Annuel		
		Moy	CV	Sd	Moy	CV	Sd	Moy	CV	Sd	Moy	CV	Sd	Moy	CV	Sd
Loukkos	P	201,82	51,82	104,59	282,45	61,33	173,23	138,53	50,81	70,39	8,70	136,70	11,89	631,51	34,60	218,51
	T_{moy}	20,08	5,85	1,17	12,86	12,88	1,66	17,11	7,11	1,22	24,40	4,49	1,09	18,61	5,53	1,03
	ETP_{BC50}	402,74	2,99	12,04	295,32	4,33	12,78	428,09	3,30	14,15	557,85	2,86	15,98	1684,00	2,32	39,09
Aouamra	P	213,31	51,94	110,79	284,17	62,57	177,82	140,23	52,45	73,55	9,48	167,44	15,87	647,19	33,77	218,57
	T_{moy}	19,80	10,56	2,09	12,72	18,16	2,31	17,18	10,94	1,88	24,08	7,55	1,82	18,45	9,32	1,72
	ETP_{BC50}	399,59	4,91	19,61	293,92	6,63	19,50	428,98	5,30	22,72	553,58	4,51	24,98	1676,06	4,33	72,60
Mrissa	P	193,98	53,54	103,86	275,21	59,63	164,11	133,36	54,07	72,11	11,30	166,02	18,76	613,85	36,07	221,39
	T_{moy}	20,43	6,51	1,33	12,85	16,31	2,10	17,24	8,73	1,50	24,90	5,11	1,27	18,85	6,42	1,21
	ETP_{BC50}	406,59	3,48	14,17	295,16	5,25	15,50	429,83	3,79	16,30	564,39	3,07	17,32	1695,97	2,78	47,13
Arbaoua	P	198,18	53,68	106,38	287,97	62,57	180,17	142,01	54,85	77,89	5,32	172,84	9,20	633,49	35,60	225,52
	T_{moy}	20,02	9,94	1,99	13,02	12,58	1,64	16,90	8,02	1,36	24,24	6,60	1,60	18,54	6,20	1,15
	ETP_{BC50}	402,04	5,50	22,11	296,88	4,99	14,82	425,46	3,95	16,80	555,60	4,52	25,13	1679,97	2,92	49,04

Péri : périmètre ; St : station ; Var. : variable ; P : précipitations (mm) ; T_{moy} : température moyenne de l'air (°C) ; ETP_{BC50} : évapotranspiration potentielle (mm)
Moy, CV et Sd représentent respectivement moyenne, coefficient de variation et écart-type.

D'un point de vue saisonnier, et durant la période 1981-2016, les précipitations les plus importantes tombaient principalement en hiver, entre décembre et février, et représentent plus de 42,4% pour le périmètre du Gharb et plus de 43,9% pour le périmètre du Loukkos des précipitations annuelles totales. Ce qui signifie que la plupart des stations des deux périmètres sont soumises à un régime saisonnier de type HAPE, c'est-à-dire à un maximum pluviométrique centré sur la saison hivernale. Nous remarquons que le coefficient de variation varie considérablement d'une saison à l'autre (entre 51% et 196% (cf. tableau 3.4)). Cela signifie qu'il y avait une forte variabilité relative intra-saisonnière. Pour les deux périmètres, la plus grande variabilité a été observée en saison estivale où le coefficient de variation atteignait 172,84% pour Arbaoua (périmètre du Loukkos) et 196,31% pour Dar Gueddari (périmètre du Gharb).

b) Température moyenne

Les températures moyennes inter-annuelles quant à elles varient entre 17,46 °C et 19,63 °C respectivement dans la zone côtière et le sud du périmètre du Gharb avec des coefficients de variation oscillant entre 4,20% et 9,32% et un écart-type variant entre 0,81 °C et 1,72 °C. Toute station confondue, la température moyenne est de 18,61 °C pour le périmètre du Loukkos et de 18,91 °C pour le périmètre du Gharb. À signaler que les plus faibles valeurs de la température moyenne ont été enregistrées durant 2004-2005 pour Menasra avec 16,19 °C et durant 1994-1995 pour Aouamra avec 15,98 °C. Tandis que les plus grandes valeurs ont été observées durant 2005-2006 pour Dar Gueddari avec 21,37 °C et durant 2009-2010 pour Aouamra avec 24,10 °C.

À l'échelle saisonnière, les températures moyennes sont comprises entre 12,23 °C pour la saison hivernale (Zirara) et 26,61 °C pour la saison estivale (Khenichet) avec un écart-type allant de 0,84 °C (Printemps-station Menasra) à 2,31 °C (Hiver-Aouamra) et un coefficient de variation de 5,11% à 15,25%, respectivement pour la saison estivale (Mrissa) et pour la saison hivernale (Khenichet).

c) Évapotranspiration potentielle

Le cumul annuel de l'évapotranspiration potentielle varie : (i) entre 1628,02 mm (Menasra) et 1735,27 mm (Khenichet) avec une moyenne de 1700,06 mm à l'échelle du Gharb (moyenne des valeurs moyenne de toutes les stations) ; (ii) entre 1676,06 mm (Aouamra) et 1695,97 mm (Mrissa) avec une moyenne de 1684,00 mm à l'échelle du Loukkos (moyenne des valeurs moyenne de toutes les stations). Nous constatons que l'évapotranspiration du périmètre du Gharb est plus forte que celle du périmètre du Loukkos. En général, les coefficients de variation oscillent entre 1,74% (Khenichet) et 4,33% (Aouamra) avec des écarts-types de 29,33 mm (Menasra) et 72,60 mm (Aouamra). À noter que les plus faibles valeurs d'évapotranspiration potentielle ont été enregistrées durant 2004-2005 pour Menasra avec 1570,65 mm et durant 1982-1983 pour Aouamra avec 1562,8 mm. Tandis que les plus grandes valeurs étaient durant 2002-2003 pour Dar Gueddari avec 1825,46 mm et durant 1999-2000 pour Aouamra, soit 1940,03 mm.

À l'échelle saisonnière, les valeurs de l'évapotranspiration potentielle oscillent entre 289,15 mm pour la saison hivernale (Zirara) et 587,11 mm pour la saison estivale (Khenichet) avec un écart-type allant de 9,41 mm (Hiver-Menasra) à 25,13 mm (Été-Arbaoua) et un coefficient de variation allant de 2,39% à 6,63%, respectivement pour la saison

printanière (Menasra) et la saison hivernale (Aouamra).

d) Synthèse

Les figures 3.2 et 3.3 montrent respectivement les variabilités annuelle et saisonnière des précipitations (cumulées), de la température moyenne et de l'évapotranspiration potentielle (cumulée) dans les trois périodes référentielles $SCR_{1981-1994}$, $SCR_{1994-2005}$ et $SCR_{2005-2016}$.

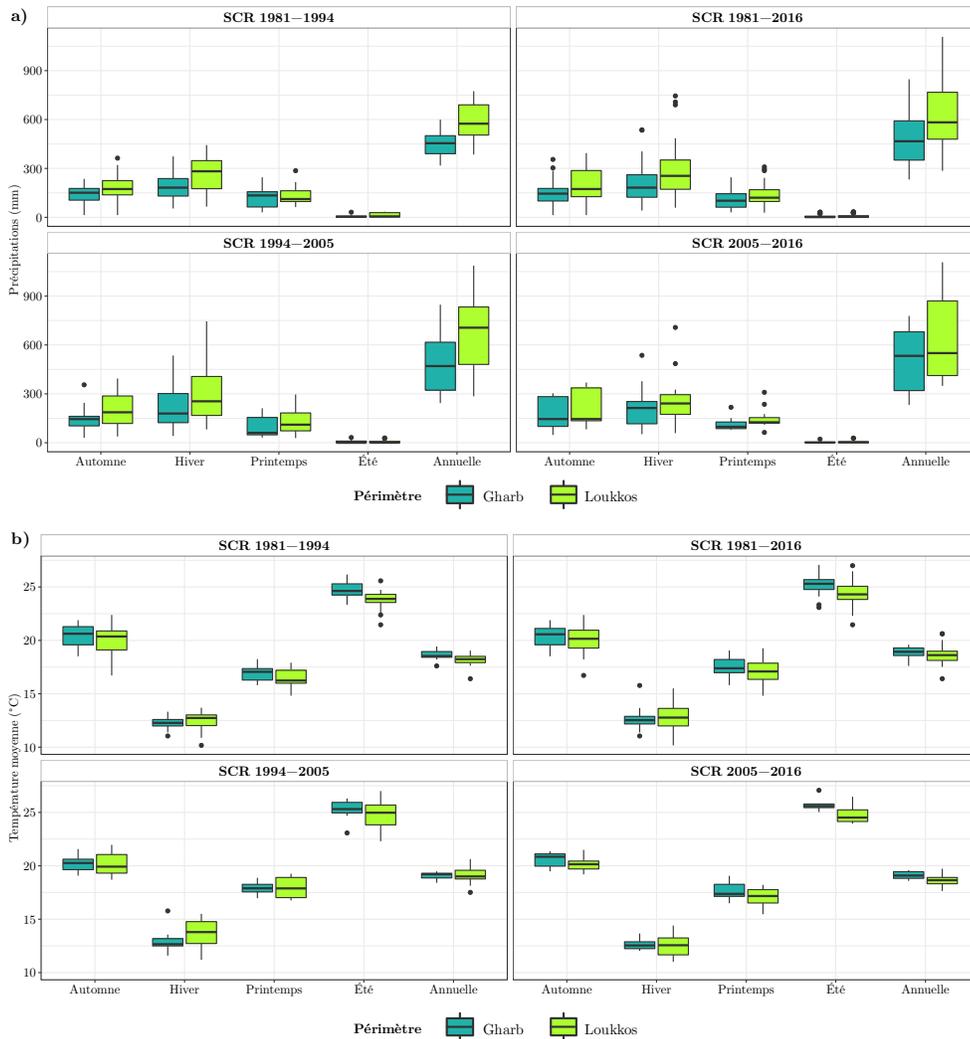


FIGURE 3.2 : Variations de (a) précipitations et (b) températures moyennes saisonnières et annuelles (mm/période) pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb.

La répartition saisonnière inter-annuelle des précipitations confirme bien que les cumuls des précipitations sont plus importants dans le périmètre du Loukkos que dans le périmètre du Gharb et avec une variabilité plus importante pour toutes les saisons des périodes considérées (avec des écarts-types allant de 6,55 mm (été $SCR_{2005-2016}$) à 200,36 mm (annuelle $SCR_{2005-2016}$) pour Gharb et de 10,78 mm (été $SCR_{2005-2016}$) à 265,71 mm (annuelle $SCR_{2005-2016}$) pour Loukkos). À l'exception de l'été en $SCR_{1994-2005}$, dans lequel les cumuls sont presque les mêmes pour les deux périmètres.

En comparant les trois scénarios entre eux, l'ordre de dominance des précipitations est récapitulé dans le tableau 3.6. À l'échelle annuelle, les précipitations ont augmenté de 5,86% en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$ et de 5,58% en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$ pour le périmètre du Gharb. Alors que pour le périmètre du Loukkos, elles ont haussé de 13,74% en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$, puis elles ont baissé de 3,48% en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$.

Quant à la température moyenne, le périmètre du Gharb est généralement plus chaud que celui du Loukkos. À l'échelle annuelle, et pour le périmètre du Gharb, les températures moyennes ont cru de 0,48 °C en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$ et de 0,03 °C en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$. Tandis que pour le périmètre du Loukkos, elles ont augmenté de 1,01 °C en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$, puis elles ont diminué de 0,49 °C en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$.

Nous observons aussi que :

- ✧ En automne et en été, il fait légèrement plus chaud dans le périmètre du Gharb que dans le périmètre du Loukkos durant tous les scénarios de référence (avec un écart allant de 0,04 °C à 1,00 °C) ;
- ✧ En printemps, il fait légèrement plus chaud dans le périmètre du Gharb que dans le périmètre du Loukkos durant les scénarios de référence 1981–1994 (écart de 0,63 °C) et 2005–2016 (écart de 0,52 °C) et l'inverse durant la période de référence 1994–2005 (écart de -0,08 °C) ;
- ✧ En hiver, il fait plus chaud dans le périmètre du Loukkos que dans le périmètre du Gharb durant tous les scénarios de référence (avec un écart allant de -0,68 °C à -0,22 °C) à l'exception du $SCR_{2005-2016}$ (écart de 0,05 °C).

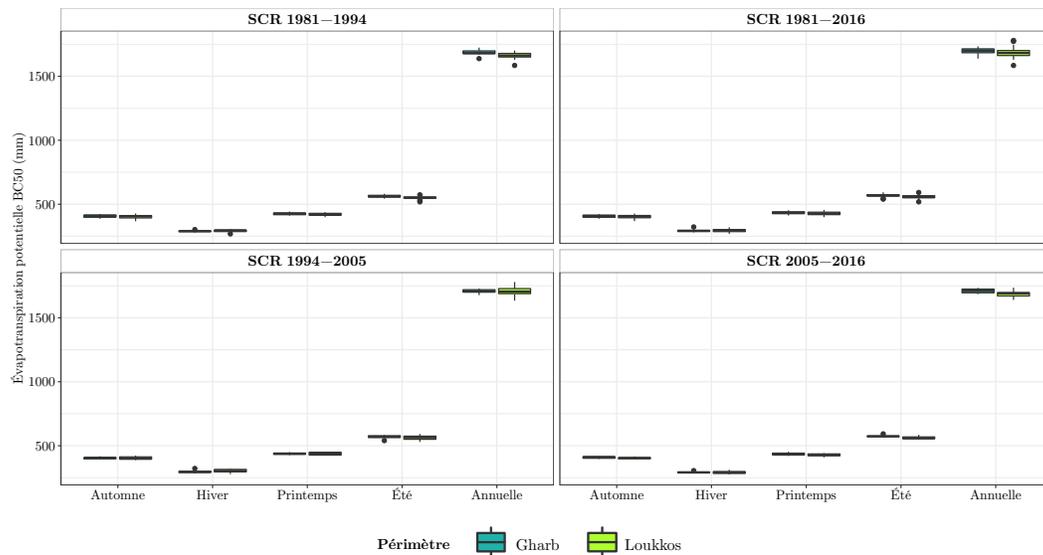


FIGURE 3.3 : Variations des évapotranspirations potentielles saisonnières et annuelles (mm/période) pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb.

Tableau 3.6 : Ordre de dominance des précipitations, des températures et évapotranspirations potentielles saisonnières et annuelles en fonction des trois scénarios de référence.

Var.	Ordre de dominance	Périmètre	Saisons/Annuelle	SCR1 vs SCR2	SCR2 vs SCR3	Allure	
P	SCR1 > SCR3 > SCR2	Gharb	Printemps	-11,43	10,93		
		Loukkos	Été	-42,07	1,15		
	SCR3 > SCR1 > SCR2	Loukkos	Printemps	-0,47	12,27		
		Gharb	Automne et Annuelle	[6,46 et 5,86]	[16,35 et 5,58]		
	SCR3 > SCR2 > SCR1	Loukkos	Automne	9,72	3,53		
		Gharb	Hiver	15,88	-2,52		
	SCR2 > SCR3 > SCR1	Loukkos	Hiver et Annuelle	[26,77 et 13,74]	[-14,56 et -3,48]		
		Gharb	Été	7,58	-44,36		
	T moy et ETP BC50	SCR3 > SCR1 > SCR2	Gharb	Automne	-0,24	0,37	
			Loukkos	Été et Annuelle	[0,55 et 0,48]	[0,38 et 0,03]	
Gharb		Hiver et Printemps	[0,65 et 0,96]	[-0,3 et -0,31]			
SCR2 > SCR3 > SCR1	Loukkos	Hiver, Printemps, Été et Annuelle	[1,1; 1,68 et 1,01]	[-1,03; -0,91 et -0,49]			

Var. : variable; P : précipitations (mm) ; T_{moy} : température moyenne de l'air (°C) ; ETP_{BC50} : évapotranspiration potentielle (mm) ; et Vari. : variation (%).
 SCR1 : SCR₁₉₈₁₋₁₉₉₄, SCR2 : SCR₁₉₉₄₋₂₀₀₅, SCR3 : SCR₂₀₀₅₋₂₀₁₆
 1981 vs 1994 : comparaison du SCR 1994-2005 par rapport à 1981-1994
 2005 vs 2016 : comparaison du SCR 2005-2016 par rapport à 1994-2005

Les cumuls de l'évapotranspiration potentielle varient de la même façon que la variation des températures moyennes quelles que soient la saison et la période de référence. Pour les deux périmètres, nous remarquons aussi que les évapotranspirations potentielles sont plus élevées en été suivi par le printemps, l'automne et l'hiver.

3.4.2 Tests statistiques de détection de rupture

Les changements significatifs dans une série de données se marquent par une rupture de la pente. La détection de cette rupture (ou points de changement de la pente) est l'estimation du point auquel les propriétés statistiques, dont la moyenne ou la variance, d'une série chronologique sont différentes (Killick and Eckley, 2014). Alors que la tendance peut être définie comme une estimation d'un changement graduel d'événements futurs à partir de données passées.

De nombreux tests de détection de rupture ont été proposés pour des changements multiples et simples. Dans cette étude, les dates de ces changements sont marquées par des ruptures au niveau de la moyenne des variables climatiques étudiées. Pour cela, nous avons utilisé trois tests d'homogénéisation en raison de leur efficacité et leur popularité. Il s'agit du test non-paramétrique de Pettitt (1979), du test paramétrique classique de Buishand (1982), et de la procédure d'homogénéisation SNH de Alexandersson (1986). Les deux derniers tests ont été recommandés par l'Organisation météorologique mondiale (Organization, 1989). Les tests de Pettitt et Buishand sont plus sensibles aux ruptures au milieu de la série chronologique (Ribeiro and Caineta, 2016). Alors que le test SNH est considéré comme l'une des méthodes d'homogénéisation les plus populaires et les plus robustes pour les variables climatiques (Ribeiro and Caineta, 2016).

Par ailleurs, l'hypothèse nulle (H_0) d'homogénéité des données ou d'absence de rupture dans les séries chronologiques, des précipitations et températures complètes, a été testée par ces trois tests statistiques à un degré de signification fixé à 5% et 1%. L'hypothèse H_0 est retenue, signifie qu'il n'y pas de cassure significative au sein de la série et que les données de cette série sont donc homogènes. Dans le cas contraire, H_0 est rejetée quand la valeur p-value est inférieure aux degrés de signification fixés. Ainsi l'hypothèse d'hétérogénéité de la série de données est retenue ce qui indique un changement significatif dans cette dernière et par conséquent l'estimation de la date de rupture est donc possible. Pour plus d'informations sur les tests utilisés, consulter l'annexe B et les références (Alexandersson, 1986; Buishand, 1982; Pettitt, 1979).

Pour ce faire, nous avons appliqué les fonctions du package 'trend' version 1.0.0 ('Pettitt.test', 'bu.test' et 'snh.test') du langage R pour obtenir des hypothèses sur les dates de ruptures (Pohlert, 2017).

3.4.3 Résultats des tests statistiques de détection de rupture

Comme discuté précédemment, les tests d'homogénéité Pettitt, SNH et U-Buishand ont été appliqués aux séries de données des précipitations mesurées, de la température moyenne comblée et d'évapotranspiration potentielle estimée à des niveaux de signification de 5% et 1% pour la période 1981–2016. Ces tests donnent une idée si la série étudiée est homogène ou hétérogène. Ils indiquent aussi la date de rupture dans la série qui serait hétérogène. Les dates de ruptures communes et les écarts sont récapitulés dans le tableau 3.7. Le tableau 3.8 illustre les valeurs statistiques des tests d'homogénéité.

Tableau 3.7 : Dates des ruptures communes par station pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb. Période 1981–2016.

Péri/St	Var.	D_{com}	Test Pettitt		Test SNH		Test U-Buishand	
			D_{rup}	Écart	D_{rup}	Écart	D_{rup}	Écart
Gharb	P	2007-2008	2007-2008	20,24	2014-2015	-51,94	2007-2008	20,24
	T_{moy}	1993-1994	1993-1994	0,50	1993-1994	0,50	1993-1994	0,50
Menasra	P	1994-1995	1994-1995	15,83	2014-2015	-58,51	1994-1995	15,83
	T_{moy}	1998-1999	1998-1999	-0,35	2014-2015	1,44	1998-1999	-0,35
Souk Larbaa	P	1994-1995	1994-1995	20,92	1994-1995	20,92	1994-1995	20,92
	T_{moy}	-	1986-1987	0,69	2012-2013	1,15	2010-2011	0,82
Dar Gueddari	P	-	2010-2011	-17,19	2014-2015	-51,13	2007-2008	17,38
	T_{moy}	2001-2002	1994-1995	0,91	2001-2002	0,89	2001-2002	0,89
Khenichet	P	2007-2008	2007-2008	24,76	2007-2008	24,76	2007-2008	24,76
	T_{moy}	1993-1994	1993-1994	0,52	1993-1994	0,52	1993-1994	0,52
Zirara	P	1994-1995	1994-1995	16,61	2014-2015	-50,99	1994-1995	16,61
	T_{moy}	1993-1994	1998-1999	0,87	1993-1994	0,95	1993-1994	0,95
Loukkos	P	1994-1995	1994-1995	19,09	1994-1995	19,09	1994-1995	19,09
	T_{moy}	1993-1994	1993-1994	0,77	1982-1983	1,69	1993-1994	0,77
Aouamra	P	1994-1995	1994-1995	18,10	1994-1995	18,10	1994-1995	18,10
	T_{moy}	1995-1996	1995-1996	1,68	1995-1996	1,68	1995-1996	1,68
Mrissa	P	1994-1995	1994-1995	19,68	1994-1995	19,68	1994-1995	19,68
	T_{moy}	1989-1990	1989-1990	0,76	1989-1990	0,76	1989-1990	0,76
Arbaoua	P	1994-1995	1994-1995	19,55	1994-1995	19,55	1994-1995	19,55
	T_{moy}	-	2007-2008	0,70	1982-1983	2,03	2006-2007	0,65

Péri. : périmètre; St : station; Var. : variable; P : précipitations (mm); T_{moy} : température moyenne de l'air en (°C); D_{com} : date commune de rupture; D_{rup} : date de rupture; et Écart : écart entre les moyennes avant et après rupture (Eq.3.9).

$$\text{Écart} = \begin{cases} \frac{\mu_{ap} - \mu_{av}}{\mu_{av}} \times 100, & \text{pour P} \\ \mu_{ap} - \mu_{av}, & \text{pour } T_{moy} \end{cases} \quad (3.9)$$

Tableau 3.8 : Tests de détection des ruptures par station pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb. Période 1981–2016.

Péri/St	Var.	Test Pettitt				Test SNH				Test U-Buishand			
		K	p-val	D_{rup}	μ_{av}	Sta.	D_{rup}	μ_{av}	μ_{ap}	Sta.	D_{rup}	μ_{av}	μ_{ap}
Gharb	P	64	1,15	2007-2008	459,52	2	2014-2015	488,03	234,56	0,06	2007-2008	459,52	552,55
	T_{moy}	184	0,02	1993-1994	18,60	10	1993-1994	18,60	19,10	0,74	1993-1994	18,60	19,10
Menasra	P	72	0,99	1994-1995	515,34	3	2014-2015	573,89	238,10	0,06	1994-1995	515,34	596,92
	T_{moy}	108	0,41	1998-1999	17,63	5	2014-2015	17,42	18,86	0,12	1998-1999	17,63	17,28
Souk Larbaa	P	74	0,95	1994-1995	443,96	2	1994-1995	443,96	536,81	0,08	1994-1995	443,96	536,81
	T_{moy}	110	0,39	1986-1987	18,36	7	2012-2013	18,84	19,99	0,20	2010-2011	18,82	19,64
Dar Gueddari	P	50	1,42	2010-2011	479,97	2	2014-2015	475,13	232,20	0,04	2007-2008	450,30	528,55
	T_{moy}	172	0,04	1994-1995	18,68	8	2001-2002	18,84	19,73	0,62	2001-2002	18,84	19,73
Khenichet	P	62	1,19	2007-2008	431,71	3	2007-2008	431,71	538,61	0,06	2007-2008	431,71	538,61
	T_{moy}	137	0,16	1993-1994	19,31	5	1993-1994	19,31	19,83	0,22	1993-1994	19,31	19,83
Zirara	P	72	0,99	1994-1995	377,97	3	2014-2015	421,78	206,70	0,09	1994-1995	377,97	440,74
	T_{moy}	230	0,00	1998-1999	18,88	16	1993-1994	18,70	19,66	1,50	1993-1994	18,70	19,66
Loukkos	P	74	0,95	1994-1995	568,39	2	1994-1995	568,39	676,92	0,06	1994-1995	568,39	676,92
	T_{moy}	160	0,06	1993-1994	18,13	8	1982-1983	17,02	18,71	0,44	1993-1994	18,13	18,90
Aouamra	P	66	1,11	1994-1995	585,59	2	1994-1995	585,59	691,59	0,06	1994-1995	585,59	691,59
	T_{moy}	226	0,00	1995-1996	17,49	10	1995-1996	17,49	19,16	0,56	1995-1996	17,49	19,16
Mrissa	P	76	0,91	1994-1995	550,80	2	1994-1995	550,80	659,21	0,06	1994-1995	550,80	659,21
	T_{moy}	98	0,54	1989-1990	18,27	3	1989-1990	18,27	19,03	0,16	1989-1990	18,27	19,03
Arbaoua	P	68	1,07	1994-1995	568,78	2	1994-1995	568,78	679,96	0,06	1994-1995	568,78	679,96
	T_{moy}	88	0,70	2007-2008	18,38	7	1982-1983	16,63	18,66	0,18	2006-2007	18,37	19,03

Péri. : périmètre ; St : station ; P : précipitations (mm) ; T_{moy} : température moyenne de l'air (°C) ; Var. : variable ; K : valeur statistique ; p-val : p-value ; D_{rup} : date de rupture ; μ_{av} : moyenne avant la rupture ; μ_{ap} : moyenne après la rupture ; et Sta. : valeur statistique du test.

a) Analyse des dates de ruptures des précipitations

Les résultats montrent que toutes les valeurs des trois tests statistiques (Pettitt, SNH et U-Buisahnd) sont supérieures aux valeurs critiques à des seuils de 5% et 1%. De ce fait, l'hypothèse nulle d'homogénéité a été acceptée pour toutes les stations des deux périmètres. Par conséquent, les séries annuelles des précipitations sont homogènes. Aussi, ces tests ne montrent pas de ruptures significatives pour les données traitées des précipitations au niveau de la majorité des stations. Ce résultat est cohérent avec ceux des travaux réalisés sur la région Souss-Massa au sud du Maroc et les bassins Bouregreg et Tensift respectivement à l'ouest et au centre du Maroc. Ces travaux ont confirmé aussi que les séries de précipitations sont homogènes respectivement sur les périodes 2002–2016 (Milewski et al., 2019), 1932–2010 (Abahous et al., 2017) et 1977–2003 (Khomsi et al., 2016).

• Cas du périmètre Gharb

Nous observons que 60% des stations du Gharb ont été affectées par une date de rupture commune non significative en 1994–1995, à savoir : Menasra, Souk Larbaa et Zirara. Khenichet, quant à elle, présente une date de rupture commune en 2007–2008. Alors que Dar Gueddari était marquée par différentes dates de ruptures selon le test appliqué.

Toutefois, il est à noter que certaines stations ont montré des déficits et d'autres des gains mais toujours non significatifs. L'écart avant et après les ruptures varie entre -58,51% (Menasra-Test SNH) et 24,76% (Khenichet pour le test Pettitt). Un gain au niveau des précipitations a été rencontré pour 80% des stations pour le test U-Buishand et 40% des stations pour les deux tests Pettitt et SNH.

• Cas du périmètre Loukkos

Pour toutes les stations, la date de rupture commune a été repérée en 1994–1995, quoique non significative. Un gain des précipitations a été observé avec des valeurs allant de 18,10% pour Aouamra à 19,68% pour Mrissa.

À signaler que l'année 1994-1995 a été considérée comme l'une des années exceptionnellement sèche ayant touché le Maroc. De telle sorte que le taux de remplissage des barrages a largement diminué, soit un taux de remplissage moyen de 29,7% contre 50,6% de l'année précédente (Driouech, 2010; Sebbar, 2013).

b) Analyse des dates de ruptures de la température moyenne

• Cas du périmètre Gharb

La majorité des stations du Gharb ont été marquées par une date de rupture commune des températures en 1993–1994 (Menasra, Khenichet (non significative) et Zirara (significative)). Tandis que 2001–2002 a été détectée comme date de rupture commune pour Dar Gueddari (significative). Toutes les stations ont connu une hausse de la température après les dates de ruptures avec un minimum de +0,52 °C (Khenichet) et un maximum de +1,44 °C (Menasra pour le test SNH), à l'exception de Menasra qui a connue une diminution de la température moyenne de l'ordre de 0,35 °C (Test U-Buishand).

- **Cas du périmètre Loukkos**

Deux dates de ruptures communes ont été manifestées pour les séries annuelles de la température moyenne. La première date observée est 1995-1996 pour la série de Aouamra (significative) avec un écart de $+1,68$ °C. Et la deuxième observée en 1989-1990 pour Mrissa (non significative) avec un écart de $+0,76$ °C. Ces résultats diffèrent de ceux réalisés par [Khomsi et al. \(2016\)](#) sur la période 1977-2003. Leurs travaux ont montré que les séries de température ne présentent aucune date de rupture significative selon le test Pettitt.

3.5 Analyse des tendances

3.5.1 Tests statistiques d'analyse des tendances

Dans cette sous-section, nous présentons les résultats des deux tests statistiques appliqués afin de déterminer l'importance des tendances (linéaires et non-linéaires) observées et de calculer leur ampleur sur différents pas de temps. Il s'agit des tests non-paramétriques de Mann-Kendall ([Kendall, 1975](#); [Mann, 1945](#)) et de [Sen \(1968\)](#) (cf. annexe B).

Pour réaliser ces tests de tendance, nous avons utilisé la fonction 'MannKendall' du package 'Kendall' ([Mcleod, 2015](#)) et la fonction 'Sens.slope' du langage R package 'trend' ([Pohlert, 2017](#)). Pour classer le niveau de confiance des tendances positives et négatives, nous avons pris comme seuils des niveaux significatifs de 5%, 1% et 0,1%. Ensuite, nous avons interpolé spatialement, via la méthode d'interpolation IDW (Pondération par l'inverse de la distance), les tendances observées par le test de l'estimateur de la pente Sen's.

Dans ce qui suit, nous interprétons les résultats obtenus par les deux tests de ([Kendall, 1975](#); [Mann, 1945](#)) et ([Sen, 1968](#)).

3.5.2 Tendances des variables météorologiques étudiées

Les résultats des tests statistiques de Mann-Kendall et de Sen's pour les précipitations, températures moyennes et évapotranspirations potentielles mensuelles saisonnières et annuelles sur la période de référence 1981–2016 sont présentés dans les tableaux 3.9–3.11.

Tableau 3.9 : Résultat des tests de Mann-Kendall et de Sen's des précipitations (P) et de la température moyenne (T_{moy}) pour chaque station météorologique du périmètre du Gharb. Période 1981–2016.

St	Var.	Test	Mois												Saison			Annuel	
			Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Aut	Hiv	Prin		Été
Gh.	P	τ	0.19	0.2	0.02	-0.05	0.09	-0.05	0.12	-0.08	0.04	-0.09	0.08	0.1	0.08	-0.13	0.01	-0.08	0.03
	Q_{med}		0.24	0.92	0.25	-0.25	0.51	-0.27	0.56	-0.29	0.06	0.00	0.00	0.00	1.24	-0.03	0.13	-0.86	0.76
	T_{moy}	τ	0.07	0.04	-0.07	-0.04	0.29*	0.05	-0.04	0.18	0.2	0.38**	0.11	0.28*	-0.04	0.43***	0.2	0.13	0.29*
Mena.	P	Q_{med}	0.01	0.01	-0.02	0.00	0.03	0.01	-0.01	0.04	0.04	0.06	0.02	0.04	-0.01	0.05	0.03	0.01	0.02
	τ		0.22	0.2	-0.04	-0.05	0.05	-0.1	0.15	-0.02	0.1	0	0.19	0.23	0.1	-0.09	0.07	-0.07	0.05
	Q_{med}		0.31	1.18	-0.35	-0.27	0.43	-0.76	0.96	-0.12	0.09	0.00	0.00	0.00	1.22	0.00	0.85	-1.29	1.83
Sla.	T_{moy}	τ	-0.05	0.06	-0.23	-0.16	0.09	-0.19	-0.04	0	0.18	0.2	0.01	0	-0.13	0.09	0.1	-0.17	-0.04
	P	Q_{med}	-0.01	0.01	-0.05	-0.03	0.02	-0.04	-0.01	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	-0.02	0.01	0.01	-0.02	0.00
	τ		0.17	0.25*	0.02	-0.07	0.12	-0.08	0.11	-0.07	-0.01	-0.11	0.09	0.11	0.15	-0.12	0.02	-0.05	0.06
DGu.	Q_{med}		0.13	1.29	0.07	-0.40	0.94	-0.40	0.53	-0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	1.93	0.00	0.10	-0.80	2.00
	T_{moy}	τ	-0.07	-0.01	0.02	0.13	0.15	0.02	-0.09	0.09	0.16	0.2	0.1	0.23	-0.04	0.24*	0.08	0.12	0.16
	P	Q_{med}	-0.02	0.00	0.01	0.03	0.04	0.00	-0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.05	-0.01	0.05	0.02	0.02	0.02
Khen.	τ		0.13	0.28*	-0.02	-0.07	0.05	-0.1	0.06	-0.08	0.03	-0.21	-0.27	-0.16	0.12	-0.23	-0.01	-0.11	-0.06
	Q_{med}		0.21	1.31	-0.15	-0.43	0.36	-0.48	0.31	-0.28	0.05	0.00	0.00	0.00	1.71	0.00	-0.07	-1.76	-1.07
	T_{moy}	τ	0.08	0.02	-0.06	-0.1	0.41***	0.14	0.16	0.22	0.03	0.29*	-0.03	0.09	0.04	0.22	0.23	0.18	0.21
Zir.	P	Q_{med}	0.03	0.01	-0.01	-0.03	0.07	0.02	0.04	0.07	0.00	0.09	-0.01	0.03	0.01	0.04	0.04	0.02	0.03
	τ		0.17	0.07	0.05	-0.09	0.09	-0.04	0.11	-0.11	0.01	-0.11	-0.01	-0.14	0.05	-0.14	-0.02	-0.06	0.01
	Q_{med}		0.17	0.25	0.53	-0.48	0.56	-0.29	0.33	-0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	-0.09	-1.10	0.09
Zir.	T_{moy}	τ	0.09	-0.08	-0.09	0.09	0.12	0.2	0.02	0.2	0.07	0.14	-0.09	-0.04	-0.08	-0.04	0.08	0.28*	0.12
	P	Q_{med}	0.03	-0.02	-0.03	0.03	0.02	0.06	0.00	0.04	0.02	0.05	-0.04	-0.01	-0.02	-0.01	0.02	0.04	0.01
	τ		0.16	0.04	0.06	0.02	0.1	-0.03	0.18	-0.12	-0.03	-0.04	0.11	0.18	0.1	-0.05	0.02	-0.03	0.09
Zir.	Q_{med}		0.08	0.16	0.38	0.16	0.62	-0.08	0.60	-0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	1.11	0.00	0.23	-0.21	2.00
	T_{moy}	τ	0.16	0.13	0.05	-0.02	0.1	-0.04	-0.01	0.16	0.38**	0.32**	0.37**	0.38**	0.09	-0.05	0.32**	0.49***	0.47***
	P	Q_{med}	0.04	0.03	0.01	-0.01	0.02	-0.01	0.00	0.05	0.11	0.08	0.10	0.13	0.02	-0.01	0.05	0.09	0.05

St : station ; Var. : variable ; P : précipitations (mm) ; T_{moy} : température moyenne de l'air ($^{\circ}C$) ; τ : statistique du test de Mann-Kendall ; Q_{med} : pente du test de Sen's (mm/période pour P et $^{\circ}C$ /période pour T_{moy} avec période : mois ou saison ou an) ; * niveau de signification des tendances de 5%, ** de 1% et *** de 0,1%.

Tableau 3.10 : Résultat des tests de Mann-Kendall et de Sen's des précipitations (P) et de la température moyenne (T_{moy}) pour chaque station météorologique du périmètre du Loukkos. Période 1981–2016.

