



HAL
open science

Résilience aux changements climatiques : reconversion du système d'irrigation gravitaire au système d'irrigation localisée en zone semi-aride

Abdelhaq Boundi

► **To cite this version:**

Abdelhaq Boundi. Résilience aux changements climatiques : reconversion du système d'irrigation gravitaire au système d'irrigation localisée en zone semi-aride. Sciences de l'environnement. Faculté des sciences et techniques de Béni Mellal; Université Moulay Slimane-Maroc, 2021. Français. NNT : . tel-04540018

HAL Id: tel-04540018

<https://theses.hal.science/tel-04540018v1>

Submitted on 10 Apr 2024

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.

Public Domain



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES BÉNI MELLAL



Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques
Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Santé

THESE

Présentée par

Abdelhaq BOUNDI

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Discipline : Biologie

Spécialité: Sciences de l'Eau

***Résilience aux changements climatiques : reconversion du système
d'irrigation gravitaire au système d'irrigation localisée en zone semi-aride***

Soutenue le Samedi 09/01/2021 à 10h devant la commission d'examen :

Pr. Nadra LEKOUCH	Faculté des Sciences et techniques- Béni Mellal	Président
Pr. Brahim LEKHLIF	Ecole Hassania des Travaux Publics-Casablanca	Rapporteur
Pr. Abdelali BOULLI	Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal	Rapporteur
Pr. Aziz HASIB	Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal	Rapporteur
Pr. Azeddine SEDKI	Faculté des Sciences Semlalia – Marrakech	Examineur
Pr. Samira KRIMISSA	Faculté Polydisciplinaire – Béni Mellal	Examinatrice
Pr. Zehor AIT YACINE	Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal	Directeur de thèse

Avant-propos

Le présent travail de recherche revêt un caractère appliqué, dans le cadre de l'ouverture de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, relevant de l'Université Sultan Moulay Slimane (Maroc), sur son environnement régional de vocation agricole d'excellence.

Cette recherche compte à valider au niveau régional les concepts universels des changements climatiques spécifiques aux zones agricoles vulnérables, avec la focalisation sur un espace potentiel de la production de biomasse végétale, situé sur l'étage bioclimatique semi-aride ; à savoir le périmètre agricole irrigué de Tadla, afférent au territoire marocain. Vu que cette zone se profile aussi par la raréfaction croissante de ses ressources en eau mobilisables à des fins d'irrigations d'appoint aux cultures pratiquées.

Dans cette optique, il est étudié les modalités de la résilience des cultures exploitées concernant la rationalisation de la satisfaction de leurs besoins en eau, moyennant des techniques innovantes. En effet, il est objet de caractériser à l'échelle locale les variabilités spatio-temporelles agro-climatiques. Ce qui est associé à des expérimentations culturelles in situ, afin de déterminer les besoins actuels en eau d'irrigation des cultures stratégiques.

En ultime tâche, il est émis des projections sur les exigences hydriques végétales pour les prochaines décennies, raisonnées selon le système d'irrigation gravitaire, actuel et classique et aussi en fonction du système d'irrigation localisée, plus efficace et innovant pour la reconversion du premier. L'approche est approfondie en considérant la pénurie récurrente des ressources en eau, d'une manière conjuguée aux manifestations éventuelles des futurs changements climatiques.

. *Dédicaces*

A la mémoire de mon défunt père **Abderrahmane**, qui nous a quitté à mi-chemin de la réalisation de ce travail, la personne tant regrettée pour son insistance à approfondir mes études académiques et par sa singularité de son engouement à l'éducation de ses proches, en déployant tous ses moyens disponibles et avec vif encouragement à la quête de meilleures performances studieuses. Pour ses aspirations tant chères, qu'aurais-je souhaitées qu'il ait été parmi nous au jour de la soutenance de cette thèse. Que Dieu te soit miséricordieux et que ton âme repose en paix. Merci bien pour tes sacrifices qui n'étaient pas en vain et vont encore perdurer.

En l'honneur à ma chère mère **Zahra**. La grande militante de la famille à coté de mon regretté père, que je ne trouve pas les mots convenables pour t'exprimer ma reconnaissance et mes remerciements, pour ta surveillance de l'éducative rigoureuse, pour moi et pour les autres frères et la regretté sœur-ainée, en m'inciter à mon âge actuel à maintenir le cap de l'attitude sérieuse professionnelle. Merci infiniment. Que Dieu te garde et t'accorde longue vie.

A ma conjointe **Atika**, pour t'exprimer mon fort attachement et ma reconnaissance à notre vie commune pleine d'amour, de gentillesse et de tendresse, dont tu m'as toujours entouré, chère épouse. Tacherais-je bien d'éprouver l'expression de grande sagesse aux conditions favorables assurées à domicile, pour mener à bien ce travail époustouflant ; notamment, pour ta grande patience à supporter mes fréquentes activités au foyer, souvent à caractère nocturne. Merci pour le fort appui à l'avènement de ce sacre. Dieu te protège et te concède longue vie.

A mon très cher fils **Housni**, interpellé à prendre le relais des études universitaires approfondies, pour leur valeur immatérielle non estimée, ainsi qu'à mon adorable fille **Fatima Ezzahra**. A tous mes très chers frères, pour citer **Dr Mohamed**, le sociologue qui a amplement contribué par ses conseils pertinents en méthodologie doctorale, ainsi que les motivateurs autres frères : **Abderrahim, Abdelmajid et Abdelkebir**. Egalement des membres spéciaux de ma belle-famille sont mémorisés pour leur soutien moral, dont les honorables: **Mohamed, Khadouj et Najiba**.

Vivement, j'attribue ma reconnaissance à tous mes camarades de l'entourage du travail professionnel et à mes illustres collègues de la formation doctorale pour leur entraide mutuelle à caractères collégial et convivial dans le souci de donner le meilleur.

Remerciements

La présente thèse n'a effectivement atteint terme que suite à l'importante contribution collégiale de diverses parties sollicitées, sont biens remerciées pour avoir mis à notre disposition les données et les informations pertinentes et aussi aux facilités accordées à nos investigations, à nos enquêtes sur terrain et aux traitements statistiques numériques afférents.

Je saisis l'opportunité pour remercier infiniment tous les membres de jury, engagés dans la lourde tâche de la restitution finale de ce travail de recherche. La reconnaissance est cordiale envers Monsieur le Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal, le Professeur Said MELLIANI, pour le support scientifique éminent de son établissement universitaire. Aussi, nos vifs remerciements sont accordés aux chercheurs de l'Equipe du Génie de l'Environnement, de même à l'égard du staff du Centre des Etudes Doctorales.

J'exprime ma profonde gratitude au Directeur de la thèse, le Professeur Zehor AIT YACINE, enseignante-chercheuse à la FST de Béni Mellal, pour son encadrement à la hauteur de cette thèse, avec la diligence d'une illustre spécialiste en la matière. En l'occurrence, m'ont été magistrales ses orientations, les fruits de longues expériences académiques, confirmées et multidisciplinaires; tels aux domaines des sciences de la vie, de protection de l'environnement, d'agro-industrie et des sciences de l'eau. Je cite en l'occurrence ses motivations incessantes à participer aux manifestations scientifiques programmées, notamment par des établissements universitaires de notre proximité.

Aussi, mon témoignage est sincère avec mes remerciements les meilleurs à mon établissement d'exercice professionnel actuel, l'Office Régional de la Mise en Valeur Agricole du Tadla, au nom de son respectueux et motivant, Monsieur le Directeur Hssain RAHAOUI, ainsi que pour ses collaborateurs honorables consultés lors du déroulement de ce travail, MM: les Chefs des Départements : Mohamed SAAF, Abdelkrim ELABED, Abderrahim KOBRI; les Chefs des Services: Mohamed MISSOURE, Mohamed BELRABI, Benacer RACHIDI, Mohamed TAZROUTI, Othmane ALAOUI, Houda CHEIKH et Khaled ASSEMI. Pour leur soutien, notre reconnaissance est exprimée à Mr Sidimoh CHARIF, responsable de la Station des Expérimentations Hydro-Agricoles d'Ouled Gnaou et aussi à Mr Abdelatif LOTFI, superviseur des réseaux agro-météorologiques automatiques du périmètre de Tadla. Notre estime est également pour leur appui aux autres collaborateurs(trices) à ce travail, qui constituent une longue liste.

Je remercie vivement toute personne ayant oeuvré à la publication de nos articles scientifiques dans des revues scientifiques indexées. A ce sujet, est évoqué pour ses conseils, le respectueux Professeur Belkheir HAMMOUTI, à l'Université Mohamed 1er d'Oujda. Autant, sont fraternellement salués mes co-auteurs de nos articles publiés.

Sommaire

Avant-propos

Dédicaces

Remerciements

Liste des abréviations

Listes des figures

Listes des tableaux

Résumé

Abstract

ملخص

INTRODUCTION	1
PARTIE I :SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
Chapitre I : EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAU EN AGRICULTURE SOUS CHANGEMENTS CLIMATIQUES	4
I-Notion des changements climatiques	4
II-Cadre mondial de changements climatiques en relation avec les ressources en eau en agriculture de productions végétales	4
III-Variabilités agro-climatiques	5
Chapitre II : IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES SYSTEMES AGRICOLES DE PRODUCTION VEGETALE	31
I-Manifestations des changements climatiques en interactions climat-sol-plante	31
II-Impacts et mesures anti-changements climatiques sur les productions végétales	32
Chapitre III : REPONSE A LA REDUCTION DE L'EAU D'IRRIGATION : BESOINS HYDRIQUES ET VARIABILITES DES EFFICIENCES D'UTILISATION DE L'EAU PAR LES CULTURES	40
I-Notions d'efficience et de valorisation de l'eau d'irrigation par les cultures	40
II-Niveaux des consommations et des efficacités de l'utilisation d'eau par les cultures en situation normale et en situation de déficit hydrique par systèmes d'irrigation usuels	48
III-Evaluations des besoins en eau des cultures par techniques d'avertissement à l'irrigation	62
Chapitre IV : PROCESSUS DE LA RECONVERSION EN SYSTEME D'IRRIGATION A ECONOMIE DE L'EAU : CAS DU PERIMETRE AGRICOLE DE TADLA	66
I-Historique sur l'adoption du système d'irrigation classique au périmètre de Tadla	66
II-Retour d'expériences en innovations d'économie d'eau testées sur le système d'irrigation classique	68
III-Choix du système d'irrigation localisée dans le processus de reconversion du mode d'irrigation classique au périmètre de Tadla	70
IV-Genèse, conception et prescriptions du projet de la reconversion collective en système d'irrigation localisée au périmètre de Tadla	74
PARTIE II : ZONE D'ETUDE, DONNEES EXPLOITEES, MATERIEL ET METHODES	89
Chapitre I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET LA BASE DE DONNEES EXPLOITEES	90
I-Présentation de la zone d'étude	90
II-Description et agencements de la base de données	93
Chapitre II : METHODES ADOPTEES	95
I-Démarche méthodologique du travail de recherche	95
II-Inventaire des méthodes adoptées au travail de recherche	95
PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS	99