St	Var.	Test	Mois												Saison			Annuel	
			Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Aut	Hiv	Prin		Été
Louk.	P	τ	0.19	0.2	-0.03	-0.05	0.12	-0.08	0.1	-0.02	0.1	-0.09	-0.34*	-0.26	0.07	-0.27*	0.12	-0.07	0.03
	T_{moy}	Q_{med}	0.28	1.22	-0.42	-0.43	0.88	-0.57	0.48	-0.16	0.28	0.00	0.00	0.00	1.33	-0.09	0.78	-1.60	1.37
		τ	-0.07	0.09	-0.01	-0.02	0.26*	0	-0.08	0.16	0.31**	0.3*	0.05	0.23	-0.02	0.26*	0.23	0.06	0.23
		Q_{med}	-0.02	0.02	0.00	-0.01	0.05	0.00	-0.01	0.03	0.07	0.07	0.01	0.04	0.00	0.04	0.04	0.01	0.02
Aoua.	P	τ	0.12	0.21	-0.04	-0.06	0.1	-0.06	0.13	0.02	0.14	-0.13	-0.15	-0.1	0.02	-0.13	0.1	-0.05	0.03
	T_{moy}	Q_{med}	0.05	1.38	-0.73	-0.50	0.69	-0.47	0.69	0.13	0.38	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	0.73	-1.32	1.45
		τ	0.14	0.25*	0.1	0.02	0.3*	-0.01	0.05	0.18	0.27*	0.28*	0.18	0.28*	0.16	0.29*	0.23	0.14	0.31**
		Q_{med}	0.04	0.08	0.02	0.00	0.08	0.00	0.01	0.05	0.09	0.06	0.05	0.07	0.05	0.06	0.05	0.02	0.04
Mri.	P	τ	0.17	0.19	-0.01	-0.04	0.1	-0.06	0.12	-0.02	0.1	-0.09	-0.40	-0.29	0.06	-0.27*	0.13	-0.07	0.04
	T_{moy}	Q_{med}	0.25	1.16	-0.13	-0.57	1.09	-0.52	0.54	-0.10	0.22	0.00	0.00	0.00	1.10	-0.14	0.75	-1.61	1.47
		τ	-0.15	0.11	-0.02	-0.1	0.11	-0.1	-0.1	0.15	0.24*	0.2	0.07	0.1	-0.05	0.18	0.17	-0.05	0.08
		Q_{med}	-0.05	0.02	0.00	-0.03	0.02	-0.02	-0.02	-0.02	0.04	0.06	0.01	0.02	-0.01	0.04	0.03	-0.01	0.01
Arb.	P	τ	0.25*	0.2	0.03	-0.03	0.1	-0.12	0.06	-0.02	0.06	-0.13	-0.06	-0.13	0.12	-0.18	0.02	-0.09	0.01
	T_{moy}	Q_{med}	0.33	1.03	0.24	-0.41	0.70	-1.04	0.22	-0.09	0.23	0.00	0.00	0.00	1.85	0.00	0.25	-1.97	0.47
		τ	-0.07	-0.05	-0.12	-0.03	0.17	-0.01	-0.06	0.15	0.32**	0.28*	-0.03	0.11	-0.06	0.2	0.2	0.06	0.12
		Q_{med}	-0.03	-0.03	-0.03	-0.01	0.04	0.00	-0.02	0.05	0.08	0.09	-0.01	0.03	-0.03	0.04	0.03	0.01	0.02

St : station ; Var. : variable ; P : précipitations (mm) ; T_{moy} : température moyenne de l'air ($^{\circ}C$) ; τ : statistique du test de Mann-Kendall ; Q_{med} : pente du test de Sen's (mm/période pour P et $^{\circ}C$ /période pour T_{moy} avec période : mois ou saison ou an) ; * niveau de signification des tendances de 5%, ** de 1% et *** de 0,1%.

Tableau 3.11 : Résultat des tests de Mann-Kendall et de Sen's de l'évapotranspiration potentielle (ETP_{BC50}) pour chaque station météorologique des deux périmètres du Loukkos et Gharb. Période 1981–2016.

Péri/St	Test	Mois												Saison			Annuel	
		Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Aut	Hiv	Prin		Été
Gh.	τ	0.07	0.04	-0.07	-0.04	0.29*	0.05	-0.04	0.18	0.2	0.38**	0.11	0.28*	-0.05	0.43***	0.19	0.11	0.33**
	Q_{med}	0.04	0.03	-0.05	-0.01	0.11	0.04	-0.03	0.14	0.20	0.28	0.09	0.18	-0.04	0.61	0.32	0.11	1.04
Mena.	τ	-0.05	0.06	-0.23	-0.16	0.09	-0.16	-0.04	0	0.18	0.2	0.01	0	-0.14	0.09	0.11	-0.16	-0.04
	Q_{med}	-0.03	0.04	-0.14	-0.08	0.06	-0.13	-0.05	0.00	0.20	0.13	0.00	0.00	-0.15	0.17	0.12	-0.22	-0.12
SLa.	τ	-0.07	-0.01	0.02	0.13	0.15	0.04	-0.09	0.09	0.16	0.2	0.1	0.23	-0.06	0.24*	0.09	0.11	0.17
	Q_{med}	-0.06	-0.01	0.03	0.09	0.13	0.04	-0.09	0.08	0.17	0.17	0.15	0.23	-0.09	0.61	0.19	0.16	0.90
DGu.	τ	0.08	0.02	-0.06	-0.1	0.41***	0.1	0.16	0.22	0.03	0.29*	-0.03	0.09	0.03	0.22	0.2	0.19	0.24*
	Q_{med}	0.11	0.03	-0.04	-0.10	0.23	0.06	0.15	0.27	0.02	0.40	-0.03	0.14	0.06	0.58	0.41	0.19	1.32
Khen.	τ	0.09	-0.08	-0.09	0.09	0.12	0.23	0.02	0.2	0.07	0.14	-0.09	-0.04	-0.07	-0.05	0.07	0.26*	0.1
	Q_{med}	0.10	-0.07	-0.08	0.08	0.08	0.17	0.02	0.15	0.09	0.21	-0.16	-0.02	-0.19	-0.11	0.19	0.38	0.50
Zir.	τ	0.16	0.13	0.05	-0.02	0.1	-0.05	-0.01	0.16	0.38**	0.32**	0.37**	0.38**	0.09	0.49***	0.33**	-0.07	0.55***
	Q_{med}	0.16	0.11	0.03	-0.02	0.06	-0.03	-0.01	0.19	0.47	0.34	0.46	0.54	0.18	1.31	0.61	-0.09	2.36
Louk.	τ	-0.07	0.09	-0.01	-0.02	0.26*	-0.03	-0.08	0.16	0.31**	0.3*	0.05	0.23	-0.01	0.26*	0.24*	0.03	0.24*
	Q_{med}	-0.07	0.06	0.00	-0.02	0.16	-0.02	-0.06	0.14	0.31	0.32	0.05	0.18	-0.01	0.57	0.49	0.08	1.34
Aoua.	τ	0.14	0.25*	0.1	0.02	0.3*	-0.03	0.05	0.18	0.27*	0.28*	0.18	0.28*	0.16	0.29*	0.23	0.11	0.32**
	Q_{med}	0.15	0.27	0.06	0.00	0.25	-0.04	0.04	0.19	0.39	0.27	0.21	0.30	0.53	0.80	0.63	0.16	2.06
Mri.	τ	-0.15	0.11	-0.02	-0.1	0.11	-0.12	-0.1	0.15	0.24*	0.2	0.07	0.1	-0.05	0.19	0.18	-0.04	0.12
	Q_{med}	-0.19	0.07	-0.02	-0.11	0.08	-0.11	-0.09	0.14	0.29	0.25	0.05	0.10	-0.09	0.55	0.38	-0.07	0.72
Arb.	τ	-0.07	-0.05	-0.12	-0.03	0.17	-0.04	-0.06	0.15	0.32**	0.28*	-0.03	0.11	-0.07	0.2	0.19	0.04	0.14
	Q_{med}	-0.13	-0.10	-0.09	-0.03	0.12	-0.05	-0.07	0.18	0.34	0.40	-0.05	0.14	-0.27	0.51	0.39	0.08	1.03

Péri : périmètre ; St : station ; τ : statistique du test de Mann-Kendall ; Q_{med} : pente du test de Sen's (mm/période pour ETP) ; * niveau de signification des tendances de 5%, ** de 1% et *** de 0,1%.

Nous avons calculé la fréquence des tendances à la hausse/à la baisse significatives², non-significatives et stationnaires³ pour chaque variable étudiée à partir du nombre total des stations pour chaque périmètre comme illustré dans les figures 3.4, 3.5 et 3.6.

a) Analyse des tendances des précipitations

• Cas du périmètre Gharb

Globalement, les tendances, à la hausse ou à la baisse, ne sont significatives dans aucune station du Gharb (figure 3.4). À l'échelle annuelle, nous remarquons que des tendances croissantes non-significatives ont été détectées pour 80% des stations du Gharb. Elles variaient entre +0,09 mm/an à Khenichet et +2 mm/an aux Souk Larbaa et Zirara. Tandis que Dar Gueddari connaissait une tendance à la baisse non-significative de 1,07 mm/an.

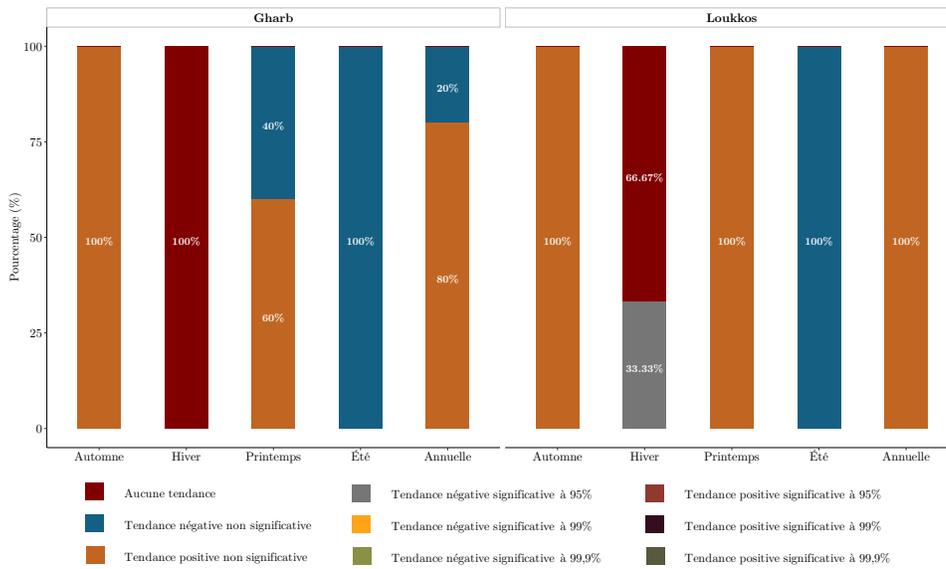


FIGURE 3.4 : Fréquence des tendances des précipitations (P) pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb.

À l'échelle saisonnière, toutes les stations ont affiché une tendance non-significative d'une part décroissante pendant la saison estivale et d'autre part croissante pendant la saison automnale avec une pente allant de -1,76 mm/saison (Dar Gueddari) à +1,93 mm/saison (Souk Larbaa). Toutefois, aucun changement n'a été observé durant la saison hivernale. Or, pour la saison printanière nous remarquons deux pentes opposées mais statistiquement non-significatives : une pente négative a été constatée pour 40% des stations et une autre pente positive a été observée pour 60% des stations. Ces résultats hivernaux et printaniers sont différents avec les travaux de [Driouech \(2010\)](#) et [Sebbar \(2013\)](#) qui ont trouvés une baisse des précipitations hivernales et printanières pour leur période d'étude 1961–1990 et 1935–2005.

À l'échelle mensuelle, le mois d'octobre est le mois le plus concerné par les variations significatives des précipitations. Durant ce mois, les précipitations mensuelles des deux stations ont montré des augmentations significatives allant de +1,29 mm/mois à Souk

²À trois niveaux de confiance 95%, 99% et 99,99%

³Aucune tendance ni à la hausse ni à la baisse

Larbaa et $+1,31$ mm/mois à Dar Gueddari. Tandis que les trois autres stations ont montré elles aussi une tendance croissante mais non-significative. De plus, les mois de septembre, novembre, janvier et mars ont montré des tendances haussières non-significatives pour la majorité des stations excepté Menasra et Dar Gueddari qui ont présentées cette hausse uniquement en novembre. En revanche, des tendances à la baisse non-significatives ont été remarquées durant les mois de décembre, février et avril presque au niveau de toutes les stations, à l'exception de Zirara qui a connue en décembre une tendance croissante non-significative. Durant les mois de juin, juillet et août aucune tendance ni à la hausse ni à la baisse n'a été observée au niveau de toutes les stations du Gharb.

- **Cas du périmètre Loukkos**

À l'échelle annuelle, toutes les stations du Loukkos avaient une tendance non-significative à la hausse avec une pente comprise entre $+0,47$ mm/an (Arbaoua) et $+1,47$ mm/an (Mrissa) (figure 3.4).

Pendant les saisons automnale et printanière, une tendance haussière statistiquement non-significative a été détectée pour l'ensemble des stations. Elle variait entre $+0,25$ mm/saison (Arbaoua-Printemps) et $+1,85$ mm/saison (Arbaoua-Automne). En ce qui concerne la saison estivale, une tendance décroissante non-significative a été observée pour toutes les stations. La saison hivernale a montré au contraire une tendance baissière significative ($\alpha=0,01$) pour une seule station avec une pente de l'ordre de $-0,14$ mm/saison (Mrissa), alors que les autres stations ne présentaient aucune tendance. Ces résultats concordent bien avec ceux de travaux antérieurs de [Khomsi et al. \(2016\)](#) qui ont également observé une faible tendance estivale à la baisse quoique non significative pour les deux bassins de Bouregreg et Tensift. Ainsi que les travaux de [Driouech \(2010\)](#) et [Sebbar \(2013\)](#) qui ont trouvé une baisse des précipitations hivernales pour leur période d'étude 1961-1990 et 1935-2005.

Pour les précipitations mensuelles, nous constatons que le mois de septembre est le seul marqué par une tendance à la hausse significative à un niveau de confiance de 95%. La pente est de l'ordre de $+0,33$ mm/saison (Arbaoua). Également, les mois d'octobre, janvier, mars et mai ont été marquées par une tendance haussière mais non-significative pour toutes les stations. Toutefois, pour les mois de novembre, décembre, février et avril, une tendance décroissante non-significative a été observée pour toutes les stations, excepté Arbaoua en novembre et Aouamra en avril. Comme pour le Gharb, aucune tendance, ni à la hausse, ni à la baisse n'a été observée pour les mois de juin, juillet et août.

b) Analyse des tendances de la température moyenne

- **Cas du périmètre Gharb**

À l'échelle annuelle, une tendance croissante significative a été remarquée à Zirara (figure 3.5). Ceci à un niveau de confiance de 99,99% avec une pente de $+0,05$ °C/an. Ce résultat dépasse légèrement les valeurs des tendances issues des travaux antérieurs de [Driouech \(2010\)](#) qui a observée, à l'échelle du Maroc, une hausse annuelle des températures moyennes variant entre $+0,01$ °C/an et $+0,04$ °C/an. Les autres stations ont affiché des tendances non-significatives.

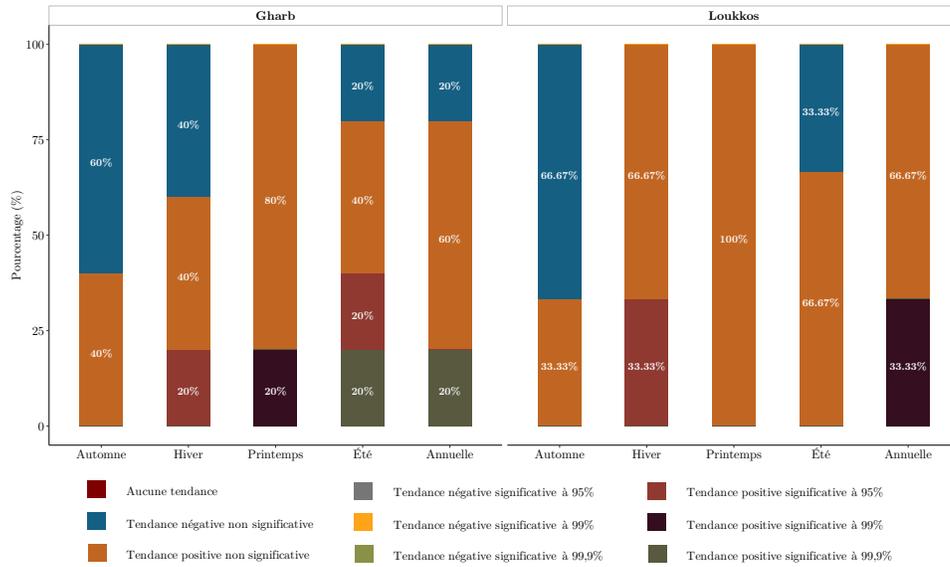


FIGURE 3.5 : Fréquence des tendances de la température moyenne (T_{moy}) pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb.

Durant la saison automnale, un mélange de pentes positives et négatives non-significatives a été observé, avec une ampleur allant de $-0,02$ à $+0,02$ °C/saison. En revanche, durant les saisons hivernale et printanière 20% des stations présentaient des tendances croissantes significatives à des degrés de confiance variables (95% à Souk Larbaa et 99% à Zirara) avec une pente de $+0,05$ °C/saison. Les autres stations affichaient des valeurs non-significatives. Concernant la saison estivale, 40% des stations ont montrée une tendance haussière significative avec une pente allant de $+0,04$ °C/saison (Khenichet) à $+0,09$ °C/saison (Zirara). En effet, ces valeurs trouvées sont inquiétantes surtout qu'elles dépassent beaucoup les valeurs des tendances obtenues dans les travaux antérieurs pour la période 1961-2008 pour 14 stations marocaines dont la hausse estivale était comprise entre $+0,1$ et $+0,3$ °C/10ans (Driouech, 2010).

Les mois de septembre, octobre, novembre, décembre, février et mars ont été caractérisés par des pentes opposées non-significatives (qui sont tantôt négatives et tantôt positives). Alors que 20% des stations ont accusé une tendance haussière significative durant les mois de janvier et mai. Durant ces deux mois, la pente était de $+0,07$ °C/mois à $+0,11$ °C/mois respectivement pour Dar Gueddari et Zirara. De plus, au moins 20% des stations ont été caractérisées par une remarquable tendance à la hausse significative durant les trois mois de la saison estivale. En juin, 40% des stations présentaient des valeurs croissantes, une ampleur de $+0,08$ °C/mois à $+0,09$ °C/mois respectivement pour Zirara et Dar Gueddari. Tandis que pour les mois de juillet et août Zirara est la seule qui montrait des tendances flagrantes à un niveau de confiance de 95%. Ces valeurs curieusement très élevées obtenues pour Zirara et Dar Gueddari pourraient s'expliquer soit par l'effet des valeurs imputées au niveau des séries des températures moyennes, soit par une réelle augmentation importante des températures moyenne à partir de 2008. En termes de stations, Zirara et Dar Gueddari se révèlent les stations les plus sensibles aux variations de températures moyennes mensuelles et dans lesquelles chaque station présente des tendances croissantes significatives ($\alpha = 0,05$, $\alpha = 0,01$ et $\alpha=0,001$) durant au moins deux mois.

- **Cas du périmètre Loukkos**

Les températures moyennes annuelles montraient une tendance haussière significative ($\alpha=0,05$) uniquement à Aouamra, avec une pente de $+0,04$ °C/an. Les autres stations présentaient aussi des tendances croissantes quoique non-significatives (figure 3.5).

À l'échelle saisonnière, pour les saisons automnale et estivale, un mélange des pentes positives et négatives non-significatives a été remarquée avec une ampleur de $-0,03$ à $+0,05$ °C/saison. Les températures moyennes hivernales montraient des tendances haussières alors qu'uniquement 33% des stations étaient significatives à un niveau de confiance 95% avec une pente $+0,06$ °C/saison (Aouamra). Concernant la saison printanière, la plupart des stations présentaient une tendance à la hausse, cependant celle-ci est non-significative.

Les mois de septembre, novembre, mars et juillet ont été caractérisés par des pentes opposées non-significatives. Durant les mois d'octobre, janvier et août seule la station Aouamra présentait une tendance haussière significative avec une pente comprise entre $+0,07$ °C/mois (août) et $+0,08$ °C/mois (octobre et janvier). Cependant, deux parmi les trois autres stations ont eu cette tendance croissante significative durant les mois de mai et juin avec une pente variant entre $+0,06$ °C/mois et $+0,09$ °C/mois. En termes de stations, Aouamra se révèle la plus sensible aux variations de températures mensuelles. D'ailleurs, elle présente des tendances croissantes significatives ($\alpha=0,05$, $\alpha=0,01$ et $\alpha=0,001$) durant cinq mois parmi douze mois de l'année.

c) Analyse de l'évapotranspiration potentielle

- **Cas du périmètre Gharb**

Une tendance annuelle significative à la hausse s'est produite au niveau de 40% des stations ($\alpha=0,01$ et $\alpha=0,001$) avec un taux variant entre $+1,32$ mm/an (Dar Gueddari) et $+2,36$ mm/an (Zirara).

Comme au niveau de la température, les saisons touchées par l'augmentation significative de l'évapotranspiration potentielle sont l'hiver, le printemps et l'été. Cette fois-ci 20% des stations ont été caractérisées par une tendance haussière significative durant les saisons printanière et estivale contre 40% des stations dans la saison hivernale (figure 3.6).

Au cours des mois de septembre-décembre, février et mars les tendances observées étaient non-significatives parfois à la hausse et parfois à la baisse. Alors que les autres mois affichaient une augmentation significative pour une seule station parmi les cinq étudiées. Dar Gueddari a été caractérisée par cette hausse significative ($\alpha=0,001$) durant le mois de janvier, avec une ampleur de $+0,23$ mm/mois. Tandis que pour les mois de mai, juin, juillet et août la station de Zirara a eu une pente comprise entre $+0,34$ mm/mois (juin) et $+0,54$ mm/mois (août).

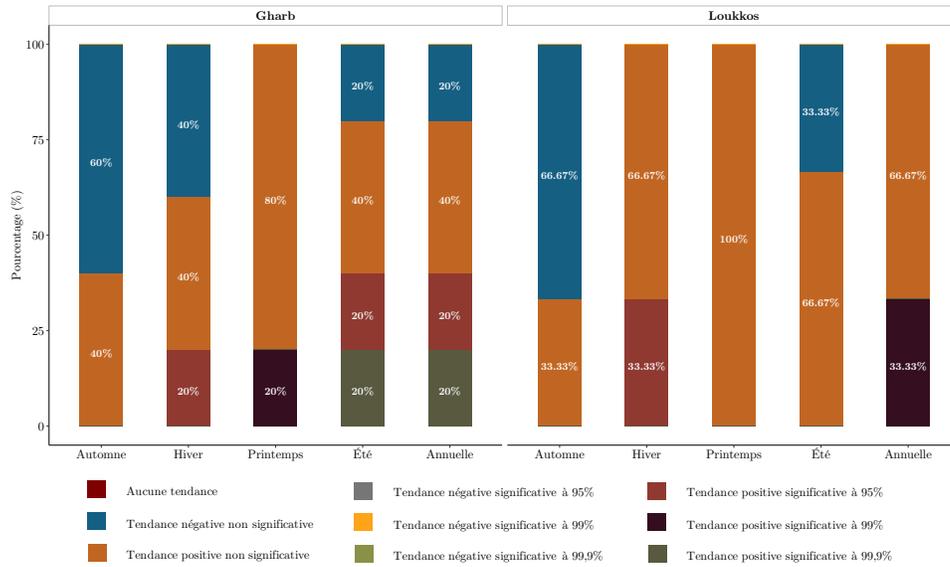


FIGURE 3.6 : Fréquence des tendances de l'évapotranspiration potentielle (ETP_{BC50}) pour les deux périmètres du Loukkos et Gharb.

• Cas du périmètre Loukkos

La plupart des stations affichaient une tendance annuelle haussière, mais seulement Aouamra était statistiquement significative à un niveau de confiance de 99%, avec une pente de +2,06 mm/an (figure 3.6).

Uniquement la saison hivernale a été marquée par une tendance à la hausse significative, et cela pour une seule station avec une pente de +0,80 mm/saison (Aouamra). La saison printanière a été caractérisée par une tendance croissante non-significative alors que les saisons automnale et estivale présentaient des tendances antagonistes non-significatives.

Les mois de septembre, novembre et mars ont eu des tendances antagonistes non-significatives. Or, pour l'ensemble des stations, le mois de février a eu une tendance à la baisse mais non significative alors que le mois d'avril a eu une tendance à la hausse mais non-significative. Durant les mois d'octobre, janvier et août, uniquement Aouamra montrait une tendance croissante significative, tandis que 67% des stations ont eu cette tendance durant les mois de juin et juillet. Similaire aux températures moyennes et en termes de stations, Aouamra se révèle comme la station la plus sensible aux variations d'évapotranspirations potentielles mensuelles.

3.5.3 Distribution spatiale des tendances

La figure 3.7 présente la répartition spatiale des stations météorologiques ainsi que les tendances qu'elles présentent pour les trois variables climatiques étudiées durant la période 1981–2016 et ce à des échelles saisonnière et annuelle.

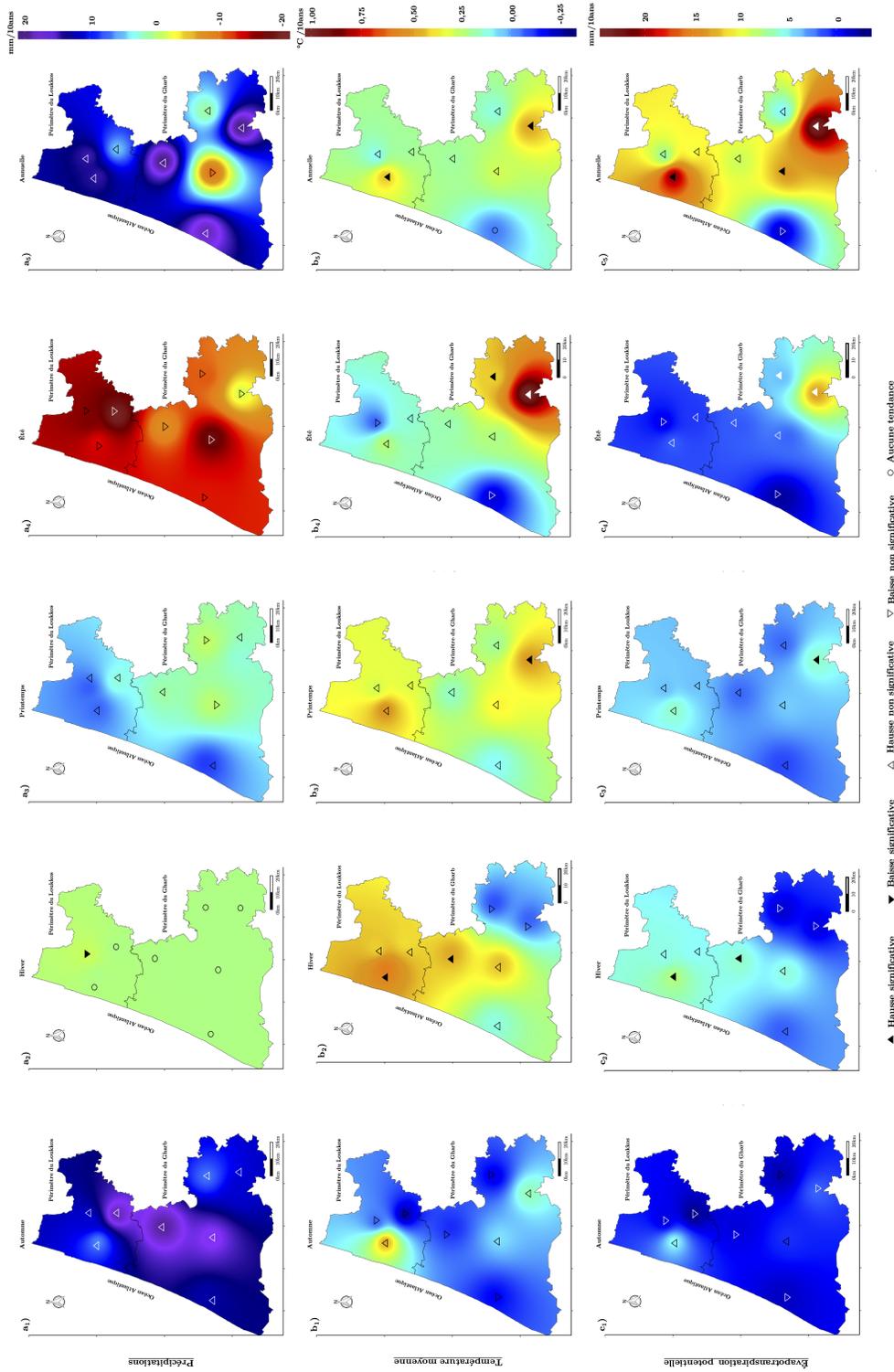


FIGURE 3.7 : Répartition spatiale de la tendance des précipitations annuelles et saisonnières (en mm/10ans), de la température (en °C /10ans) et de l'évapotranspiration potentielle (en mm/10ans) pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb. Période 1981–2016

Comme montré dans la figure 3.7, pour toutes les stations, les précipitations annuelles affichaient des tendances à la hausse et à la baisse non-significatives. Des tendances à la hausse significatives de températures moyennes annuelles ont été détectées pour deux stations situées dans la zone côtière du périmètre du Loukkos et le sud-est du périmètre du Gharb. Les évapotranspirations potentielles annuelles présentaient des tendances à la hausse significatives dans la zone côtière du périmètre du Loukkos, le centre et le sud-est du périmètre Gharb qui sont par ailleurs similaires à celles des températures.

Des tendances à la hausse et à la baisse non-significatives ont été remarquées d'une part pour les trois variables durant la saison automnale, et d'autre part pour la série des précipitations durant les saisons printanière et estivale. L'occurrence spatiale des tendances pour les températures moyennes est assez similaire à celles des évapotranspirations potentielles en printemps et en été.

En printemps, des tendances à la hausse significatives ont été identifiées dans la zone côtière du périmètre du Loukkos, le nord et le sud-est du périmètre du Gharb. Tandis qu'en été ces tendances ont été observées uniquement dans le sud-est du périmètre du Gharb. Au contraire, pour la plupart des stations, aucune tendance significative ni à la hausse ni à la baisse n'a été détectée dans la série des précipitations en hiver, à l'exception du centre du Loukkos qui montrait une tendance à la baisse significative.

3.6 Analyse des projections futures

3.6.1 Démarche

En ce qui concerne les projections futures climatiques, nous nous sommes référés aux travaux de thèse de [Driouech \(2010\)](#) qui avait estimé les projections futures des précipitations et températures à l'aide d'une descente d'échelle dynamique avec le modèle ARPEGE-Climat sous le scénario A1B à une haute résolution de 50km sur le Maroc.

Pour ce faire, nous avons attribué à chaque station les valeurs projetées de précipitation et température moyenne issues des projections futures déjà établies par [Driouech \(2010\)](#). Puis, au niveau de chaque station et pour chacune des variables étudiées, nous avons calculé les valeurs du climat projeté sur la base de nos données de référence (1981–2016) avec les deux bornes inférieures et supérieures des valeurs projetées notées $Td_{(ij)inf}$ et $Td_{(ij)sup}$ et sous l'hypothèse que les mois de la même saison varient de la même façon. Ensuite, selon la nature de la variable, ces bornes inférieures et supérieures ont été considérées comme des scénarios de climat projeté optimiste (SCPO) et pessimiste (SCPP) comme cela a été fait dans une étude antérieure ([Kassogué et al., 2017a](#)). Enfin, nous avons appliqué à notre période de référence pour chacune des huit stations les tendances annuelles et saisonnières $Td_{(ij)inf}$ et $Td_{(ij)sup}$ comme mentionnées dans le tableau 3.12.

Par exemple, si $X_{(ij)réf}$ est la température moyenne de référence, alors la température projetée dans le cas du SCPP, serait donnée par l'équation suivante :

$$X_{(ij)peess} = (1 + Td_{(ij)sup}) \times X_{(ij)réf} \quad (3.10)$$

Par contre, dans le cas du SCPO, la température projetée serait donnée par :

$$X_{(ij)_{opt}} = (1 + Td_{(ij)_{inf}}) \times X_{(ij)_{réf}} \quad (3.11)$$

avec i : station ; j : saison ; pess : pessimiste ; opt : optimiste ; réf : référence ; sup : supérieure ; et inf : inférieure.

Tableau 3.12 : Valeurs de projection future obtenues pour l'horizon 2021–2050

Péri.	Station	Para. ^a	Automne	Hiver	Printemps	Été
Gharb	Menasra	<i>P</i>	[-5; +5]	[-15; -10]	[+5; +10]	[-10; -5]
		<i>T_{moy}</i>	[+1,5; +1,6]	[+0,9; +1]	[+1,5; +1,6]	[+1,7; +1,8]
	Souk Larbaa	<i>P</i>	[-5; +5]	[-15; -10]	[+5; +10]	[-10; -5]
		<i>T_{moy}</i>	[+1,5; +1,6]	[+0,9; +1]	[+1,5; +1,6]	[+1,7; +1,8]
	Dar Gueddari	<i>P</i>	[-5; +5]	[-15; -10]	[+5; +10]	[-10; -5]
		<i>T_{moy}</i>	[+1,6; +1,7]	[+0,9; +1]	[+1,5; +1,6]	[+1,7; +1,8]
	Khenichet	<i>P</i>	[-5; +5]	[-15; -10]	[+5; +10]	[-10; -5]
		<i>T_{moy}</i>	[+1,6; +1,7]	[+0,9; +1]	[+1,5; +1,6]	[+1,7; +1,8]
	Zirara	<i>P</i>	[-5; +5]	[-15; -10]	[+5; +10]	[-10; -5]
		<i>T_{moy}</i>	[+1,6; +1,7]	[+0,9; +1]	[+1,5; +1,6]	[+1,8; +1,9]
Loukkos	Aouamra	<i>P</i>	[-5; +5]	[-10; -5]	[+5; +10]	[-15; -10]
		<i>T_{moy}</i>	[+1,5; +1,6]	[+0,9; +1]	[+1,4; +1,5]	[+1,6; +1,7]
	Mrissa	<i>P</i>	[-5; +5]	[-15; -10]	[+5; +10]	[-10; -5]
		<i>T_{moy}</i>	[+1,5; +1,6]	[+0,9; +1]	[+1,4; +1,5]	[+1,7; +1,8]
	Arbaoua	<i>P</i>	[-5; +5]	[-15; -10]	[+5; +10]	[-10; -5]
		<i>T_{moy}</i>	[+1,5; +1,6]	[+0,9; +1]	[+1,4; +1,5]	[+1,7; +1,8]

^a : Para. : paramètre ; P : précipitation (%) ; Tmoy : température moyenne (°C)
Péri. : périmètre ; [inf; sup] : [valeur de la borne inférieure ; valeur de la borne supérieure , selon [Driouech \(2010\)](#)]

3.6.2 Interprétation des résultats

D'après les résultats du tableau 3.12, les tendances annuelles et saisonnières projetées pour 2021–2050 des huit stations de notre zone d'étude indiquent que les précipitations annuelles varieront entre -5% et +5% (selon les scénarios pessimiste et optimiste). Alors que les précipitations saisonnières seront comprises entre -15% (en hiver) et +10% (au printemps). Ces importants changements prévus pour les précipitations hivernales peuvent potentiellement être expliqués par la forte influence de l'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) comme cela a été signalé dans le rapport de synthèse de [ESCWA \(2017\)](#). Également, pendant les phases ONA positives, les précipitations hivernales au Maroc ont généralement tendance à être inférieures à la normale ([ESCWA, 2017](#)). Les saisons les plus touchées par le réchauffement climatique seraient l'hiver suivi par l'été avec une baisse remarquable des précipitations atteignant -15% en hiver et -10% en été.

En termes de la température moyenne annuelle, les stations seront marquées par une hausse allant de +1,4 °C à +1,6 °C. Tandis que la température moyenne saisonnière tendrait à une augmentation de +0,9 °C (hiver) à +1,9 °C (été). Alors qu'une hausse de la température saisonnière moyenne augmenterait de +1,6 °C en printemps, +1,7 °C en automne et +1,9 °C en été.

À l'échelle spatiale, nous remarquons que les stations légèrement impactées par l'effet du changement climatique sont situées à l'ouest de notre région d'étude comme les stations de Menasra, Souk Larbaa, Aouamra, Mrissa et Arbaoua. Alors que les stations fortement affectées par le réchauffement climatique sont : Dar Gueddari, Khenichet et Zirara. Ce qui implique que l'effet du changement climatique est plus ressenti en allant de l'ouest vers l'est surtout pour le périmètre du Gharb.

3.6.3 Variation mensuelle des variables étudiées selon les scénarios

Dans cette sous-section, nous discutons la comparaison des valeurs de précipitations et températures mensuelles sur l'ensemble des deux périmètres dans les scénarios futures simulées (optimiste (SCPO) et pessimiste (SCPP) 2021–2050) avec celles du scénario de référence (SCR 1981-2016). Pour ce faire, nous avons utilisé en ce qui concerne la répartition mensuelle les valeurs moyennes des précipitations mensuelles et les températures moyennes mensuelles pour toutes les stations en fonction du périmètre.

La répartition mensuelle inter-annuelle des précipitations et des températures en fonction des scénarios étudiés est illustrée dans les figures 3.8 (par périmètre) et 3.9 (par station).

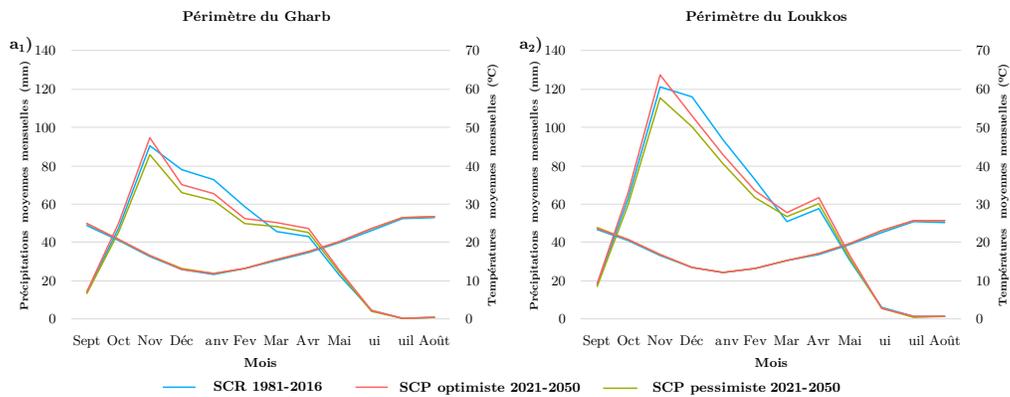


FIGURE 3.8 : Comparaison de la répartition mensuelle des précipitations et de la température moyenne pour les deux périmètres du Loukkos et du Gharb.

En analysant l'allure générale des graphiques (figure 3.8) et des variations mensuelles des précipitations moyennes sous les trois scénarios (référence 1981-2016, SCPO et SCPP 2021-2050), nous observons premièrement que les cumuls des précipitations sont plus importants dans le périmètre du Loukkos que dans le périmètre du Gharb. Ensuite, nous remarquons, pour les deux périmètres, que durant la période allant de décembre à février, les valeurs de précipitations des deux scénarios projetés SCPO et SCPP sont inférieures à celles du scénario de référence 1981-2016, avec des écarts allant :

- de -7,78 à -5,85 mm par mois pour Gharb et de -9,56 à -6,08 mm par mois pour Loukkos, pour le scénario optimiste (SCPO).
- de -11,67 à -8,78 mm par mois pour Gharb et de -15,35 à -9,72 mm par mois pour Loukkos, pour le scénario pessimiste (SCPP).

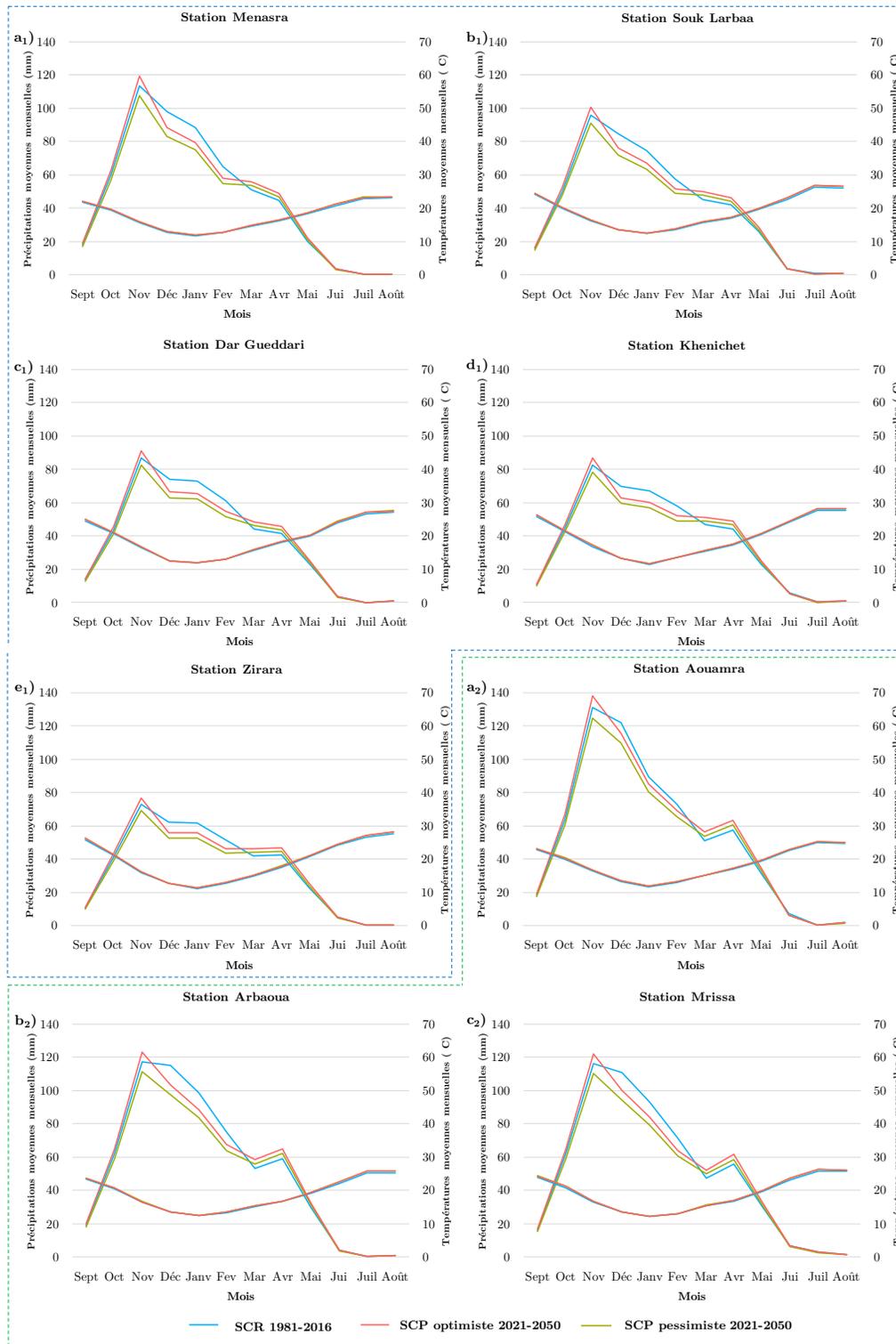


FIGURE 3.9 : Comparaison de la répartition mensuelle des précipitations et de la température moyenne pour chaque station des deux périmètres du Loukkos et du Gharb.

Ceci montre qu'on assistera alors à une baisse importante des précipitations durant cette période hivernale (de décembre à février), indépendamment du scénario de climat projeté. Toutefois, durant les mois des saisons automnale et printanière, les valeurs du scénario SCPO sont supérieures à celles du scénario de référence, avec un écart compris entre +2,29 et +4,58 mm par mois pour le Gharb et entre +3,03 et +6,07 mm par mois pour le Loukkos. Excepte le mois de septembre où les valeurs de SCPO sont légèrement supérieures avec un écart de +0,69 mm pour Gharb et de +0,89 mm pour Loukkos.

De plus, nous observons que les mois les plus pluvieux sont les mois de novembre, décembre et janvier qui fournissent respectivement plus de 19%, 14% et 13% des précipitations annuelles totales. En revanche, juillet, août et juin sont les mois les plus secs avec moins de 1% des précipitations annuelles. Il est également clair qu'il y a une tendance à la hausse en moyenne des précipitations de septembre à novembre pour les deux périmètres, laquelle est spectaculairement suivie par une tendance à la baisse jusqu'à la fin de l'été toujours pour les deux périmètres.

Par ailleurs, à l'échelle mensuelle, nous remarquons que les précipitations moyennes suivent un profil un peu particulier avec une augmentation progressive en automne et au printemps donnant lieu à deux pics bien marqués pour les deux périmètres et pour toutes les stations (figure 3.9). Le pic le plus important est centré sur le mois de novembre, et est suivi d'un autre au mois d'avril. Les valeurs du scénario SCPP sont les plus faibles ; ensuite viennent les valeurs du scénario SCPO et finalement celles du scénario de référence. Un troisième pic, également bien marqué en janvier, avec un grand dépassement des valeurs du scénario de référence, se remarque pour trois stations situées au centre et à l'est du Gharb. Ce qui témoigne aussi d'une baisse, en cette période, par rapport à notre période de référence. Globalement, nous constatons que d'après ces résultats, la période hivernale serait la plus marquée par une diminution importante des précipitations par rapport à notre période de référence pour les deux périmètres. Toutefois, la saison printanière serait marquée par une augmentation des précipitations. On pourrait donc assister à un léger décalage de la saison la plus pluvieuse dans les années à venir.

Pour les températures moyennes, nous observons que durant tous les mois, les températures moyennes des scénarios projetés (SCPO et SCPP) sont supérieures à celles du scénario de référence. En outre, nous constatons qu'il y a une très bonne concordance entre les profils de variation des températures sous les trois scénarios et pour les deux périmètres, les valeurs des deux scénarios projetés sont toujours supérieures à celles du scénario de référence. En outre, nous remarquons deux pics : un caractérisant une baisse durant les mois septembre-janvier et un autre une hausse pendant les mois février-août. Le mois le plus sec est août pour le périmètre du Gharb et le mois de juillet pour le périmètre du Loukkos. Tandis que le mois le plus froid est celui de janvier pour les deux périmètres.

3.7 Automatisation des traitements des données climatiques et projections futures (WebTDClim)

Nous avons développé une application web nommée "WebTDClim" qui permet de réaliser une analyse statistique spatio-temporelle des données climatiques comme décrite dans les sections précédentes et l'article (Acharki et al., 2019). "WebTDClim" offre un moyen aux scientifiques et praticiens pour traiter leurs données, générer des tableaux, créer des graphiques interactifs et télécharger les jeux de données sous-jacents sans connaissances particulières en programmation. En outre, cette application permettra de gagner beaucoup de temps même pour les spécialistes.

3.7.1 Développement et mise en œuvre

Nous avons utilisé les mêmes packages que pour l'application "Web2TISat" (comme décrit dans le chapitre 2, sous-section 2.4.1). Concernant les instructions dans "WebTDClim", elles consistent en importation des données climatiques, calcul, analyse et visualisation des données ainsi que des résultats.

3.7.2 Description des sections

La page d'accueil de "WebTDClim" est montrée dans la figure 3.10. Le menu situé dans la section gauche permet à l'utilisateur d'accéder à chacune des dix sections principales dans lesquelles l'application est structurée, tandis que le menu situé dans la section droite de l'application permet à l'utilisateur de choisir certaines variables permettant le filtrage des données.

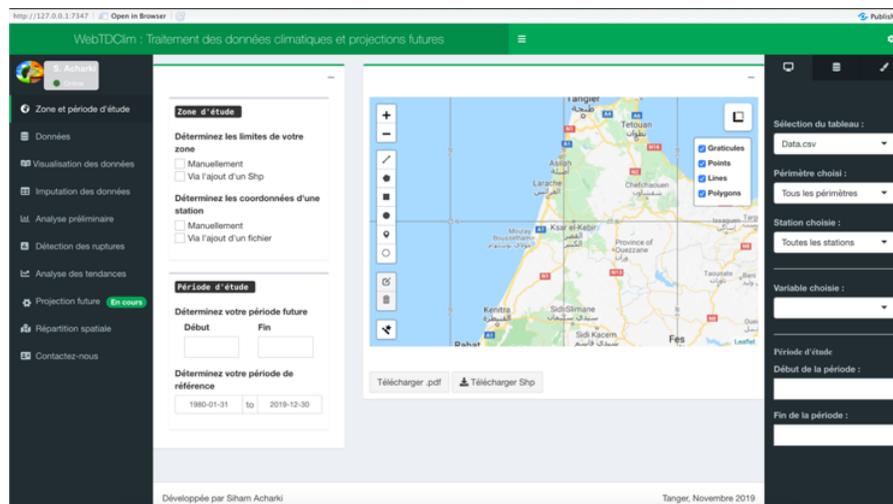


FIGURE 3.10 : Vue d'ensemble de l'application "WebTDClim".

Les dix sections principales de la "WebTDClim" sont les suivantes :

- ✧ **Choix de la zone et période d'étude** : Tout d'abord, l'utilisateur peut soit délimiter manuellement sa zone d'étude à travers les options de dessin proposées par Leaflet soit ajouter un fichier contenant les limites de la zone concernée. Ce fichier doit être sous format shapefile. Ensuite, l'utilisateur doit ajouter un fichier csv contenant une ou plusieurs stations si les coordonnées des stations existent déjà dans sa base de données ou dans un fichier externe. Sinon, il doit entrer

manuellement les coordonnées et le nom de la station. Après avoir chargé la zone et le fichier de coordonnées, l'utilisateur peut spécifier sa période d'étude future ainsi que celle de référence.

- ✧ **Importation des données** : Les données climatiques sont fournies par l'utilisateur. Ce choix présente l'avantage d'être plus flexible. Pour importer un ou plusieurs fichiers, l'utilisateur sélectionne un ou plusieurs fichiers sous format csv dans l'explorateur de fichiers. Ensuite, il définit les paramètres du fichier à savoir : le type de séparateur (virgule, tabulation, espace), le type de quote (simple, double, aucune) et la présence/absence des noms de colonnes (header). Une fois le fichier visible est paramétré, un tableau s'affiche dans la zone d'aperçu. De plus, il obtient des informations sur les jeux de données telles que le nom, la taille, la structure et les statistiques sommaires du fichier d'entrée. Si l'utilisateur veut fusionner deux tableaux, il lui suffit de choisir le nom de la variable commune.
- ✧ **Visualisation préliminaire des données** : Dans cette section, l'utilisateur peut rechercher, sélectionner ou trier les informations d'un tableau de données ainsi que de le sauvegarder sous format csv ou excel. Ensuite, il peut créer des graphes sur l'évolution temporelle de la variable climatique choisie pour une ou plusieurs stations. Les graphiques exportés peuvent être enregistrés en trois formats (pdf, png et jpeg).
- ✧ **Imputation des données** : Lors du traitement des données climatiques, des données incomplètes sont souvent visualisées. Tout d'abord, l'utilisateur doit s'assurer de l'état de ses jeux de données. Cela se fait en analysant le pourcentage des données manquantes par station. Ensuite, les données manquantes peuvent être reconstituées en choisissant une ou plusieurs méthodes d'imputation comme kNN ([Feng et al., 2014](#)) et MICE ([Buuren and KarinGroothuis-oudshoorn, 2011](#)). Une fois la méthode d'imputation est sélectionnée, l'utilisateur clique sur le bouton "Lancer l'analyse" et le résultat de l'imputation s'affiche. L'utilisateur peut aussi évaluer la performance de la méthode d'imputation à choisir sur la base de trois indicateurs statistiques (MAE, RMSE, CVRMSE) comme cela a été détaillé plus haut dans la sous-section 3.3.2 et dans l'article de [Acharki et al. \(2019\)](#).
- ✧ **Analyse préliminaire des données** : Sur une période donnée, l'utilisateur peut générer un tableau de données à l'échelle mensuelle, saisonnière et/ou annuelle et le sauvegarder sous format csv, excel ou pdf. Ce qui lui permettra de faire une analyse statistique selon certains paramètres statistiques comme la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation. En outre, des graphes « boîte à moustaches » seront obtenus en choisissant l'échelle de l'analyse et la/les stations concernées par l'étude. Dans ce cas, le titre du graphe peut être modifié par l'utilisateur et actualisé selon le besoin.
- ✧ **Détection des ruptures** : L'utilisateur peut sélectionner un test de détection des ruptures parmi test non paramétrique de [Pettitt \(1979\)](#), test paramétrique classique de [Buishand \(1982\)](#) et test d'homogénéisation SNH [Alexandersson \(1986\)](#). Cette section sera complétée par d'autres tests. Une fois le type de test est choisi, un tableau contenant les résultats s'affiche ainsi qu'un graphe montrant l'évolution de la variable choisie avec deux lignes une avant la date de rupture et l'autre après la date de rupture.
- ✧ **Analyse des tendances** : Dans cette section, l'utilisateur peut spécifier deux options qui seront utilisées dans les analyses. Premièrement, il choisit le type

de test de tendance à savoir test de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) et/ou test de Sen (1968). Deuxièmement, il spécifie l'échelle temporelle d'analyse (Mensuelle, saisonnière, annuelle ou toutes). Un tableau de résultat s'affiche une fois l'analyse est terminée et peut être exporté sous différents formats. Puis, un graphique représente la fréquence des tendances à la hausse/à la baisse significatives, non-significatives et stationnaires pour la variable étudiée à partir du nombre total des stations pour le périmètre choisi.

- ✧ **Projection future** : Cette fonctionnalité peut servir de point de départ pour les utilisateurs travaillant sur le changement climatique. Dans cette section, l'utilisateur doit au minimum choisir entre une série de modèle climatique prédéfinies. Un tableau contenant des valeurs de projection peut être importé (pour le moment cette étape est en cours de conception).
- ✧ **Répartition spatiale des variables** : L'utilisateur peut sélectionner les options appropriées dans les menus déroulants de l'indicateur, de la période et du type d'analyse à effectuer. Lorsque les critères sont sélectionnés, une répartition spatiale des stations se fait via le diagramme de voronoi. Par conséquent, l'utilisateur peut visualiser la carte produite ainsi que de la télécharger sous format pdf.
- ✧ **Contactez-nous** : Cette section contient des informations sur le développeur.

3.7.3 Exemple d'application

À titre démonstratif, WebTDClim a été appliquée à notre région d'étude comme illustrée dans la figure 3.11.

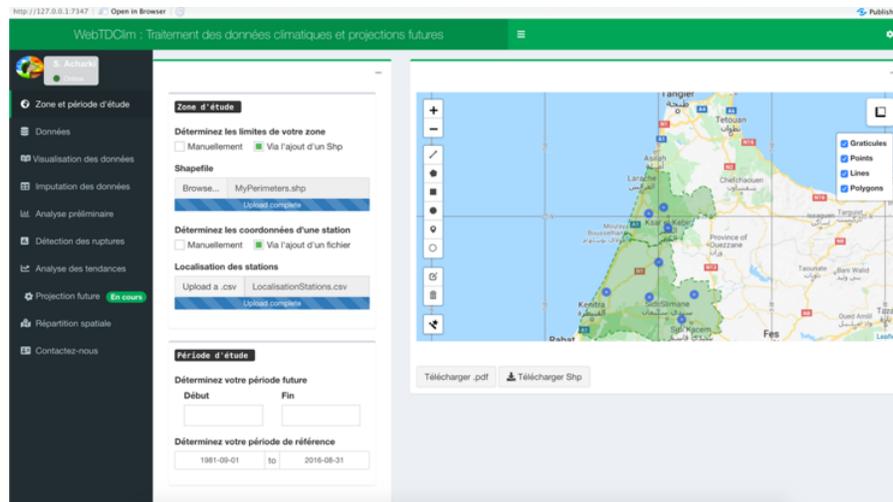


FIGURE 3.11 : Illustration sur la région d'étude.

Nous ajoutons un fichier csv contenant des données climatiques. Ces données comprennent le nom du périmètre, le nom de la station, l'année hydrologique, la date, la variable (précipitation, température...etc), et la valeur de la variable. Ensuite, nous spécifions les options requises afin de paramétrer le fichier csv.

Dans la section visualisation des données, nous obtenons un graphe illustrant l'évolution temporelle des précipitations sur la période 1981-2016 et ceci pour toutes les huit stations étudiées comme montrée dans la figure 3.12.

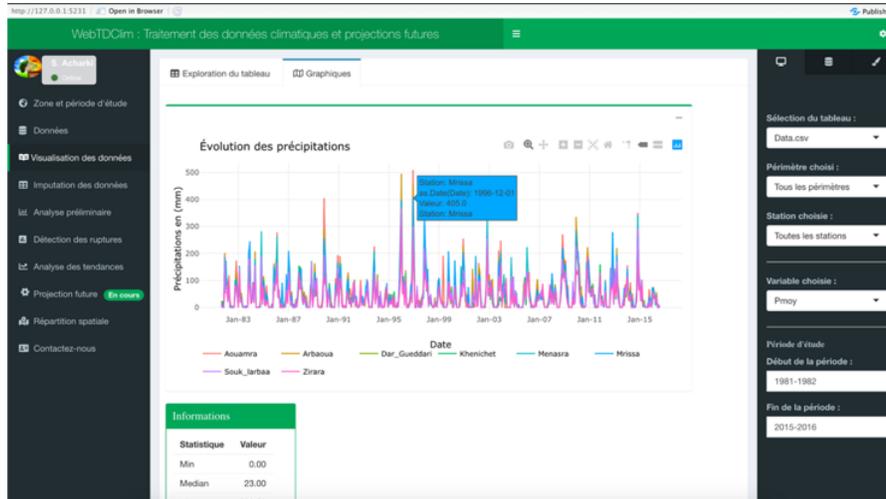


FIGURE 3.12 : Visualisation des données climatiques (Précipitations).

La figure 3.13 montre le graphique de la variation saisonnière des précipitations durant la période de référence 1981-2016.

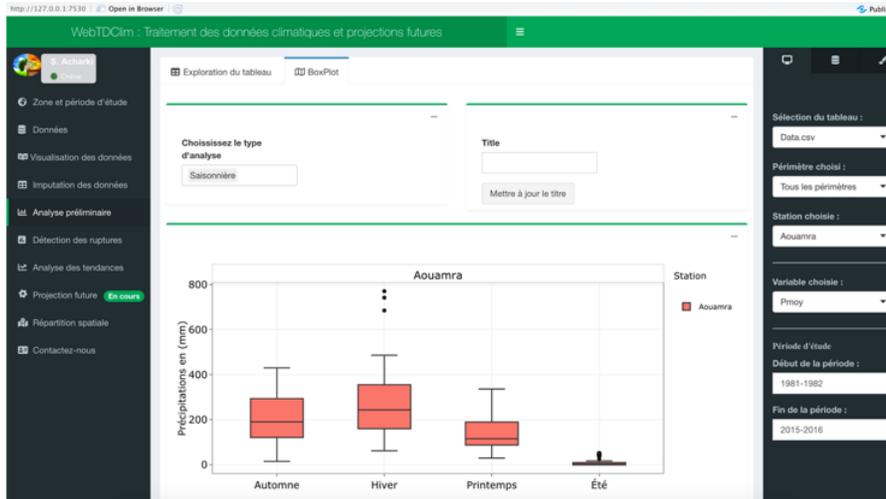


FIGURE 3.13 : Variation des précipitations saisonnières.

La figure 3.14 représente les résultats obtenus par le test de Pettitt pour la station Aouamra.

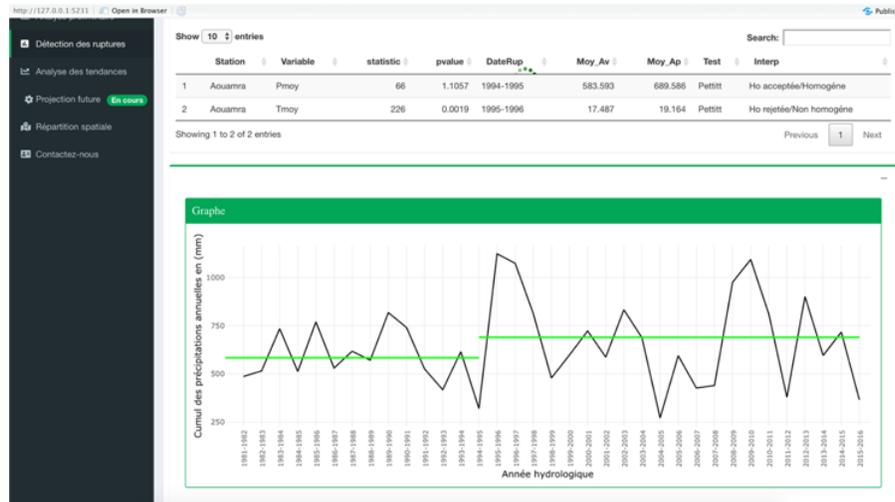


FIGURE 3.14 : Test de détection des ruptures pour la station Aouamra. Période 1981–2016.

La répartition spatiale des températures moyennes interannuelles est montrée dans la figure 3.15.

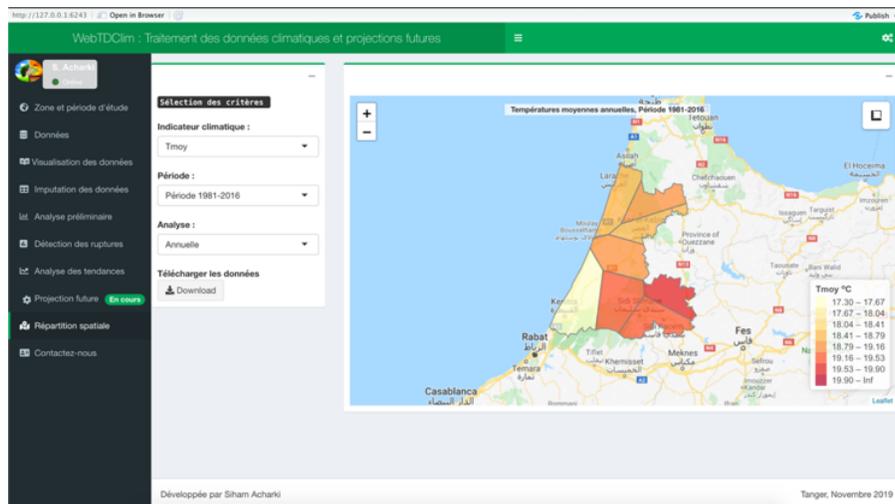


FIGURE 3.15 : Répartition spatiale des températures moyennes inter-annuelles durant 1981-2016.

En conclusion, dans ce chapitre, nous nous sommes appuyés sur une approche statistique pour analyser des séries chronologiques de certaines variables climatiques notamment les précipitations, la température moyenne et l'évapotranspiration potentielle afin d'analyser leurs variabilités et par la même occasion prévoir leurs tendances spatio-temporelles pour la période de référence 1981–2016. Les résultats ont montré que la méthode d'imputation MICE s'avère plus performante par rapport à la méthode k-NN pour la reconstitution des lacunes. Selon les tests de tendances, la période hivernale serait la plus marquée par une diminution importante des précipitations par rapport à la période de référence. Toutefois, les saisons d'automne et de printemps seraient marquées par une augmentation des précipitations. De plus, nous avons présenté les fonctionnalités de notre application web "WebTDClm" qui permet d'automatiser les traitements des données climatiques et projections futures. Le contenu du chapitre a constitué des parties de l'article ([Acharki et al., 2019](#)).

Vis-à-vis de telles variations du climat dans les différents scénarios de référence considérés, nous avons effectué les simulations (montrées dans le chapitre 4) avec les données d'entrée discutées précédemment en rapport avec les paramètres de climat (chapitre 3) couplés aux paramètres physiques du terrain (chapitre 2). Nous allons ainsi discuter dans le chapitre suivant, comment ces variations climatiques vont impacter la disponibilité des ressources en eau dans l'horizon 2021–2050 à travers les trois grandeurs qui sont : l'eau évaporée, l'eau de surface et l'eau souterraine.

Apport de la modélisation dans l'étude de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau de la région d'étude : Modèle 2CAFDYM

Ce chapitre est structuré comme suit. En section 4.1, nous allons présenter brièvement le principe des automates cellulaires et ses principales composantes. Ce principe des ACs a été utilisé dans le modèle 2CAFDYM que nous allons présenter en section 4.2. Les améliorations apportées au modèle utilisé sont présentées en section 4.3. Ensuite, en section 4.4, nous allons décrire la méthodologie adoptée. Enfin, nous allons présenter, en section 4.5, les résultats de simulation obtenus tout en les discutant.

4.1 Généralités sur l'automate cellulaire (AC)

Bien que le concept des ACs ait été défini depuis 1940, il n'est devenu un outil de modélisation très puissant qu'au cours des dernières décennies. Ceci grâce à la grande poussée de développement de la science informatique surtout avec l'implémentation des ACs sur des ordinateurs massivement parallèles. Il est largement utilisé dans de nombreux domaines, notamment dans la modélisation et simulation de systèmes environnementaux complexes tels que la dynamique d'évolution du paysage ([Soares-Filho et al., 2002](#)), des feux de forêts ([Jellouli et al., 2016](#)), de l'écoulement d'eau ([Kassogué et al., 2017b](#)) et du vent ([Byari et al., 2019](#)). Nous retrouvons également des applications pour la simulation des changements des caractéristiques des terres ([Feng et al., 2018](#)).

4.1.1 Principe d'un AC

En général, de manière formelle, un automate cellulaire (AC) pour la modélisation d'un phénomène ou système dynamique consiste en la donnée de quatre éléments avec deux conditions comme indiquées dans la figure 4.1.

$$\mathcal{A}(\mathcal{L}, \mathcal{N}, \mathcal{S}, f) \text{ \& Condition initiale } \oplus \text{ Conditions aux bords} \quad (4.1)$$

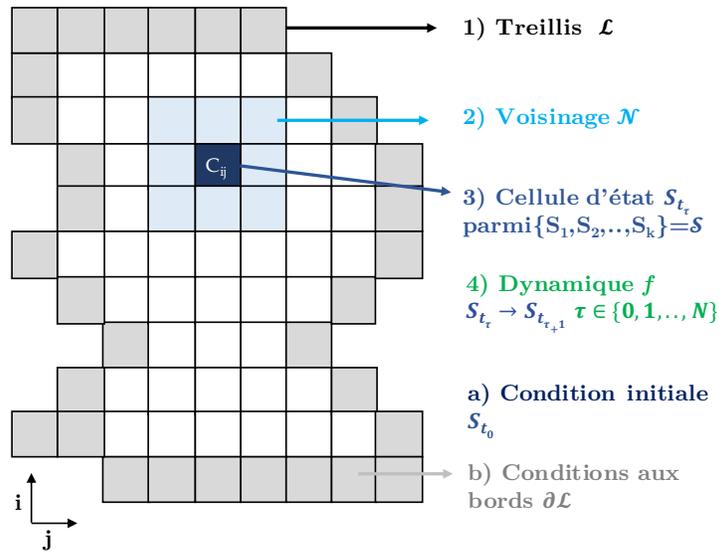


FIGURE 4.1 : Principe d'un automate cellulaire (illustration 2D).

4.1.2 Composants d'un AC

Un automate cellulaire comporte ce qui suit :

Le premier élément \mathcal{L} est dit espace cellulaire. C'est le support sur lequel le phénomène ou système évolue. Il se constitue d'un ensemble de nœuds ou mailles (appelées cellules) obtenu à partir d'un maillage discret de l'espace. Nous notons que, l'espace et la nature du maillage dépendent du système qu'ils modélisent et la dimension considérée. Pour le 1D et 2D, les cellules peuvent être des carrées, rectangles, triangles, hexagonales ou polygones ; et pour le 3D, elles peuvent être soit des pavés, soit des cubes, soit des hexagones ou soit des polyèdres.

Le second élément \mathcal{N} est dit voisinage. Il consiste en la définition d'un ensemble de cellules pour chaque cellule qui en interaction avec elle affectent son évolution dans le temps. Ce système de voisinage va aussi dépendre du problème modélisé et de la dimension considérée. En 2D par exemple, les voisinages de type More et von Neumann (illustration en figure 4.2) sont les plus utilisés.

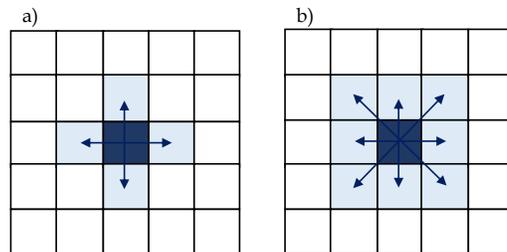


FIGURE 4.2 : Types de voisinage dans un treillis bidimensionnel (a) Von Neumann et (b) Moore.

Le troisième élément \mathcal{S} est dit ensemble des états. C'est l'ensemble des valeurs discrètes définies sous la base des attributs des cellules (dits aussi facteurs d'état) qu'on peut représenter pour chaque pas de temps, et qui caractérisent mieux l'état des cellules en lieu et place de l'ensemble de ses attributs. Ainsi, pour chaque pas de temps, l'ensemble de ces valeurs issues des cellules va constituer l'état observable du système.

Le quatrième élément f est dit fonction de transition ou règles de transition. Il consiste à décrire les interactions mutuelles entre les cellules de même voisinage (état et facteurs d'états de la cellule centrale par rapport à l'état et aux facteurs d'état des cellules voisines) durant une itération de temps via des règles simples qui vont permettre de déterminer le changement d'état à l'itération ou instant suivant de chaque cellule. La dynamique locale induit de cellule en cellule la dynamique globale du système modélisé.

La condition initiale concerne l'existant sur le domaine d'étude par rapport à l'état et aux facteurs d'état pour chaque cellule dès le début de la simulation. Ces valeurs initiales peuvent être collectées, évaluées, fixées par des valeurs par défaut ou pris aléatoirement.

Enfin, les conditions aux bords traduisent l'interaction du milieu extérieur avec le domaine d'étude via les cellules des bords de l'espace cellulaire. Différents types de conditions aux bords sont considérés dans la littérature dont : (i) le type fixe qui traduit le non-échange avec le milieu extérieur, (ii) le type réflexif qui traduit l'échange avec le milieu extérieur et (iii) le type périodique qui permet de définir un espace cellulaire infini.

4.2 Présentation du modèle 2CAFDYM

[Kassogué et al. \(2017a,b\)](#) eurent recours à utiliser un modèle dynamique basé sur les automates cellulaires (2CAFDYM) pour évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau (à la fois des eaux de surface et souterraines) dans la zone Boukhalef (Tanger, Maroc). Pour illustrer leur approche, les auteurs ont développé les résultats de simulation en (i) se basant sur une seule carte d'occupation du sol pendant toute la période considérée, (ii) en utilisant une distribution de la pluie (début, intensité et durée) sur toute la région (30 km²) via un seul point de mesure (ou station météorologique).

Alors que nous considérons l'estimation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau des deux périmètres irrigués (Loukkos et Gharb) en utilisant le même modèle 2CAFDYM tout en tenant compte des modifications suivantes : (i) utilisation de différentes cartes d'occupation du sol, (ii) une distribution de pluie via plusieurs stations qui couvrent la région d'étude. En outre, par rapport aux fonctionnalités existantes dans l'article de ([Kassogué et al., 2017b](#), Fig. 6), les nouvelles fonctionnalités sont greffées aux packages fonctionnels : *Data management*, *Constraints* et *Flow monitoring* (cf. section 4.3). Ce chapitre fut l'objet de l'article ([Acharki et al., 2020c](#)).

4.2.1 Description du modèle

Nous avons utilisé le modèle Two Scale Cellular Automaton for Flow DYnamics Modelling (2CAFDYM) développé par [Kassogué et al. \(2017b\)](#). Il fut à la base proposé pour le suivi de la dynamique d'écoulement conformément au processus du cycle de l'eau (précipitation, évaporation/évapotranspiration, infiltration et ruissellement). Ces grandeurs traduisent les quatre processus du cycle de l'eau, le modèle reste alors valable pour le suivi du cycle de l'eau dans sa forme simplifiée en tenant compte de deux types de grandeurs d'entrée : les paramètres physiques du terrain (PPT) de la région d'étude couplés avec les paramètres climatiques (PC). Ce couplage sous différents scénarios climatiques permet ainsi d'évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau comme se fut dans ([Kassogué et al., 2017a](#)) à travers 2CAFDYM. Comme tout autre modèle d'automate cellulaire, les quatre composants du modèle 2CAFDYM se représentent sous la forme :

$$2CAFDYM(\mathcal{L}, \mathcal{N}, \mathcal{S}, f) \quad (4.2)$$

où

- Le treillis \mathcal{L} est donné par

$$\mathcal{L} = \{c_{ij}; ; i, j \in \mathbb{Z}\} \quad (4.3)$$

est constitué de cellules hexagonales c_{ij} de taille prédéfinie avec chaque cellule ayant toutes les informations nécessaires sur les PPT et les PC. Lesquels sont énumérés dans la figure 4.3. Pour plus de détails sur les règles de calcul de ces paramètres, voir les sections 3.1 et 3.2 de ([Kassogué et al., 2017b](#)). Dans cette thèse, nous allons considérer la structuration carrée du treillis dû à des problèmes de résolution d'écran lors de l'affichage des résultats de simulation vu que nous avons à traiter des régions de très grand étendu (de l'ordre de 8708 km², représentant 9 675 555 pixels).