Chapitre I : ETUDE DE LA VARIABILITE DU REGIME PLUVIOMETRIQUE AU PERIMETRE DE TADLA	100
I-Caractéristique des précipitations annuelles au périmètre de Tadla.....	100
II-Variabilité pluviométrique annuelle au périmètre de Tadla.....	101
III-Tendance des précipitations annuelle au périmètre de Tadla	111
Chapitre II : ETUDE DES SAISONNALITES DES PRECIPITATIONS AU PERIMETRE DE TADLA	117
I-Tests statistiques préliminaires sur les données pluviométriques périodiques précédant les tests de tendance des distributions.....	117
II-Evaluation de tendance des précipitations périodiques.....	118
III-Relations chronologiques tendancielle entre les variables périodiques des précipitations	118
IV-Sens géodésique de tendance des précipitations périodiques	124
V-Analyses de tendance des saisonnalités des précipitations par la méthode de l'ACP	127
Chapitre III : VARIABILITES THERMIQUE ET DE DEMANDE CLIMATIQUE EN EVAPORATION AU PERIMETRE DE TADLA	136
I-Descriptifs thermique et de la demande climatique en évaporation au périmètre de Tadla.....	136
II-Résultats des tests de tendance thermique et de la demande climatique en évaporation	139
III-Caractérisation de tendance thermique et de la demande climatique en évaporation pour le périmètre de Tadla	145
IV-Bilan hydrique au sol au périmètre de Tadla	157
Chapitre IV : VARIABILITE EN NIVEAU D'ARIDITE AU PERIMETRE DU TADLA	161
I-Diagrammes de Gaussen.....	161
II-Indice de De Mritone	161
III-Quotient d'Emberger	161
Chapitre V : CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET IMPACTS SUR LES BESOINS EN EAU D'IRRIGATION DES CULTURES AU PERIMETRE DE TADLA	167
I-Résultats des enquêtes agricoles auprès des agriculteurs sur l'usage comparatif des deux systèmes d'irrigation gravitaire et localisée.	167
II-Evaluation des besoins nets actuels en eau des cultures du périmètre de Tadla.	169
III-Evaluation de besoins bruts actuels en eau d'irrigation et performances agronomiques liées à l'eau pour cultures du périmètre de Tadla.....	171
IV-Détermination de l'efficiences d'application de l'eau à la parcelle pour les systèmes d'irrigation gravitaire et localisée au périmètre de Tadla	180
V-Occupation du sol par les cultures et intensification culturelle en relation avec la source d'eau d'irrigation au périmètre de Tadla	181
VI-Projections alternatives à long terme des besoins en eau d'irrigation des cultures au périmètre de Tadla	185
DISCUSSIONS	191
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	197
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	200
ANNEXES	

Liste des abréviations

• ACP	:	Analyse en composantes principales
• AH	:	Station météorologique Ahl Souss
• AUEA	:	Association des usagers d'eau agricole
• CIRAD	:	Centre internationale de la recherche agronomique et de développement
• DJF	:	Période « Décembre-Janvier-Février »
• E.M.	:	Etage bioclimatique méditerranéen
• EUE	:	Efficiencce de l'utilisation d'eau
• ETo	:	Evapo-transpiration de référence
• ETM	:	Evapotranspiration maximale
• ETR	:	Evapotranspiration réelle
• Ev.	:	Evaporation en bac
• FAO	:	Organisation mondiale de l'agriculture et de l'alimentation
• FBS	:	Station météorologique de Fkih Ben Salah
• GIEC	:	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
• ICRA	:	Centre international de la recherche agricole et de développement
• IDP	:	Indice de déficit pluviométrique
• IDW	:	Indice inverse de poids de distance
• LM.	:	Indice d'aridité de De Maritonne
• INRA	:	Institut national de la recherche agronomique
• IPS	:	Indice standardisé des précipitations
• JJA	:	Période « Juillet-Août-Septembre »
• K_b	:	Coefficient de la correction d'évaporation en bac
• K_c	:	Coefficient cultural
• MA	:	Station météorologique Mabrouk Ali
• MAM	:	Période « Mars-Avril-Mai »
• M	:	Unité au million
• M.S.	:	Matière sèche
• NDVI	:	Indice normalisé végétatif en télédétection spatiale
• OG	:	Station de mesures pluviométriques d'Ouled Ganou
• ORMVA	:	Office régionale de mise en valeur agricole
• PB	:	Prise bloc au réseau de reconversion collective à l'irrigation localisée
• PDAIRE	:	Plan directeur d'aménagement intégré des ressources en Eau
• PNEEI	:	Programme national de l'économie de l'eau d'irrigation
• PP	:	Prise propriété au réseau de reconversion collective à l'irrigation localisée
• Q.E.	:	Quotient d'aridité d'Emberger
• Qx	:	Quintaux
• RFU	:	Réserve facilement utilisable en eau
• RU	:	Réserve utilisable en eau
• SAU	:	Superficie agricole utile
• SIG	:	Système d'information géographique
• SON	:	Période « Septembre-Octobre-Novembre »
• T.I.C.	:	Taux d'intensification cultural
• SEHA	:	Station des expérimentations hydro-Agricoles
• SemH	:	Semestre humide (de Septembre à Février)
• SemS	:	Semestre Sec (de Mars à Août)

Liste des figures

Figure 1 : Evolution mondiale de la variation thermique sur la période de 1880-2019.....	15
Figure 2 : Schéma des acheminements de l'eau et les étapes de détermination des efficacités.....	42
Figure 3 : Potentiel en superficies susceptibles à la reconversion en système d'irrigation en zone des Béni Moussa au périmètre de Tadla	80
Figure 4 : Secteurs prioritaires de reconversion collective en irrigation localisée au périmètre de Tadla	81
Figure 5 : Situation géographique de la zone d'étude et localisation des stations de mesures pluviométriques	91
Figure 6: Evolution des précipitations annuelles moyennes avec marge de variations et courbe de tendance en affichant équation de la droite de régression linéaire pour le périmètre du Tadla de 1958 à 2018.	101
Figure 7 : Evolution de l'indice des précipitations standardisé (IPS) au périmètre du Tadla de 1958 à 2018.	103
Figure 8 : Schématisation des données de l'indice pluviométrique par la méthode du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 au périmètre de Tadla sur période 1958 à 2018.....	105
Figure 9 : Evolution de l'indice en filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 de la pluviométrie annuelle aux deux stations repères Ahl Souss et Ouled Gnaou au périmètre de Tadla de 1958 à 2018.	106
Figure 10 : Chronogramme des ruptures pluviométriques selon les méthodes d'homogénéisation	112
Figure 11 : Evolution des précipitations annuelles en avant et après la rupture chronologique des précipitations au périmètre de Tadla pour la période de 1958 à 2018.	112
Figure 12 : Rupture chronologique pluviométrique avec classification de pluies annuelles avec rapprochements à l'Indice des Précipitations Standardisés (IPS) au périmètre de Tadla	114
Figure 13 : Carte pluviométrique en avant rupture de la chronologie de précipitations au périmètre de Tadla en période de 1958 à 1978	116
Figure 14 : Carte pluviométrique en après rupture de la chronologie de précipitations au périmètre de Tadla en période de 1979 à 2018	116
Figure 15 : Arborescence chronologique des tendances des précipitations périodiques mensuelles (Septembre à Août), trimestrielles, semestrielles et annuelle au périmètre de Tadla.....	124
Figure 16 : Les positions géodésiques des tendances de précipitations périodiques (mensuelles, trimestrielles, semestrielles et annuelles) au périmètre du Tadla	125
Figure 17 : Tracé d'effondrement de valeurs propres en axes de l'ACP sur les variables périodiques de tendances des précipitations au périmètre de Tadla.....	130
Figure 18 : Cercle des corrélations de l'ACP pour les variables périodiques de tendances de précipitations au périmètre de Tadla (Période de 1958 à 2018)	132
Figure 19 : Tracé-double d'ACP en tendance des précipitations périodiques au périmètre de Tadla	133
Figure 20 : Régionalisation de tendances périodiques de précipitations au périmètre du Tadla.....	134
Figures 21 : Evolution de température moyenne annuelle au périmètre de Tadla	136
Figures 22: Evolution de température maximale moyenne annuelle au périmètre de Tadla	137
Figures 23: Evolution de température minimale moyenne annuelle au périmètre de Tadla	137
Figures 24 : Evolution de l'évapo-transpiration de référence moyenne annuelle au périmètre du Tadla	139
Figures 25 : Graphiques des ruptures temporelles pour paramètres : Température maximale (<i>graphique A</i>), Température minimale, Température moyenne, ETo au périmètre de Tadla.....	145
Figures 26 : Tendance de température minimale au périmètre du Tadla en avant/près rupture chronologique	146

Figures 27: Cartes de tendance spatio-temporelle de la température minimale en avant (<i>Carte A</i>) et en après rupture chronologique (<i>Carte B</i>) au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1970 à 2018).....	147
Figures 28: Tendances de température max. au périmètre du Tadla en avant/après rupture chronologique ...	148
Figures 29: Cartes de tendance spatio-temporelle de la température maximale en avant (<i>Carte A</i>) et en après rupture chronologique (<i>Carte B</i>) au périmètre de Tadla	149
Figures 30 : Tendances de température moyenne au périmètre du Tadla en avant/rupture chronologique ...	150
Figures 31: Cartes de tendance spatio-temporelle de la température moyenne en avant (<i>Carte A</i>) et en après rupture chronologique (<i>Carte B</i>) au périmètre de Tadla	151
Figures 32 : Courbes de régression de relation « Année-Pluviométrie mensuelle » au périmètre de Tadla de Septembre à Février	152
Figures 33 : Courbes de régression de relation « Année-Pluviométrie mensuelle » au périmètre du Tadla définie de Mars à Août	153
Figure 34 : Tendances d'évapo-transpiration de référence au périmètre du Tadla en avant/après rupture chronologique	154
Figures 35: Cartes de tendance spatio-temporelle de l'évapo-transpiration de référence en avant (<i>Carte A</i>) et en après rupture chronologique (<i>Carte B</i>) au périmètre de Tadla	155
Figures 36 : Courbes de régression Température-Evapotranspiration au périmètre de Tadla :Sept.- Fév. ...	156
Figures 37 : Courbes de régression Température-Evapotranspiration au périmètre de Tadla :Mar.-Août ...	157
Figures 38 : Tendance des bilans hydriques au sol mensuels le périmètre de Tadla en avant-rupture (<i>graphe A</i>) et en après-rupture (<i>graphe B</i>) chronologique de la pluie et de l'ETo	159
Figures 39 : Tendance de la variabilité du bilan hydrique au sol cumulatif d'une manière comparative entre l'avant/après rupture chronologique de paramètres agro-climatiques au périmètre de Tadla	160
Figure 40 : Diagrammes de Gaussen au périmètre de Tadla aux niveaux des stations agro-climatiques Ouled Gnou (<i>graphes A à C</i>) et Ahl Souss (<i>graphes D à F</i>)	162
Figure 41 : Diagrammes de Gaussen au périmètre de Tadla aux niveaux des stations agro-climatiques Mabrouk (<i>graphes A à C</i>) et Fkih Ben Salah (<i>graphes D à F</i>)	163
Figures 42: Tendance de l'indice mensuel d'aridité de De Maritonne au périmètre de Tadla	164
Figures 43 : Cartes d'évolution spatio-temporelle de l'aridité au périmètre du Tadla entre l'avant (<i>graphe A</i>) et l'après (<i>graphe B</i>) de la rupture chronologique sur paramètres agro-climatique	165
Figure 44: Illustrations d'essais culturaux de céréaliculture et de la betterave à sucre en station SEHA-OG.	174
Figure 45 : Illustrations d'essais culturaux de luzerne et betterave à sucre en station SEHA-Ouled Gnaou ..	176
Figure 46 : Illustrations d'essais culturaux du maïs et maraichage en station SEHA-Ouled Gnaou.....	178
Figure 47 : Carte d'occupations du sol en mi-Juillet 2014 en zone des réseaux M4-M7 du périmètre de Tadla, en avant-projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée.....	183
Figure 48 : Carte d'occupations du sol en mi-Juillet 2018 en zone des réseaux M4-M7 du périmètre de Tadla, en après-projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée.....	183

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractérisation des changements climatiques dans l'espace Sud de la Méditerranée et en Afrique de l'Ouest.....	5
Tableau 2 : Projections des précipitations au Nord du Maroc à différents horizons du 21ème siècle	14
Tableau 3 : Caractéristiques thermiques de la zone du bassin hydraulique Oum Er Rbia (Maroc).....	16
Tableau 4 : Projections des températures au Nord du Maroc selon le modèle climatique MAGICC afférent au GIEC.....	18
Tableau 5 : Evapo-transpirations cumulatives périodiques pour différentes dates des semis de la culture des blés en régions céréalières potentielles du Maroc	22
Tableau 6 : Cumuls d'évapotranspiration maximale (ETM) de la culture de la betterave à sucre en fonction de la précocité variétale et la date de semis aux grands périmètres irrigués du Maroc.....	22
Tableau 7 : Evolution du couvert végétal au niveau de la plaine du Tadla entre les années 1984 et 2015 dont les superficies déterminées par la télédétection spatiale sur la base de l'indice NDVI.....	28
Tableau 8 : Evolution de l'occupation des sols au périmètre irrigué de Tadla, évaluée par la télédétection spatiale avec l'indice NDVI pour la campagne 2017/2018.....	28
Tableau 9 : Risques potentiels des changements climatiques sur les ressources en eau pour l'agriculture et les redressements proposés.....	36
Tableau 10 : Programme prioritaire du gouvernement marocain restructurant le processus de l'exploitation des eaux pour la période de 2019-2026- Volet du secteur agricole	37
Tableau 11 : Modalités des mesures d'évaluation des volumes d'eau en relation avec la détermination des efficacités d'irrigation	43
Tableau 12 : Efficacités d'eau des systèmes d'irrigation usuels à différents sites mondiaux et pour principales cultures	46
Tableau 13 : Données référentielles des efficacités des irrigations aux périmètres irrigués en grande hydraulique au Maroc.....	47
Tableau 14 : Consommations et efficacités agronomiques d'utilisation d'eau pour la culture du blé sous régimes de déficit hydrique aux grands périmètres irrigués du Maroc	49
Tableau 15 : Résultats des expérimentations comparatives de trois systèmes d'irrigation usuels (localisée, aspersion et gravitaire) sur la culture de la betterave à sucre (<i>Beta vulgaris</i> L.) au périmètre de Tadla (Maroc).....	51
Tableau 16 : Résultats des expérimentations comparatives sur les trois systèmes d'irrigation usuels (localisée, aspersion et gravitaire) sur la culture de la Betterave à sucre (<i>Beta vulgaris</i> L.) au périmètre du Tadla – « Aspect de la marge bénéficiaire et de l'efficacité économiques en utilisation de l'eau d'irrigation »	51
Tableau 17 : Effets des régimes du déficit hydrique sur consommation et efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau de la culture de la Betterave à sucre (<i>Beta vulgaris</i> L.) aux grands périmètres irrigués du Maroc.	52
Tableau 18 : Consommations et efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau pour la culture de la Betterave à sucre (<i>Beta vulgaris</i> L.) sous des régimes de déficit hydrique en fonction du niveau de stockage de l'eau au sol.....	53
Tableau 19 : Consommations et efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau pour la culture de la luzerne (<i>Medicago sativa</i> L.) sous des régimes de déficit hydrique aux niveaux de grands périmètres irrigués du Maroc.....	54
Tableau 20 : Consommations et efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau pour la culture du maïs (<i>Zea mays</i> L.), sous régimes de déficit hydrique en comparaison des systèmes d'irrigation gravitaire et localisée aux grands périmètres irrigués du Maroc.....	55
Tableau 21 : Consommations et efficacités agronomiques d'utilisation d'eau pour la culture du maïs (<i>Zea mays</i> L.), en fonction de la gestion des irrigations appuyée sur le stockage de l'eau dans le sol situé sur étage bioclimatique semi-aride.....	56
Tableau 22 : Effets du déficit hydrique sur la performance agronomique de la culture du piment rouge (<i>Capsicum annum</i> L.) conduite sous l'irrigation localisée.	57
Tableau 23 : Effets du régime de la réduction d'eau en système d'irrigation gravitaire sur les performances agronomiques de la culture de l'oignon de saison (<i>Allium cepa</i> L.) au périmètre de Tadla.....	58
Tableau 24 : Effets de la réduction hydrique sur la performance agronomique de la culture de l'oignon (<i>Allium cepa</i> L.) conduite sous l'irrigation localisée en zone à climat semi-aride de la Chine.....	59
Tableau 25 : Consommation hydrique et efficacité agronomiques sous régime en pour le verger d'oliviers en comparaison des deux systèmes d'irrigation gravitaire et localisée au niveau du périmètre irrigué du Haouz (Maroc)	60
Tableau 26 : Consommations hydriques et efficacités agronomiques d'utilisation de l'eau pour les vergers d'oliviers en zone méditerranéenne sous le système d'irrigation localisée et soumis à différents régimes du déficit en eau.....	61

Tableau 27: Tests de déficits hydriques sur le jeune verger d'agrumes conduit sous le système d'irrigation localisée au périmètre irrigué du Souss (Maroc).....	62
Tableau 28: Modèles de procédés de l'avertissement à l'irrigation	63
Tableau 29: Modèles de logiciels utilisés dans le processus de l'avertissement à l'irrigation sur le territoire français.....	64
Tableau 30 : Apports d'eau, performance productive agricole et efficience agronomique par outils de l'avertissement en irrigation et par stade de développement de la culture de la pomme de terre au périmètre du Loukous (Maroc).....	65
Tableau 31 : Inventaire d'innovations sur économie d'eau à la parcelle testées sur système d'irrigation gravitaire au périmètre de Tadla	69
Tableau 32 : Expérimentations de comparaison au périmètre du Tadla entre le système d'irrigation gravitaire (technique anciennement adopté) et le système d'irrigation localisée (innovation technique sous test)	73
Tableau 33 : Tranches d'exécution des aménagements de la reconversion collective à l'irrigation localisée avec la répartition par zones des associations professionnelles AUEA et par sources de financement du projet au périmètre de Tadla	80
Tableau 34 : Modèles des configurations et des principes de fonctionnements des équipements hydroagricoles de la 1 ^{ère} tranche du projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla	83
Tableau 35 : Variabilités projetées des assolements culturaux annuels entre avant et après projet de reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla	85
Tableau 36: Rendements moyens annuels comparatifs entre les situations de départ et les situations projetées à l'achèvement du projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla	85
Tableau 37 : Niveaux productifs comparatifs moyens annuels entre les situations de départ et les situations des projections après le projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla	86
Tableau 38 : Récapitulatif des réalisations en cours de travaux du projet de la reconversion à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla, en fin de l'exercice 2019.....	87
Tableau 39 : Identification et caractérisation des stations des mesures pluviométriques.....	94
Tableau 40 : Stations des mesures de température et de l'évapotranspiration de référence au périmètre de Tadla.....	94
Tableau 41: Identifications et caractérisation des stations de mesures pluviométriques sources de données pour l'étude	100
Tableau 42 : Seuils à la sécheresse, intervalles de confiance pluvieux, écarts à la normale en pluviométrie et fréquences selon la pluviosité des années au périmètre de Tadla en période de 1958 à 2018.	102
Tableau 43 : Résultats du test statistique de tendance pluviométrique par méthode de Mann-Kendall	106
Tableau 44 : Résultats du test statistique de tendance pluviométrique par méthode de Sen's	107
Tableau 45 : Résultats du test de Pettitt de détection de rupture chronologique de pluviométrie	108
Tableau 46 : Résultats du test de Buishand sur chronologie pluviométrique.....	109
Tableau 47 : Résultats du tests de détection de rupture de Lee et Heghinian	110
Tableau 48 : Résultats de la segmentation de Hubert sur les séries pluviométriques.....	110
Tableau 49 : Classification des pluviométries annuelles pour les stations de mesures selon les périodes d'avant et d'après ruptures ayant été détectées par les tests statistique d'homogénéité	113
Tableau 50 : : Résultats des tests de tendance de Mann-Kendall et de Sens's sur les variables pluviométriques mensuelles de Septembre à Mai par station agro-météorologique au périmètre de Tadla	119
Tableau 51 : : Tests de tendance de Mann-Kendall et de Sens's sur variables pluviométriques mensuelles de Juin à Août, trimestrielles, semestrielles et annuelles par stations pluviométriques du périmètre de Tadla	120
Tableau 52 : Classification des tendances des précipitations mensuelles au périmètre de Tadla	121
Tableau 53 : Recueil en tendance des précipitations trimestrielles, semestrielles et annuelles pour le périmètre de Tadla	122
Tableau 54 : Affectations de tendance de précipitations périodiques en fonction du sens géographique	126
Tableau 55 : Sélections successives des variables périodiques des précipitations au périmètre de Tadla.....	127