- Le voisinage \mathcal{N} est donné par

$$\mathcal{N}(c_{ij}) = \{c_{kl} \in \mathcal{L}; ; d(c_{ij}, c_{kl}) \leq 1\} \quad (4.4)$$

avec d une distance dans $\mathcal{L} \times \mathcal{L}$ équivalente à la norme L_∞ . Elle est de rayon 1 et de cardinalité m comprise entre 3 et 6 selon les bords du domaine. Un tel voisinage correspond à celui de von Neumann dans la structuration carrée du treillis que nous considérons au lieu de l'hexagonale.

- L'ensemble des états \mathcal{S} est donné par

$$\mathcal{S} = \{0, 1, 2, 3\} \quad (4.5)$$

À un instant $s_{t_\tau}(c_{ij})$, une cellule c_{ij} est caractérisée par un état t_τ tel que :

$$S_{t_\tau}(c_{ij}) = \begin{cases} 0, & \text{si } Gw_{ij}^{t_\tau} < S_{ij}^{t_\tau} \text{ et } Sw_{ij}^{t_\tau} = 0 \text{ (non saturation et pas d'eau en surface)} \\ 1, & \text{si } Gw_{ij}^{t_\tau} = S_{ij}^{t_\tau} \text{ et } Sw_{ij}^{t_\tau} = 0 \text{ (saturation et pas d'eau en surface)} \\ 2, & \text{si } Gw_{ij}^{t_\tau} < S_{ij}^{t_\tau} \text{ et } Sw_{ij}^{t_\tau} > 0 \text{ (non saturation et eau en surface)} \\ 3, & \text{si } Gw_{ij}^{t_\tau} = S_{ij}^{t_\tau} \text{ et } Sw_{ij}^{t_\tau} > 0 \text{ (saturation et eau en surface)} \end{cases} \quad (4.6)$$

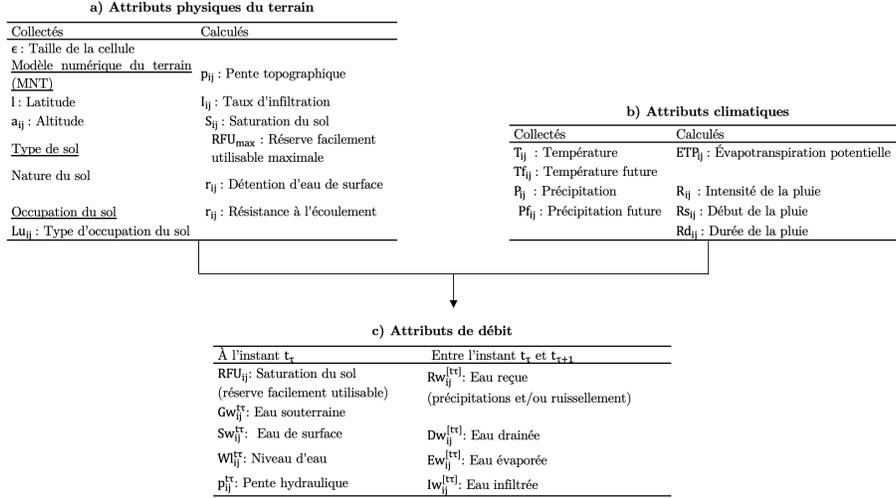


FIGURE 4.3 : Ensemble des facteurs d'état pour une cellule c_{ij} réparti en (a) paramètres physiques du terrain, (b) paramètres climatiques et (c) paramètres de débit.

Les paramètres intervenant dans le calcul de ces états (cf. figure 4.3) sont mis à jour d'une itération à une autre via un principe de conservation de masse (Kassogué et al., 2017b, pp. 67). Ici, le paramètre $S_{ij}^{t_\tau}$ est égal à la RFU_{max} .

- La fonction de transition f est donnée par

$$\begin{aligned} f : \mathcal{S}^m &\rightarrow \mathcal{S} \\ s_{t_\tau} &\mapsto s_{t_{\tau+1}} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Elle est décrite par les paramètres (facteurs d'états discutés dans la figure 4.3) à travers l'action mutuelle notée \oplus de quatre processus de dynamique d'eau entre deux instants t_τ et $t_{\tau+1}$:

$$f \equiv \text{réception} \oplus \text{évaporation} \oplus \text{infiltration} \oplus \text{évacuation} \quad (4.8)$$

Les règles de calcul des différents paramètres relatifs à ces processus (eau reçue, eau évaporée, eau infiltrée et eau drainée) sont décrites dans la section 3.3 de (Kassogué et al., 2017b).

En outre, le modèle 2CAFDYM prend comme condition initiale l'ensemble des paramètres physiques du terrain (PPT), des paramètres climatiques (PC) et des paramètres de débit (PD) pour chaque cellule. Leurs valeurs sont collectées en entrée surtout pour les PPT et les PC. Pour certaines PD, les valeurs peuvent être considérées nulles en raison de manques de données. Finalement, pour les conditions aux bords deux types sont considérés :

- ✧ Le type fixe par défaut pour lequel l'eau n'entre pas dans le domaine d'étude et n'en sort pas.
- ✧ Le type réflexif pour certaines cellules des bords pour lequel l'eau entre dans le domaine d'étude avec un certain débit et/ou en sort selon l'inclinaison de la pente vers le milieu extérieur. Voir la description en section 3.4 de (Kassogué et al., 2017b).

4.2.2 Principe de fonctionnement

Le modèle étant décrit, le couplage des paramètres (PPT) avec les paramètres (PC) sur une longue durée fut considéré dans (Kassogué et al., 2017a) pour la modélisation et l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau. Le principe de l'approche est illustré dans la figure 4.4.

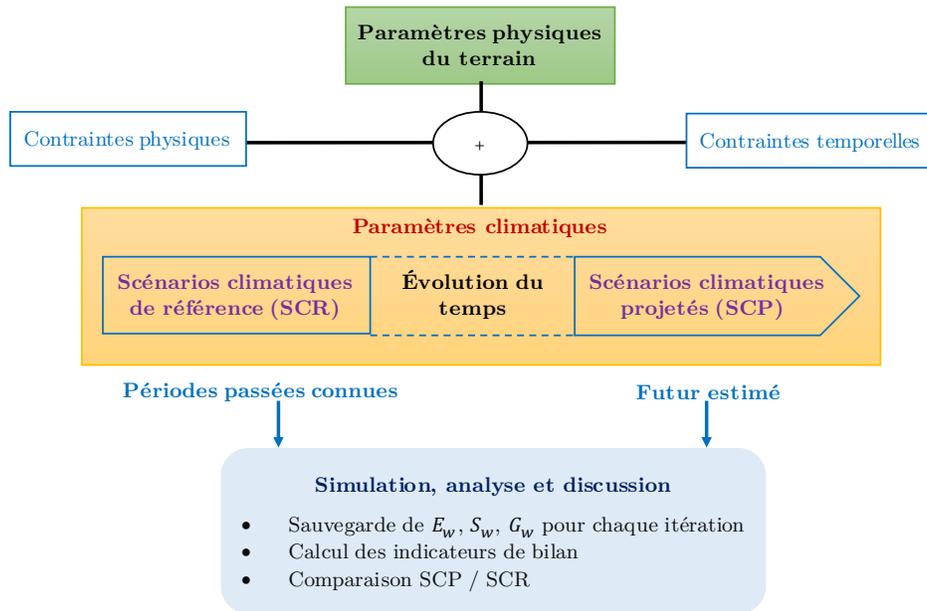


FIGURE 4.4 : Principe du couplage des PPT avec les PC à travers 2CAFDYM pour la modélisation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau pour une région donnée.

Cela consiste brièvement pour une région donnée à :

- ✧ Considérer deux périodes : des périodes passées connues que nous appelons scénario de climat de référence SCR durant lesquelles nous disposons des PPT et des PC ; et des périodes futures estimées durant lesquelles nous projetons les PC via les modèles de changement de climat. Cette deuxième période est appelée scénario de climat projeté (SCP).
- ✧ Coupler les paramètres PC (les scénarios SCR/SCP) et les paramètres PPT pour en faire des simulations à travers le modèle 2CAFDYM en tenant compte de quelques contraintes de simulation réparties en contraintes physiques (tailles des cellules, zones d'intérêt, ...etc) et contraintes temporelles (pas de temps, vitesse de simulation, ...etc).
- ✧ Pour chaque simulation concernant les scénarios (SCR et SCP), sauvegarder pour chaque itération de temps les paramètres (eau évaporée (E_w), eau souterraine (G_w) et eau de surface (S_w)), puis les analyser et les comparer. Nous procédons par :
 - Comparer les paramètres E_w , S_w et G_w par zone d'influence à travers les cellules du domaine d'étude pour les SCP par rapport aux SCR par intervalle de temps (saison par exemple) ;

- Comparer le volume moyen global des paramètres E_w , S_w et G_w pour tout le domaine d'étude en fonction des intervalles de temps (mois par exemple) pour les SCP par rapport aux SCR ;
- Comparer la disponibilité des paramètres S_w et G_w pour tout le domaine d'étude en fonction des pas d'itération de temps pour les SCP par rapport aux SCR. Et cela par le biais du produit du pourcentage en aire et du volume moyen de l'eau de surface S_w et de l'eau souterraine G_w disponibles (codés respectivement par H_Vsw et H_Vgw). Les unités de H_Vsw et H_Vgw dépendent de la dominance du % par rapport au volume, vu que l'un constitue un coefficient de poids comparé à l'autre.

4.3 Améliorations apportées au modèle

Cette section mentionne les améliorations que nous avons apportées au logiciel de simulation de 2CAFDYM afin d'assurer son application à notre région d'étude.

4.3.1 Amélioration du package fonctionnel "*Data management*"

Les améliorations concernent deux niveaux :

- *Superposition des PPT de base pour initialiser un domaine d'étude* : en plus des trois fichiers de base (MNT, type de sol et occupation du sol), nous avons incorporé un quatrième fichier contenant la distribution des régions d'intérêt afin de restituer les résultats de simulation par région. Les quatre fichiers (pris au format d'image raster de type ASCII) sont à charger chacun comme systèmes de coordonnées induits $(i, j) \in \mathbb{Z}^2$ dénotés respectivement par $C_{altitude}$, $C_{soiltype}$, $C_{landuse}$ et C_{roi} . Ainsi, le treillis \mathcal{L} résultant de leur superposition est pris comme domaine d'étude pour les simulations, soit :

$$c_{ij} \in \mathcal{L} \text{ si et seulement si } (i, j) \in C_{altitude} \cap C_{soiltype} \cap C_{landuse} \cap C_{roi} \quad (4.9)$$

Cette superposition permet de résoudre les problèmes d'uniformité de la géométrie des bords du domaine d'étude à travers les quatre données d'entrée issues en général de sources différentes.

- *Importation & Exportation des paramètres* : qui consiste à donner la possibilité premièrement d'importer à tout moment de simulation depuis la phase de superposition précédente les paramètres d'intérêt entre les paramètres PPT, PC et PD. À partir des actionneurs de l'Interface graphique (GUI), nous procédons par :
 - Choisir le type du paramètre ensuite choisir le paramètre concerné ;
 - Choisir le mode d'importation : fichier raster, valeur commune, shapefile, comparé à un paramètre ;
 - Exécuter le processus d'importation avec le choix d'activer le calcul des sous-paramètres liés.

La fonctionnalité consiste à donner la possibilité d'exporter à tout moment de simulation les paramètres d'intérêt entre les paramètres PPT, PC et PD. Les étapes d'exportation sont identiques à celles de l'importation sauf que le mode d'exportation est choisi : fichier raster et shapefile.

4.3.2 Amélioration du package fonctionnel "*Constraints*"

Les améliorations concernent deux niveaux :

- *Description des PC par stations* : qui consiste à décrire la répartition des stations pour les cellules qui constituent le domaine d'étude avec l'ensemble de ses PC. Nous procédons depuis les actionneurs du GUI à :
 - Choisir le mode de description, deux modes sont considérés à cet effet. Un premier qui consiste à choisir un fichier au format d'image raster de type ASCII contenant l'attribution directe des numéros de station pour chaque pixel (ou cellule). Le second consiste à choisir un fichier de type ASCII contenant la liste des coordonnées (exactes ou en (i, j)) des stations à partir duquel un diagramme de Voronoi est appliqué pour attribuer à chaque cellule la station qui lui est le plus proche. Les coordonnées exactes nécessitent la prise en compte des coordonnées du *left lower corner* (XLLCORNER et YLLCORNER), lesquels sont éditables depuis le GUI.
 - Charger et appliquer les données de PC à chaque cellule par itération de temps. Le chargement est effectué une seule fois à travers un fichier de type ASCII contenant la liste des données de PC (température, précipitations, début et nombre de jours de pluie) par station, par an et par mois. Une fois chargées, les données sont sauvegardées en cache, puis à chaque itération, les cellules font la mise à jour de leurs PC en interrogeant la station associée.
- *Définition des conditions aux bords* : cette fois-ci depuis le GUI au lieu de passer par le code source. Nous procédons par :
 - Choisir le type de conditions : fixe, eau entrant ou eau sortant.
 - Choisir le mode de définition des conditions : une seule cellule capturée, toutes les cellules de bords ou cellules des bords d'un shapefile.
 - Appliquer les conditions aux cellules considérées.

Cependant par défaut, le type fixe est sélectionné pour toutes les cellules des bords du domaine d'étude.

4.3.3 Amélioration du package fonctionnel "*Flow monitoring*"

Les améliorations concernent trois niveaux :

- *Choix de la période de simulation* : qui consiste à choisir la période de répartition de la simulation : mois suivant, tranche suivante avec le nombre de mois à renseigner, année suivante et toute la période. Pour chaque type de la période, les paramètres clés de discussion (eau évaporée, eau de surface et eau souterraine) sont sauvegardés pour chaque pas de temps.
- *Restitution des résultats de simulation* : qui consiste à choisir la période de restitution en fonction des périodes de simulation choisies puis choisir le type de résultats (paramètres) à restituer : valeur moyenne par zone d'influence, volume global moyen par pas de temps, disponibilité par pas de temps. Pour chaque type de restitution, les résultats sont sauvegardés automatiquement dans un dossier choisi au préalable sous deux formats (images illustratrices et données associées pour chaque région d'intérêt chargé) et affichés automatiquement dans le GUI. L'affichage de certains résultats sous format courbe peut être pour chaque région d'intérêt ainsi que par superposition entre les régions d'intérêt.

- *Manipulation des résultats* : qui consiste à choisir un paramètre critique, définir une échelle et le visualiser à l'écran. Afin d'assurer l'affichage pour des zones de très grande taille (le cas des simulations avec plus de 8000 km²) nous utilisons des systèmes de zoom in/out sur le paramètre concerné vers une fenêtre externe dédiée. Nous procédons par :
 - Construire ou récupérer l'image correspondant au paramètre concerné depuis le fichier au format d'image raster d'origine,
 - Instancier la fenêtre adaptée avec comme arrière-plan l'image du paramètre considérée avec les fonctions "zoom" actives,
 - Effectuer les "zoom" in/out avec la molette de la souris pour concentrer l'affichage vers les régions d'intérêt.

4.3.4 Récapitulatif des différences

Le tableau 4.1 illustre les différences considérées par rapport aux articles qui portent sur la zone de Boukhalef.

Tableau 4.1 : Différence entre l'application du modèle 2CAFDYM dans la zone de Boukhalef (Kassoué et al., 2017a) et dans les deux périmètres du Loukkos et Gharb.

Désignation	(Kassoué et al., 2017a)	Notre étude	
Région d'étude	Boukhalef, Tanger	Périmètre du Loukkos	Périmètre du Gharb
Superficie	34,3 km ²	2.572 km ²	6.160 km ²
Type du climat	Subhumide	Subhumide à semi-aride	
Affectation des données climatiques	Uniforme	Distribué	
Nombre de stations	1	3	5
Activité	Activité non agricole	Activité agricole intense	
Période de référence	1984–2014	1981-1994 ; 1995-2005 et 2005-2016	
Nombre de carte d'occupation du sol	Une seule carte pour le scénario de référence et futur	Trois cartes pour le scénario de référence et une carte pour le futur	
Saturation du sol	Saturation calculée par la constante d'infiltration	RFU_{max} considérée comme saturation	
Simulation et résultats	Simulations et résultat globalement	Simulation globale et restitution des résultats par périmètre	

Dans la section suivante, nous allons considérer une application du modèle considéré pour évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de deux périmètres irrigués du Nord du Maroc couvrant en totalité une superficie de 8708 km².

4.4 Application du modèle 2CAFDYM à la région d'étude

4.4.1 Données d'entrée de la région d'étude

Les données de paramètres physiques du terrain (topographie, sol et occupation du sol) et de paramètres climatiques utilisées dans cette étude sont montrées dans le tableau 4.2.

Une résolution de 30×30 m du modèle numérique d'élévation (MNT) a été utilisée à partir de la plateforme USGS EarthExplorer afin de calculer la pente (cf. chapitre 2 sous-section 2.3.1). Les données de sol ont été obtenues à partir de la base de données de l'ORMVAG et ORMVAL. La distribution spatiale des types de sol est illustrée dans la figure 2.12 (cf. chapitre 2 sous-section 2.3.2). Les vertisols représentent le type de sol le plus largement répandu dans le périmètre du Gharb. Tandis que les sols peu évolués et les vertisols sont les plus dominants dans le périmètre du Loukkos. Les données sur les types d'occupation du sol présentant des variations spatio-temporelles en 1984-1985, 2001-2002, 2015-2016 et 2016-2017 ont été obtenues via différentes phases de traitement comme illustrées précédemment dans le chapitre 2 sous-section 2.3. Comme déjà mentionné, les trois premières années sont considérées pour les climats de référence et la quatrième année est considérée pour les climats projetés ($SCPO_{2021-2050}$ et $SCPP_{2021-2050}$). À rappeler que nous avons choisi six principales catégories d'occupation du sol, à savoir : Eau, bâtiment et infrastructures, végétation, terres agricoles, forêt et sol nu. Les données météorologiques décennales de 1981-1982 à 2015-2016, notamment les températures minimale et maximale et les précipitations, des deux périmètres ont été fournis par l'ORMVAG et ORMVAL.

Pour les projections futures, nous nous sommes limités à utiliser une carte d'occupation du sol de 2016-2017 tandis qu'il serait nécessaire de prendre en compte les plans de développement futur des terres dans notre région d'étude. Cela peut se faire, en nous basant sur des modèles permettant la prédiction des changements d'utilisation des terres. Voir (Liping et al., 2018) pour quelques issues concernant une telle considération.

Tableau 4.2 : Récapitulatif des données d'entrée du modèle utilisé.

Type	Donnée	Description	Acquisition/Source de données
PPT	MNT	Résolution de 30 x 30 m	Plateforme USGS EarthExplorer
	Sol	Carte Gharb de 1970 de 1/100000	ORMVAG
		Carte Loukkos de 1/100000	ORMVAL
	Occupation du sol	Quatre carte de 1984-1985, 2001-2002, 2015-2016 et 2016-2017	Plateforme USGS+ Cette étude
PC	Données météorologiques de référence	Températures minimale et maximale et précipitations de 1981-2016	ORMVAG et ORMVAL
	Données météorologiques de projection	(Driouech, 2010)	Cette étude

4.4.2 Conditions initiales et contraintes de simulation pour la région d'étude

4.4.2.1 Conditions initiales et limites pour la région d'étude

Comme condition aux bords, nous avons appliqué le type fixe qui est par défaut dans le modèle 2CAFDYM. En d'autres termes pas d'échange entre la région d'étude et le milieu extérieur. Ce choix a été fait en raison d'absence des statistiques du débit d'eau entrant et/ou sortant sur les bords des deux périmètres à l'instant initial de la simulation. Une telle donnée nous aurait permis de considérer des conditions aux bords de type réflexif.

À la différence de l'article ([Kassogué et al., 2017a](#)), les résultats sont obtenus non seulement à la fin du processus de simulation mais aussi après chaque itération du modèle.

4.4.2.2 Contraintes de simulation

Pour chaque station considérée, et pour chaque scénario de référence et projeté, la pluie commence le premier jour de chaque mois et durant un nombre de jours (RD_i) pris en fonction du cumul des intensités de précipitations du mois concerné (noté P_i en mm) selon que :

$$RD_i = \begin{cases} 10, & \text{si } P_i \geq 80 \\ 7, & \text{si } P_i \in [50, 80[\\ 5, & \text{si } P_i \in [30, 50[\\ 2, & \text{si } P_i \in [10, 30[\\ 1, & \text{si } P_i \in [5, 10[\\ 0,5 & \text{si } P_i \in [0, 5[\end{cases} \quad (4.10)$$

Nous avons considéré une telle répartition en observant les valeurs minimales et maximales des précipitations pour chaque station tout en prenant en compte les statistiques annuelles du cumul total des précipitations dans les régions avoisinantes.

Les simulations sont effectuées par pas de temps horaire sur les deux périmètres en tant qu'un seul domaine d'étude, mais les résultats sont restitués en les séparant. Les caractéristiques de la station de calcul utilisée pour les simulations sont données dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Caractéristiques de la station de calcul utilisée pour effectuer les simulations pour les deux périmètres.

Caractéristique	Indication
Modèle	HP Z8 G4 Workstation
Système d'exploitation	Windows 10 Professionnel 64 bits
Processeur	Intel(R) Xeon(R) Silver 4108 CPU @ 1.80 GHz 1.80 GHz
Mémoire	64 Gb RAM et 1 TB SATA 6.0 Gbps
Carte graphique	NVIDIA Quadro P4000

Les simulations pour chaque scénario ont pris en moyenne 14 heures tout en allégeant le logiciel de simulation de façon à ne garder que les fonctionnalités nécessaires pour l'étude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau.

4.5 Résultats de simulations et discussion

Dans cette section, nous discuterons les variations des quantités de l'eau évaporée, celles disponibles en surface et celles disponibles dans le sous-sol. Chaque grandeur d'eau sera en comparaison avec les scénarios projetés par rapport aux scénarios de climat de référence.

4.5.1 Eau évaporée

4.5.1.1 Variation spatiale saisonnière de l'eau évaporée

La variation saisonnière moyenne d'eau évaporée (E_w) pour chaque cellule (portion carrée de terrain de 30 m de côté) des deux périmètres du Loukkos et du Gharb durant les trois scénarios de référence et les deux scénarios projetés 2021–2050 sont données par les figures 4.5 et 4.6.

Les remarques sont les suivantes par rapport à chaque saison.

- ✧ **En automne**, nous constatons visuellement que pour le périmètre du Gharb, la quantité d'eau évaporée est plus forte pour le scénario $SCR_{2005-2016}$, ensuite vient le scénario $SCR_{1994-2005}$. Tandis que pour le périmètre du Loukkos, la quantité d'eau évaporée en $SCR_{1994-2005}$ est plus forte que celle du scénario $SCR_{2005-2016}$ puis les plus faibles valeurs sont observées durant le scénario $SCR_{1981-1994}$. En outre, la quantité d'eau évaporée est plus forte en $SCPO_{2021-2050}$ et plus faible en $SCPP_{2021-2050}$ par rapport à celle du scénario $SCR_{2005-2016}$ pour le périmètre du Loukkos. Quant au périmètre du Gharb, nous remarquons que les deux scénarios projetés 2021–2050 ont de faible quantité par rapport à celle du scénario $SCR_{2005-2016}$. Globalement, pour tous les cinq scénarios, les différences de dominance des fortes et faibles valeurs des quantités d'eau évaporée sont observées beaucoup plus au centre pour les deux périmètres.
- ✧ **En hiver**, la quantité d'eau évaporée a augmenté très considérablement par rapport à la saison automnale pour tous les scénarios et les deux périmètres. Nous observons que cette quantité a haussé aussi très considérablement pour les deux périmètres en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$ (variations observées à l'ouest, au centre et à l'est du périmètre du Loukkos et tout le périmètre du Gharb), puis modérément en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$ (variations observées au centre du Gharb et à l'ouest du Loukkos). Par rapport au scénario $SCR_{2005-2016}$, les deux scénarios projetées ont de faible quantité d'eau évaporée pour les deux périmètres (variations observées au sud et à l'est du Gharb).

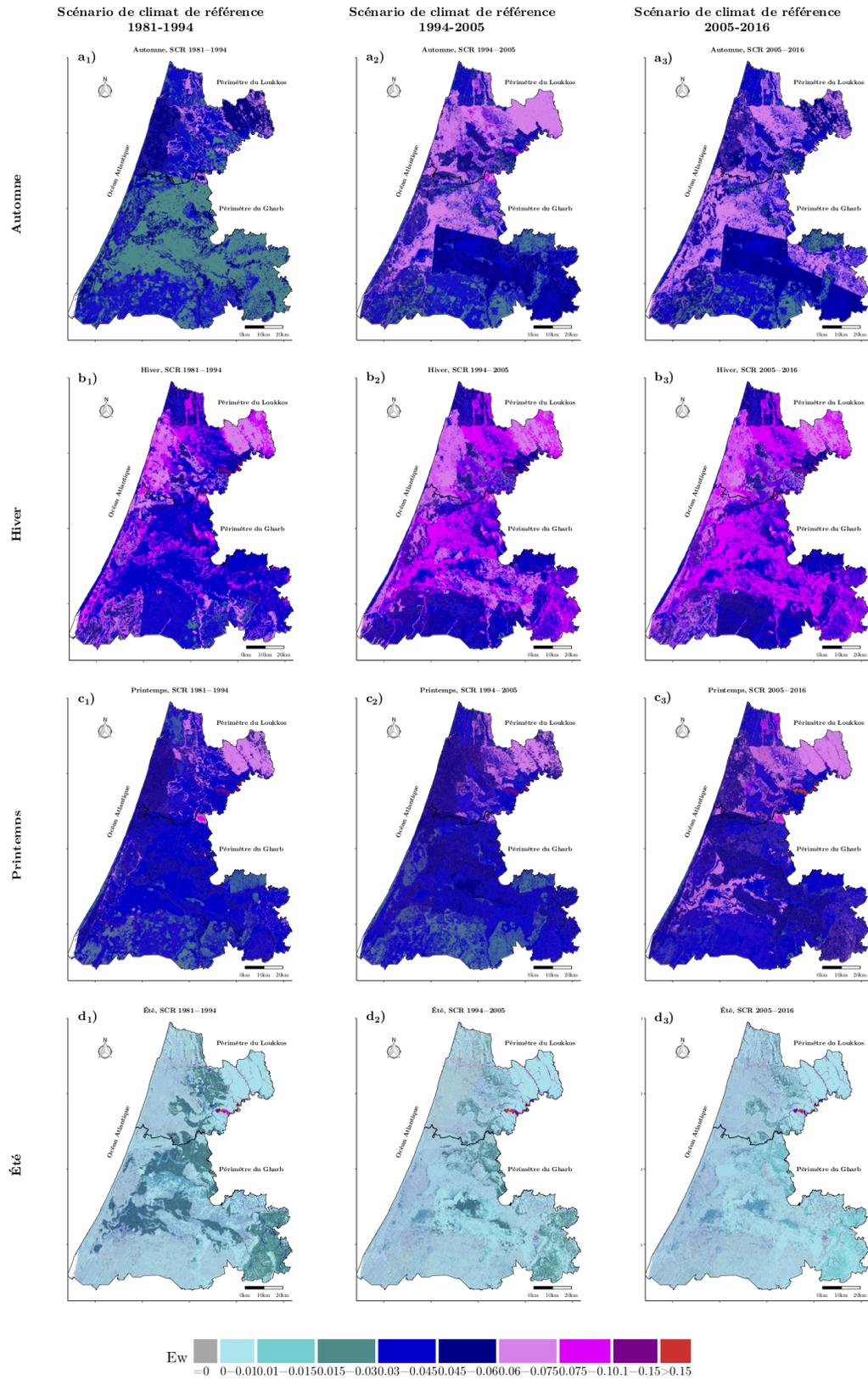


FIGURE 4.5 : Variation saisonnière de l'eau évaporée (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.

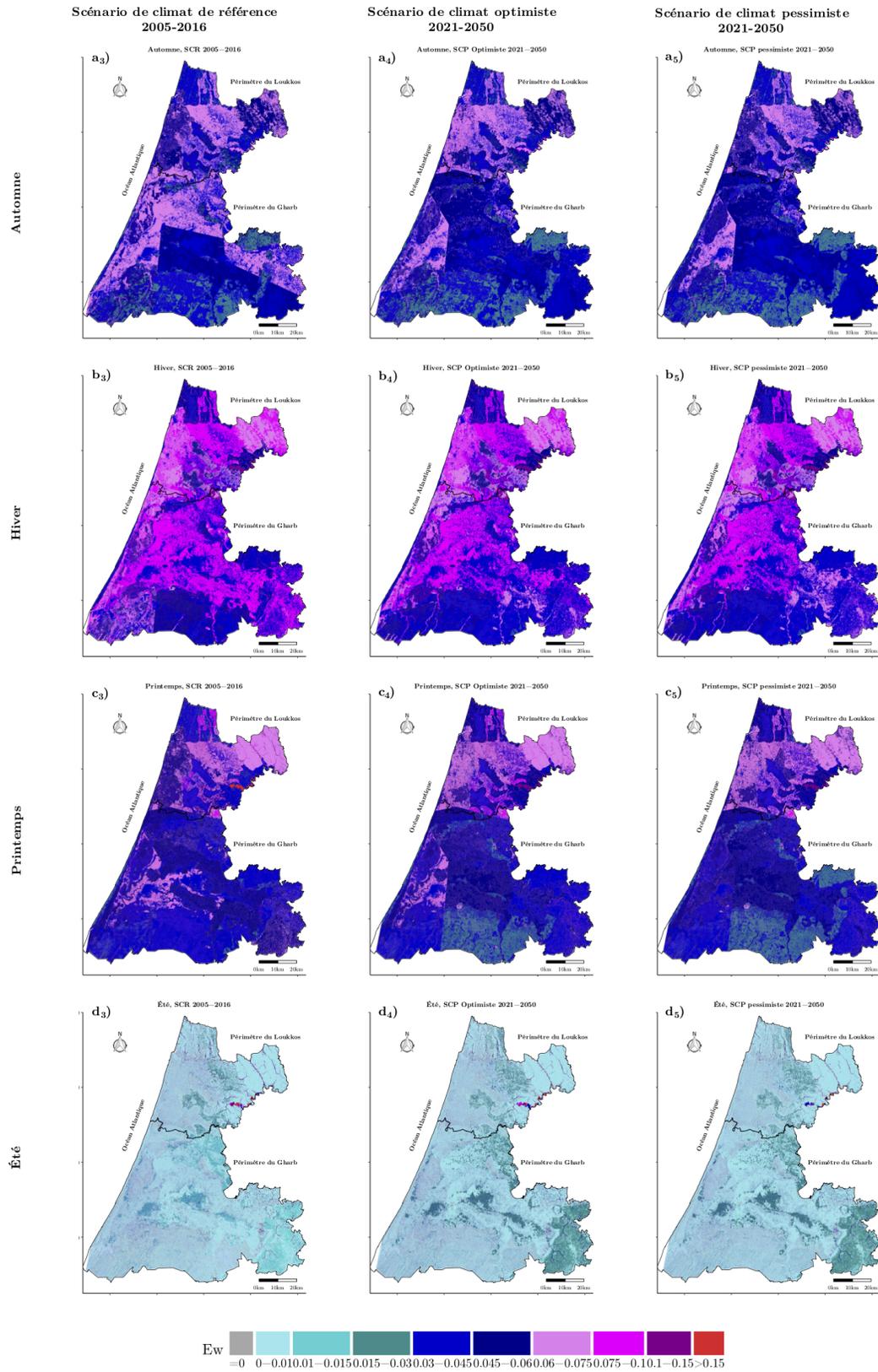


FIGURE 4.6 : Variation saisonnière de l'eau évaporée (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb. (suite)

- ✧ **En printemps**, la quantité d'eau évaporée a baissé énormément par rapport à la saison hivernale pour tous les scénarios. En passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$, la quantité d'eau évaporée a intensifié dans le centre, le nord et l'est du Gharb ainsi que le centre et le nord du Loukkos. Elle a diminué dans le sud amplement pour le périmètre du Gharb. Ensuite, cette quantité continue d'augmenter à l'est et à l'ouest du Gharb ainsi qu'au Sud du Loukkos et continue de diminuer au sud du Gharb en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$. Nous constatons aussi que le scénario $SCR_{2005-2016}$ est plus faible (respectivement plus fort) en quantité par rapport aux scénarios projetés dans le centre (respectivement dans le sud et l'est) du périmètre du Gharb. Tandis qu'il est plus faible en comparaison avec les scénarios projetés pour le périmètre du Loukkos.
- ✧ **En été**, par rapport à la saison printanière, la quantité d'eau évaporée a déchu très considérablement pour tous les scénarios. Visuellement, nous observons que la quantité d'eau évaporée a baissé largement pour les deux périmètres en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$ (variations observées au centre et au sud du périmètre du Loukkos, ainsi qu'au centre, au nord et à l'est du Gharb). Ensuite, la quantité a déchu modérément en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$ (variations observées au centre, au nord et à l'est du Gharb et le long du nord au sud du Loukkos). De plus, nous constatons que le scénario optimiste est relativement plus grand (respectivement faible) en quantité d'eau évaporée par rapport au scénario $SCR_{2005-2016}$ pour le périmètre du Gharb (respectivement pour le périmètre du Loukkos).

Vis-à-vis de ces discussions, nous notons que les valeurs d'eau évaporée moyenne pendant l'hiver sont supérieures à celles en printemps ensuite en automne et enfin en été. Ce qui est le cas de manière générale. La discussion de l'eau évaporée dans ce contexte d'impact du changement climatique aide à cerner le bilan de variation de la disponibilité de l'eau de surface (S_w) et de l'eau souterraine (G_w) comme grandeurs de ressources en eau considérées dans ce travail.

4.5.1.2 Bilan de variation d'eau évaporé par rapport à l'eau souterraine et de surface

La figure 4.7 illustre la comparaison du cumul moyen d'eau évaporée (E_w) par mois, par rapport à la moyenne horaire par mois d'eau de surface (S_w) et souterraine (G_w) disponible. Cette figure indique aussi l'effet de l'évaporation sur la disponibilité de ces deux ressources en eau.

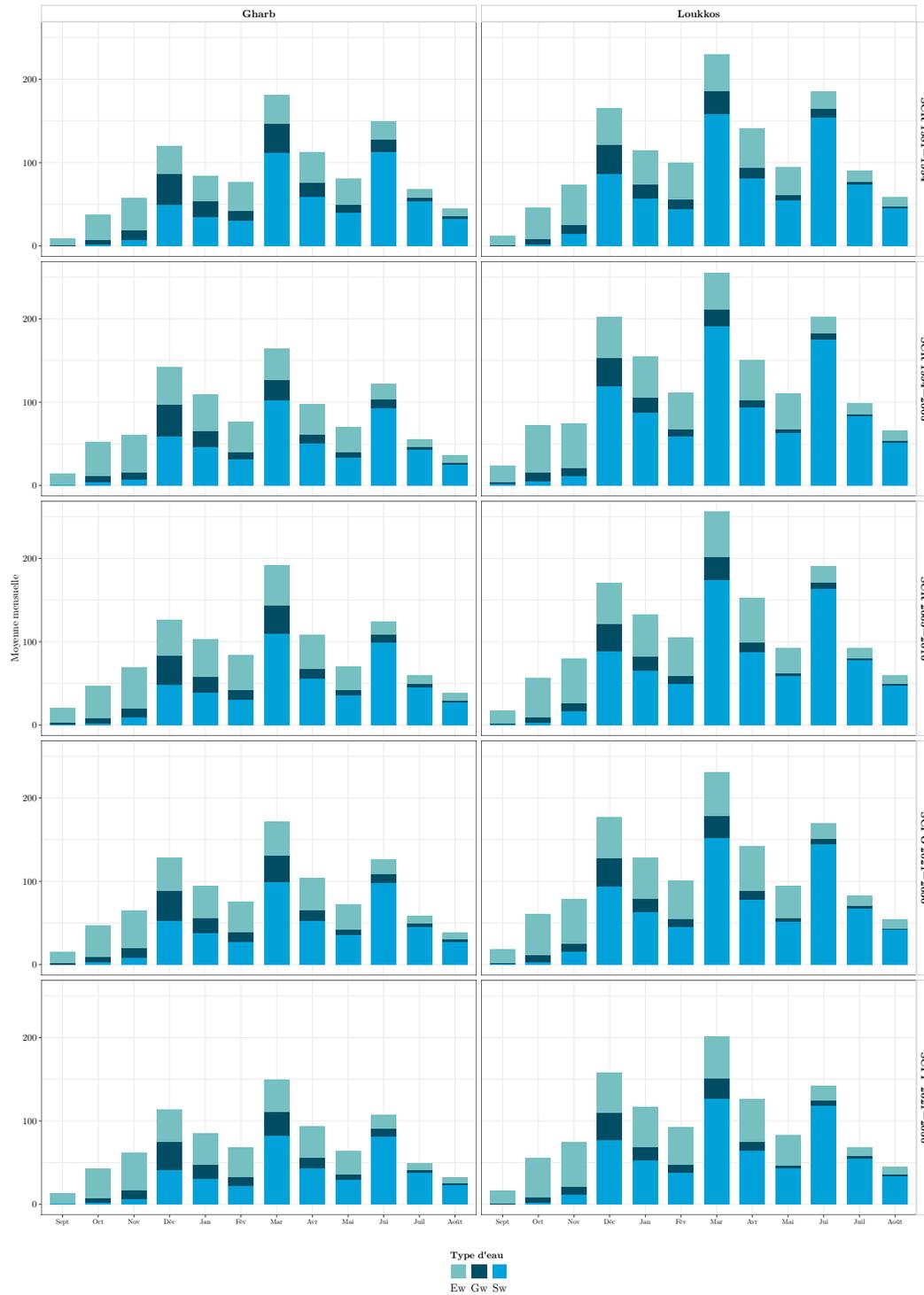


FIGURE 4.7 : Bilan globale par mois de l'eau évaporée (E_w), souterraine (G_w), et de surface (S_w) (en m^3/m^2) en fonction des différents scénarios (référence, optimiste et pessimiste) pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.