Tableau 56 : Matrice des corrélations de variables périodiques de tendances de précipitations au périmètre de Tadla ..	128
Tableau 57 : Evaluation de l'ACP par l'indice KMO et test de Bartlett sur variables périodiques de précipitations au périmètre de Tadla	129
Tableau 58 : Valeurs propres et composantes d'ACP sur tendance de précipitations périodiques au périmètre du Tadla	129
Tableau 59 : Valeurs de composantes, qualités de représentation et contributions en ACP pour les variables périodiques des précipitations au périmètre de Tadla	130
Tableau 60 : 1 ^{er} groupement géographique des sites des stations pluviométriques en fonction des variables des tendances des précipitations périodiques, selon l'ACP au périmètre de Tadla	133
Tableau 61 : 2 ^{ème} groupement géographique des sites des stations pluviométriques en fonction des variables des tendances des précipitations périodiques, selon l'ACP au périmètre du Tadla.....	134
Tableau 62 : Températures moyennes annuelles des mois les plus froids et les plus chauds en année au périmètre de Tadla	136
Tableau 63 : Températures extrêmes moyennes de l'année par stations au périmètre de Tadla	138
Tableau 64 : Evapotranspiration de référence (ET _o) annuelle par stations du périmètre de Tadla	138
Tableau 65 : Résultats du test de normalité avant tests d'homogénéité sur séries agro-climatiques au périmètre de Tadla.	139
Tableau 66 : Résultats des tests statistiques de tendance par la méthode de Mann-Kendall sur les indicateurs agro-climatiques au périmètre du Tadla	140
Tableau 67 : Tests de détection de rupture de Pettitt sur les chronologies agro-climatiques au périmètre du Tadla	141
Tableau 68 : Tests de la détection de rupture de Buishand sur les séries temporelles agro-climatiques au périmètre du Tadla	142
Tableau 69 : Tests de détection de rupture de Lee et Heghinian sur séries chronologiques agro-climatiques au périmètre du Tadla	143
Tableau 70 : Segmentation de Hubert appliquée sur les séries temporelles agro-climatiques au périmètre du Tadla.....	144
Tableau 71 : Tendances de la variabilité de la période sèche sur le diagramme de Gaussen au périmètre de Tadla	161
Tableau 72 : Tendance de la variabilité de l'indice d'aridité de De Maritonne au périmètre de Tadla	164
Tableau 73 : Tendances de la variabilité de l'indice mensuel d'aridité de De Maritonne au périmètre de Tadla.....	166
Tableau 74 : Principaux résultats des enquêtes sur l'opération de l'irrigation auprès d'exploitations agricoles du périmètre de Tadla avec la comparaison des systèmes d'irrigation gravitaire et localisée	167
Tableau 75: Besoins nets en eau d'irrigation des principales cultures du périmètre de Tadla	170
Tableau 76 : Résultats des essais culturaux sur céréales d'automne en Station SEHA-Ouled Gnaou au périmètre de Tadla	171
Tableau 77 : Résultats des essais culturaux des techniques d'irrigation sur la betterave à sucre à la Station SEHA-Ouled Gnaou au périmètre de Tadla (1 ^{ère} version)	172
Tableau 78 : Résultats des essais de la réduction d'eau sur la production de la betterave à sucre à la Station SEHA-Ouled Gnaou dans le périmètre de Tadla (2 ^{ème} version)	175
Tableau 79 : Résultats des essais culturaux sur luzerne	175
Tableau 80 : Résultats des essais culturaux sur le Maïs ensilage réalisés à Station SEHA-Ouled Gnaou, périmètre du Tadla	177
Tableau 81 : Résultats d'essais culturaux sur la Pomme de Terre au niveau de la Station SEHA-Ouled Gnaou au périmètre du Tadla.....	179
Tableau 82 : EUE des cultures menées dans le périmètre de Tadla	179
Tableau 83 : Besoins en eau bruts et efficacités des systèmes d'irrigation gravitaire et localisée pour les principales cultures conduites dans le périmètre de Tadla, en se référant aux enquêtes et expérimentations	180
Tableau 84 : Assolements et intensification culturale en relation avec source d'eau d'irrigation au périmètre de Tadla .	182
Tableau 85 : Occupations du sol entre avant/ après projet de reconversion collective à l'irrigation localisée par méthodes comparatives de télédétection spatiale et statistiques terrestres en 2013/14 et en 2017/18 sur zone des réseaux M4-M7 (périmètre de Tadla).....	184
Tableau 86 : Situation actuelle et projections à l'an 2050 des besoins en eau d'irrigation pour principales cultures	186
Tableau 87 : Situation de départ des besoins en eau d'irrigation pour les principales cultures conduites sous le système d'irrigation gravitaire en période de 2014-2018 sur la globalité du périmètre de Tadla.....	188
Tableau 88 : Projections à long-terme des besoins en eau d'irrigation des principales cultures du périmètre de Tadla en comparaison avec situation actuelle de référence aux campagnes de 2014/15 à 2017/18 - <i>Situation projetée au scenario 1</i> : Cultures maintenues sous le système d'irrigation gravitaire en période de 2040-2050	189
Tableau 89 : Projections à long-terme des besoins en eau d'irrigation des principales cultures du périmètre de Tadla en comparaison avec situation actuelle de référence aux campagnes de 2014/15 à 2017/18. <i>Situation projetée au scenario 2</i> : Equipements des parcelles des cultures en après reconversion totale du système d'irrigation gravitaire en système d'irrigation localisée à l'horizon 2050.....	190

Résumé

Les impacts des changements climatiques sur les besoins en eau des cultures en zones vulnérables ont été caractérisés pour une zone semi-aride modèle, à savoir le périmètre irrigué de Tadla. Un espace agricole potentiel sur le territoire marocain, mais plus dépendant à des ressources d'eau en raréfaction. A cet effet, il a été exploité les données agro-climatiques de cette zone pour la période de 1958- 2018 en 28 stations de mesures. Dans ce sens, des expérimentations hydro-agricoles sur les cultures stratégiques ont été menées in situ.

Il est constaté sur base de calculs par l'*Indice Standardisé des Précipitations (IPS)*, des fréquences d'années déficitaires, normales et excédentaires en pluie respectivement de : 33% ; 35% et 32%. Par *test de Mann-Kendall*, il est décelé des tendances à la baisse des précipitations et d'augmentation de la température et d'évapo-transpiration végétale. Aussi, il est repéré des ruptures chronologiques par les *tests d'homogénéité* de: *Pettitt, Lee et Heghinian, Buishand et Hubert*, sur pluviométrie, température, évapo-transpiration du végétal et sur aridité en années respectives de : 1978 ; 1989; 1997; 1995; 1978 et 1988. Après rupture chronologique, la pluviométrie se réduit à 36 %, le réchauffement à 1°C. Le déficit du bilan hydrique au sol s'accroît mensuellement entre Mars et Août et annuellement son cumul passe de -805 à - 1 093 mm/an. La période sèche s'allonge de 43 jours sur le *Diagramme de Gaussen*, l'*Indice de De Maritonne* régresse de 11,2 à 8,6 unités et le *Quotient d'Emberger* de 27,8 à 18,7 points. La cartographie *SIG* spatio-temporelle montre après les ruptures chronologiques précitées, un gradient de dessèchement pluvieux est au sens Ouest-Est et le déplacement des isohyètes de 135 mm/an. Sur carte, le réchauffement atmosphérique et l'élévation de l'ETo, sont plus importants aux parties Sud-Ouest et du Centre-Nord de la zone d'étude ; l'aridité qui est en augmentation, est plus prononcée au Sud-Est de cette zone.

Avec le couplage du *test de Mann-Kendall* et du *test de Sen's*, il est constaté des variations significatives des pluies mensuelles en 9 sur 12 mois de l'année, avec sa hausse en Septembre et sa baisse entre Novembre et Juin. Par méthode *ACP*, il est révélé deux groupements spatiaux pluviométriques homogènes: l'un pour Décembre, Avril, trimestre « Mars-Avril-Mai » et semestres humide-sec; l'autre pour Septembre et Juin.

En l'alternative proposée du maintien de la situation actuelle d'adoption du système d'irrigation gravitaire au périmètre de Tadla, les besoins en eau d'irrigation des cultures à l'horizon 2050 augmenteraient de 8 356 à 11 283 m³ par hectare assolé, soit une élévation de 35%. Dans l'autre alternative de la reconversion totale en système d'irrigation localisée, il y aurait un volume réduit en ces besoins en eau à 7 831 m³/ha, soit à l'inverse une baisse de 6% par rapport à la situation de référence. En conséquence, il est attesté le rôle capital de la substitution du système d'irrigation gravitaire classique par d'autre système efficient d'irrigation localisée, dans le processus projeté de la résilience aux changements climatiques en cas de l'agriculture des productions végétales dans une zone semi-aride.

Mots clés : Changements climatiques, résilience, irrigation localisée, cultures, besoins en eau, périmètre de Tadla.

Abstract

The unavoidable effects of climate change on the water requirements of crops in vulnerable zones call for the characterization of rainfall and evapo-transpiration trends for crops in a model irrigated Tadla perimeter's in Moroccan country, the land a semi-arid climate and have a potential agriculture but with a trend of scarcity water resources. In this fact, it is analyzing the rainfall data of 60 years (to 1958 at 2018) from 27 measuring stations, also thermal and evapo-transpiration reference data (ETo) of 49 years (1969-2018) from four stations are used.

The Standardized Precipitation Index (SPI) in deficit, normal and surplus years: 33%; 35% and 32% respectively. Mann-Kendall's test detects highly significant trends of decreasing precipitation and increasing temperature and evapo-transpiration. Detection of chronological breaks in annual series by tests of homogeneity of : Pettitt, Lee and Heghinian Bayesian, Buishand and Hubert segmentation for rainfall, temperature at minimum, at maximum, at average, evapo-transpiration and De Maritonne aridity index in the respective years of 1978; 1989; 1997; 1995; 1978 and 1988. After these breaks: rainfall is reduced by 36%; reheating by +1°C; monthly water balance increases its deficit from March to August and its cumulative annual total deficit from (-) 805 mm to (-) 1,093 mm. It is the same of annual dry period is extending by 43 days on Gausson diagrams; De Maritonne aridity index decreases to 11.2 at 8.6 and Emberger's quotient from to 27.8 at 18.7. The GIS cartography shows, after a break temporary, a gradient of rainy drying in the West-East direction of the zone, with a translate of isohyets over 135 mm/year, reheating and a increase ETo evapo-transpiration in the South-West and Central-North parts and an accentuation of aridity in the extreme South-East part of the zone.

The two-coupled tests of Mann-Kendall and Sen's show a change in monthly rainfall for 9 out of 12 months in year; with its increase in September and decrease per month from November to June. By PCA method, we have two spatial homogenous rainfall groups: one group from December, April, "March-April-May" quarter and wet and dry semesters; the other group from September and June.

For the year 2050, the 1st scenario projects an increase in the volume of irrigation water requirements with basin irrigation systems from 8,356 to 11,283 m³ per hectare with crop rotation (+35%). The 2nd scenario projects, in the event of total reconversion of the area with localized irrigation system, a decrease in this volume to 7,831 m³/ha, at a deviation of -6% compared to the initial situation in year 2018. Thus is attesting to the major contribution of the highly efficient irrigation system to any long-term resilience process to the impacts of climate change.

Keywords: Tadla perimeter, irrigation, water requirements, crops, climate change, resilience.

ملخص

إن الآثار الفعلية للتغيرات المناخ على الاحتياجات المائية للزراعات في المناطق الأكثر عرضة يستدعي توصيف اتجاهات هطول الأمطار واتجاهات نتح التبخر للزراعات بالنسبة لنموذج الدائرة السقوية لتادلة على صعيد القطر المغربي، والمنطقة ذات مناخ شبه جاف ولديها قدرات زراعية مهمة ولكنها عرضة لمخاطر تواصل ندرة الموارد المائية. في هذا المجال، يتم تحليل بيانات هطول الأمطار لمدة 60 عامًا (من 1958 إلى 2018) على مستوى 27 محطة قياس، ويتم أيضًا استخدام البيانات المرجعية الحرارية والنتح التبخر (ET₀) لمدة 49 عامًا (1969-2018) على مستوى 4 محطات.