Le tableau 4.4 résume l'ordre de dominance entre E_w , S_w et G_w pour les deux périmètres.

Tableau 4.4 : Ordre de dominance entre E_w , S_w et G_w pour les deux périmètres.

Ordre de dominance	Périmètre	Mois	Scénarios
$E_w > G_w > S_w$	Gharb Loukkos	Septembre à Novembre Septembre à Octobre	Tous les SCR et SCP
$S_w > G_w > E_w$	Gharb Loukkos	Décembre et Mars	$SCR_{1981-1994}$
$E_w > S_w > G_w$	Gharb Loukkos	Janvier Novembre Février	Tous les SCR et SCP $SCPP_{2021-2050}$
$S_w > E_w > G_w$	Gharb Loukkos	Janvier, de Avril à Août Décembre, Janvier, de Mars à Août Décembre, de Mars à Août Décembre, de Mars à Août Décembre à Août	$SCR_{1981-1994}$ $SCR_{1994-2005}$ $SCR_{2005-2016}$ et tous les SCP Tous les SCP Tous les SCR

Après que nous ayons discuté la variation de l'eau évaporée sur les deux périmètres et leur effet sur la disponibilité globale des ressources en eau de surface et en eau souterraine, nous allons rentrer dans les détails des disponibilités de ces ressources en eau de point de vue superficie et volume. Nous poursuivons par l'eau de surface.

4.5.2 Eau de surface

4.5.2.1 Variation spatiale saisonnière de l'eau de surface

La variation saisonnière moyenne d'eau de surface (S_w) pour chaque cellule (portion carrée de terrain de 30 m de côté) des deux périmètres du Loukkos et du Gharb durant les trois scénarios de référence et les deux scénarios projetés 2021–2050 est donnée par les figures 4.8 et 4.9. Les résultats de variation sont obtenus par simulation par pas de l'heure pour chacun des scénarios considérés. Les remarques et discussions sont les suivantes en fonction de chaque scénario.

✧ **En automne**, pour les deux périmètres, l'eau de surface est beaucoup plus disponible pour le scénario $SCR_{2005-2016}$ (soit en moyenne $0,013 m^3/m^2$ pour Gharb et $0,021 m^3/m^2$ pour Loukkos) que pour les deux autres scénarios de référence. Néanmoins, entre ces deux scénarios, les valeurs d'eau de surface est plus grand pour $SCR_{1981-1994}$ que pour $SCR_{1994-2005}$. Ce dernier scénario présente beaucoup plus de valeurs nulles que les deux autres scénarios (connotant l'absence d'eau de surface). D'autre part, pour le périmètre du Loukkos, les scénarios projetés et $SCR_{2005-2016}$ ont une variation similaire de la disponibilité de l'eau de surface. Par contre pour le périmètre du Gharb, nous remarquons une décroissance de la disponibilité de part et d'autre, par rapport au scénario de référence $SCR_{2005-2016}$: le scénario optimiste présente une forte régression dans le nord et une partie du sud-est du périmètre. Le scénario pessimiste quant à lui présente une forte baisse dans le nord et l'est du périmètre et une faible déclin dans une partie du sud-est du périmètre.

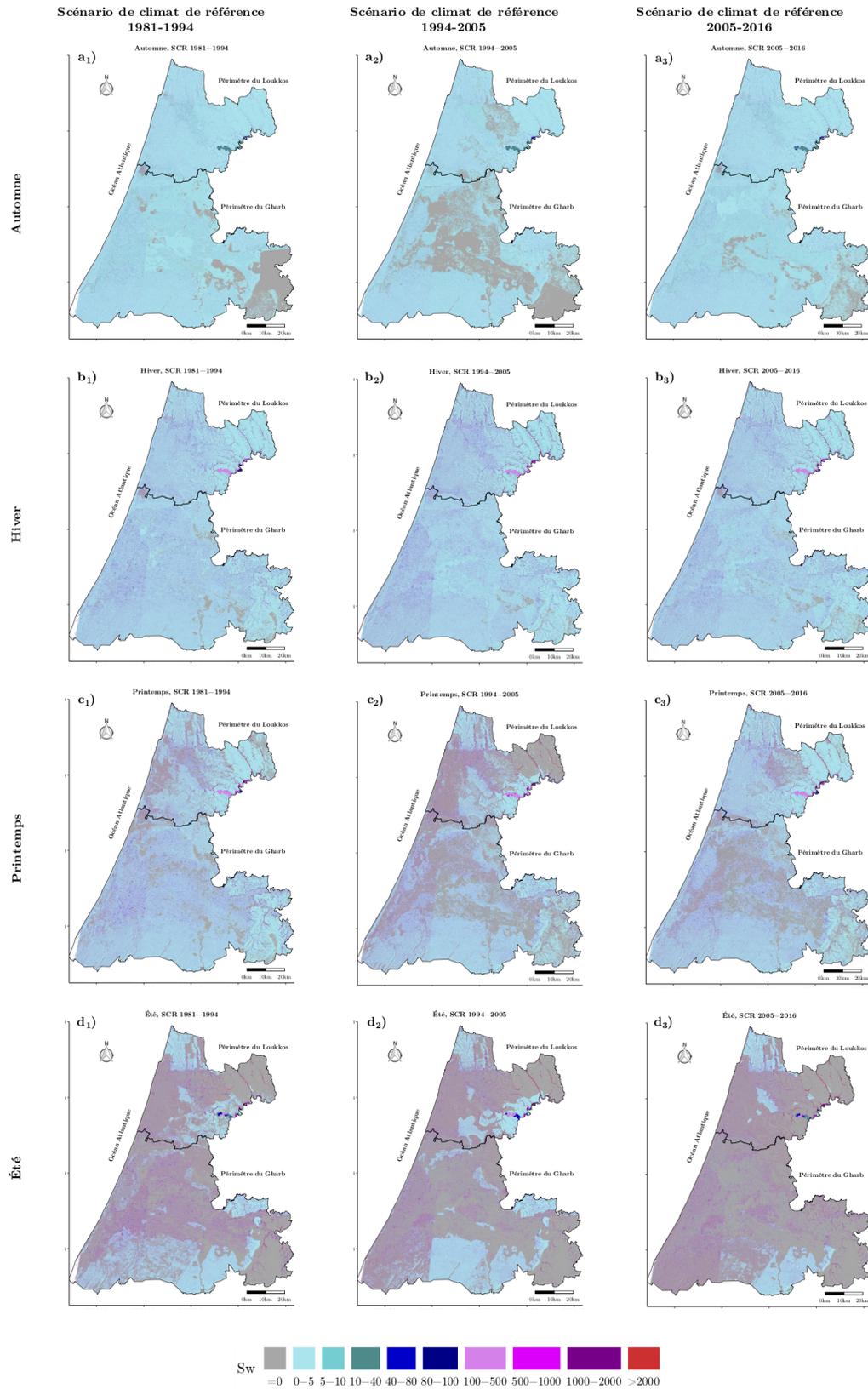


FIGURE 4.8 : Variation saisonnière de l'eau de surface (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.

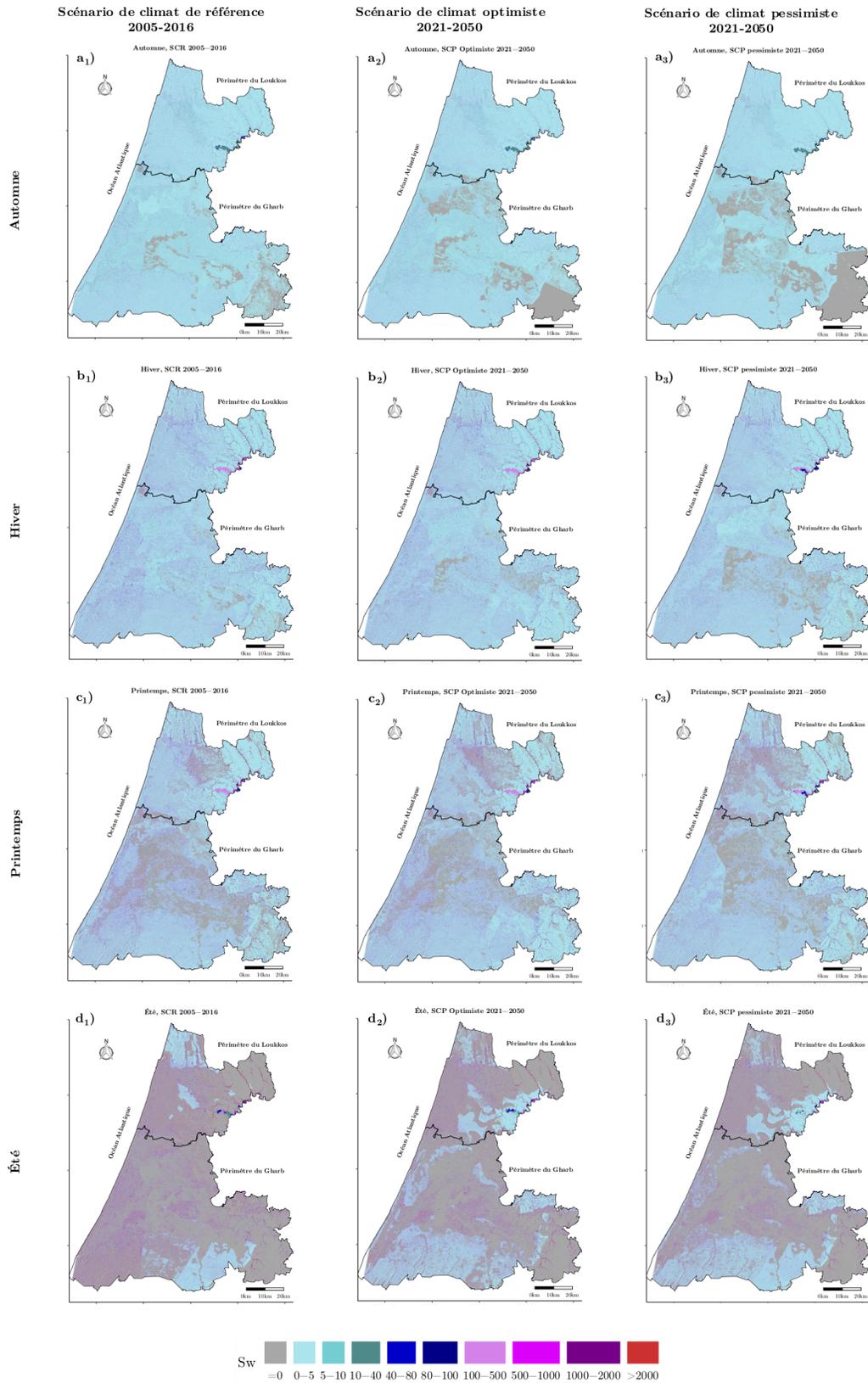


FIGURE 4.9 : Variation saisonnière de l'eau de surface (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb. (suite)

- ✧ **En hiver**, pour les deux périmètres et pour tous les scénarios, nous remarquons que l'eau de surface est presque la même en termes de disponibilité bien que les valeurs augmentent et présentent beaucoup moins de valeurs nulles en comparaison avec la saison automnale. Le périmètre du Loukkos affiche à nouveau les grandes valeurs de disponibilité de l'eau de surface par rapport au périmètre du Gharb pour tous les trois scénarios de référence. Ce qui confirme le fait que les cumuls des précipitations soit plus grands pour le périmètre du Loukkos que celui du Gharb durant cette saison bien que l'inverse est observé pour la température (cf. sous-section 3.6.5, chapitre 3). Pour les deux scénarios projetés 2021–2050 par rapport au scénario de référence $SCR_{2005-2016}$, nous remarquons que la variation de la disponibilité de l'eau est beaucoup similaire pour le périmètre du Loukkos. Toutefois, le scénario optimiste tend à témoigner un tout petit plus d'eau que le cas pessimiste relativement au scénario de référence. Pour le périmètre du Gharb, la disponibilité de l'eau de surface est en décroissance. Le scénario optimiste présente moins de baisse que le scénario pessimiste.

- ✧ **Au printemps**, par rapport à la saison hivernale, l'eau de surface décroît largement pour les deux périmètres et pour tous les scénarios en discussion. Pour les scénarios de référence, la baisse est plus importante pour $SCR_{1994-2005}$, ensuite vient celui de $SCR_{2005-2016}$, et finalement celui de $SCR_{1981-1994}$. Et distinctement, il y a plus de superficie couverte d'eau de surface dans le périmètre du Gharb que celui du Loukkos durant $SCR_{1981-1994}$ et l'inverse pour $SCR_{2005-2016}$. Cependant, le pourcentage des zones couvertes d'eau de surface par rapport aux zones non couvertes est presque le même pour les deux périmètres durant $SCR_{1994-2005}$. Signalons que les précipitations ont eu tendance à dominer sur les évaporations durant cette saison. Par rapport au scénario de référence $SCR_{2005-2016}$, nous remarquons une décroissance pour les scénarios projetés dans les deux périmètres. Pour le périmètre du Loukkos, le déclin est presque similaire pour les deux scénarios projetés en comparaison avec celui de référence, sauf que le centre présente une disponibilité en volume un peu plus grande dans le cas optimiste que dans le cas pessimiste. Pour le périmètre du Gharb, par rapport au $SCR_{2005-2016}$, la croissance est plus forte dans les zones du sud et sud-est pour le scénario optimiste et dans les zones du sud et sud-ouest pour le scénario pessimiste.

- ✧ **En été**, par rapport à la saison printanière, l'eau de surface décroît fortement pour les deux périmètres durant tous les scénarios. De manière distincte, le périmètre du Gharb présente les plus grandes valeurs de disponibilité de l'eau de surface durant $SCR_{1981-1994}$, puis vient $SCR_{1994-2005}$ et ensuite la période $SCR_{2005-2016}$. Par contre, le périmètre du Loukkos les présente durant $SCR_{1994-2005}$, ensuite vient $SCR_{1981-1994}$ et ensuite $SCR_{2005-2016}$. Et en contraste avec la discussion de la sous-section 3.6.5, chapitre 3, nous trouvons qu'il y a plus d'eau de surface dans le périmètre du Loukkos que dans celui du Gharb dans tous les trois scénarios de référence (précipitations et températures plus importantes dans le périmètre Loukkos que dans le périmètre Gharb). Par rapport au scénario de référence $SCR_{2005-2016}$, nous observons pour les deux scénarios projetés 2021–2050, une croissance et une décroissance de part et d'autre du périmètre du Loukkos tandis que nous observons une croissance pour le périmètre du Gharb. Pour le périmètre du Loukkos, la croissance est observée au sud-est et la régression au nord. Pour le périmètre du Gharb, la hausse est plus observable au sud, dans une partie du sud-est et quelques parties du nord pour tous les deux scénarios projetés. Les valeurs de disponibilités sont plus grandes en volume pour le scénario

optimiste que pour le scénario pessimiste.

4.5.2.2 Disponibilité globale d'eau de surface

De point de vue disponibilité globale d'eau de surface pour les deux périmètres comme l'illustre la figure 4.10 en termes d'évolution globale par heure de la disponibilité de l'eau de surface, nous observons que l'intervalle septembre-décembre correspond à la faible disponibilité de l'eau (moins de $0,04 m^3$) alors que l'intervalle janvier-août correspond à la plus grande disponibilité de l'eau (plus de $0,05 m^3$) pour tous les scénarios en discussion. Nous constatons aussi que l'eau de surface est plus disponible dans le périmètre du Loukkos que celui du Gharb durant presque tous les mois de tous les scénarios (avec des écarts allant de $0,001 m^3$ pour le mois de septembre à $0,10 m^3$ pour le mois de février, scénario $SCR_{1994-2005}$).

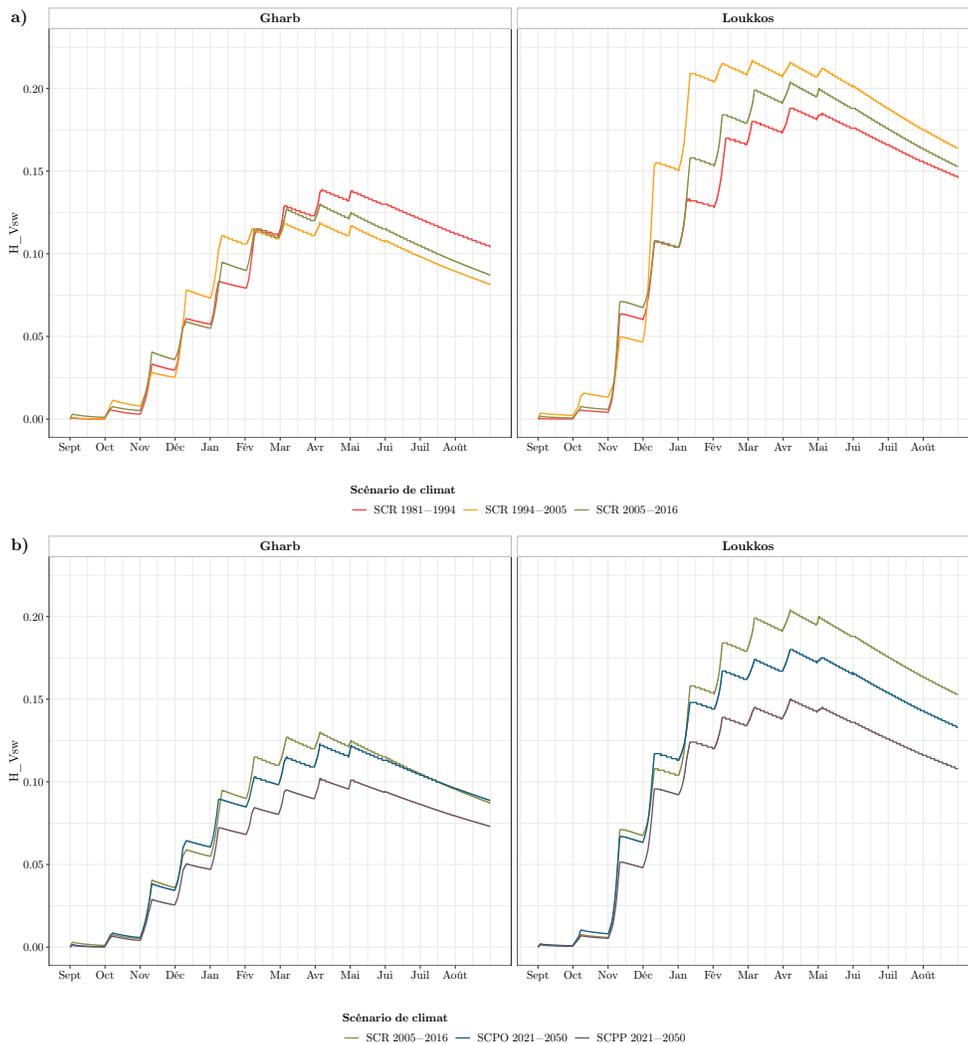


FIGURE 4.10 : Évolution globale par heure de la disponibilité de l'eau de surface (H_{Vsw} en m^3) pour les différents scénarios de référence et les scénarios projetés 2021-2050 pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.

Ainsi, pour chaque périmètre, nous trouvons que :

- **Cas du Gharb**

Pour les scénarios de référence, la disponibilité de l'eau de surface a diminué avec un taux de variation allant de 2,23% (mars) à 21,94% (août) en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$, puis elle a crû en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$ soit un taux de variation allant de 0,43% (mars) à 10,12% (avril) . Ces variations montrant des différences nettes pour des climats passés connus, il est bien intéressant de voir ce qui pourrait en être en comparaison avec les projections futures du climat.

De mi-janvier à mi-juin, la disponibilité de l'eau de surface décroît pour les deux scénarios projetés par rapport au $SCR_{2005-2016}$ avec des taux de variation minimale et maximale respectivement de l'ordre de 0,14% (janvier) à 10,82% (février) pour le scénario optimiste et de 17,61% (juin) à 26,88% (février) pour le scénario pessimiste. Alors qu'elle connaît une croissance pour le scénario optimiste par rapport au $SCR_{2005-2016}$ durant les mois de décembre, début-janvier et mi-août avec un taux de variation allant de 0,05% (décembre) à 11,15% (janvier).

- **Cas du Loukkos**

De janvier à août, pour les scénarios de référence, la disponibilité de l'eau de surface a augmenté de 11,48% (août) à 59,18% (janvier) en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$, puis elle a baissé de 4,42% (mai) à 31,24% (janvier) en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$.

Pour les deux scénarios projetés, de mi-janvier à août, la disponibilité de l'eau de surface connaît une décroissance par rapport au $SCR_{2005-2016}$ avec des taux de variation minimale et maximale respectivement de l'ordre de 0,04% (janvier) à 13,17% (mai) pour le scénario optimiste et de 14,36% (janvier) à 29,38% (août) pour le scénario pessimiste. Tandis que d'octobre à décembre une hausse de la disponibilité en eau est remarquée pour le scénario optimiste par rapport au scénario de référence $SCR_{2005-2016}$ soit un taux de croissance allant de 0,07%(novembre) à 37,74% (octobre).

Suite à la discussion des disponibilités de ressources en eau de surface pour les deux périmètres, nous poursuivons avec la discussion concernant cette fois-ci les ressources en eau souterraine.

4.5.3 Eau souterraine

4.5.3.1 Variation spatiale saisonnière de l'eau souterraine

Les figures 4.11 et 4.12 montrent la variation saisonnière moyenne de l'eau souterraine (G_w) pour chaque cellule (portion carrée de terrain de 30 m de côté) des deux périmètres du Loukkos et du Gharb durant les trois scénarios de référence et les deux scénarios projetés 2021–2050. Les résultats de variation sont obtenus par simulation par pas de l'heure pour chacun des scénarios considérés. Par rapport à chaque scénario, les remarques et discussions sont comme suit.

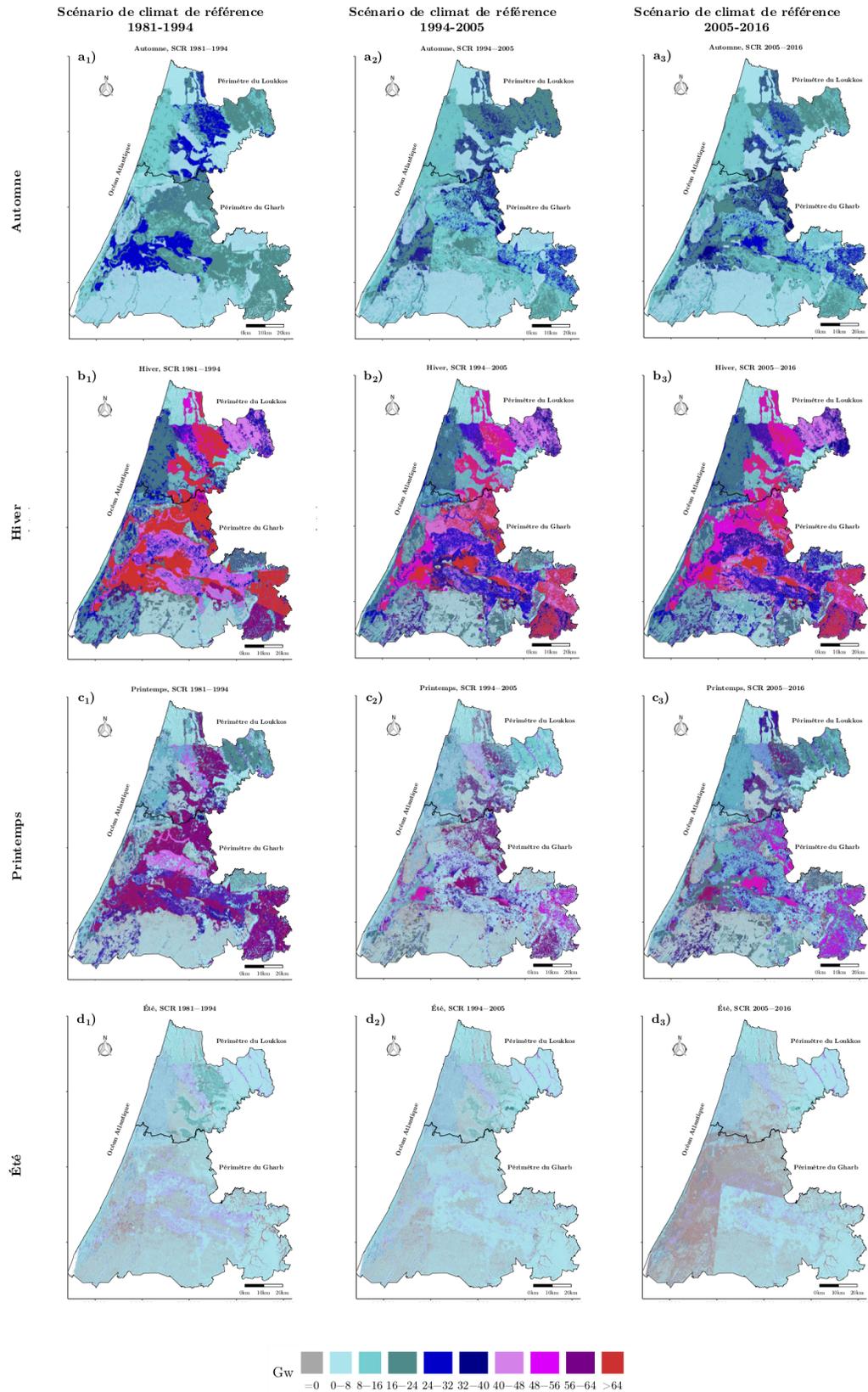


FIGURE 4.11 : Variation saisonnière de l'eau souterraine (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.

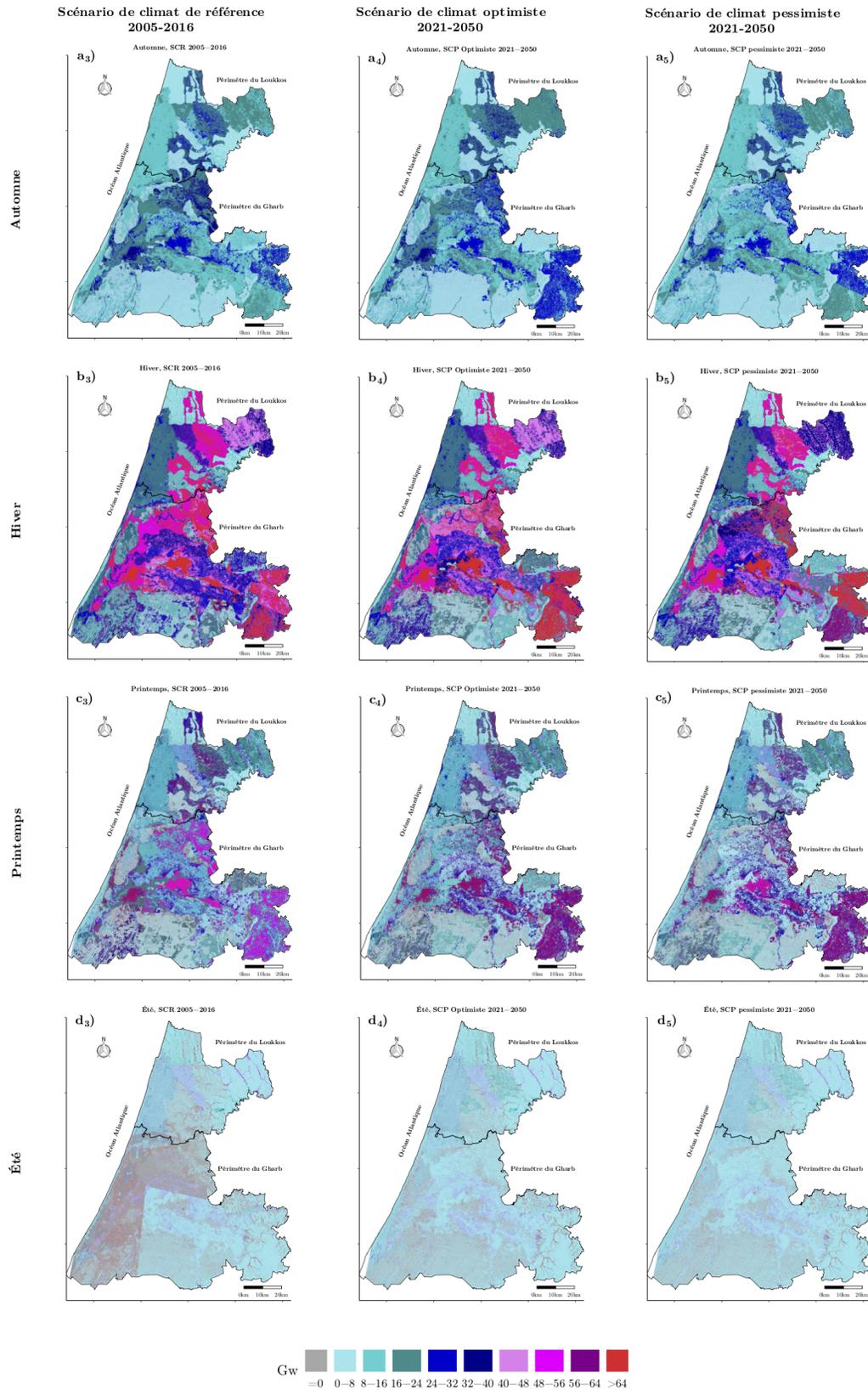


FIGURE 4.12 : Variation saisonnière de l'eau souterraine (en $m^3/(m^2.h)$) selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb. (suite)

- ✧ **En automne**, pour les deux périmètres, l'eau souterraine est plus disponible en volume pour $SCR_{1994-2005}$ (soit $16,94 \text{ m}^3/h$) vient ensuite $SCR_{2005-2016}$ puis $SCR_{1981-1994}$ pour Loukkos. Selon tous les trois scénarios de référence SCR, les plus grandes valeurs de l'eau souterraine sont au centre, ensuite les montagnes de l'est, puis la zone côtière (station Aouamra à l'ouest) et enfin le nord du Loukkos (zone du Sahlel). Par contre, pour le Gharb, le scénario $SCR_{2005-2016}$ est caractérisé par plus de disponibilité en volume d'eau souterraine (soit $15,48 \text{ m}^3/h$) que les deux autres scénarios de référence 1981-1994 et 1994-2005. Visuellement, il en est de même entre les scénarios $SCR_{1981-1994}$ et $SCR_{1994-2005}$. Néanmoins, pour $SCR_{1981-1994}$, le centre occupe les plus grandes valeurs de disponibilité, ensuite l'est et le nord en seconde position et finalement le sud en dernière position. Pour $SCR_{1994-2005}$, l'ordre croissant de disponibilité de l'eau souterraine est : l'ouest, ensuite le nord et l'est, puis le centre et enfin le sud. Pour $SCR_{2005-2016}$, l'ordre croissant de disponibilité de l'eau est : le nord, le centre et l'est en première position, ensuite l'ouest en seconde position et finalement le sud. En comparant les deux scénarios projetés 2021-2050 par rapport au $SCR_{2005-2016}$, nous observons une variation similaire de la disponibilité de l'eau souterraine en beaucoup de zones du Loukkos exceptés le centre, le sud et l'est qui présentent une petite croissance. Également pour le périmètre du Gharb, la variation est similaire dans beaucoup de zones excepté l'est qui est marqué par une hausse.
- ✧ **En hiver**, par rapport à la saison automnale, l'eau souterraine s'est accentuée très considérablement pour les deux périmètres pour tous les scénarios dont les valeurs de l'eau souterraine dépassent 30 m^3 . Pour le périmètre du Gharb, l'ordre décroissant de grande disponibilité en volume de l'eau souterraine selon les trois scénarios de référence est : $SCR_{1981-1994}$, ensuite $SCR_{2005-2016}$ puis $SCR_{1994-2005}$. De même, les valeurs du nord-est (station de Souk Larbaa) présentent les plus grandes valeurs de disponibilité, ensuite vient le centre du Gharb, puis l'est (pour lequel la station Zirara est forte que la station Khenichet en valeurs) et enfin le sud du Gharb (zone marquée par les forêts de Maâmoura). Quant au Loukkos, l'ordre décroissant de disponibilité de l'eau souterraine est : $SCR_{1981-1994}$, ensuite $SCR_{1994-2005}$ puis $SCR_{2005-2016}$. Nous notons que les valeurs du centre du Loukkos présentent les plus grandes valeurs de disponibilité, ensuite les montagnes l'est du Loukkos, puis la zone côtière (station Aouamra à l'ouest) et enfin le nord du Loukkos (zone du Sahlel). Distinctement, pour le périmètre du Loukkos, la variation est presque similaire entre le scénario optimiste ($32,60 \text{ m}^3/h$) et $SCR_{2005-2016}$ ($32,69 \text{ m}^3/h$). Tandis que pour le périmètre du Gharb, par rapport au $SCR_{2005-2016}$, la variation est croissante et décroissante selon les zones du périmètre pour les deux scénarios projetés 2021-2050. Entre le scénario optimiste et $SCR_{2005-2016}$, la baisse concerne une partie du centre-est, du nord, de l'ouest et le sud central, et la hausse concerne les zones de l'est et du sud-ouest (soit un taux de variation moyen de -3%). Entre le scénario pessimiste et $SCR_{2005-2016}$, la décroissance concerne le centre, le centre-est, le nord et l'ouest du périmètre avec un taux de variation moyen de -10% et la croissance concerne le sud-ouest et l'est. Les autres parties présentent des similarités.

- ✧ **Au printemps**, relativement à la saison hivernale, l'eau souterraine a diminué et augmenté en certaines zones pour les deux périmètres pour tous les scénarios. Pour les deux périmètres, l'ordre décroissant de grande disponibilité en volume de l'eau souterraine selon les trois scénarios de référence est : $SCR_{1981-1994}$, ensuite $SCR_{2005-2016}$ puis $SCR_{1994-2005}$. Toutefois, nous avons pour le périmètre du Gharb : (i) pour $SCR_{1981-1994}$, le centre, le nord et l'est occupent les grandes valeurs de disponibilité, ensuite vient l'ouest puis le sud ; (ii) pour $SCR_{1994-2005}$, l'ordre décroissant de disponibilité de l'eau souterraine est : le centre, le nord-est et sud-est en première position, ensuite l'est en seconde position et enfin l'ouest et le sud ; et (iii) pour $SCR_{2005-2016}$, l'ordre décroissant de disponibilité de l'eau est : le centre, l'est et le nord-est, ensuite l'ouest, puis le nord-ouest et le sud. Tandis que pour le périmètre du Loukkos, nous avons : (i) pour $SCR_{1981-1994}$, le centre occupe les grandes valeurs de disponibilité de l'eau souterraine, ensuite vient l'est, puis l'ouest et finalement le nord ; et (ii) pour les deux autres scénarios de référence, l'ordre décroissant de disponibilité de l'eau est : le centre et le sud, ensuite l'est, puis l'ouest. En outre, les scénarios optimiste et pessimiste étant similaires l'un de l'autre, nous notons que les deux périmètres présentent également des variations croissantes presque pour toutes les zones des deux périmètres par rapport au $SCR_{2005-2016}$. Quelques zones présentent des similarités.
- ✧ **En été**, comparé à la saison printanière, l'eau souterraine a décreu considérablement pour les deux périmètres durant tous les scénarios. Pour les deux périmètres, l'ordre décroissant de grande disponibilité en volume de l'eau souterraine selon les trois scénarios de référence est : $SCR_{1981-1994}$, ensuite $SCR_{1994-2005}$ puis $SCR_{2005-2016}$. Cependant, pour le périmètre du Gharb, $SCR_{1981-1994}$ occupe les plus grandes valeurs, lesquelles sont un peu similaires à celui de $SCR_{1994-2005}$ pour beaucoup de zones tout autour du centre. Ensuite, $SCR_{1994-2005}$ occupe à son tour des valeurs nettement plus grandes que celles du $SCR_{2005-2016}$ principalement au nord, à l'ouest et au sud-ouest du périmètre. Quant au Loukkos, $SCR_{1981-1994}$ occupe aussi les plus grandes valeurs principalement au centre par rapport à celles du $SCR_{1994-2005}$ et similaires ailleurs, ensuite $SCR_{1994-2005}$ présente à son tour des valeurs faibles comparés à celles du $SCR_{2005-2016}$ dans les zones du nord, du centre et du sud. Entre les deux scénarios projetés et $SCR_{2005-2016}$, nous observons, pour le périmètre du Loukkos, une grande similarité entre les trois scénarios avec quelques décroissances en passant du $SCR_{2005-2016}$ au scénario pessimiste, soit un taux de variation moyen de -16%. Par contre pour le périmètre du Gharb, bien que les valeurs sont similaires entre les deux scénarios projetés, nous notons tous de même que par rapport au $SCR_{2005-2016}$, les zones du nord, de l'ouest et sud-ouest (présentant beaucoup de valeurs nulles connotant le manque de l'eau souterraine) ont subi une grande croissance pour les scénarios projetés (soit un taux de variation moyen de 6% pour le scénario optimiste). Les valeurs nulles ont presque été toutes comblées par des valeurs comprises entre 0 et 16 m^3 .