مؤشر القياسي المعياري لهطول الأمطار (SPI) في سنوات العجز والعادية والفائضة: 33%؛ 35% و 32% على التوالي. يكتشف اختبار Mann-Kendall اتجاهات شديدة الأهمية لتقليل هطول الأمطار وزيادة درجة الحرارة و نتح التبخر. الكشف عن القطائع الزمنية في السلاسل السنوية باختبارات التجانس لكل من: بيتيت (Pettitt)، بايزيان لولي وهيجينيان (Bayesian de Heghinian et Lee)، وبويشاند (Buishan) و تجزئة هوبيرت (segmentation de Hubert) لسقوط الأمطار، ودرجة الحرارة عند الحد الأدنى، والحد الأقصى، وفي المتوسط، التبخر - النتح ومؤشر الجفاف دو متون (Indice d'aridité De Maritonne) في السنوات المعنية: 1978؛ 1989؛ 1997؛ 1995؛ 1978 و 1988. بعد هذه القطائع الزمنية: انخفض معدل هطول الأمطار بنسبة 36%. ارتفاع حرارة المناخ بمقدار 1 درجة مئوية؛ تزايد الميزان المائي الشهري من عجزه من مارس إلى أغسطس مما يؤدي إلى زيادة العجز السنوي التراكمي للميزان المائي من (-) 805 ملم إلى (-) 1093 ملم. الشأن كذلك بتمدد فترة الجفاف السنوية ب 43 يومًا على صعيد مخططات جاوسين (Diagramme de Gaussen)؛ انخفاض مؤشر الجفاف (Indice d'aridité De Maritonne) من 11.2 إلى 8.6 وحاصل امبرجي (Quotient d'Emberger) من 27.8 عند 18.7. تُظهر خرائط نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، بعد القطيعة الزمنية، تم تنقل موجة التقلص المطر في اتجاه الغرب والشرق للمنطقة، مع تحرك في البعد التساوي المطري ب 135 ملم / سنة، وكذلك لتسخن المناخ مع زيادة نتح-التبخر على مستوى أجزاء الجنوب-الغربي و الوسط-الشمالي و مع الإشارة لزيادة حدة الجفاف في جزء أقصى الجنوب-الشرقي للمنطقة. تغير التساقطات ب 9 شهر من أصل 12 شهرًا في السنة؛ مع زيادتها في سبتمبر وانخفاضها شهرًا من نوفمبر إلى يونيو. و بواسطة منهجية PCA، لدينا مجموعتان جغرافيتين متجانستان في تساقط الأمطار: مجموعة من ديسمبر، أبريل، ربع "مارس - أبريل - مايو" والسداسيتين الرطبة والجافة والمجموعة الأخرى من شتنبر و يونيو.

بالنسبة لأفاق عام 2050، يتوقع حسب السيناريو الأول زيادة في حجم متطلبات مياه الري بنظام الري الانسيابي من 8356 إلى 11283 متر مكعب للهكتار الواحد المجزئ زراعيًا (زيادة 35%) يشتمل السيناريو الثاني، في حالة التحويل الكلي للمنطقة بنظام الري الموضعي، على انخفاض في هذا الحجم المائي إلى 7831 م³ / هكتار، مع انخفاضه بنسبة 6% مقارنة بالوضع الأولي في عام 2018. وهكذا يشهد على المساهمة الفعالة لنظام الري الناجع في أي عملية أو مشروع مرونة أو ملائمة طويلة الأمد في مواجهة تأثيرات التغيرات المناخية.

الكلمات الرئيسية: الدائرة السقوية تادلة، الري، الاحتياجات المائية، الزراعات، التغيرات المناخية، المرونة والملائمة.

INTRODUCTION

Les changements climatiques se répercutent d'une manière effective sur le secteur agricole, par leurs principales manifestations des précipitations, du réchauffement atmosphérique, de la recrudescence de l'élévation de la demande climatique en évaporation et aussi dans la refonte du bilan hydrique au sol (Pulina, 2012 ; G.I.E.C, 2013).

En effet, il est relevé la régression notable dans l'intensité des pluies dans les régions continentales de l'Ouest du Bassin Méditerranéen depuis l'année charnière de 1951 (GIEC, 2007). Sur ce, Il est projeté au Sud de la France à l'horizon 2046-2065 que le paramètre de l'évapo-transpiration de référence augmenterait de 20% avec l'impact du fort risque du stress hydrique pour les cultures pluviales à l'horizon du moyen au long-terme (MEDDE-France, 2012).

En conséquence aux revers climatiques, le bilan hydrique au sol est actuellement dans un état de déficit anormal évolutif et qui est de plus en plus prolongé durant la campagne agricole dans les régions du Nord-Est du pourtour méditerranéen (Murarescu et *al.*, 2017). Aussi dans la partie Ouest méditerranéenne, il est projeté à l'an 2050, précisément sur l'espace marocain, une baisse pluviométrique annuelle de 3% à 30 %, avec un réchauffement de l'air prétendu de 2,3 à 2,9 °C (GIEC, 2013).

Il est à noter, par ailleurs, que la situation s'empire avec l'irrationalité qu'à l'échelle mondiale pour la satisfaction des besoins courants en eau des cultures par les irrigations d'appoint, sachant que pour environ un nécessaire au total de 1 501 milliards de mètres cubes par an, il faut prélever un volume global d'eau de 2 673 milliards de m³/an, correspondant à une efficience moyenne de seulement de 56%, soit en exerçant une pression d'usage sur les ressources en eau renouvelables d'irrigation au taux croissant d'à peine 5% ; mais aux pays Nord africains et du Proche Orient, à divers climats allant de l'humide au saharien en passant par le méditerranéen et le semi-aride, ont particulièrement pour le premier taux le pourcentage de 59 %, alors que le deuxième taux est d'ordre paradoxale enchaussé à 43% en raison de la tendance à la raréfaction en eaux mobilisables en ces zones spécifiques (FAO, 2002; Frenken et Gillet, 2012).

Ces constats hydro-agricoles sont essentiellement à l'origine de la performance du mode adopté de la distribution de l'eau au niveau de la parcelle agricole, qui reste plus tributaire au type du système d'irrigation préconisé. En effet, les efficiences standards des systèmes d'irrigation les plus usuels sont pour le gravitaire, l'aspersion et le localisé aux grandeurs respectives de 60% ;

de 80% et de 90 % (Wittling et Molle, 2017), encore ces niveaux d'efficacités deviennent plus inférieurs dans les espaces agricoles irrigués à climat semi-aride (Bouaziz et Belabbes, 2002).

Compte-tenu de cette problématique complexe en exploitation des disponibilités en eau déjà insuffisances pour l'irrigation des cultures dans des zones plus vulnérables aux changements climatiques (GIEC, 2007 et 2013), le présent travail se fixe pour des objectifs de caractériser l'état actuel d'une zone agricole semi-aride modèle et aussi pour mener les projections à long-terme des tendances des aspects clés de : précipitations, température, évapo-transpiration culturale, aridité du milieu, bilan hydrique au sol de végétation.

Cette démarche est à achever donc en évaluant comparativement les besoins en eau de l'irrigation des cultures en fonction du système d'irrigation classique par rapport à un nouveau système d'irrigation proposé plus efficace. Ceci est faisable en réalisant au préalable des enquêtes agricoles thématiques sur le terrain chez les agriculteurs concernés, option qui à relayer par des expérimentations agricoles in situ, La zone d'étude considérée dans ce travail de recherche est le périmètre irrigué de Tadla, qui se situe sur l'étage bioclimatique semi-aride, dotée de potentialités agricoles stratégiques pour le Maroc, mais ses ressources en eau mobilisables à l'irrigation sont dans une phase critique de pénurie croissante (ORMVA du Tadla, 2020c),

De point de vue méthodologique, il est envisagé dans ce travail le recours à des procédés usuels de la caractérisation des aspects agro-climatiques, en relation avec l'utilisation de l'eau pour les productions végétales, notamment : la méthode en intervalles de confiance, les tests statistiques de la détection des ruptures chronologiques sur les séries temporelles pour les précipitations, la température et l'évapo-transpiration. Dans le souci de pousser la réflexion scientifique, il est incorporé les méthodes par l'analyse en composantes principales (ACP) en étudiant les saisonnalités des pluies, par le recours à des indices d'évaluation de la sécheresse et de l'aridité. Ce qui est à compléter par des cartographies SIG spatio-temporelles des tendances d'ordre climatique. Ce système méthodologique poursuivi à caractère intégré, a pris pour support l'exploitation des données du large réseau agro-météorologiques de 28 stations couvrant toute la zone d'étude sur une durée d'observations de 60 ans entre les années de 1958 et 2018.

Dans le souci de contribuer à l'utilisation judicieuse de la ressource de l'eau pour les productions végétales dans un contexte difficile avec avènement des changements climatiques, il est escompté par le présent travail de proposer des modalités pratiques de résilience, assorties de projections à long terme pour l'optimisation des besoins en eau d'irrigation des cultures stratégiques à conduire sous l'alternative de système d'irrigation plus efficace.

PARTIE I :
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAU EN AGRICULTURE DANS LES CONDITIONS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Dans le cadre des changements climatiques, l'aspect des ressources en eau en agriculture des productions végétales est traité en fonction de leurs origines pluviale, de surface et souterraines et aussi selon les aires géographiques mondiales de proximité. En l'occurrence, l'accent est porté sur la tendance agro-climatique et ses relations avec les ressources en eau allouées aux irrigations des cultures.

I-Notion des changements climatiques

Le climat décrit les conditions météorologiques moyennes pour un endroit particulier et sur longue période (OMM, 2020). En d'autres termes, le climat, c'est l'ensemble de facteurs météorologiques se rapportant aux variables de surface, notamment : la température, la pression atmosphérique, les précipitations, l'ensoleillement et l'humidité (GIEC, 2013).

Quant à la notion de changements climatiques, elle est traduite essentiellement par les phénomènes suivants : le réchauffement anormal de l'atmosphère et des océans, la modification des régimes des précipitations, les irrégularités dans les flux éoliens, la fonte anormale des glaciers et des neiges de montagne, l'anomalie en élévation du niveau des océans et de leur acidification, la hausse en concentration du CO₂ atmosphérique, la recrudescence des sécheresses pluvieuses, la désertification accrue, les inondations fréquentes des terres fermes et les avènements ascendants en incendies forestières à différents endroits du globe terrestre (GIEC, 2013).

II-Cadre mondial des changements climatiques en relation avec l'exploitation des ressources en eau en agriculture de productions végétales

Le facteur eau en sa qualité de composante fondamentale dans la nature, vu son rôle vital dans la survie et les activités humaines et animales, est soumis aux changements climatiques en augmentant le risque des tendances pour sa rareté récurrente (SPF, 2020). En effet, l'aspect pluviométrique est considéré un des maillons centraux des manifestations des changements climatiques, d'ores et déjà par sa variabilité irrégulière à différents sites de la planète; sachant que le changement était à moindre degré durant la période 1901-1951, mais dès l'année tournante de 1951, de fortes fluctuations anormales ont sévi sur le régime des pluies (GIEC, 2013).

III-Variabilités agro-climatiques

Les variabilités agro-climatiques ont pour assise les deux paramètres de la pluviométrie et de la température. Ces derniers sont impliqués directement ou indirectement dans le cycle périodique de la reconstitution des ressources en eau mobilisables pour les cultures. En l'occurrence, ces aspects ont été abordés par de nombreux les travaux de la recherche et en développement, portant en principe sur des analyses de circonstances, sur des études d'évolutions spatio-temporelles et aussi sur des approches de projections du court au long terme dans l'option des changements climatiques (GIEC, 2007).

A ce propos, il est objet de rapporter implicitement, ci-après, les caractéristiques saillantes de ces aspects et plus particulièrement pour les zones de proximité à notre zone d'étude, le périmètre de Tadla qui relève du territoire marocain.