4.5.3.2 Disponibilité globale d'eau souterraine

De point de vue disponibilité globale d'eau souterraine pour les deux périmètres comme l'illustre la figure 4.13 en termes d'évolution globale par heure de la disponibilité de l'eau souterraine, nous remarquons que l'intervalle mai-novembre correspond à la faible disponibilité de l'eau (moins de 30 m^3) alors que l'intervalle décembre-avril correspond à la plus grande disponibilité de l'eau (plus de 30 m^3) pour tous les scénarios en discussion. En outre, nous observons que l'eau souterraine est beaucoup plus disponible pour le périmètre du Gharb que celui du Loukkos durant presque tous les mois de tous les scénarios (avec de différence allant de $0,001 \text{ m}^3$ pour le scénario optimiste-septembre à $46,20 \text{ m}^3$ pour le scénario $SCR_{1994-2005}$ -janvier). Excepté les mois de septembre-octobre, janvier et avril du scénario optimiste pour lesquels le périmètre du Loukkos domine (avec un maximum de $8,77 \text{ m}^3$ de différence).

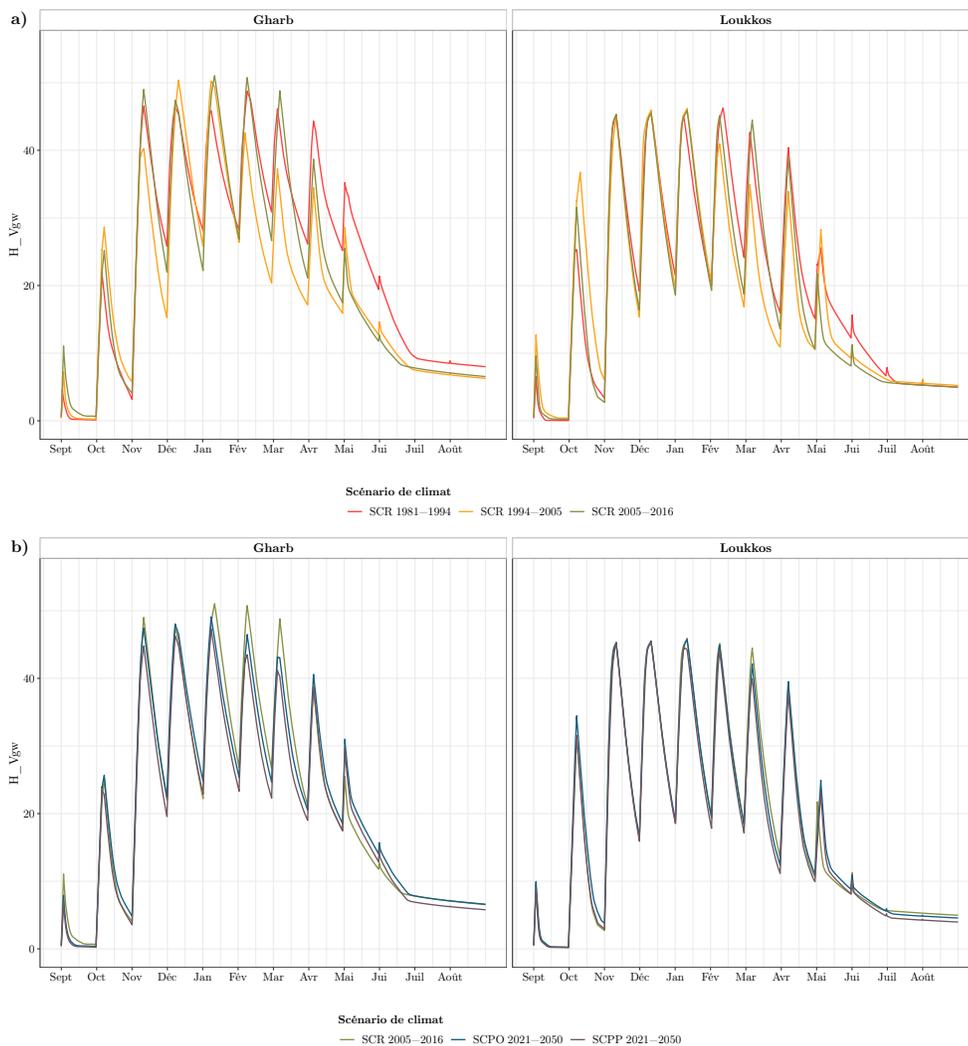


FIGURE 4.13 : Évolution globale par heure de la disponibilité de l'eau souterraine (H_Vgw en m^3) pour les différents scénarios de référence et les scénarios projetés 2021-2050 pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.

D'après la figure 4.13, nous trouvons aussi que :

- **Cas du Gharb**

Pour le mois de novembre et de février à août, pour les scénarios de référence, la disponibilité de l'eau souterraine a baissé de 0,03% (novembre) à 40,95% (novembre) en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$. Tandis que la disponibilité de l'eau a connu une augmentation en passant du $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$, avec des variations allant de 0,04% (janvier) à 56,17% (mars). Cette augmentation de la disponibilité est observée pour tous les mois excepté les mois d'octobre, de décembre et de juin.

De septembre à novembre et de janvier à avril, pour les deux scénarios projetés comparés au $SCR_{2005-2016}$, la disponibilité de l'eau souterraine diminue de 0,02% (novembre) à 62,47% (septembre) pour le scénario optimiste et de 5,03% (novembre) à 74,15% (septembre) pour le scénario pessimiste. Alors, pour les autres mois la disponibilité connaît une croissance pour le scénario optimiste par rapport au $SCR_{2005-2016}$ avec un taux de variation allant de 0,06% (juillet) à 29,47% (mai).

- **Cas du Loukkos**

De février à mi-mai et de juin-début juillet, la disponibilité de l'eau souterraine a décro de 0,02% (mi-mai) à 35,28% (avril) en passant du $SCR_{1981-1994}$ au $SCR_{1994-2005}$, puis elle a augmenté en passant $SCR_{1994-2005}$ au $SCR_{2005-2016}$ durant les mois de novembre, décembre et de février à avril avec des taux de variation allant de 0,05% (avril) à 61,59% (mars).

Pour les tous les mois, nous avons une similarité pour tous les scénarios projetés et $SCR_{2005-2016}$, excepté en mars, juillet et août où la disponibilité de l'eau souterraine a diminué pour les deux scénarios projetés comparés au $SCR_{2005-2016}$ avec des taux de variations allant de 0,22% (juillet) à 12,24% (mars) pour le scénario optimiste et de 6,51% (mars) à 20,49% (mars) pour le scénario pessimiste.

4.5.4 Variation moyenne annuelle des trois types de l'eau étudiés

La variation annuelle des quantités des E_w , S_w et G_w en Millions de m^3 est illustrée dans la figure 4.14 . Quel que soit le type de l'eau et le scénario, nous constatons que la quantité du Gharb est supérieure à celle du Loukkos.

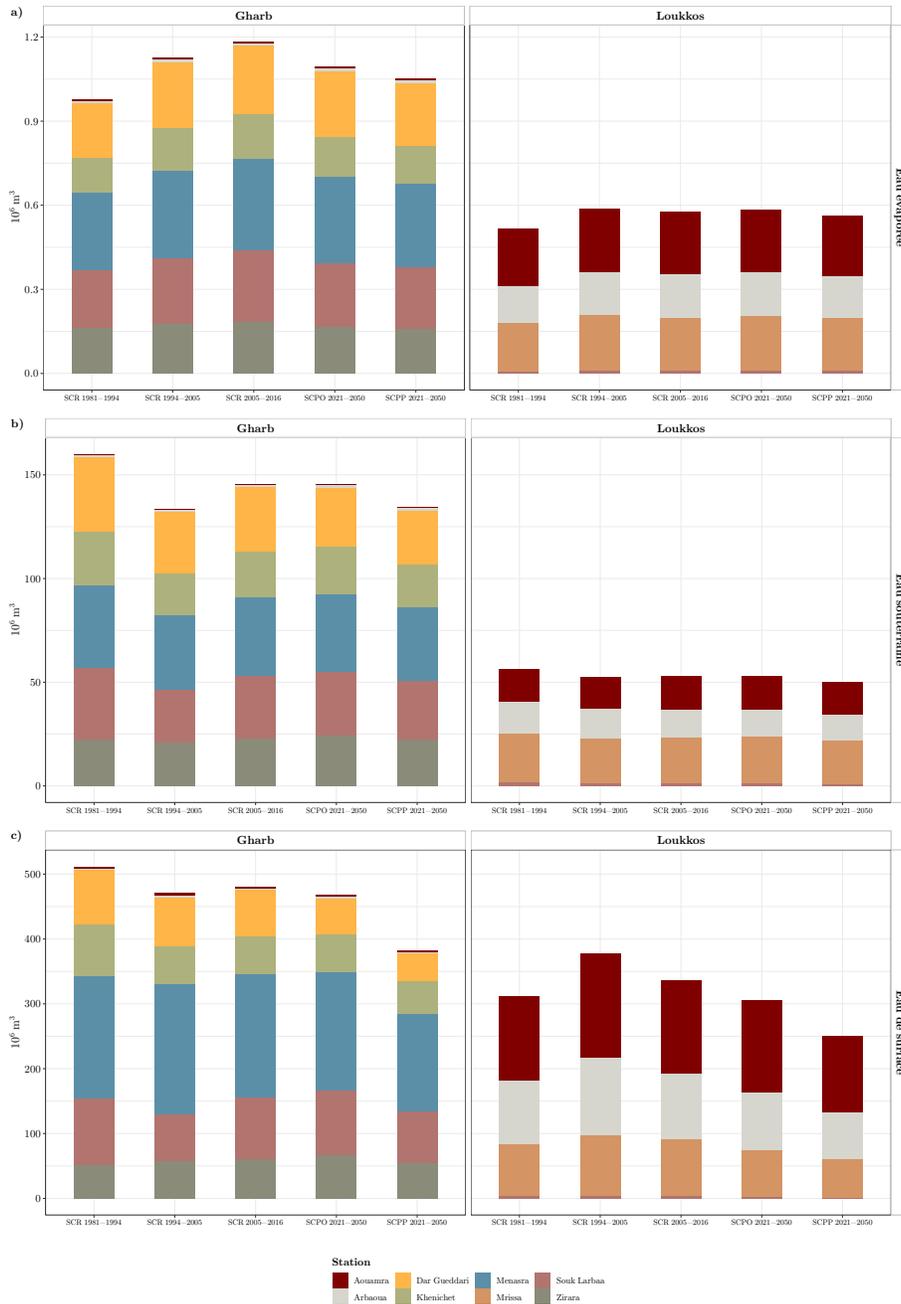


FIGURE 4.14 : Variation annuelle des trois types de l'eau en $10^6 m^3$ selon les différents scénarios climatiques pour les périmètres du Loukkos et du Gharb.

La figure 4.15 montre la variation annuelle de l'eau évaporée, des eaux souterraines et des eaux de surface entre SCR et SCP.

Les deux scénarios projetés 2021–2050 montrent une augmentation des eaux évaporées de +7,53% à +13,23% par rapport à $SCR_{1981-1994}$. Cela peut être dû à l'augmentation de température attendue. Ceci est cohérent avec les travaux de Pascual et al. (2015) et ses co-auteurs en Catalogne (Espagne), qui prévoyait pour 2076-2100 une augmentation de l'évapotranspiration potentielle de +12,7% à +23,8% pour les deux scénarios, en plus d'une réduction de l'évapotranspiration réelle de 12,8% à 20,5% en raison de la diminution attendue des précipitations.

Dans l'ensemble, tous les scénarios montrent une diminution des eaux de surface. La baisse observée pour le scénario $SCPO_{2021-2050}$ va de 0,75% à 8,63% pour Gharb et de 1,98% à 19,1% pour Loukkos. Pour le scénario $SCPP_{2021-2050}$, une baisse remarquable oscille entre 18,86% et 25,31% pour Gharb et entre 19,61% et 33,65% pour Loukkos. Nous constatons également que le déclin de Loukkos est plus prononcé que celui de Gharb. Ce résultat est cohérent avec une étude antérieure (Marchane et al., 2017) dans laquelle, pour les scénarios climatiques 2049-2065, les projections hydrologiques pour le bassin versant de la Rheraya montrent une réduction significative du ruissellement en surface (-19% à -63%). En outre, une étude menée à Makhazin (nord du Maroc) a prédit une diminution des ressources en eaux de surface allant de 9% à 54% en hiver (de novembre à mai) (Tramblay et al., 2014). Milano et al. (2013) ont déduit une diminution comprise entre 30% et 50% d'ici 2050 pour l'échelle méditerranéenne.

Pour les eaux souterraines, certains scénarios indiquent une augmentation des quantités des eaux souterraines pour les deux périmètres, y compris le scénario $SCR_{1995-2005}$ et le scénario $SCPO_{2021-2050}$ (+1,26% et +8,83%). D'autres scénarios, cependant, montrent une baisse avec des valeurs allant de 15,96% à 0,11% pour Gharb et de 10,94% à 5,69% pour Loukkos. Ce résultat concorde avec les travaux de El Asri et al. (2019) qui ont trouvés pour plaine de Ghis-Nekkor une diminution d'environ de 40% de la recharge de la nappe pour la période 2020-2080. Nous notons que les variations observées sont beaucoup plus importantes pour Gharb que pour celles de Loukkos.

En règle générale, les baisses observées pour un scénario pessimiste sont supérieures à celles observées pour un scénario optimiste. Ces résultats sont la conséquence de la diminution des précipitations et de l'augmentation de la température.

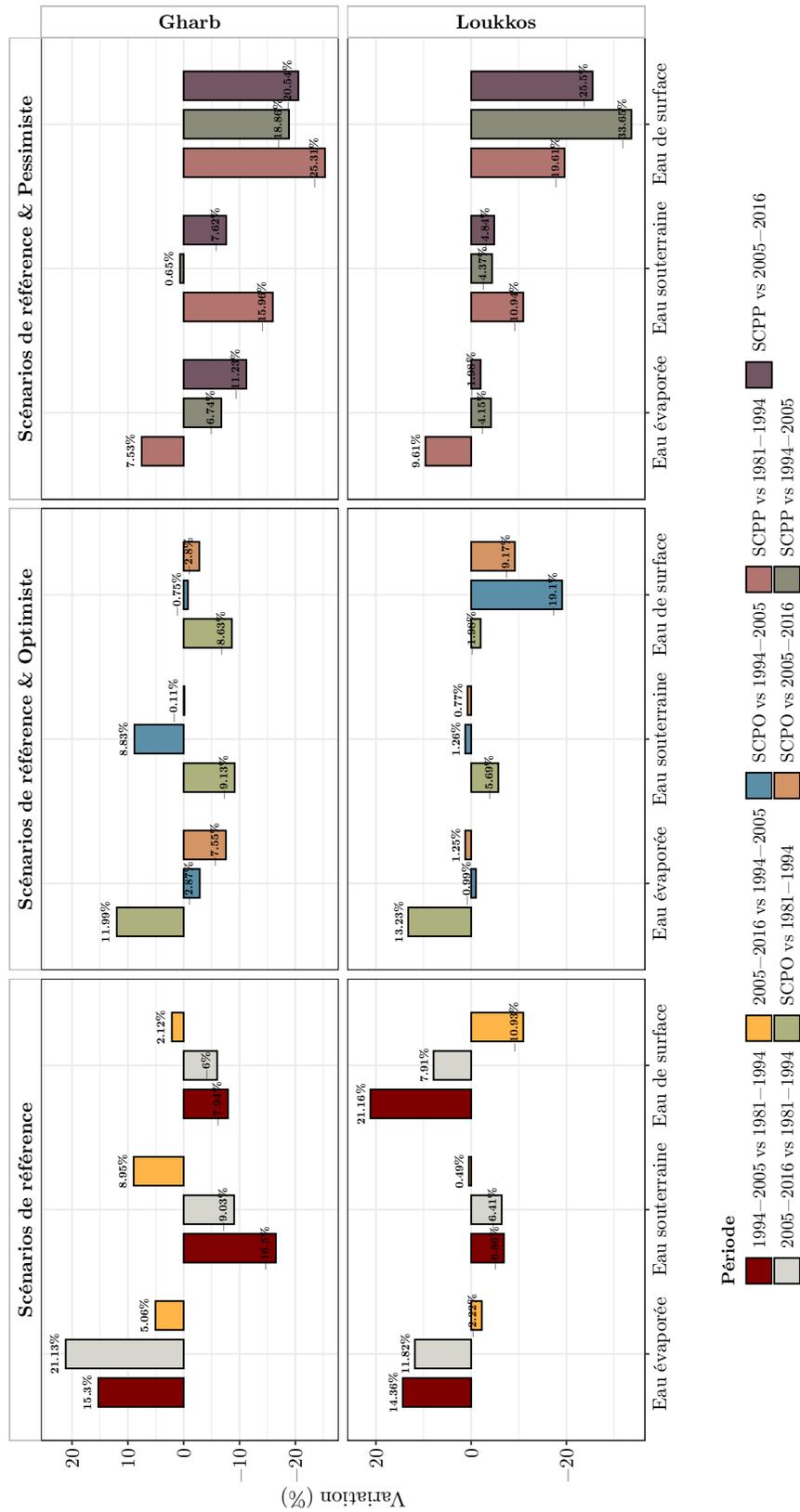


FIGURE 4.15 : Variation annuelle des eaux évaporées, des eaux souterraines et des eaux de surface entre les scénarios projetés (SCP) et les scénarios de référence (SCR).

En conclusion, dans ce chapitre, nous avons décrit le modèle 2CAFDYM, un automate cellulaire qui permet le suivi de la dynamique d'écoulement du cycle de l'eau ainsi que l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau lors du couplage sous différents scénarios climatiques. Pour y parvenir et rendre les simulations possibles, nous avons amélioré plusieurs fonctionnalités du logiciel original 2CAFDYM à travers le langage de programmation Java orienté objets. Nous avons ensuite considéré une application sur deux périmètres irrigués au Nord du Maroc : Loukkos et Gharb (8708 km²) à l'horizon 2021-2050. À l'échelle annuelle, les résultats de simulations ont montré une diminution des eaux de surface (-0,75% à -33,65%, selon les scénarios et les périmètres). Pour les eaux souterraines, la baisse pourrait atteindre -15,96% pour Gharb et -10,94% pour Loukkos. En outre, un des périmètres est plus affecté que l'autre en fonction des scénarios et des paramètres considérés.

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons considéré le problème de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de deux périmètres irrigués du nord du Maroc : Loukkos et Gharb, et cela durant les horizons 2021-2050. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur la modélisation en utilisant l'approche par les automates cellulaires et spécifiquement le modèle 2CAFDYM. Pour produire les données d'entrée de simulations pour les deux périmètres nous nous sommes appuyés sur des méthodes et des outils de la télédétection et de la statistique. En outre, nous avons amélioré le logiciel en gardant le noyau original du modèle 2CAFDYM compte tenu des contraintes rencontrées. Ainsi que nous avons automatisé les processus de traitements des images satellitaires et des données climatiques via deux applications Web2TISat et WebTDClm.

Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- **Étude des paramètres physiques du terrain**

Nous avons examiné les superficies des paramètres physiques du terrain (Altitude, type de sol et occupation du sol). Les résultats ont montré que chaque périmètre diffère l'un de l'autre en termes du poids relatif des paramètres physiques. Ensuite nous avons tenté d'examiner la dynamique à long terme de la variation de l'occupation du sol. Il en ressort que l'utilisation de la terre a considérablement changé dans la région au cours des trente-trois dernières années (1981-2016). Pour les deux périmètres, les changements les plus importants ont été la destruction de la végétation naturelle, une augmentation de la superficie en terres cultivées (notamment entre 1984-1985 et 2001-2002), une légère expansion des forêts et un déclin des terres nues. Quant à l'eau, elle a connu une légère augmentation pour le périmètre du Gharb tandis qu'une légère réduction a été observée entre 2001-2002 et 2016-2017 pour le périmètre du Loukkos.

- **Analyse statistique des paramètres climatiques**

Les résultats de traitement des données climatiques sur la période choisie ont montré une tendance positive des températures qui concorde bien avec les résultats des études antérieures. Tandis que la série des précipitations annuelles et saisonnières n'a pas été marquée par une tendance significative. Toutefois, seule la station Mrissa qui est caractérisée par une tendance significative décroissante pendant la saison hivernale.

Les résultats des tendances annuelle et saisonnière projetées à l'horizon 2021–2050 des données des huit stations indiquent globalement, qu'au niveau des deux périmètres Loukkos et Gharb, la période hivernale serait la plus marquée par une diminution importante des précipitations par rapport à la période de référence. Toutefois, les saisons

automnale et printanière seraient marquées par une augmentation des précipitations. On pourrait donc assister à un léger décalage de la saison la plus pluvieuse de l'année ; du fait que les précipitations seraient relativement plus abondantes en automne et au printemps et moins abondantes en hiver. Toutefois ces résultats restent à confirmer par des études sur d'autres régions du Maroc et en s'appuyant sur des périodes de références avec des séries chronologiques plus longues.

- **Impact du changement climatique sur la ressource en eau**

Les résultats de simulations discutés montrent que : (i) l'un des deux périmètres est plus touché que l'autre en fonction des scénarios et des paramètres critiques considérés ; en effet, pour l'eau de surface et l'eau évaporée le Loukkos présente des volumes (données en $\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{h})$) plus grands que ceux du Gharb, par contre pour l'eau souterrain le Gharb contient les plus grandes valeurs par rapport au Loukkos de novembre à août durant les deux scénarios projetés considérés et l'inverse se produit pour les mois de septembre et d'octobre ; (ii) l'ordre de dominance entre les eaux évaporée, de surface et souterraine dépendent des scénarios et des mois, en particulier pour les mois de décembre, janvier et de mars à août l'eau de surface est plus grande en volume ($\text{m}^3/(\text{m}^2 \text{h})$) que l'eau évaporée qui elle à son tour est plus grande que l'eau souterraine durant tous les cinq scénarios et cela pour les deux périmètres ; et (iii) la répartition de la disponibilité en superficie des ressources en eau dépend des scénarios, des saisons ainsi que la répartition superficielle des paramètres physiques du terrain dans les deux périmètres.

Sur la base des deux scénarios projetés, la période 2021-2050 montre des températures plus élevées (+1,7 °C en automne et +1,9 °C en été) et une diminution remarquable des précipitations atteignant -15% en hiver et -10% en été. À l'échelle annuelle, les résultats de la simulation montrent une diminution des eaux de surface (-0,75% à -33,65%, selon le scénario et le périmètre). Pour les eaux souterraines, la baisse pourrait atteindre 15,96% pour Gharb et 10,94% pour Loukkos.

Perspectives de recherches futures

Nous avons considéré certaines suppositions relatives aux données d'entrée ainsi qu'à l'évolution de la simulation. Afin de consolider notre travail et discuter des problèmes ouverts, il serait intéressant de tenir compte de certaines suggestions et/ou améliorations, à savoir :

- Considérer beaucoup plus de classes pour l'occupation du sol lors de la classification des images satellitaires couvrant le domaine d'étude et évaluer leurs effets sur les résultats discutés,
- Considérer une distribution des données climatiques plus fines (pas de temps journalier voire horaire) pour une période donnée de point de vue intensité-début de pluie-durée de pluie.
- Effectuer premièrement une étude comparative entre le présent modèle considéré (2CAFDYM) avec d'autres modèles d'évaluation des paramètres critiques pris en compte afin de proposer une validation de 2CAFDYM ; puis deuxièmement effectuer une étude comparative entre les présents résultats de simulations avec ceux issus d'autres modèles climatiques que celui utilisé par (Driouech, 2010), et cela afin de valider nos résultats de simulations,

- Effectuer premièrement une prédiction future des changements d'occupation du sol via des modèles appropriés comme ([Liping et al., 2018](#)) et également des changements futurs du relief; puis deuxièmement les combiner avec les changements futurs du climat afin de rendre mieux réels l'étude des impacts du changement climatique futur sur les ressources en eau particulièrement l'eau d'irrigation,

Tous ces problèmes évoqués sont en cours d'investigation.

Annexes

Principes des prétraitements et traitements des images satellitaires

A.1 Acquisition des images satellitaires

A.1.1 Images optiques

Le programme Landsat a débuté avec le lancement du satellite de technologie Earth Resources le 23 juillet 1972 et est opérationnel depuis plus de 40 ans. Huit satellites ont été développés et lancés dans le cadre du programme ([Chastain et al., 2019](#)). Deux satellites sont actuellement en service, Landsat 7 et Landsat 8.

Landsat 5 a été lancé le 1er mars 1984 et a observé la Terre jusqu'au 15 janvier 2013, date à laquelle les instruments Landsat 5 ont été mis hors tension et le satellite placé dans une orbite inférieure. Le Landsat 5 TM a acquis toutes les images disponibles sur le Conterminous United States (CONUS), même pendant sa période de commercialisation de 1985 à 2001.

Landsat 7, lancé en 1999, est équipé de l'instrument Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) qui capture les images dans trois bandes lumineuses visibles, une bande proche infrarouge (NIR), deux bandes infrarouges à ondes courtes (SWIR), une bande thermique et une bande panchromatique large bande.

Landsat 8, lancé en 2013, est doté de l'instrument Operational Land Image (OLI) qui capture des images dans des bandes comparables à ETM +, mais ajoute également une bande thermique supplémentaire ainsi que des bandes d'aérosols et de cirrus côtiers. Les deux satellites ont un temps de visite (sur les sites d'étude) d'environ deux semaines. Les jeux de données de la collection Landsat sont disponibles auprès du Système d'Observation des Ressources Terrestres (EROS), prétraité dans la réflectance du sol (niveau 2A), ainsi que des indices de végétation dérivés des produits de réflectance. Les produits sont dans le système de coordonnées Universal Transverse Mercator (UTM).

Sentinel-2 consiste en une constellation de deux satellites et instruments à balai multi-spectres identiques (MSI) introduits par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) le 24 juin 2015 (Sentinel-2A) et le 7 mars 2017 (Sentinel-2B). L'instrument multispectral Sentinel-2 (MSI) est considéré comme la mission de suivi des instruments Landsat, destiné à assurer la continuité des produits de télédétection. Sentinel-2 propose des images

satellites avec une résolution de 10 à 60 mètres.

Généralement, les données collectées par Landsat 7, Landsat 8 et Sentinel 2 semblent visuellement similaires. Cependant, il existe de légères différences dans les spécifications de la fonction de réponse spectrale, la résolution spatiale et le nombre de bandes comme résumées dans le tableau A.1.

Tableau A.1 : Comparaison des types de bandes et des propriétés d'acquisition entre Landsat 7 et 8 et Sentinel 2. (Chastain et al., 2019)

Caractéristiques	Landsat 7	Landsat 8	Sentinel 2
Sensor	ETM+	OLI	MSI
Nombre de bandes (pan)	1	1	0
Nombre de bandes (multispec)	6	7	13
Nombre de bandes (therm)	1	2	0
Résolution radiométrique (bits)	8	12	12
Résolution spatiale (m)	15, 30, 60 (pa., ms. et th.)	15, 30, 100 (pa., ms. et th.)	10, 20, 60 (toutes ms.)
Largeur de bande (km)	183	183	290
Altitude en orbite (km)	705	705	786
Temps de traversée équatoriale	10:00 - 10:15	10:00 - 10:15	10:30
Fréquence de visite (jours)	16	16	10

pa. : panchromatique, ms. : multispectrale, th. : thermique

A.1.2 Images radar

Sentinel-1 est un satellite radar en bande C (longueur d'onde de 5,7 cm) constitué d'une constellation de deux satellites, *Sentinel-1A* et *Sentinel-1B*, qui fait également partie du programme européen Copernicus créé par l'ESA. Leurs principales applications sont les suivantes : surveillance des zones de glace de mer et de l'environnement arctique, surveillance du milieu marin, des risques de mouvement de surface, cartographie des surfaces : forêt, eau et sol, agriculture, cartographie à l'appui de l'aide humanitaire en situation de crise. Les données du radar constituent une solution fiable pour faire face aux limitations des images optiques, car elles ne sont pas sensibles aux conditions atmosphériques et peuvent être acquises de jour comme de nuit (Denize et al., 2018).

Radiomètre Spatial Avancé d'Émission et de Réflexion Thermiques (ASTER) a été lancé à bord du satellite Terra de la NASA en décembre 1999. Le GDEM ASTER, mis à disposition en juin 2009, a été généré à l'aide d'une image stéréoscopique collectée par l'instrument ASTER intégré à Terra. La couverture d'ASTER GDEM s'étend de 83° de latitude nord à 83° de sud, couvrant 99% de la masse terrestre du globe. Il possède une capacité stéréoscopique parallèle utilisant sa bande spectrale proche infrarouge et son télescope à visée nadir et à visée arrière pour acquérir des données d'image stéréo avec un rapport base/hauteur de 0,6. Les précisions estimées pour l'ASTER GDEM sont de 20 m pour les valeurs d'altitude et de 30 m pour le positionnement horizontal.

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (30 m) a été acquis du Groupe consultatif sur la recherche agricole internationale et Consortium pour l'information spatiale. Le radar de la navette Topography Mission (SRTM) DEM 1 seconde d'arc (environ 30 m) est le fruit d'un effort de collaboration de la part de l'Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace (NASA), l'Agence Nationale d'Imagerie et de

Cartographie (NIMA), le Centre Aérospatial Allemand (DLR) et l'Agence Spatiale Italienne (ASI) (Foni and Seal, 2004). La mission a été lancée le 11 février 2000 à bord de la navette spatiale Endeavour. Un DEM de 3 secondes d'arc (SRTM-3) a été produit couvrant près de 80% du globe, à l'exclusion des régions polaires. Initialement, un produit de données d'une seconde d'arc était également produit, mais n'était pas disponible pour tous les pays. Cependant depuis Janvier 2015 la NASA fournit les données en 1 seconde d'arc librement pour de nombreux pays (Sinha et al., 2015).

Le tableau A.2 compare les caractéristiques des données ASTER et SRTM.

Tableau A.2 : Comparaisons des caractéristiques des données entre ASTER et SRTM.

Caractéristiques	ASTER	SRTM
Technique d'acquisition	Satellite stereo images	RADAR
Taille de la tuile	3601x3601 cells(1°x1°)	1 arc second (1°x1°)
Format	GeoTIFF	GeoTIFF
Datum vertical	EGM96	EGM96
Résolution spatiale	1 arc-second	1 arc-second
Système de projection	Géographique	Géographique
Aucune valeur de données	-9999	-32768
Zone de couverture	Nord 83° - Sud 83°	Nord 60°- Sud 60°

A.2 Principes des prétraitements

Le prétraitement des images satellitaires joue un des rôles-clés dans l'analyse des résultats. En conséquence, ces images nécessitent un certain nombre de corrections, qui sont réalisées soit directement par les distributeurs, soit par les utilisateurs. Ces corrections sont de trois types : géométriques, atmosphériques et radiométriques.

A.2.1 Correction géométrique

La correction géométrique consiste à corriger les déformations dues à des erreurs de positionnement du satellite sur son orbite, au fait que la terre tourne sur son axe durant l'enregistrement de l'image, aux effets du relief terrestre, etc. La correction géométrique de la télédétection est normalement mise en œuvre en deux étapes. Tout d'abord, on considère les distorsions qui sont systématiques. Ensuite, les distorsions qui sont aléatoires, ou imprévisibles, sont corrigées. Les erreurs systématiques sont de nature prévisible et peuvent être corrigées en utilisant les données de l'orbite de la plate-forme et la connaissance de la distorsion interne du capteur. Les types courants de distorsions systématiques sont : l'obliquité du balayage, la vitesse de balayage miroir, les distorsions panoramiques, la vitesse de la plate-forme, la rotation de la terre, la perspective (Gill et al., 2010; Jensen, 1996). La plupart des données de télédétection disponibles dans le commerce (par exemple, Landsat) sont déjà débarrassées d'une grande partie des erreurs systématiques. Les erreurs non systématiques sont corrigées sur la base de l'enregistrement géométrique des images de télédétection dans un système de coordonnées au sol connu (par exemple, une carte topographique). Le processus d'enregistrement géométrique implique l'identification des coordonnées image des points de contrôle au sol, des points clairement discernables (par exemple, les passages à niveau),

dans l'image déformée et une carte disponible. Il existe différentes techniques de correction géométrique en fonction d'un algorithme, d'une source de distorsion et de la nature des données disponibles. Pour plus d'informations sur ces techniques, voir (Gill et al., 2010; Pehani et al., 2016; Toutin, 2010).

A.2.2 Correction radiométrique

La correction radiométrique consiste à rectifier les erreurs instrumentales et à calibrer les images, c'est-à-dire transformer les nombres numériques (DN) (de 0 à 255) quantifiés par satellite, en réflectance par satellite. Ici, toutes les corrections sont faites directement par l'USGS (Usgs, 2018). Les images ont d'abord été converties en radiance par satellite à l'aide de l'équation suivante (Schroeder et al., 2006) :

$$L_{sat} = \frac{DN - B}{G} \quad (\text{A.1})$$

où L_{sat} est la radiance spécifique de la bande de fréquence du satellite ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), DN est le nombre numérique calibré quantifié par satellite, B est le biais spécifique à la bande dans DN, et G est le gain spécifique à la bande ($m^2 sr \mu m W^{-1}$).

Ensuite, les images ont été converties en radiance satellitaire (Eq. A.2)

$$L_{sat} = \frac{LMax_{sat} - LMin_{sat}}{DN_{max} - DN_{min}} * (DN - DN_{min}) + LMin_{sat} \quad (\text{A.2})$$

où $LMax_{sat}$ et $LMin_{sat}$ sont la radiance spectrale spécifique de la bande mise à l'échelle de respectivement de DN_{max} et DN_{min} ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), DN_{max} est le nombre numérique calibré quantifié maximum (255), et DN_{min} est le nombre numérique calibré quantifié minimum. L'équation A.2 tient compte de l'état de gain (c'est-à-dire le réglage haut/bas).

Après la conversion à la radiance par satellite, chaque image a été convertie à la réflectance par satellite (en supposant une surface lambertienne uniforme dans des conditions sans nuages) en utilisant l'équation A.3 :

$$\rho_{ASR} = \frac{\pi * L_{sat}}{E_0 * \cos\theta} \quad (\text{A.3})$$

Où ρ_{ASR} est la réflectance du satellite, E_0 la constante solaire exoatmosphérique ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$) (corrigée pour la distance solaire), et θ l'angle du zénith solaire. Par définition, la réflectance par satellite n'élimine pas les effets atmosphériques, c'est pourquoi on l'appelle ici le cas partiellement corrigé (Schroeder et al., 2006).

A.2.3 Correction atmosphérique

La correction atmosphérique est l'une des étapes les plus importantes du prétraitement car elle peut affecter le résultat final. Son objectif principal est de supprimer les effets atmosphériques afin de récupérer les paramètres physiques de la surface de la Terre, notamment la réflectance de la surface, la visibilité du sol et la température (López-Serrano et al., 2016). Cette correction peut être soit : a) absolue, lorsqu'un nombre numérique (DN) est lié à la réflectance de la surface. b) relative, lorsque les mêmes valeurs de nombre numériques dans les images corrigées correspondent à la même réflectance, quelle que soit la valeur de réflectance réelle sur le terrain (Song et al., 2001). Nombreuses méthodes de correction atmosphérique ont été développées et testées au

cours des dernières décennies (Cui et al., 2014; Lantzanakis et al., 2016; López-Serrano et al., 2016; Song et al., 2001). Ces méthodes sont réparties en deux principales catégories : les méthodes basées sur les images (telles que DOS (Chavez, 1988), COST (Chavez, 1996)) et les méthodes basées sur les modèles (telles que 6S (Vermote et al., 1997)). Les méthodes basées sur les images reposent sur les métadonnées des images et l'analyse statistique de la réflectance de la couche supérieure de l'atmosphère (TOA). D'autre part, les corrections atmosphériques basées sur des modèles s'appuient sur la modélisation radiative et nécessitent des données sur les caractéristiques optiques atmosphériques du temps d'acquisition des images (Lantzanakis et al., 2016; Martins et al., 2017).

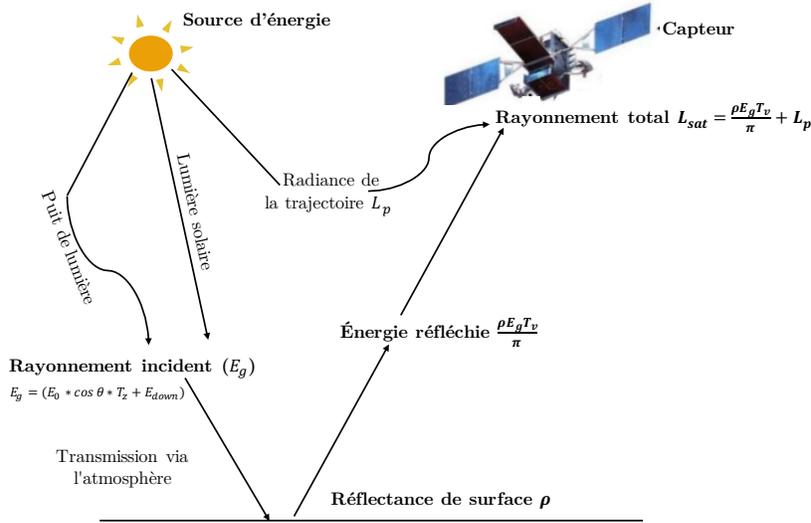


FIGURE A.1 : Effets atmosphériques influençant la mesure de l'énergie solaire réfléchie.

Pour une correction absolue complète, la réflectance des satellites a été convertie en réflectance de surface (en supposant une surface lambertienne uniforme dans des conditions sans nuages) en utilisant l'équation A.4, (Goslee, 2011; Schroeder et al., 2006; Song et al., 2001).

$$\rho = \frac{\pi(L_{sat} - L_p)}{T_v(E_0 * \cos\theta * T_z + E_{down})} \quad (\text{A.4})$$

où ρ est l'estimation de la réflectance de surface, L_p est la radiances de la trajectoire ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) (figure A.1), T_v est la transmission atmosphérique de la cible vers le capteur, T_z , est la transmission atmosphérique dans la direction d'éclairage, et E_{down} est le rayonnement diffus vers le bas ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$). Les méthodes de correction atmosphérique absolue utilisent des mesures ou des modèles de simulation atmosphérique pour déterminer les paramètres T_z , T_v , E_{down} et L_p (Chavez, 1988; Goslee, 2011). Ici, la correction est faite par une méthode basée sur l'image nommée méthode de soustraction des objets sombres (DOS).

Principe de la méthode de soustraction des objets sombres

La méthode DOS est une méthode simple qui nécessite relativement peu d'entrées et peut-être facilement appliquée à toutes les données d'image. Elle suppose que sur une

image satellite, il existe des éléments qui ont une réflectance proche de 0% (c'est-à-dire l'eau, la forêt dense, l'ombre). De sorte que le signal enregistré par le capteur à partir de ces éléments est uniquement le résultat de la diffusion atmosphérique (radiance du trajet), qui doit être supprimé (Goslee, 2011; Lantzanakis et al., 2016; Song et al., 2001). La radiance de la trajectoire, L_p , a été estimée à l'aide de l'équation (Eq. A.5, (Schroeder et al., 2006)).

$$L_p = G * DN_{min} + B - 0,01 \frac{T_v}{\pi} [E_0 * \cos\theta * T_z + E_{down}] \quad (\text{A.5})$$

Où G est le gain du capteur, B est le biais utilisé pour convertir les signaux du capteur (DN) en radiance du satellite, DN_{min} est la valeur DN la plus sombre dans chaque bande spectrale d'au moins mille pixels. La méthode DOS utilisée ici est appelée DOS1 dans Song et al. (2001), qui suppose qu'il n'y a pas de perte de transmission atmosphérique (T_v et T_z sont unitaires), et pas de rayonnement diffus vers le bas à la surface (E_{down} est égal à zéro) en Eq. A.5 (Chavez, 1988)

A.3 Variation des indices

Les tableaux A.3, A.4 et A.5 illustrent les paramètres statistiques (le minimum, le maximum, la moyenne et l'écart-type) de chaque indice (notamment AVI, NDVI, OSAVI, BSI et NDWI) pour les deux périmètres et leurs stations ainsi que pour chaque année. Les répartitions spatiales de la moyenne annuelle de chaque indice sont montrées dans les figures A.2 (pour AVI et NDVI), A.3 (pour OSAVI et BSI) et A.4 (pour NDWI).

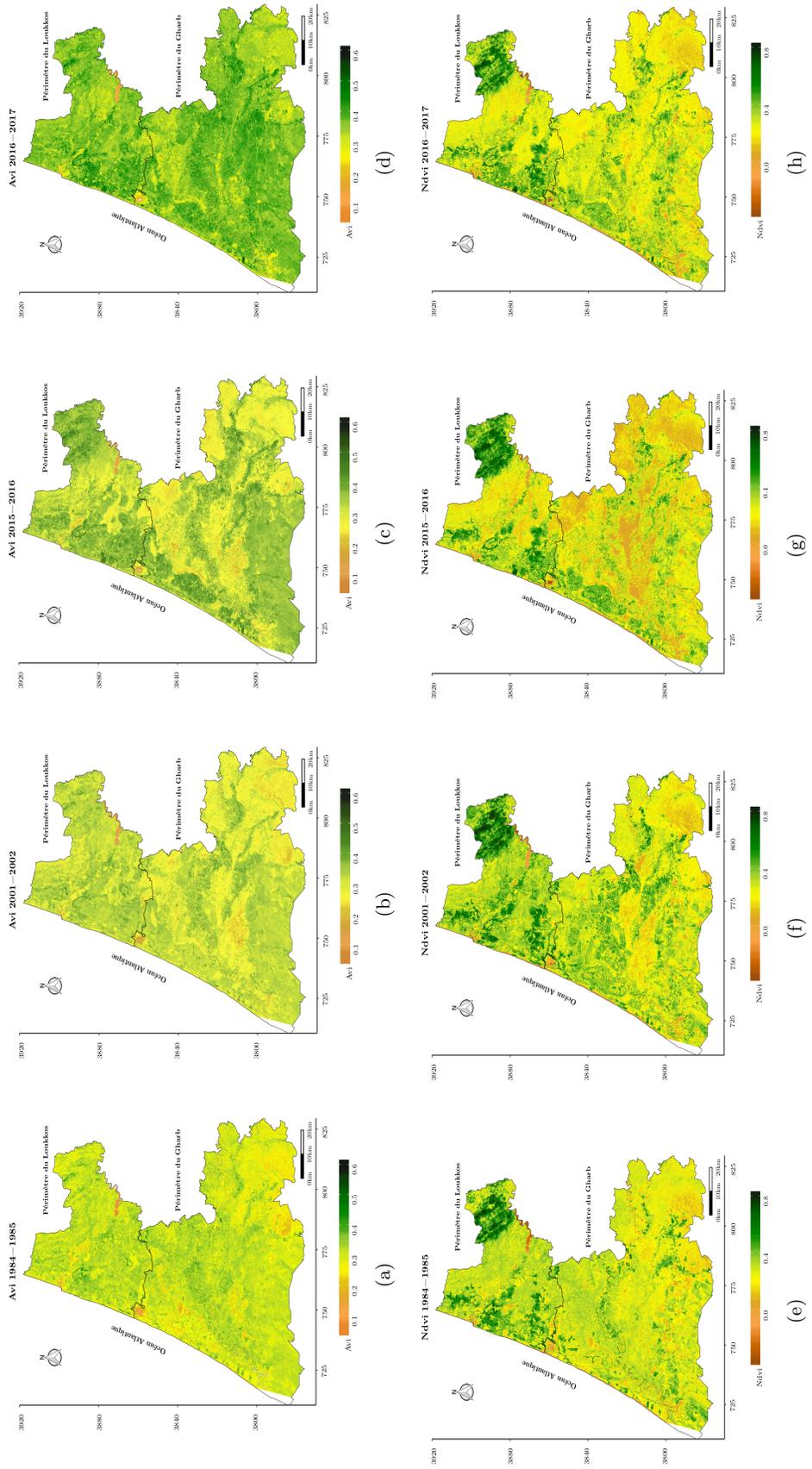


FIGURE A.2 : Répartition spatiale de la moyenne annuelle des indices AVI et NDVI.

Tableau A.3 : Statistique descriptive des indices AVI et NDVI entre les années étudiées par périmètre et station.

AVI	1984-1985			2001-2002			2015-2016			2016-2017						
	Min	Max	Moy	Sd	Min	Max	Moy	Sd	Min	Max	Moy	Sd				
Gharb	0,002	0,50	0,29	0,04	0,02	0,54	0,29	0,04	0,01	0,60	0,31	0,05	0,00	0,63	0,35	0,04
Loukkos	0,002	0,55	0,30	0,04	0,01	0,52	0,31	0,04	0,02	0,61	0,33	0,05	0,01	0,61	0,35	0,05
Menasra	0,002	0,50	0,29	0,04	0,08	0,54	0,30	0,04	0,02	0,59	0,33	0,05	0,00	0,61	0,35	0,05
Souk Larbaa	0,020	0,48	0,30	0,04	0,08	0,50	0,30	0,04	0,07	0,60	0,30	0,06	0,03	0,63	0,34	0,04
Dar Gueddari	0,020	0,48	0,30	0,03	0,09	0,53	0,31	0,04	0,07	0,56	0,32	0,05	0,02	0,59	0,36	0,03
Khenichet	0,010	0,49	0,29	0,04	0,02	0,52	0,28	0,04	0,01	0,57	0,29	0,05	0,02	0,61	0,35	0,04
Zirara	0,150	0,50	0,27	0,04	0,15	0,49	0,27	0,04	0,10	0,55	0,30	0,05	0,08	0,58	0,33	0,04
Aouamra	0,005	0,55	0,30	0,04	0,01	0,50	0,31	0,04	0,01	0,61	0,34	0,06	0,01	0,61	0,36	0,05
Mrisa	0,040	0,47	0,30	0,03	0,09	0,52	0,31	0,04	0,11	0,55	0,33	0,05	0,06	0,58	0,35	0,04
Arbaoua	0,002	0,52	0,30	0,05	0,06	0,48	0,30	0,05	0,04	0,57	0,32	0,06	0,05	0,57	0,34	0,06

NDVI	1984-1985			2001-2002			2015-2016			2016-2017						
	Min	Max	Moy	Sd	Min	Max	Moy	Sd	Min	Max	Moy	Sd				
Gharb	-0,34	0,75	0,34	0,08	-0,25	0,81	0,35	0,09	-0,22	0,85	0,36	0,11	-0,40	0,87	0,38	0,10
Loukkos	-0,39	0,81	0,40	0,12	-0,28	0,83	0,43	0,12	-0,21	0,89	0,44	0,14	-0,43	0,88	0,45	0,13
Menasra	-0,34	0,75	0,34	0,09	-0,16	0,81	0,36	0,10	-0,15	0,84	0,38	0,12	-0,36	0,87	0,40	0,12
Souk Larbaa	-0,16	0,75	0,36	0,08	-0,13	0,77	0,38	0,08	-0,15	0,85	0,37	0,11	-0,40	0,86	0,41	0,09
Dar Gueddari	-0,13	0,72	0,34	0,07	-0,12	0,76	0,35	0,09	-0,07	0,78	0,36	0,11	-0,26	0,82	0,39	0,09
Khenichet	-0,26	0,75	0,32	0,07	-0,25	0,77	0,33	0,09	-0,20	0,80	0,32	0,10	-0,39	0,82	0,36	0,09
Zirara	0,09	0,72	0,31	0,09	0,11	0,73	0,31	0,09	0,01	0,78	0,34	0,10	-0,21	0,80	0,35	0,09
Aouamra	-0,34	0,78	0,39	0,11	-0,28	0,80	0,41	0,12	-0,22	0,88	0,44	0,13	-0,38	0,87	0,45	0,14
Mrisa	-0,24	0,80	0,43	0,12	-0,19	0,83	0,46	0,12	0,07	0,89	0,47	0,16	-0,15	0,88	0,46	0,14
Arbaoua	-0,39	0,81	0,38	0,12	-0,22	0,81	0,41	0,12	-0,17	0,85	0,40	0,13	-0,44	0,85	0,42	0,13

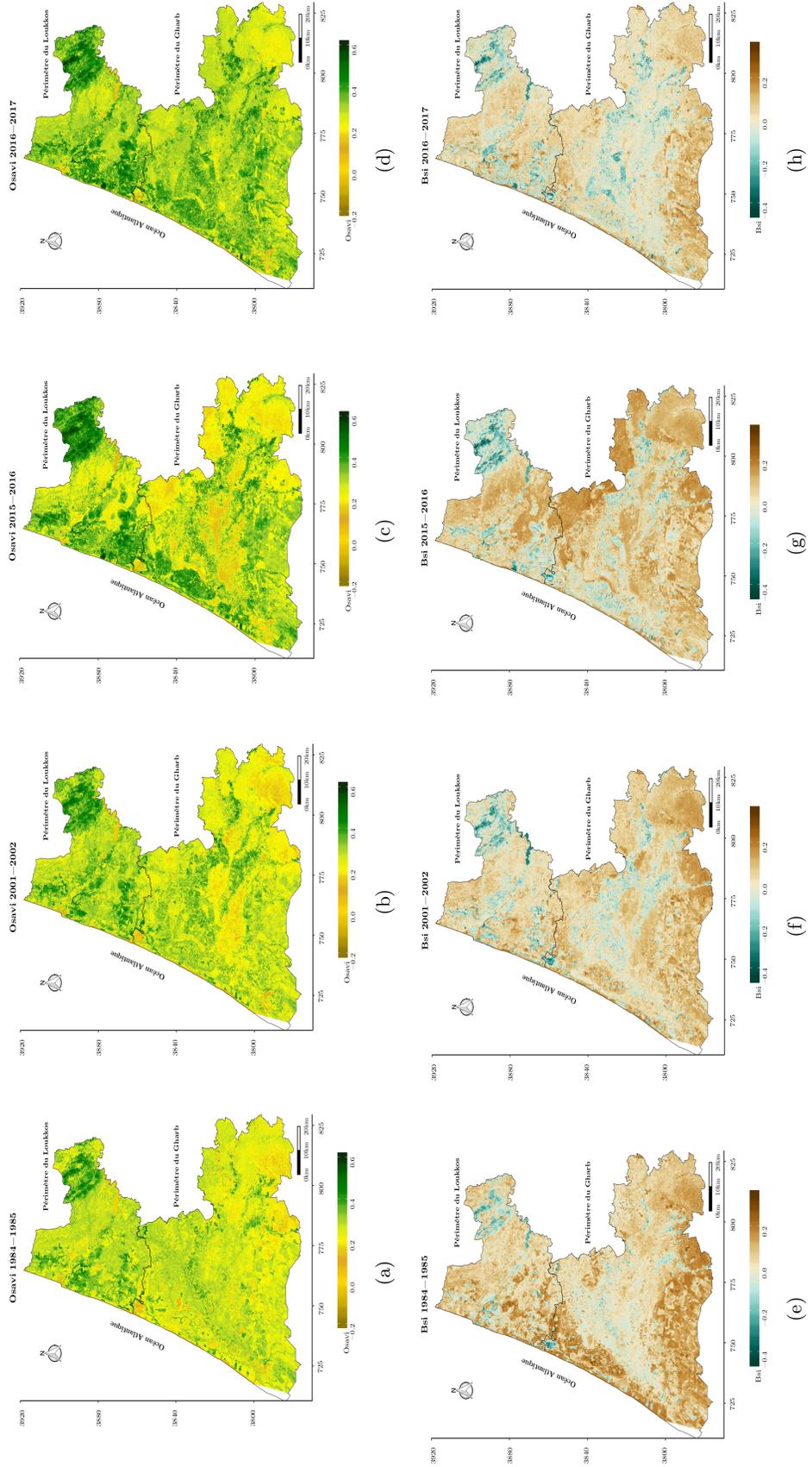


FIGURE A.3 : Répartition spatiale de la moyenne annuelle des indices OSAVI et BSI.

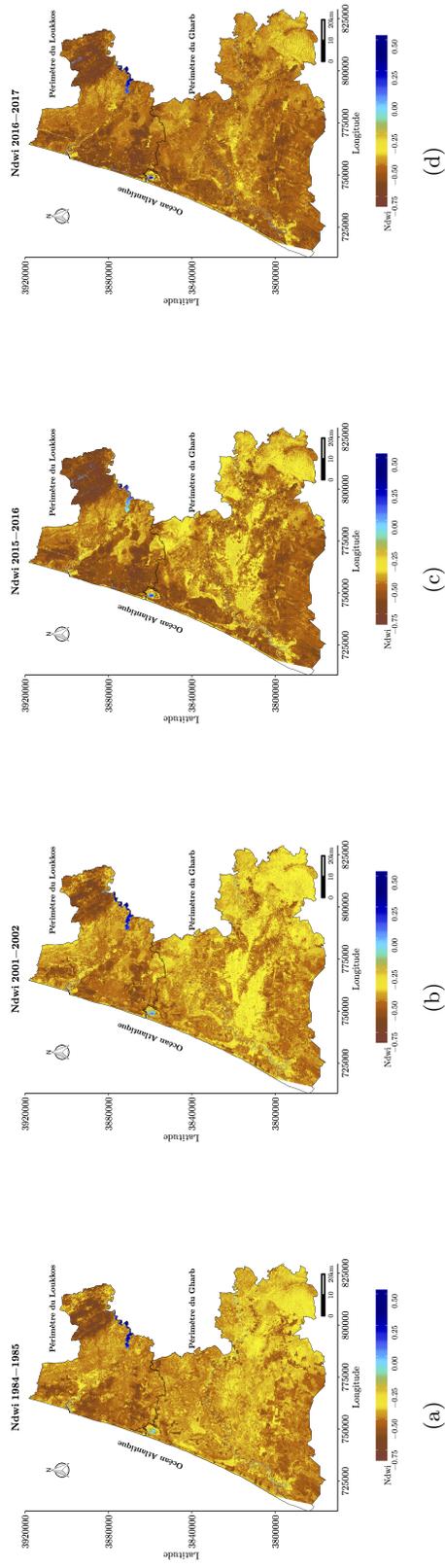


FIGURE A.4 : Répartition spatiale de la moyenne annuelle d'indice NDWI.

Tableau A.5 : Statistique descriptive de l'indice NDWI entre les années étudiées par périmètre et station.

NDWI	1984-1985			2001-2002			2015-2016			2016-2017				
	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Sd	
Gharb	-0,78	0,39	0,45	0,07	0,07	0,08	-0,77	0,34	0,44	0,08	-0,85	0,21	-0,49	0,10
Loukkos	-0,82	0,47	0,50	0,11	0,11	0,11	-0,80	0,42	0,49	0,11	-0,87	0,29	0,55	0,12
Menasra	-0,77	0,39	-0,46	0,08	0,08	0,08	-0,77	0,20	-0,45	0,08	-0,84	0,15	-0,51	0,10
Souk Larbaa	-0,78	0,11	-0,46	0,06	0,06	0,06	-0,76	0,13	-0,46	0,06	-0,85	0,14	-0,49	0,09
Dar Gueddari	-0,75	0,12	-0,45	0,06	0,06	0,07	-0,73	0,17	-0,44	0,07	-0,78	0,14	-0,49	0,10
Khenichet	-0,74	0,32	-0,42	0,07	0,07	0,07	-0,72	0,26	-0,41	0,07	-0,78	0,20	-0,45	0,08
Zirara	-0,73	-0,18	-0,43	0,07	0,07	0,07	-0,69	-0,04	-0,41	0,07	-0,78	0,01	-0,48	0,08
Aouamra	-0,79	0,43	-0,50	0,10	0,10	0,10	-0,77	0,40	-0,49	0,10	-0,87	0,29	-0,56	0,11
Mrissa	-0,80	0,25	-0,52	0,10	0,10	0,09	-0,78	0,22	-0,51	0,09	-0,86	-0,10	-0,57	0,12
Arbaoua	-0,82	0,47	-0,47	0,15	0,15	0,15	-0,79	0,42	-0,46	0,15	-0,85	0,27	-0,52	0,14

NDWI : indice d'eau par différence normalisé; min : minimum; Max : maximum; Moy : moyenne et Sd : écart-type.

Séries chronologiques et tests statistiques

B.1 Généralités sur les séries chronologiques

B.1.1 Définitions

Une série temporelle ou bien encore chronique ou série temporelle est un ensemble séquentiel de points de données, mesurés généralement sur des périodes successives. Selon (Fawaz et al., 2019), une série chronologique est définie comme :

Définition 1.1 : Une série temporelle univariée $X = [x_1, x_2, \dots, x_T]$ est un ensemble ordonné de valeurs réelles. La longueur de X est égale au nombre de valeurs réelles T .

Définition 1.2 : Une série temporelle à dimension multivariée, $X = [X^1, X^2, \dots, X^M]$ est constituée de séries temporelles univariées différentes avec $X^i \in \mathbb{R}$.

Définition 1.3 : l'ensemble de données $D = (X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_N, Y_N)$ est un ensemble de paires (X_i, Y_i) où X peut être une série temporelle univariée ou multivariée avec Y_i est son vecteur étiquette correspondant. Pour un ensemble de données contenant K classes, le vecteur à étiquette unique Y_i est un vecteur de longueur K où chaque élément $j \in [1, K]$ est égal à 1 si la classe de X_i est j et 0 sinon.

Définition 1.4 : Une série chronologique $X_t, t \in \mathbb{Z}$ est dit (faiblement) stationnaire si

- (i) $Var(X_t) < \infty$ pour $t \in \mathbb{Z}$,
- (ii) $\mu_X(t) = \mu$ pour $t \in \mathbb{Z}$,
- (iii) $\gamma_X(r, s) = \gamma_X(r + t, s + t)$ pour $r, s, t \in \mathbb{Z}$,
- (iv) implique que $\gamma_X(r, s)$ est une fonction de $r - s$, et il est commode de définir $\gamma_X(h) = \gamma_X(h, 0)$

La valeur "h" est appelée "lag".

Définition 1.5 : Supposons que $X_t, t \in \mathbb{Z}$ est une série chronologique stationnaire. La fonction d'autocovariance (ACVF) de X_t est

$$\gamma_X(h) = Cov(X^{t+h}, X^t) \tag{B.1}$$

La fonction d'autocorrélation (ACF) est

$$\rho_X(h) = \frac{\gamma_X(h)}{\gamma_X(0)} \quad (\text{B.2})$$

Définition 1.6 : un processus $X_t, t \in \mathbb{Z}$ est dit être un blanc bruit avec μ moyen et variance σ^2 ,

$$X_t \sim WN(\mu, \sigma^2), \quad (\text{B.3})$$

$$\text{Si } EX_t = \mu \text{ et } \rho_X(h) = \begin{cases} \sigma^2, & \text{si } h = 0 \\ 0, & \text{si } h \neq 0 \end{cases}.$$

B.1.2 Types de séries chronologiques

Il existe de nombreuses classifications de séries chronologiques différentes basées sur des critères spécifiques. Les dépendances les plus importantes sont : la longueur du pas de temps, la mémoire et la stationnarité.

Tableau B.1 : Différentes classes de séries chronologiques.

Dépendances	Critères	Définitions
Distance entre les valeurs enregistrées	Équidistantes	Formées, lorsque leurs valeurs sont enregistrées périodiquement avec une durée constante de la période. De nombreux processus physiques ou environnementaux sont décrits par ce genre de séries chronologiques.
	Non équidistantes	Qui ne gardent pas une distance constante entre les observations. Les indicateurs économétriques, comme les prix des actions, ne sont pas nécessairement réalisés à intervalles réguliers, ils sont régulés par un taux concret de l'offre et de la demande sur le marché spécifique.
Taux de dépendance entre les valeurs nouvellement observées et les précédentes	À mémoire longue	Pour lesquelles la fonction d'autocorrélation diminue lentement. Ce type de série chronologique décrit généralement des processus qui ne présentent pas de rotation rapide. La congestion du trafic, la consommation d'énergie électrique, les différents indicateurs physiques ou météorologiques, comme les mesures de la température de l'air, tous ces processus sont généralement décrits par des séries chronologiques à longue mémoire.
	À mémoire courte	Pour lesquelles la fonction d'autocorrélation diminue plus rapidement. Les exemples typiques contiennent des processus du secteur économétrique.
Stationnarité	Stationnaires	Dont les propriétés statistiques, comme la valeur moyenne ou la variance, sont constantes dans le temps. Ces séries temporelles restent en équilibre relatif par rapport à leurs valeurs moyennes correspondantes.
	Non stationnaires	Dans l'industrie, le commerce ou l'économie, les séries chronologiques appartiennent plus fréquemment à la catégorie des séries non stationnaires. Afin d'effectuer des prévisions, les séries chronologiques non stationnaires sont généralement transformées en séries stationnaires par des méthodes de prétraitement appropriées.

B.1.3 Composantes des séries chronologiques

En général, la plupart des méthodes d'analyse supposent que les données de séries chronologiques contiennent la composante systématique (comprenant généralement plu-

sieurs composantes comme citées ci-dessous) et le bruit aléatoire (erreur), ce qui complique la détection des composantes régulières. Par conséquent, la majorité des méthodes comprend différentes méthodes de filtrage du bruit, afin de détecter les composantes régulières, ou doit être effectuée lors du prétraitement des données (Jebb et al., 2015).

- **Composante tendancielle $T(t)$ (ou tendance séculaire)** est un mouvement à long terme dans une série temporelle. Par exemple, les séries relatives à la croissance de la population, au nombre de maisons dans une ville, etc. montrent une tendance à la hausse, alors qu'une tendance à la baisse peut être observée dans les séries relatives aux taux de mortalité, aux épidémies, etc ;
- **Composante saisonnière $S(t)$ (ou variations saisonnières)**, qui représentent des fluctuations au cours d'une année pendant la saison. Les facteurs importants à l'origine des variations saisonnières sont : le climat et les conditions météorologiques, les coutumes, les habitudes traditionnelles, etc ;
- **Composante cyclique $C(t)$ (ou fluctuations cycliques)**, qui correspondent à des variations périodiques mais non saisonnières. La différence entre les composantes cycliques et saisonnières est que la composante saisonnière représente une périodicité saisonnière régulière, tandis que la composante cyclique a un effet plus durable et peut varier d'un cycle à l'autre. Très souvent, la composante cyclique est intégrée dans une composante tendancielle ;
- **Composante aléatoire du bruit $\varepsilon(t)$** , qui sont d'autres sources de variations de nature irrégulières, aléatoires et inexplicables des séries.

Il s'avère nécessaire de décrire comment ces composants interagissent mathématiquement entre eux, afin de composer une série chronologique. Les relations fonctionnelles concrètes entre les composants peuvent varier selon les séries. Cependant, il existe deux modèles principaux, la façon dont ils interagissent entre eux :

- Modèle additif

$$Y(t) = T(t) + S(t) + C(t) + \varepsilon(t) \quad (\text{B.4})$$

- Modèle multiplicatif

$$Y(t) = T(t) * S(t) * C(t) * \varepsilon(t) \quad (\text{B.5})$$

-Modèle mixte

$$Y(t) = T(t) * S(t) + C(t) + \varepsilon(t) \quad (\text{B.6})$$

Ici, $Y(t)$ est l'observation et $T(t)$, $C(t)$, $S(t)$, $\varepsilon(t)$ sont respectivement la tendance, la variation saisonnière, cyclique et irrégulière au moment t .

B.1.4 Test d'hypothèse et conditions d'application

Le test d'hypothèse est une méthode d'inférence statistique qui est utilisée pour prendre des décisions statistiques en utilisant des données expérimentales. Au fil des ans, les tests hypothèses ont été abordés avec une pléthore de tests qui peuvent être répartis en deux classes (Expósito-Ruiz et al., 2010; Tsagris et al., 2019). i) Tests paramétriques ou tests standard de hypothèse qui sont basés sur l'hypothèse de normalité (i.e. test T,

test Z, test F). ii) Tests non paramétriques ou tests sans distribution de hypothèse qui ne font pas une hypothèse sur les paramètres de la population et n'utilisent donc pas les paramètres de la distributions (i.e. test McNemer, test des rangs signés de Wilcoxon, test Wilcoxon–Mann–Whitney).

Généralement, toutes les hypothèses sont testées selon un processus en sept étapes (Alkarkhi and Alqaraghuli, 2020; Emmert-Streib and Dehmer, 2019; Ross, 2017) :

- Sélectionner une statistique de test ou une statistique appropriée T : par exemple t-score ou z-score ;
- Définir l'hypothèse nulle H_0 et l'hypothèse alternative H_a pour T ;
- Trouver la distribution d'échantillonnage pour T , étant donné que H_0 est vrai ;
- Choisir le niveau de signification α ;
- Évaluer la statistique de test T pour les données de l'échantillon ;
- Déterminer les valeurs $p - values$;
- Prendre une décision (accepter H_0 ou rejeter H_0).

a) Choix d'une statistique de test

La statistique de test est une statistique utilisée pour tester une hypothèse statistique. Il s'agit d'une valeur calculée à partir de données d'échantillon. Formellement, la statistique de test s'écrit comme suit :

$$t_n = T(E(n)) \quad (\text{B.7})$$

où $E(n) = x_1, \dots, x_n$ est un échantillon de données de taille n . Ici, nous avons indiqué la cartographie par T et la valeur que nous obtenons par t_n . Généralement, la statistique du test peut prendre des valeurs réelles, c'est-à-dire $t_n \in \mathbb{R}$ mais des restrictions sont possibles.

b) Hypothèse nulle H_0 et hypothèse alternative H_a

Nous définissons deux hypothèses qui font des déclarations sur la valeur de population de la statistique de test et sont mutuellement exclusives. Ces hypothèses sont :

- **Hypothèse nulle** (H_0) : Elle est désignée par ; $H_0 : \theta = \theta_0$, ce qui montre qu'il n'y a pas de différence entre les deux paramètres de population.
- **Hypothèse alternative** (H_1 ou H_a) : Contrairement à l'hypothèse nulle ($H_1 : \theta \neq \theta_0$), l'hypothèse alternative montre que les observations sont le résultat d'un effet réel.

avec θ est la valeur de population de t .

Notons que la valeur du paramètre de population θ ne peut être vrai que pour une seule déclaration, mais pas pour les deux. Par exemple, soit $\theta = \theta_0$ est vrai mais l'hypothèse alternative H_1 est fausse, soit $\theta \neq \theta_0$ est vrai mais l'hypothèse nulle H_0 est fausse. Le tableau B.2 illustre les quatre résultats possibles d'un test d'hypothèse (Alkarkhi and Alqaraghuli, 2020).

Tableau B.2 : Types d'erreur des tests hypothèses.

Décision	H_0 vraie	H_a
Rejeter H_0	Erreur de type I (risque α)	Décision correcte.
Ne pas rejeter H_0	Décision correcte	Erreur de type I (risque β)

Erreur de type I : rejet de l'hypothèse nulle lorsqu'elle est vraie; Erreur de type II : ne pas rejeter l'hypothèse nulle lorsque l'hypothèse alternative est vraie.

c) Distribution de l'échantillon

Le lien entre une statistique de test et sa distribution d'échantillonnage est crucial pour tout test d'hypothèse. Soit $X(n) = X_1, \dots, X_n$ un échantillon aléatoire d'une population avec $X_i \sim P_{pop} \forall_i$ et $T(X(n))$ soit une statistique test. Ensuite, la distribution de probabilité $f_n(x|H_0 \text{ vraie})$ de $T(X(n))$, en supposant que H_0 est vrai, est appelée la distribution d'échantillonnage de l'hypothèse nulle ou la distribution nulle. Le tableau B.3 récapitule les résultats de la distribution de l'échantillonnage du z-score et du t-score qui sont données respectivement par les équations B.8 et B.10.

Tableau B.3 : Distribution d'échantillonnage du z-score et du t-score.

Statistique de test	Distribution d'échantillonnage	Connaissance des paramètres
z-score	N(0,1)	σ^2 doit être connu
t-score	distribution Student's, dof=n - 1	aucun

La distribution de Z est une distribution normale standard, $Z \sim N(0, 1)$.

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (\text{B.8})$$

Si nous connaissons la variance σ^2 , la distribution d'échantillonnage de la moyenne transformée \bar{X} , nommée Z , est une distribution normale standard. Toutefois, si nous ne connaissons pas la variance σ , nous ne pouvons pas effectuer la z-transformation dans l'équation B.8, car cette transformation dépend de σ . Dans ce cas, nous devons estimer la variance de l'échantillon aléatoire X_1, \dots, X_n qui est définie par

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X})^2 \quad (\text{B.9})$$

Ensuite, nous pouvons utiliser l'estimation de la variance afin de l'utiliser pour la t-transformation suivante :

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{\hat{\sigma}/\sqrt{n}} \quad (\text{B.10})$$

Malgré le fait que cette transformation t soit formellement similaire à la transformation z de l'équation B.8, la variable aléatoire T qui en résulte ne suit pas une distribution normale standard mais une distribution t de Student avec n - 1 degrés de liberté (dof). Nous tenons à mentionner que cela s'applique strictement aux échantillons distribués normaux, c'est-à-dire $X_i \sim N(\mu, \sigma)$.

d) Niveau de signification α

Le niveau de signification α est un nombre compris entre zéro et un, soit $\alpha \in [0, 1]$. Elle a pour signification de donner la probabilité de rejeter H_0 à condition que H_0 soit vrai. Cela signifie qu'elle nous donne la probabilité de commettre une erreur de type I entraînant une décision faussement positive.

$$\alpha = P(\text{Erreur de type I}) = P(\text{rejeter } H_0 | H_0 \text{ vraie}) \quad (\text{B.11})$$

Lorsque nous effectuons un test d'hypothèse, nous avons la liberté de choisir cette valeur. Cependant, le choix le plus fréquent sur α est probablement 0,05 ou 0,01 (Alkarkhi and Alqaraghuli, 2020; Expósito-Ruiz et al., 2010).

e) Évaluation du test statistique à partir des données

Pour $E(n) = X(n) = x_1, \dots, x_n$, nous estimons la valeur numérique de la statistique de test sélectionnée comme donnée par l'équation B.7. Ici, t_n représente une valeur numérique particulière obtenue à partir des données observées $E(n)$. Étant donné que notre ensemble de données dépend du nombre d'échantillons n , cette valeur numérique dépendra également de n .

f) Détermination des p -values

La p -value est la probabilité d'observer des valeurs plus extrêmes que la statistique test t_n en supposant que H_0 est vrai.

$$\alpha = P(\text{observé} \times |t| | H_0 \text{ est vraie}) = P(x \geq |t| | H_0 \text{ vraie}) \quad (\text{B.12})$$

Afin de déterminer les valeurs p d'un test d'hypothèse, nous devons utiliser la distribution d'échantillonnage et la statistique de test estimée t_n . Cela signifie que les p -values résultent d'une comparaison entre les hypothèses théoriques (distribution d'échantillonnage) et les observations réelles (échantillon de données) en supposant que H_0 est vrai (cf. figure B.1).

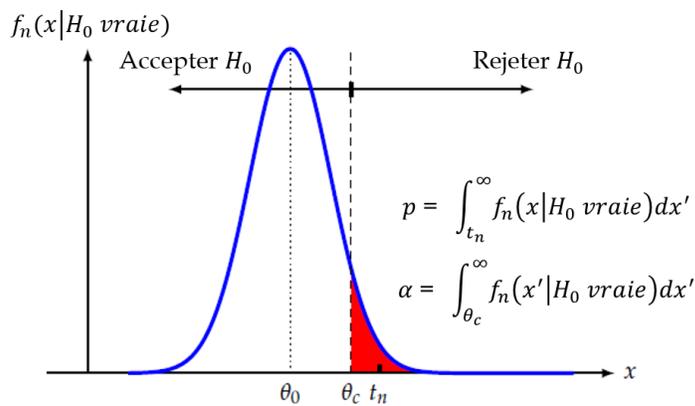


FIGURE B.1 : Détermination des p -values à partir de la distribution d'échantillonnage de la statistique du test. (Emmert-Streib and Dehmer, 2019)

g) Décision sur l'hypothèse nulle

La prise de décision sur l'hypothèse nulle est basée sur deux possibilités. La première possibilité consiste à prendre une décision basée sur les valeurs p ou, la deuxième concerne une décision basée sur la valeur de la statistique test t_n .