III-1-Variabilités et projections pluviométriques

III-1-1-Variabilité pluviométrique en zone afro-méditerranéenne

Au cours des dernières décennies, il a été constaté la recrudescence des sécheresses, surtout en zone des pays du Sahel durant la fin des années 1960. L'anomalie pluviométrique s'étendait encore jusqu'à intégrer l'Afrique de l'Ouest entre les décennies 1970 et 1980 (Paturel et al., 1997). Ceux-ci, s'expliquent par la mutation dans le régime des précipitations sur l'essentiel du continent africain et aux pays du bassin méditerranéen (OMM, 2001 ; GIEC, 2007 et 2013). La synthèse de ces manifestations climatiques au niveau de l'espace africain de l'Ouest et Sud méditerranéen est rapportée dans le Tableau 1

Tableau 1 : Caractérisation des changements climatiques dans l'espace Sud de la Méditerranée et en Afrique de l'Ouest
(Source : GIEC, 2013)

Région	Fréquences des extrêmes de températures diurnes (jours chauds ou froids)		Fréquences de fortes précipitations (pluie, neige)		Fréquences de conditions des temps sec et de sécheresse	
	Observations	Projections	Observations	Projections	Observations	Projections
Sud de la Méditerranée	Hausse pour les jours dans presque toute la région. (baisse pour les jours froids)	Hausse très probable pour les jours chauds (baisse pour les jours froids)	Tendances incohérentes dans l'ensemble de la région et des études	Changements incohérents et variations régionales	Hausse générale pour le temps sec, hausse pour la méditerranée	Hausse pour le temps sec. Hausse cohérente pour la sécheresse
Afrique de l'Ouest	Hausse significative pour la température du jour le plus chaud et du jour le plus froid dans certaines parties de la région	Hausse probable pour les jours chauds (baisse pour les jours froids)	Hausse pour l'intensité des pluies	Changement faible ou nul pour les indicateurs de fortes précipitations dans presque toute la région	Hausse probable mais sécheresse des années 70 dans le Sahel prédomine dans la tendance ; variation interannuelle plus fortes ces dernières années.	Signal incohérent

En effet, sur cet espace relevant de l'afro-méditerranéen, les fortes perturbations climatiques actuelles et projetées sont en majorité de hausse en fréquences des jours chauds et des sécheresses pluvieuses, avec plus en l'avènement de temps sec (Tableau 1).

III-1-2-Tendance pluviométrique au Nord du bassin méditerranéen

Les précipitations acquièrent de plus en plus la tendance à la baisse au bassin méditerranéen, notamment en sa partie Est avec récentes fréquences plus élevées en des années de la sécheresse sévère, ce depuis les années 1960 et au taux de plus de 27% (Zaharia et *al.*, 2012 ; Murarescu et *al.*, 2017). Des similitudes sont relevées depuis les années 1980 au Centre-méditerranéen, plus précisément au Sud de l'Italie (Pulina, 2012 ; Baronetti et *al.*, 2019), ainsi qu'au Sud de la France (Norrant et Douguédroit, 2004) et en région espagnole de l'Andalousie (Ronchail et *al.*, 2012).

III-1-3-Tendance pluviométrique en Afrique de l'Ouest subsaharienne et aux pays du Sahel

En Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne, la tendance pluviométrique avait évolué à la baisse depuis l'année de 1966 (Paturel et *al.*, 1997 ; Gautier et *al.*, 1998). Dans la partie Nord du bassin versant sénégalais, le même constat est attesté depuis l'année de 1969 (Faty et *al.*, 2017). Au Centre et au pays du Sud de la Côte d'Ivoire, un tel avènement avait eu lieu à posteriori sur l'intervalle temps de 1968-1975 (Ahoussi et *al.*, 2013 ; Fossou et *al.*, 2015). Des irrégularités pluviométriques en question sont également décelées dans la zone géographique des pays du Sahel durant les décennies de 1970 et de 1980, tout en citant pour modèle représentatif du Sud tchadien, qui se démarquait par des années de sécheresses très sévères, restreintes à l'intervalle temps de 1980-1987 (Bedoum et *al.*, 2014).

III-1-4-Tendances pluviométriques aux pays du Maghreb

Au niveau des pays du Maghreb en ciblant l'espace algérien, la tendance à la diminution des précipitations annuelles est dans le sens de la diminution, vu qu'au Nord-Ouest de cette zone les pluies sont une allure de régression dès l'année de 1975 avec réduction pluviométrique de 27% (Ghenim et *al.*, 2010). Dans la partie Nord-Est, ont été constatées des ruptures chronologiques sur les précipitations annuelles entre les années de 1982 et 1984, notamment sur le bassin versant de Seybouse (Medjerab et Henia, 2011 ; Taibi et *al.*, 2013 ; Balah et Amarchi, 2016).

Aussi, sur le territoire marocain, il y avait eu lieu tendance de la forte variabilité dans les précipitations au cours de la période de 1970-2010, comportant deux sous-périodes distinctes et caractérisées par d'extrêmes déficits pluviométriques, à savoir entre 1980 à 1985 et entre 1990 et 1995 (Driouech, 2010).

Au Maroc septentrional, il a été décelé trois phases pluviométriques : une phase déficitaire d'avant l'année de 1956, une phase normale en période de 1956-1970 et une phase déficitaire au-delà des années 1970. Durant la dernière phase, il est identifié des ruptures chronologiques entre les années de 1972 et 1979, le taux de réduction pluviométrique inter-périodes après les ruptures est de 8% à 15 % (Sebbar et *al.*, 2011).

Au Centre du Maroc, la réduction des précipitations annuelles atteint le taux de 19% après la rupture chronologique de 1975, avec exception du rayon géographique plus réduit aux alentours de la ville côtière de Safi, située sur l'océan atlantique et où le sens de la tendance a été inversé avec l'élévation pour le cumul annuel des pluies (Sebbar et *al.*, 2012).

En se positionnant au Centre-Est du Maroc, avec pour repère la zone du Tafilalt, l'évolution des précipitations annuelles montre aussi la tendance à la baisse, voire même qu'il a été mis en évidence des cycles d'alternances pluviométriques, entre des années plus humides et des années plus sèches (El Khoudri et Damnati, 2015).

Au Maroc oriental, où il a été pris comme référence le bassin versant d'Isly, les précipitations annuelles se caractérisent par deux périodes proéminentes, une période avec une série d'années relativement pluvieuses marquant la décennie de 1970-1980, suivie de l'autre période de 1981-2016 à caractère pluvieux très irrégulier, mais interposées par une alternance en années de sécheresse et en années relativement pluvieuses (El Hafid et *al.*, 2017).

A un niveau plus restreint sur le territoire marocain, concernant la délimitation du bassin hydraulique d'Oum Er Rbia, abritant notre zone d'étude, la tendance du régime des précipitations s'apparente à ce qui a été cité précédemment rapporté avec une allure de la diminution pluviométrique dès la moitié des années 1970 (Jouilili et *al.*, 2013). Il est rapporté sur ce bassin hydraulique la mise en évidence de ruptures temporelles pluviométriques entre les années de 1972 à 1980 sur période d'observations de 1935-2004 (Sebbar et *al.*, 2011). Fait encore qui a été confirmé sur la partie de l'extrême Est de ce bassin hydraulique sur période observée de 1969-2015 et où les ruptures pluvieuses chronologiques se concentraient sur l'intervalle temps de 1977-2006 (Krimissa, 2017).

III-1-5-Variabilité des précipitations en des périodicités intra-annuelles

Les tendances pluviométriques des périodicités intra-annuelles se caractérisent selon les quatre variantes suivantes:

+ Variante 1 : Les mois de l'année les plus vulnérables aux modifications pluviométriques

Sur large étendue de la face atlantique marocaine, avec ses différentes zones bioclimatiques, allant du sub-humide au Nord à l'aride et saharien au Sud, il a été décelé durant la phase de l'après-rupture chronologique pluviométrique à partir de la moitié des années 1970, que la tendance est dans le sens de la baisse pour les cumuls mensuels des pluies interceptées entre Mars et Juin. Par ailleurs, en zone bioclimatique aride au Sud du Maroc, la diminution des pluies porte sur les mois de l'intervalle Décembre-Mai (Hanchane, 2013).

+ Variante 2 : Deux saisons de l'année vulnérables à la fois

Sur l'espace algérien, il est remarqué au Centre et au Nord-Ouest dès 1976, une diminution de la pluviométrie aux deux saisons d'automne et d'hivers ou bien sont concernées en duo les deux saisons d'hivers et du printemps ; alors que la région Est-Centre demeure sans aucune variation pluviométrique saisonnière significative (Touhami, 2017). Il est à noter que pour l'ensemble du territoire marocain que les fluctuations dans le temps des précipitations de deux saisons de l'année prises en conjoint sont à caractère irrégulier (Driouech, 2010 ; Sebbar, 2012 ; Hanchane, 2013).

+ Variante 3 : Trois saisons vulnérables à la fois

Sur l'intégralité de l'espace marocain, à partir des années 1980, la diminution pluviométrique saisonnière touche les saisons de l'hivers étendu (4 à 5 mois) et aussi du printemps, ce qui impacte en conséquence la pluviométrie de toute l'année (Driouech, 2010). Avec la focalisation sur les régions marocaines du Centre, où la rupture pluviométrique chronologique avait survécu en l'année de 1975, le déclin dans l'importance des précipitations est de plus en plus saillant aux saisons d'hivers et du printemps, voire légèrement dans le sens inverse à la hausse en la saison d'automne (Sebbar, 2012).

+ Variante 4 : Toutes les périodicités vulnérables (annuelles, saisonnières, mensuelles)

En zone magrébine, suite à l'année repère de 1975, toutes les périodicités de l'année prises au singulier ou de manière confondue, sont sujettes à la baisse progressive de la pluviométrie (Hebal et Remini, 2012).

III-1-6-Régionalisation et cartographie spatio-temporelle des tendances de précipitations

En vue de la caractérisation spatio-temporelle des tendances des précipitations périodiques, il est objet du recours à des méthodes plus affinées telles les « *analyses statistiques multivariées* », dont la plus usuelle est la méthode par « *analyse en composantes principales (ACP)* » (Paturel et al. ; 1997).

Dans un objectif de prendre connaissance des tendances spatio-temporelles pluviométriques en des espaces géographiques de proximité, y compris notre propre zone d'étude, il est question d'apporter ci-après la revue des principaux résultats des travaux de recherche en la matière.

-Espace Nord-bassin méditerranéen

La méthode ACP a permis de mettre en évidence que sur la rive Nord méditerranéenne au Sud de la France en région d'Ardèche de deux zones pluviométriques homogènes sur la période d'observations de 1960-1992 (Laurent ,1995). Au Sud-Est français, en aval du fleuve Rhône sur la période de 1955-2000, il est identifié trois zones à régimes différents des pluies (Narrant et Douguédroit, 2004). Aussi par le recours à la même méthode ACP, il est décelé dix principales sous-périodes marquées par la sécheresse pluviométrique avec deux gradients géographiques croisés du dessèchement pluvieux : un évolue du Nord au Sud et l'autre de l'Est vers l'Ouest au niveau de la vaste plaine du fleuve PO, située en Italie septentrionale pour la période d'observations de 1965-2017 (Baronetti et *al.*, 2019).

-Espace d'Afrique occidentale

Il est révélé par la méthode ACP sur support cartographique spatio-temporel des précipitations annuelles en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale non sahélienne sur la période étudiée de 1936-1996, la mise en exergue de trois périodes pluviométriques distinctes à savoir : une déficitaire, une excédentaire et une très déficitaire pour des intervalles temps respectifs de 1936-1950, de 1951-1968 et de 1969-1996, avec avènement de rupture dans la chronologie des pluies au début des années 1980 (Paturel et *al.*, 1997). Ceci a été bien confirmé par plusieurs auteurs à différentes zones de l'Ouest africain (Gautier et *al.*, 1998 ; Khodja et *al.*, 1998 ; Koudou, 2015).

Il est rapporté aussi que pour le procédé de l'ACP, il y a possibilité d'identifier tout déplacement significatif sur carte des isohyètes en rapport avec la variabilité pluviométrique spatio-temporelle ; un cas échant est rapporté sur l'espace ivoirien sur la partie Sud agro-forestière de la région d'Abidjan-Agboville, où après la rupture pluviométrique au début des années 1970 sur la période observée de 1923-2000, il a été cartographié la disparition de deux principaux isohyètes de 2300 mm/an et de 2200 mm/an, lesquels existaient auparavant en période de 1950-1959 ; par ailleurs, il y a l'apparition d'un nouvel isohyète de 1500 mm/an spécifique en phase suivante de 1990-1999 (Ahoussi et *al.*, 2013).

-Espace maghrébin

Dans l'espace des pays maghrébins, le déclin dans l'intensité des pluies est effectivement constaté pour les quatre saisons de l'année et ce depuis quatre dernières décennies (Hebal et Remini, 2012 ; Touhami, 2017).

Sur le territoire algérien, il est élucidé par la méthode ACP que les pluies s'intensifient avec l'altitude et elles diminuent au sens Est-Ouest tout en s'éloignant du littoral maritime (Hebal et Remini, 2012). Après la rupture dans la cadence de pluie en l'année 1970 au Nord algérien, il est cerné par la méthode d'analyses multivariées six régions pluviométriques homogènes (Taibi, 2013) et au Nord-Ouest sur le bassin versant de la MACTA de quatre groupements régionaux pluvieux (Chibane et *al.*, 2015).

Le territoire marocain a été doté en 2013 d'une carte SIG, conçue avec l'appui de la méthode de l'ACP en illustrant géographiquement la répartition du taux de la réduction des précipitations après la rupture en tendance pluviométrique, survenue en fin des années 1970 (Sebbar et *al.*, 2013).

Aussi à travers une autre carte SIG sur les précipitations annuelles en espace marocain, élaborée par soutien de la méthode de Krigeage, il est visualisé l'extension spatiale des zones bioclimatiques semi-arides et à l'inverse le rétrécissement des zones à climat sub-humide sur période d'observation de 1980-2015 (El Ajhar et *al.*, 2018), ce qui s'explique par l'effet du gradient spatio-temporel du dessèchement pluvieux dans le sens Sud-Nord marocain (Driouech, 2010).

Au Centre du Maroc, aux niveaux des plaines atlantiques, il a été également cartographié selon la méthode ACP avec rotation des groupements spatiaux des tendances pluviométriques au nombre de cinq (Sebbar et *al.*, 2012). Au niveau du bassin hydraulique du Tensift, il a été repéré par la méthode des « analyses statistiques multivariées » des régions pluviométriques homogènes au nombre de quatre suite à la rupture chronologique du régime des pluies sur intervalle de 1989 - 2003 à l'issue de la période d'observations de 1961 à 2003 (Salama, 2010).

Quant à la régionalisation de la tendance des précipitations pour les périodicités intra-annuelles sur l'espace marocain, il est élucidé par la méthode de l'ACP des diminutions spatio-temporelles significatives pour les cumuls pluviométriques aux saisons d'hivers et du printemps. A l'opposée en saison d'automne et à différentes régions, les précipitations suivent une allure à la hausse (Driouech, 2010). Au pas mensuel aux régions continentales de la face atlantique du Maroc, le niveau de la pluie chute aux mois deux mois de Mars et de Juin (Hanchane, 2013).

A l'échelle du bassin d'hydraulique Oum Er Rbia, il est montré sur cartes SIG pour les répartitions périodiques des précipitations de l'année que les pluviométries aux trois saisons d'automne, d'hivers et du printemps sont dans le sens de la diminution graduelle depuis la fin des années 1970 (Driouech, 2010). Ceci a été aussi rapporté sur la partie Est pour ce bassin hydraulique depuis le début des années 1980 (Krimissa et *al.*, 2017). En effet, le périmètre du Tadla (zone d'étude) le positionnement actuel sur carte est entre les isohyètes de 300 et de 400 mm/an (Sebbar, 2013 ; Daki et *al.*, 2016).

III-1-7-Impacts de la variabilité pluviométrique sur la nappe d'eau souterraine

-Relation pluviométrie-hydrologies au bassin méditerranéen

Au pourtour méditerranéen, les précipitations sont considérées plus conséquentes sur les réserves mobilisables d'eau à partir de la nappe souterraine, surtout à des fins de l'irrigation des cultures. Ainsi, il est rapporté pour la région de référence de l'Andalousie au Sud de l'Espagne les retombées négatives de la forte fréquence des années de sécheresse dès le début des années 1980, se traduisent par le pompage abusif à partir des eaux souterraines, évalué à de plus de 40% du potentiel renouvelable de cette nappe, susceptible d'atteindre le maximum de 170 % de ce potentiel hydrologique; une telle circonstance a été jugée défavorable pour le sort de l'exploitation des plantations oléicoles de la Province de Jaén, laquelle abrite une des plus importantes zones d'oliviers à l'échelle mondiale (Ronchail et *al.*, 2012).

-Relation pluviométrie-hydrologie en Afrique de l'Ouest

Les ressources en eau de surface dans les bassins versants de l'Afrique de l'Ouest et Centrale sont très impactées par les niveaux des pluies. Il en est de même au territoire sénégalais, notamment au niveau du haut-bassin versant du fleuve Sénégal depuis la fin des années 1970 (Cisse et *al.*, 2014 ; Bodian et *al.*, 2011 ; Faty et *al.*, 2017). Ce qui est également relevé dès l'année de 1968 au Sud-ivoirien, en région agricole d'Abidjan-Agboville, desservie par la rivière Agnéby dont le déficit d'écoulement atteint le taux de 41,3 % (Ahoussi et *al.*, 2013). Ainsi qu'au niveau de la partie Nord-ivoirien entre les années 1970 et 1980 sur le bassin versant agricole de Bandama-Blanc, qui est arrosé par l'important fleuve Bandama (Yaof et *al.*, 2018).

Les réserves en eau souterraines sur le continent africain, sont désormais plus affectées par l'importance des pluies, comme le cas pour le potentiel acquière de la région Abidjan-Agboville en Côte d'Ivoire ; en effet, à partir de l'année 1968, le coefficient de tarissement d'eau passerait de 0,07 à 0,08/jour, correspondant à la baisse en volume d'eau mobilisable de 59,5 % (Ahoussi et *al.*, 2013).

Par ailleurs, au Centre-Est du pays ivoirien la baisse de la pluviométrie annuelle qui est évaluée de 10 à 18 %, en phase de l'après rupture chronologique sur le régime des pluies entre les années 1968 et 1975, induit à posteriori la réduction de 19 à 33% sur les lames d'eau infiltrées dans la nappe souterraine, affectant par conséquent le pompage d'eau très utile à des fins agricoles (Fossou et *al.*, 2015). De telles circonstances de cause-à-effet de la relation pluie-eau de nappe sont aussi extrapolables pour la zone vulnérable des pays du Sahel (Bedoum et *al.*, 2014).

Les eaux douces du continent africain, notamment pour les cours d'eau, les lacs et les étangs qui se retrouvent indirectement impactées par les tendances de la diminution croissante des précipitations au cours des dernières décennies (Thieme et *al.*, 2010).

-Relation pluviométrie-hydrologie aux pays du Maghreb

Sur l'espace tunisien, il a été établi le modèle de flux des eaux souterraines pour la région agricole potentielle du Cap Bon, située au Nord-Est du bassin versant du fleuve Oued Lebnil, où la nappe phréatique de l'aquifère Korba, en une année à pluviométrie normale d'une moyenne de 473 mm/an est alimentée par le débit global d'infiltration d'eau au sous-sol à hauteur de 36 mm/an (Gaaloul et Laignel, 2012). Sur ce même espace agricole, l'exploitation de l'eau de la nappe souterraine est devenue plus abusive depuis l'année tournante de 1959, avec une chute du niveau piézométrique de 5 à 6 mètres selon les localités (Ferchichi, 2017). En Tunisie centrale, pour le bassin versant de Regueb à climat aride, il a été projeté à l'horizon de l'an 2060, si aucune mesure de redressement ne serait prise, qu'il aurait une hausse en prélèvement d'eau sur la nappe souterraine pour un volume d'eau de 2 millions m³/mois par rapport à la situation actuelle, ce qui correspondrait à un épuisement de cette nappe de 70% (Guermazi et *al.*, 2018).

Au niveau de l'espace algérien, spécialement au Nord-Ouest, la baisse dans les précipitations plus effective depuis l'année de 1975 à une réduction de 27% au bassin versant d'Oued Tafna se corrèle bien avec la diminution de l'écoulement fluvial de 69% (Ghenim et *al.*, 2010). En zone Nord-Est tunisien la tendance est similaire sur le réseau hydrologique de surface, plus tributaire aux pluies interceptées par le bassin versant de Seybousse (Mrad et *al.*, 2012).

Sur le territoire marocain, d'étendues espaces agricoles potentielles deviennent plus vulnérables à la pénurie en ressources d'eau, tel le cas de la plaine du Gharb où la nappe côtière souterraine d'eau est en un état d'épuisement croissant à partir de l'année 1984 (Hadjout et Larfi, 2012). Ce qui a été aussi constaté au niveau de la plaine du Chaouia, où son aquifère principal est nettement impacté depuis l'année de 2011 (Najib et *al.*, 2018). Ce qui est également signalé pour le périmètre du Haouz en présence d'année relativement sèche, tel le cas en campagne agricole

de référence de 2004/2005 à pluviométrie de 125 mm et la nappe d'eau souterraine subit en conséquence un déstockage massif en eau évalué, évalué à 450 millions de m³/an, contre la situation inverse en campagne pluvieuse ultérieure de 2008/2009 à 355 mm et où l'approvisionnement soutenu de l'aquifère engendre par effet la remontée de la nappe d'eau au sens de surface du sol (Tanouti, 2017).