- Décision basée sur les p – values : Si $p < \alpha$ rejeter H_0
- Décision basée sur le seuil θ_c : Si $t_n > \theta_c$ rejeter H_0

Si nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle, nous l'acceptons.

B.2 Tests statistiques de détection de rupture

B.2.1 Test de Pettitt-Whitney-Mann

Le test de [Pettitt \(1979\)](#), dérivé de celui de Mann-Whitney, est un test non paramétrique. Il est utilisé pour évaluer un seul point de changement qui existe dans une série chronologique.

Ce test est capable de détecter la période où une rupture peut se produire sur un pas de temps annuel, mais il est plus sensible aux ruptures au milieu de la série chronologique ([Ribeiro and Caineta, 2016](#)). Ainsi, l'absence de rupture dans la série (x_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle (H_0 = 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) $i = 1$ 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 :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (\text{B.13})$$

$$D_{ij} = \text{sing}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1, & \text{si } x_i - x_j > 0 \\ -1, & \text{si } x_i - x_j < 0 \\ 0, & \text{si } x_i - x_j = 0 \end{cases} . \quad (\text{B.14})$$

L'hypothèse nulle est testée en utilisant l'équation ci-dessous :

$$K_n = \text{Max}|U_t, N|, 1 < t < N \quad (\text{B.15})$$

Si k correspond à la valeur de K_n , la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée par :

$$\Pr(K_n > k) \approx 2 \times e^{\frac{-6 \times K_n^2}{N^3 + N^2}} \quad (\text{B.16})$$

H_0 est rejetée quand la valeur p – value est inférieure au niveau de signification 0,05 ou 0,01. Ainsi l'hypothèse alternative est retenue et une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$. Les valeurs critiques sont 208 et 167 pour les seuils de confiance 95% et 99% respectivement.

B.2.2 Test d'homogénéité normal ou le test SNH

Le test normalisé d'homogénéité normale (SNH), qui a ses racines dans (Hawkins, 2008), a été appliqué à des données climatiques par Alexandersson (1986), ensuite a été utilisé par beaucoup d'autres scientifiques. Il est considéré comme l'une des méthodes d'homogénéisation les plus populaires et les plus robustes pour les variables climatiques (Ribeiro and Caineta, 2016). Le test peut être utilisé sur un pas de temps annuel comme mensuel. Il repose sur la comparaison entre la moyenne des premières observations k avec la moyenne des observations $n-k$ restantes :

$$T_k = kz_1^2 + (n-k)z_2^2, \quad k = 1, \dots, n \quad (\text{B.17})$$

où :

$$z_1 = \left(\frac{1}{k}\right) \left(\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})}{\delta}\right) \quad (\text{B.18})$$

$$z_2 = \frac{1}{n-k} \times \frac{\sum_{i=k+1}^n (x_i - \bar{X})}{\delta} \quad (\text{B.19})$$

Quand une rupture se produit à l'année K , T_k atteint un maximum proche l'année $k = K$. Le test T_o est défini comme suit :

$$T_o = \max(T_k), \quad 1 \leq k \leq n \quad (\text{B.20})$$

L'hypothèse nulle est telle que la valeur de z suit une distribution normale $z_t \sim N(0, 1)$, $1 \leq t \leq n$ tandis que l'hypothèse alternative est comme suit :

$$z_t \sim N(\mu_1, 1), \quad 1 \leq k \leq c \quad (\text{B.21})$$

et

$$z_t \sim N(\mu_2, 1), \quad c+1 \leq t \leq n \quad (\text{B.22})$$

avec N est la distribution normale avec les paramètres (moyenne et écart type).

Si la valeur statistique de T_o est au-dessus de la valeur critique (Cr_v) à certain seuil de confiance (i.e. 95%), l'hypothèse nulle d'homogénéité peut être rejetée au niveau de signification (i.e. $\alpha=0,05$). Les valeurs Cr_v correspondent, dans notre étude, à 8,21 et 10,865 respectivement pour les seuils de confiance 95% et 99%. Ces valeurs ont été obtenues à partir du tableau de valeurs critiques de la statistique SNH mentionné dans l'article (Khaliq and Ouarda, 2007).

B.2.3 Test d'écart cumulatif ou de U Buishand

Le test d'écart cumulatif Buishand (1982) est, un test paramétrique, principalement utilisé pour déterminer si une série chronologique est uniforme sur un pas de temps annuel. Aussi, ce test est plus sensible aux ruptures au milieu de la série chronologique (Ribeiro and Caineta, 2016). Il consiste à calculer la différence (S_k) entre chaque valeur de donnée (x_i) et la moyenne de la série \bar{X} . H_o est l'hypothèse nulle de l'absence de rupture. Si la série est uniforme, S_k oscille à 0. L'équation s'écrit comme suit :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X}), \quad 1 \leq k < n \quad (\text{B.23})$$

où n est le nombre de valeurs de données après avoir calculé S_k , l'écart-type (δ_y) est utilisé pour corriger S_k et produire une série S_k^* . Ensuite, la valeur maximale de la

série S_k est identifiée, celle-ci est utilisée ainsi pour calculer la valeur de test statistique Q/\sqrt{n} .

$$S_k^* = \frac{S_k}{\delta_y}, \quad 0 < k \leq n \quad (\text{B.24})$$

$$\delta_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{X})^2}{n} \quad (\text{B.25})$$

$$Q = \text{Max}|S_k^*| \quad (\text{B.26})$$

Si $Q/\sqrt{n} > Cr_v$, la série temporelle n'est pas uniforme, on parle d'une série hétérogène. Cette valeur critique (Cr_v) varie en fonction du nombre d'années d'enregistrement. Dans notre étude, elle vaut 1,26 pour le seuil de confiance 95% et 1,50 pour le seuil de confiance 99%.

B.3 Tests statistiques d'analyse des tendances

B.3.1 Test de Mann Kendall

Le test de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) est une approche non paramétrique puissante. Il est couramment utilisé pour détecter les tendances monotones dans une série de données environnementales, climatiques ou hydrologiques (Pohlert, 2017). L'un de ses avantages, c'est qu'il ne requiert pas que les données suivent une distribution normale. Aussi, il se caractérise par une faible sensibilité aux ruptures abruptes dues à des séries temporelles non homogènes (Gocic and Trajkovic, 2013).

Son principe repose sur la vérification de la signifiante des tendances, en se basant sur la corrélation entre les rangs d'une série chronologique et leur ordre. Néanmoins, il ne peut pas être utilisé pour calculer l'étendue de la tendance à la hausse ou à la baisse.

L'hypothèse nulle (H_0) est telle que les variables suivent une distribution aléatoire c'est-à-dire qu'il n'y a pas de tendance. L'hypothèse alternative (H_1) est telle que les variables suivent une distribution ce qui signifie l'existence d'une tendance monotone (croissante ou décroissante) au fil du temps. En supposant une série temporelle t_1, t_2, \dots, t_n correspondant aux séries de données x_1, x_2, \dots, x_n , la valeur statistique S du test Mann-Kendall est calculée par les équations suivantes :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sing}(x_j - x_k), \quad j > k \quad (\text{B.27})$$

$$\text{sing}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ -1, & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \\ 0, & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \end{cases} \quad (\text{B.28})$$

où n est la longueur de la série de données, x_j et x_k sont les valeurs de données observées dans le temps j et k, respectivement. L'équation est appliquée, lorsque $n \geq 10$ dont la valeur statistique S du test de Mann-Kendall est similaire à une distribution normale, avec une moyenne $\mu(S) = 0$.

La variance est :

$$\delta^2(S) = \frac{n(n-1)(2n+5 - \sum_{j=1}^n (t_j - 1)(2t_j + 5))}{18} \quad (\text{B.29})$$

avec p est le nombre de groupes lié dans l'ensemble de données et t_j est le nombre de points de données dans le j^{th} groupe lié. La valeur de S est approximativement normalisée à condition que la valeur de Z soit définie comme suit :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\delta(S)}, & \text{si } S > 0 \\ 0, & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\delta(S)}, & \text{si } S < 0 \end{cases} . \quad (\text{B.30})$$

La valeur statistique S est étroitement liée au τ de Kendall donné par l'équation :

$$\tau = \frac{S}{D} \quad (\text{B.31})$$

Où

$$D = \sqrt{\frac{1}{2}n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)} \times \sqrt{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad (\text{B.32})$$

L'hypothèse nulle (H_0) est rejetée au niveau significatif de α , lorsque la valeur absolue de Z est supérieure à celle de $Z_{(1-\alpha/2)}$ qui est obtenue à partir de la table de distribution normale. Cela signifie que, les données de séries temporelles montrent une tendance statistiquement significative aux niveaux de confiance 90%, 95% et 99% quand $|Z|$ est supérieure à 1,64; 1,96 et 2,58 respectivement. Une valeur positive de τ indique une tendance significative à la hausse tandis qu'une valeur négative signifie une tendance à baisse.

B.3.2 Test de Sen's

La pente de Sen's (nommé aussi estimateur de Theil-Sen) est un test non paramétrique développé par Sen (1968) et qui est une extension du test de Wetensch. (1950). Ce test permet d'estimer à la fois l'ampleur de la tendance linéaire (c'est-à-dire le taux de variation linéaire) et les niveaux de confiance (Gilbert, 1987; Pohlert, 2017). Il est considéré comme un test extrêmement moins sensible aux données manquantes et valeurs aberrantes (Gilbert, 1987). Ce qui lui rend une méthode plus robuste que l'estimateur des moindres carrés. Le modèle linéaire s'écrit comme suit :

$$X(t) = Q_{med} \times t + c \quad (\text{B.33})$$

Où Q_{med} est la pente et c : est une constante. Les interceptions sont calculées pour chaque pas de temps tel que donné par la formule suivante :

$$c = X(t) - Q_{med} \times t \quad (\text{B.34})$$

L'interception correspondante est aussi bien la médiane de toutes les interceptions.

Nous calculons d'abord toutes les pentes de toutes les valeurs paires pour chaque station comme exprimé dans l'équation :

$$Q_{ij} = \frac{X_j - X_i}{j - i}, \text{ pour } i \text{ et } j = 1, 2, 3, \dots, N \text{ et} \quad (\text{B.35})$$

où X_j et X_i sont les valeurs de données aux instants (ou durant une période) j et i respectivement.

Nous obtenons $N = \frac{n(n-1)}{2}$ d'estimations de la pente Q_k , lorsqu'il y a une seule donnée de valeurs x_j dans chaque période de temps, où n est le nombre total des années. Sinon $N < (n'(n'-1))/2$, dans le cas de plusieurs observations en une ou plusieurs périodes (Gocic and Trajkovic, 2013), avec n' est le nombre total des observations. L'estimateur de pente de Sen's Q_{med} est la médiane de N valeurs de Q_k qui sont classées dans l'ordre croissant ($Q_1 \leq Q_2 \leq \dots \leq Q_{(N-1)} \leq Q_N$) et calculée comme suit :

$$Q_{med} = median(Q_k) = \begin{cases} Q_{[\frac{(N+1)}{2}]}, & \text{si } N \text{ est impair} \\ \frac{1}{2}(Q_{\frac{N}{2}} + Q_{\frac{N+2}{2}}), & \text{si } N \text{ est pair} \end{cases} . \quad (B.36)$$

Un test à double face à l'intervalle de 100 $(1 - \alpha)$ % de confiance est réalisé sur le Q_{med} . Cet intervalle $[Q_{min}; Q_{max}]$ est calculé en suivant la procédure décrite dans (Gilbert, 1987, p. 218) :

$$\begin{cases} Q_{min} = M_{1th}, \text{ avec } M_1 = \frac{N-C_\alpha}{2} \\ Q_{max} = (M_2 + 1)th, \text{ avec } M_2 = \frac{N+C_\alpha}{2} \end{cases} . \quad (B.37)$$

et

$$C_\alpha = Z_{(1-\alpha/2)} \times \delta^2(S) \quad (B.38)$$

où N : nombre de données pour lesquelles $j > i$, $\delta^2(S)$: est définie en équation B.29, α : niveau de confiance qui vaut 0,05, Z obtenue à partir de la table de distribution normale et vaut 1,96.

Le signe Q_{med} reflète le sens de la tendance des données, tandis que sa valeur indique la pente de la tendance. Si les deux limites (Q_{min} et Q_{max}) ont un signe similaire, la pente Q_{med} est statistiquement différente de zéro.

Références

- Abahous, H., Ronchail, J., Sifeddine, A., Kenny, L., and Bouchaou, L. (2017). Trend and change point analyses of annual precipitation in the souss-massa region in morocco during 1932–2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(3-4) :1153–1163.
- Acharki, S., Amharref, and Bernoussi, A.-S. (2020a). Web2tiset : Automated satellite images downloading and processing for environmental and hydrological use. *Journal of Environmental Hydrology*, 28.
- Acharki, S., Amharref, M., El Halimi, R., and Bernoussi, A.-S. (2019). Évaluation par approche statistique de l’impact des changements climatiques sur les ressources en eau : application au périmètre du gharb (maroc). *Revue des sciences de l’eau / Journal of Water Science*, 32(3) :291–315.
- Acharki, S., Amharref, M., Frison, P.-L., and Bernoussi, A.-S. (2020b). Cartographie des cultures dans le périmètre du loukkos-maroc : Apport de la télédétection radar et optique. *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*.
- Acharki, S., Amharref, M., Kassogué, H., and Bernoussi, A.-S. (2020c). Climate change impact on water resources : A case study of northern morocco.
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *International Journal of Climatology*, 6 :661–675.
- Alkarkhi, A. F. M. and Alqaraghuli, W. A. A. (2020). *Applied Statistics for Environmental Science with R*, chapter Statistical Hypothesis Testing, pages 57—86. Elsevier Science Publishing Co Inc.
- Amharref, M., Aassine, S., Bernoussi, A.-S., and B-Y., H. (2007). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Application à la plaine du gharb (maroc). *Revue des sciences de l’eau*, 20(2) :185.
- Antipolis, S. (2008). The blue plan’s sustainable development outlook for the mediterranean. Technical report, United Nations Environment Programme Mediterranean Action Plan Blue Plan – Regional Activity Centre.
- Aoubouazza, M. and Rajel, R. (2013). Impact of extreme climate events on water resources and agriculture and biodiversity in morocco. *Journal of Climatology & Weather Forecasting*, 1(2).
- Arnell, N. W. (2004). Climate change and global water resources : Sres emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1) :31–52.

- Arnell, N. W. and Lloyd-Hughes, B. (2014). The global-scale impacts of climate change on water resources and flooding under new climate and socio-economic scenarios. *Climatic Change*, 122(1) :127–140.
- AT-PMGI (2015). Étude d’impact environnemental du projet de modernisation de la grande irrigation. Technical report, Organisation des Nations Unies pour l’Alimentation et l’Agriculture (FAO), Rome.
- Ban, Y., editor (2016). *Multitemporal Remote Sensing : Methods and Applications (Remote Sensing and Digital Image Processing)*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Bates, B., W. Kundzewicz, Z., Wu, S., and Palutikof, J. (2008). Climate change and water. Technical report, Geneva : IPCC Secretariat, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Blaney, H. F. and Criddle, W. D. (1950). *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*.
- Bouabid, R. and Chafai Elalaoui, A. (2010). Impact of climate change on water resources in morocco : The case of sebou basin. *López-Francos A. (comp.), López-Francos A. (collab.). Economics of drought and drought preparedness in a climate change context. Zaragoza : CIHEAM / FAO / ICARDA / GDAR / CEIGRAM / MARM Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 95*, pages 57–62.
- Boukrim, S., Sedkaoui, N., Lahrach, A., Chaouni, A., and Benabdelhadi, M. (2012). Impact of climate change on water resources in morocco : The case of ouergha watershed. *International Water Technology Journal*, 2(3) :217–223.
- Breiman, L. (2001). Machine learning. volume 45, page 5–32. Kluwer Academic Publishers.
- Buishand, T. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58 :11–27.
- Buuren, S. and KarinGroothuis-oudshoorn, K. (2011). mice : Multivariate and imputation by chained. *Journal of Statistical Software*, 45(3).
- Buuren, S., Karingroothuis-oudshoorn, K., Robitzsch, A., Vink, G., Doove, I., Jolani, S., Schouten, R., Gaffert, P., Meinfelder, F., and Gray, B. (2018). *mice : Multivariate Imputation by Chained Equations*. R Package Version 3.3.0.
- Byari, M., Bernoussi, A. S., and Amharref, M. (2019). The development of a three-dimensional cellular automata model for wind flow. In *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development*, pages 677–683. Springer.
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., and Gómez, M. (2016). Climate and land use changes on streamflow and subsurface recharge in the fluvià basin, spain. *Water*, 8(6) :228.
- Carneiro, J. F. and Boughriba, M., Correia, A., Zarhloule, Y., Rimi, A., and El Houadi, B. (2009). Evaluation of climate change effects in a coastal aquifer in morocco using a density-dependent numerical model. *Environmental Earth Sciences*, 61(2) :241–252.
- Carrega, P., Dubreuil, V., and Richard, Y. (2004). Climat et développement durable. *Historiens et Géographes*, pages 205–209.

- Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., and Mcpherson, J. (2019). *shiny : Web Application Framework*. R Package Version 1.4.0.
- Chastain, R., Housman, I., Goldstein, J., Finco, M., and Tenneson, K. (2019). Empirical cross sensor comparison of sentinel-2a and 2b MSI, landsat-8 OLI, and landsat-7 ETM+ top of atmosphere spectral characteristics over the conterminous united states. *Remote Sensing of Environment*, 221 :274–285.
- Chavez, P. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24 :459–479.
- Chavez, P. (1996). Image-based atmospheric corrections – revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9) :1025–1036.
- Chavez, P., Sides, S., and Anderson, J. (1991). Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data : Tm and spot pan. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57 :295–303.
- Cui, L., Li, G., Ren, H., He, L., Liao, H., Ouyang, N., and Zhang, Y. (2014). Assessment of atmospheric correction methods for historical landsat TM images in the coastal zone : A case study in jiangsu, china. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1) :701–716.
- DeConto, R. M. and Pollard, D. (2016). Contribution of antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531(7596) :591–597.
- Denize, J., Hubert-Moy, L., Betbeder, J., Corgne, S., Baudry, J., and Pottier, E. (2018). Evaluation of using sentinel-1 and -2 time-series to identify winter land use in agricultural landscapes. *Remote Sensing*, 11(1) :37.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 24 edition.
- Douville, H., Ribes, A., Decharme, B., Alkama, R., and Sheffield, J. (2012). Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration. *Nature Climate Change*, 3(1) :59–62.
- Déqué, M., Drevet, C., Braun, A., and D., C. (1994). The arpege-ifs atmosphere model : a contribution to the french community climate modelling. *Climate Dynamics*, 10 :249–266.
- Driouech, F. (2010). *Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d’un changement climatique : descente d’échelle et incertitudes*. PhD thesis, Université de Toulouse.
- Ducharne, A., Théry, S., Viennot, P., Ledoux, E., Gomez, E., and Déqué, M. (2003). Influence du changement climatique sur l’hydrologie du bassin de la seine. *VertigO*, 4(3).
- El Asri, H., Larabi, A., and Faouzi, M. (2019). Climate change projections in the ghisnekkor region of morocco and potential impact on groundwater recharge. *Theoretical and Applied Climatology*.

- El ibrahimi, A., Baali, A., Couscous, A., and El kamel, T. (2015). étude de l'impact des variations pluviométriques sur les fluctuations piézométriques des nappes phréatiques superficielles en zone semi-aride (cas de la plaine de saïss, nord du maroc). *European Scientific Journal*, 11(27).
- Emmert-Streib, F. and Dehmer, M. (2019). Understanding statistical hypothesis testing : The logic of statistical inference. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 1 :945—961.
- Es Saouini, H. (2015). *Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : Aspects dynamiques et application à l'aquifère de R'Mel (Larache, Maroc)*. PhD thesis, Université Abdelmalek Essaadi.
- ESCWA (2017). Arab climate change assessment report - main report. Technical report, United Nations Economic and Social Commission for Western Asia.
- Expósito-Ruiz, M., Pérez-Vicente, S., and Rivas-Ruiz, F. (2010). Statistical inference : Hypothesis testing. *Allergologia et Immunopathologia*, 38(5) :266—277.
- Fawaz, H. I., Forestier, G., Weber, J., Idoumghar, L., and Muller, P.-A. (2019). Deep learning for time series classification : a review. *data mining and knowledge discovery. Springer*, 33(4) :917–963.
- Feng, L., Nowak, G., O'Neill, T., and Welsh, A. (2014). CUTOFF : A spatio-temporal imputation method. *Journal of Hydrology*, 519 :3591–3605.
- Feng, Y., Liu, Y., and Tong, X. (2018). Comparison of metaheuristic cellular automata models : A case study of dynamic land use simulation in the Yangtze River Delta. *Computers, Environment and Urban Systems*, 70 :138–150.
- Filahi, S., Tramblay, Y., Mouhir, L., and Diaconescu, E. P. (2017). Projected changes in temperature and precipitation indices in morocco from high-resolution regional climate models. *International Journal of Climatology*, 37(14) :4846–4863.
- Foni, A. and Seal, D. (2004). Shuttle radar topography mission : an innovative approach to shuttle orbital control. *Acta Astronautica*, 54(8) :565–570.
- Foody, G. (1992). On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58 :1459–1460.
- Frison, P.-L. and Lardeux, C. (2018). *QGIS and Application in Agriculture and Forest*, chapter Vegetation Cartography and from Sentinel and Radar Images, page 181–214. Elsevier Ltd. : Oxford, UK.
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., and Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4) :121–139.
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*.
- Gill, T., Collett, L., Armston, J., Eustace, A., Danaher, T., Scarth, P., and Phinn, S. (2010). Geometric correction and accuracy assessment of landsat-7 etm+ and landsat-5 tm imagery used for vegetation cover monitoring in queensland, australia from 1988 to 2007. *Journal of Spatial Science*, 55(2) :273—287.

- Girard, M.-C. and Girard, C.-M. (2010). *Traitement des données de télédétection*. Environnement et ressources naturelles (Environnement et sécurité) (French Edition), 2e éd edition.
- Gislason, P. O., Benediktsson, I. A., and Sveinsson, J. R. (2006). Random forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 27(4) :294–300.
- Gocic, M. and 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.
- Goslee, S. C. (2011). Analyzing remote and sensing data and in r and the landsat and package. In *JSS Journal of Statistical Software*, volume 43.
- Granjon, D. (2019). *shinydashboardPlus : Add More ‘AdminLTE2’ Components to ‘shinydashboard’*. R Package Version 0.7.0.
- Harbouze, R. (2009). *Efficacité et efficience économique comparées des systèmes de production dans différentes situations d’accès à la ressource en eau : Application dans le périmètre du Gharb (Maroc)*. PhD thesis, Institut agronomique méditerranéen de Montpellier.
- Hawkins, D. M. (2008). Testing a sequence of observations for a shift in location. *Journal of the American Statistical Association*, 72(357) :180–186.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., and Ferreira, L. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the modis vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83 :195–213.
- Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., and Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images : From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80 :91–106.
- IPCC (2013). *Summary for Policymakers*, book section SPM, page 1–30. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IRES (2011). Rapport stratégique de synthèse :le maroc face au changement climatique incidences sur la trajectoire de développement et perspectives d’adaptation. Technical report, Institut Royal des Etudes Stratégiques.
- Jebb, A. T., Tay, L., Wang, W., and Huang, Q. (2015). Time series analysis for psychological research : examining and forecasting change. *Front. Psychol.*, 6.
- Jellouli, O., Bernoussi, A.-S., Mâatouk, M., and Amharref, M. (2016). Forest fire modelling using cellular automata : application to the watershed Oued Laou (Morocco). *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 22(5) :493–507.
- Jensen, J. R. (1996). *Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective*. 2 édition,. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.
- Jilali, A. (2014). Impact of climate change on the figuig aquifer using a numerical model : Oasis of eastern morocco. *Journal of biology and Earth Sciences*.
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.-I., Sheffield, J., Goulden, M.-L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., de Jeu, R., Dolman, A. J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Beverly, E. L., Montagnani,

- L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., D. Richardson, A., Roupsard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., and Zhang, K. (2010). Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 467(7318) :951–954.
- Kassogué, H., Bernoussi, A.-S., Amharref, M., and Ouardouz, M. (2017a). Cellular automata approach for modelling climate change impact on water resources. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, pages 1–16.
- Kassogué, H., Bernoussi, A.-S., Ma atouk, M., and Amharref, M. (2017b). A two scale cellular automaton for flow dynamics modeling (2CAFDYM). *Applied Mathematical Modelling*, 43 :61–77.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin : London, 4th edition.
- Khaliq, M. N. and Ouarda, T. B. M. J. (2007). On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT). *International Journal of Climatology*, 27(5) :681–687.
- Khomsı, K., Mahe, G., Tramblay, y., Sinan, M., and Snoussi, M. (2016). Regional impacts of global change : seasonal trends in extreme rainfall, run-off and temperature in two contrasting regions of morocco. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(5) :1079–1090.
- Kili, M., El Mansouri, B., and Chao, J. (2008). Bilan hydrique des sols et recharge de la nappe profonde de la plaine du Gharb (Maroc). *S echeresse*, 19(2) :145–51.
- Killick, R. and Eckley, I. A. (2014). changepoint : An and r package and for changepoint and analysis. *Journal of Statistical Software*, 58(3).
- Knitar, L., Amharref, M., Bernoussi, A.-B., and Es Saouini, H. (2019). Assessment of aquifer vulnerability to pollution based on tcr method : Application to oulad ogbane aquifer (morocco). *Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG)*, 7 :44–52.
- Kowarik, A. and Templ, M. (2016). Imputation with the r package VIM. *Journal of Statistical Software*, 74(7).
- Kumar, C. P. (2012). Climate change and its impact on groundwater resources. *RESEARCH INVENTY : International Journal of Engineering and Science*, 1(5) :43–60.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., and Sherstyukov, B. (2013). Flood risk and climate change : global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1) :1–28.
- Lafaysse, M. (2011). *Changement climatique et régime hydrologique d’un bassin alpin. Génération de scénarios sur la Haute-Durance, méthodologie d’évaluation et incertitudes associées*. PhD thesis, Océan, Atmosphère, Hydrologie. Université de Toulouse III- Paul Sabatier.
- Lantzanakis, G., Mitraka, Z., and Chrysoulakis, N. (2016). Comparison of physically and image based atmospheric correction methods for sentinel-2 satellite imagery. In *Perspectives on Atmospheric Sciences*, pages 255–261. Springer International Publishing.

- Lepoutre, B. and Combes, M. (2018). *La Mamora. In : Congrès de Pédologie méditerranéenne 1966, Madrid. Excursion au Maroc, T. I, 2ème partie*, chapter Chap VII : Description des régions traversées, pages 279–295.
- Li, M., Zang, S., Zhang, B., Li, S., and Wu, C. (2014). A review of remote sensing image classification techniques : the role of spatio-contextual information. *European Journal of Remote Sensing*, 47(1) :389–411.
- Liping, C., Yujun, S., and Saeed, S. (2018). Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques—a case study of a hilly area, jiangle, china. *PLOS ONE*, 13(7) :e0200493.
- López-Serrano, P., Corral-Rivas, J., Díaz-Varela, R., Álvarez-González, J., and López-Sánchez, C. (2016). Evaluation of radiometric and atmospheric correction algorithms for aboveground forest biomass estimation using landsat 5 TM data. *Remote Sensing*, 8(5) :369.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., and Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25 :12 :2365–2401.
- Magand, C. (2014). *Influence de la représentation des processus nivaux sur l’hydrologie de la Durance et sa réponse au changement climatique*. PhD thesis, Hydrologie. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3) :245.
- Marchane, A., Trambly, Y., Hanich, L., Ruelland, D., and Jarlan, L. (2017). Climate change impacts on surface water resources in the rheraya catchment (high-atlas, morocco). *Hydrological Sciences Journal*, 62(6) :979–995.
- Martins, V., Barbosa, C., Carvalho, D., Jorge, D., Lobo, F., and Novo, E. (2017). Assessment of atmospheric correction methods for sentinel-2 MSI images applied to amazon floodplain lakes. *Remote Sensing*, 9(4) :322.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (ndwi) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7) :1425–1432.
- Mcleod, A. I. (2015). *Kendall : Kendall Rank Correlation and Mann-Kendall Trend Test*. R Package Version 2.2.
- Mellor, A., Boukir, S., Haywood, A., and Jones, S. (2015). Exploring issues of training data imbalance and mislabelling on random forest performance for large area land cover classification using the ensemble margin. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105 :155–168.
- MEMEE (2016). 3ème communication nationale du maroc à la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques. Technical report, Ministère Délégué auprès du Ministre de l’Énergie, des Mines, de l’Eau et de l’Environnement.
- Milano, M., Ruelland, D., Fernandez, S., Dezetter, A., Fabre, J., Servat, E., Fritsch, J.-M., Ardoin-Bardin, S., and Thivet, G. (2013). Current state of mediterranean water resources and future trends under climatic and anthropogenic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 58(3) :498–518.

- Milewski, A., Seyoum, W. M., Elkadiri, R., and Durham, M. (2019). Multi-scale hydrologic sensitivity to climatic and anthropogenic changes in northern morocco. *Geosciences*, 10(1) :13.
- Mishra, S., Shrivastava, P., and S Dhurvey, P. (2017). Change detection techniques in remote sensing : A review. *International Journal of Wireless and Mobile Communication for Industrial Systems*, 4(1) :1–8.
- Monserud, R. and Leemans, R. (1992). Comparing global vegetation maps and with the kappa and statistic. *Ecological Modelling*, 62(4) :275–293.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., and Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282) :747–756.
- Nassopoulos, H. (2012). *Les impacts du changement climatique sur les ressources en eaux en Méditerranée*. PhD thesis, Sciences économiques. Université Paris-Est.
- NOAA (2016). State of the climate : Global analysis for annual 2016. Technical report, National Centers for Environmental Information.
- OMM (2019). État du climat en 2018 – les conséquences du changement climatique s’intensifient. Technical report, Organisation Météorologique Mondiale.
- Organization, W. M. (1989). Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. Technical report, (WMO/TD-No. 341). Geneva.
- Ormval (2009). Documents techniques. Technical report, ORMVA Loukkos.
- OTB, T. (2018). Orfeotoolbox. Available online : <https://www.orfeo-toolbox.org>. (accessed on 23 December 2018).
- Panuju, D. R., Paull, D. J., and Griffin, A. L. (2020). Change detection techniques based on multispectral images for investigating land cover dynamics. *Remote Sensing*, 12(11) :1781.
- Pascual, D., Pla, E., Lopez-Bustins, J. A., Retana, J., and Terradas, J. (2015). Impacts of climate change on water resources in the mediterranean basin : a case study in Catalonia, Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 60(12) :2132–2147.
- Pehani, P., Cotar, K., Marsetic, A., Zaletelj, J., and Ostir, K. (2016). Automatic geometric processing for very high resolution optical satellite data based on vector roads and orthophotos. *International Journal of Remote Sensing*, 8(4).
- Perrier, V., Meyer, F., and Granjon, D. (2019). *shinyWidgets : Custom Inputs Widgets for Shiny*. R Package Version 0.4.9.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society*, 28(2) :126–135.
- Pohlert, T. (2017). *Non-parametric trend tests and change-point detection*. R Package Version 1.0.0.

- Portmann, F. T., Döll, P., Eisner, S., and Flörke, M. (2013). Impact of climate change on renewable groundwater resources : assessing the benefits of avoided greenhouse gas emissions using selected cmip5 climate projections. *Environmental Research Letters*, 8.
- Pravema (2012). Rapport d'activité relatif aux actions de la fondation phidias correspondant à l'activité 1 de pravema. Technical report.
- QGIS Development Team (2017). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation.
- Quintana Seguí, P. (2008). *Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN-ISBA-MODCOU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique*. PhD thesis, Hydrologie. Université de Toulouse III- Paul Sabatier.
- R Development Core Team (2017). *R : A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing.
- Raymond, F., Ullmann, A., and Camberlin, P. (2016). Précipitations intenses sur le bassin méditerranéen : quelles tendances entre 1950 et 2013? *European Journal of Geography Environnement, Nature, Paysage*.
- Ribeiro, S. and Caineta, J. and. Costa, A. (2016). Review and discussion of homogenisation methods for climate data. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 94 :167–179.
- Rikimaru, A., Roy, P., and Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*, 43(1) :39–47.
- Rondeaux, G., Michael Steven, M., and Barrett, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 55 :95–107.
- Ross, S. M. (2017). *Introductory Statistics*, chapter Testing Statistical Hypotheses, pages 381—432. Elsevier Science.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., and Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. In S.C. Freden, E. M. and (eds), M. B., editors, *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, volume Technical Presentations, pages 309–317. NASA SP-351, NASA, Washington, D.C.
- Royo, I. (2015). Change detection analysis of north morocco land cover using ndvi and ndwi on satellite images tm landsat 4-5 ; since 1987 to 2011.
- Rubin, D. (1987). *Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Schroeder, T. A., Cohen, W. B., Song, C., Canty, M. J., and Yang, Z. (2006). Radiometric correction of multi-temporal landsat data for characterization of early successional forest patterns in western oregon. *Remote Sensing of Environment*, 103 :16–26.
- Sciama, Y. (2008). *Le changement climatique : une nouvelle ère sur la terre. 2 édition.*, La petite encyclopédie Larousse , France.
- Sebbar, A. (2013). *Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935-2005) : Réactualisation de la carte des précipitations*. PhD thesis, Université Hassan II Mohammedia – Casablanca.

- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324) :1379–1389.
- Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., and Verbist, K. (2018). Satellite remote sensing for water resources management : Potential for supporting sustainable development in data-poor regions. *Water Resources Research*, 54(12) :9724–9758.
- Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L. K., and Nathawat, M. S. (2015). A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5) :1779–1792.
- Soares-Filho, B. S., Cerqueira, G. C., and Pennachin, C. L. (2002). DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154 :217–235.
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., and Macomber, S. A. (2001). Classification and change detection using landsat TM data : When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 27(230) :244.
- Stagl, J., Mayr, E., Koch, H., Hattermann, F., and Huang, S. (2014). *Managing Protected Areas in Central and Eastern Europe Under Climate Change*, volume 58 of *Advances in Global Change Research 58*, chapter Effects of Climate Change on the Hydrological Cycle in Central and Eastern Europe. Springer Netherlands, 1 edition.
- Taylor, R., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P. J.-F., Holman, I., and Treidel, H. (2012). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4) :322–329.
- Tian, S., Zhang, X., Tian, L., and Sun, O. (2016). Random forest classification of wetland landcovers from multi-sensor data in the arid region of xinjiang, china. *Remote Sensing*, 8(11) :954.
- Toure, S., Diop, O., Kpalma, K., and Maiga, A. (2019). Shoreline detection using optical remote sensing : A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2) :75.
- Toutin, T. (2010). Review article : Geometric processing of remote sensing images : models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10) :1893—1924.
- Tramblay, Y., Badi, W., Driouech, F., El Adlouni, S., Neppel, L., and Servat, E. (2012). Climate change impacts on extreme precipitation in morocco. *Global and Planetary Change*, 82-83 :104–114.
- Tramblay, Y., Ruelland, D., Bouaicha, R., and E., S. (2014). Projected climate change impacts on water resources in and northern morocco and with an ensemble of regional climate models. In *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, volume 363, pages 250–255.

- Tramblay, Y., Ruelland, D., Somot, S., Bouaicha, R., and Servat, E. (2013). High-resolution med-cordex regional climate model simulations for hydrological impact studies : A first evaluation of the aladin-climate model in morocco. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 :3721–3739.
- Tsagris, M., Alenazi, A., Verrou, K.-M., and Pandis, N. (2019). Hypothesis testing for two population means : parametric or non-parametric test? *Journal of Statistical Computation and Simulation*, pages 1—19.
- Usgs, T. (2018). United states geological survey earth explorer. Available online : <https://earthexplorer.usgs.gov>. (accessed on 7 April 2018).
- van Buuren, S. (2012). *Flexible Imputation of Missing Data*. New York : Chapman and Hall/CRC.
- Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Planells, M., Dejoux, J.-F., and Ceschia, E. (2017). Understanding the temporal behavior of crops using sentinel-1 and sentinel-2-like data for agricultural applications. *Remote Sensing of Environment*, 199 :415–426.
- Vermote, E., Tanre, D., Deuze, J., Herman, M., and Morcrette, J. (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6s : An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3) :675–686.
- Wetensch., G. N. A., editor (1950). *A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis*.
- Yozgatligil, C., Aslan, S., Iyigun, C., and Batmaz, I. (2012). Comparison of missing value imputation methods in time series : the case of turkish meteorological data. *Theoretical and Applied Climatology*, 112(1-2) :143–167.
- Zhang, X., Tang, Q., Zhang, X., and P. Lettenmaier, D. (2014). Runoff sensitivity to global mean temperature change in the CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, 41(15) :5492–5498.