Le bassin hydraulique d'Oum Er Rbia dispose d'importants ressources en eaux souterraines, qui sont plus concentrées en sa partie Est, y compris pour le périmètre du Tadla (zone d'étude), lesquelles sont plus impactées par les aléas pluviométriques au cours des dernières décennies ; dont les caractéristiques hydrologiques se différencient d'une manière distincte pour les deux zones des Béni et qui se présentent comme suit (Hammani, 2006 ; Roerink et *al.*, 2009 ; Oustou, 2015) :

- **Zone hydraulique des Béni Moussa :**

L'équilibre de flux hydrologique de la nappe des Béni Moussa n'avait été maintenu que sur une courte période de 1991 à 1996. Depuis lors, la péréquation du bilan hydrologique de la nappe avait évolué dans le sens de la reconstitution des réserves en eaux souterraines pour atteindre le volume maximum de 400 millions de m³/an entre les années 2000 et 2003. Ceci trouve explication à la forte augmentation du drainage de l'eau résiduelle des apports en eaux de surface destinées à l'irrigation des cultures, ayant pour origine le Barrage hydraulique de Bin El Ouidane, comme parmi les mesures de la compensation à la baisse annuelle des ressources d'eau pluviale (Hammani, 2006).

- **Zone hydraulique des Béni Amir :**

La réserve en eau de la nappe souterraine a pour tendance l'augmentation graduelle depuis l'année de référence de 1992. Cette évolution positive d'un bilan hydrologique se poursuivait jusqu'au début de l'année 2001, pour atteindre le point culminant au volume de 250 Millions de m³/an. Suite à cette date, il y avait eu une tendance à la baisse pluviométrique annuelle, pourtant le stock hydrique de la nappe a été maintenu à l'issue du drainage afférent aux apports de complément en eau d'irrigation des cultures, originaire l'eau de surface à partir du Barrage Hydraulique El Hansali (Hammani, 2006).

En globalité pour le périmètre de Tadla, Il est signalé, que le pompage d'eau via la nappe souterraine contribue au taux de 35 % dans la mobilisation des eaux pour l'irrigation des cultures. Ce constat a été le résultat du suivi-évaluation à distance par technique de la télédétection de l'exploitation des ressources en eaux de la nappe d'eau à des fins agricoles. Cette méthode faisait recours au modèle par l'algorithme SSEBI (*Simplified Surface Energy*

Balance Index), qui quantifiant régulièrement le bilan énergétique en surface terrestre à travers le traitement d'images satellitaires « MODIS » (Roerink et al., 2009).

III-1-8-Approche des projections pluviométriques

Les projections pluviométriques à l'horizon 2021-2050 pour le territoire marocain, évoquent la réduction des précipitations annuelles sur l'intervalle de (-) 0,04 à (-) 0,43 mm/jour en fonction des régions, en se référant à la méthode usuelle par le Modèle de la Circulation Globale ARPEGE-Climate (MCGAC). Sur un espace plus restreint se rapportant aux régions de Marrakech et de Casablanca (de proximité au périmètre du Tadla, zone d'étude), les prévisions respectives de la baisse pluviométrique sont de (-) 0,09 et de (-) 0,18 mm/jour avec la même méthode MCGAC (Driouech et al., 2010).

Aussi, on prévoit pour l'espace marocain, en se référant au 5^{ème} rapport du GIEC que la baisse des précipitations annuelles aux horizons 2030, 2050 et 2080 en des taux respectifs de la réduction pluviométrique de 14%, de 13 à 30% et de 21 à 36% (GIEC, 2013). Sur une délimitation géographique plus réduite à la partie Nord du Maroc, les projections aux horizons 2045 et 2075, sont également orientées vers la baisse des précipitations, moyennant le procédé du GIEC qui fait usage aux deux scénarii : l'un plus optimiste « B2 » et l'autre moyennement optimiste « A1B » (El Jihad et al. 2014). Le détail de ces prédictions est porté au Tableau 2.

Tableau 2 : Projections des précipitations au Nord du Maroc à différents horizons du 21ème siècle

(Source : Royaume du Maroc (2010), citée par EL JIHAD et al. (2014)).

Horizon de projection	Horizon 2045		Horizon 2075	
	A1B ^(*)	B2 ^(**)	A1B	B2
Précipitations annuelles en mm	623	634	567	589
(Ecart en mm)	(+97)	(+86)	(+153)	(+131)

NB : (*) : A1B, scénario médian, (**) : B2, scénario optimiste.

La modélisation des disponibilités hydriques en fonction des précipitations futures probables dans la zone de l'Afrique du Nord, y compris le territoire du Maroc, aboutit à la prédiction à l'horizon de l'an 2050 de l'accroissement de la pénurie d'eau au taux de 22% (GIEC, 2013).

Les projections de tendance pour les paramètres agro-climatiques pertinents de l'espace marocain, qui sont en rapport avec l'exploitation des ressources en eau par les cultures et la gestion du domaine forestier, sont susceptibles en procédant par le système MOSAICC. Ce système a été conçu en tenant compte des changements climatiques ; il comporte, en outre, ses cinq modèles prospectifs suivants (FAO et INRA-Maroc, 2015) :

- Modèle climatique** : Il permet des projections climatiques par la réduction d'échelle et à travers des interpolations statistiques sur les données initiales du climat actuel, en s'intéressant aux paramètres agro-climatiques clés : les températures (minimale et maximale), les précipitations et l'évapo-transpiration de référence.
- Modèle agronomique** : Il est simulé la croissance et le développement pour un nombre de cultures, dont les résultats se rapportent à leur bilan hydrique et aux niveaux de leur satisfaction en approvisionnement en eau selon les stades physiologiques du cycle cultural.
- Modèle hydrologique** : Il confère l'estimation du ruissellement sur les rivières des bassins hydrologiques, en exploitant les données produites par le modèle climatique précité.
- Modèle économique** : Il accomplit la simulation des impacts des variations agro-économiques, en réponse des rendements des cultures aux changements climatiques.
- Modèle forestier** : Il vise l'évaluation des impacts des changements climatiques sur les dynamiques forestières aux niveaux régional et national.

III-2-Variabilité et projections thermiques

III-2-1-Tendance spatio-temporelle thermique

Les enregistrements de la température de l'air à l'échelle mondiale ont été adoptés officiellement par différents pays depuis le début du 19^{ème} siècle, dont la courbe d'évolution est présentée à la Figure 1.

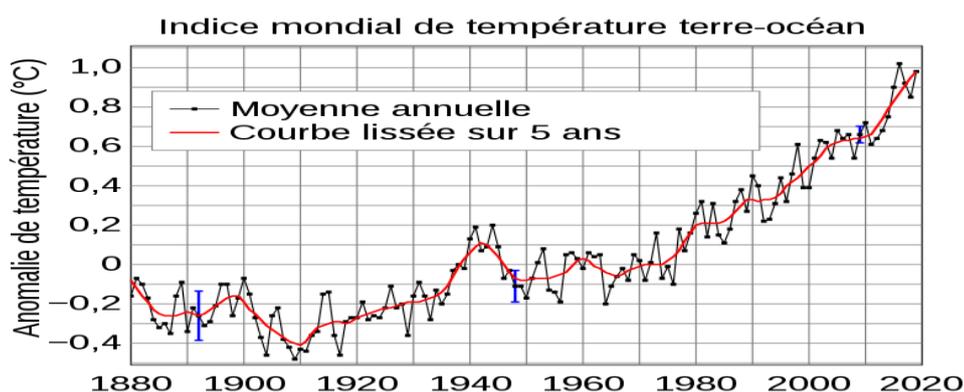


Figure 1 : Evolution mondiale de la variation thermique sur la période de 1880-2019

(Source : Lenssen et al., 2019)

L'anomalie thermique de l'air à l'échelle planétaire qui a été déjà déclenchée depuis les années 1940, s'est manifestée depuis les années 1980 par la forte cadence d'augmentation de la température, pour atteindre actuellement l'écart moyen annuel positif de 1 à 2 °C (Figure 1).

Pour l'espace marocain, on a décelé deux périodes thermiques contrastées: Une période de 1961-1972 avec un refroidissement moyen de -1°C et une période dès l'année de 1972 avec le

réchauffement atmosphérique, évalué au pas de la décennie de 0,2°C à 0,4°C (Driouech, 2010). Ceci reste conforme à la circonstance planétaire, ayant marqué la période de 1975-2005 par des écarts thermiques ascendants de 0,3° à 0,5 °C (Stour et Agoumi, 2008). Au Centre-Ouest marocain, sur zone témoin de la région de Casablanca-Settat où la rupture chronologique de la tendance thermique est en l'année 1994, les écarts moyens thermiques entre les deux périodes contrastées de 1980-1994 et de 1995-2015 sont aux niveaux suivants : A un maximum de 0,56 °C (0,41 à 0,79 °C), à un minimum de 0,86 °C (0,09 à 1,29 °C) et à une valeur moyenne de la différence de 0,71°C (0,44 à 0,89 °C) (Ouattab et *al.*, 2019).

Aussi, sur le territoire marocain, il est relevé au niveau du Centre-Est et notamment en région repère de Tafilalt, au cours de la période d'observations de 1982-2007, que le gradient thermique spatio-temporel est en augmentation annuelle pour une moyenne de 0,03°C/an (El Khoudri et Damnati, 2015). Egalement, au Maroc oriental, sur zone référence du bassin versant d'Isly, la température de l'air augmente selon le taux moyen de +0,45% par décennie dès l'année de 1970, soit un l'écart thermique cumulatif de 2,1 °C sur durée de 47 ans en période étudiée de 1970-2016 (El Hafid et *al.*, 2017).

A propos de la zone du bassin hydraulique Oum Er Rbia, qui intègre la zone d'étude, sa caractérisation thermique est rapportée au Tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques thermiques de la zone du bassin hydraulique Oum Er Rbia (Maroc)
(Période 1985-2007 ; source : Jouilili et *al.*, 2013)

Zone	Température moyenne (°C)	Médiane de température (°C)	Température maximale (°C)	Température minimale (°C)	Coefficient de variation (%)	Coefficient d'asymétrie (%)	Etendue thermique (°C)
Bassin Hydraulique Oum Er Rbia	18,5 à 21,4	18,2 à 22,3	23,2 à 33,7	17,2 à 20,2	6,5 à 13,9	1,1 à 3,5	5,2 à 13,5
Station météorologique de Béni Mellal	21,4	21,3	25,6	17,6	8,7	3,5	8,0
Station météorologique de Kasba Tadla	19,1	18,9	23,1	18,1	5,1	3,1	5,2

En effet, le bassin hydraulique Oum Er Rbia se caractérise par une dissymétrie de l'intervalle thermique, avec un important écart entre le minimum et le maximum de la température évalué de 5 à 13,5 °C, dont le coefficient de la variation interannuelle est élevé et qui atteint 6,5% à 13,9 % (Tableau 3). La température moyenne en cette zone est dans une tendance d'augmentation avec l'écart thermique ascendant est d'une moyenne annuelle de 0,13°C sur la période de 1985-2007 (Jouilili et *al.*, 2013).

III-2-2-Tendance thermique pour les périodicités intra-annuelles

La variabilité thermique pour les périodicités de l'année est déterminée sur un large espace du Centre-Ouest du Maroc sur longue période de 1935-2009, les valeurs moyennes de la hausse de la température par saison et pour toute l'année sont les suivantes (Sebbar et *al.*, 2012 :

- Hivers	: 1,2 °C.
- Eté	: 1,4 °C.
-Automne	: 0,4 °C.
-Printemps	: 0,7 °C.
-Année entière	: 1,0 °C

III-2-3-Projections de l'évolution de la température de l'air

Les projections en tendance de la température à la surface du sol sont indiquées ci-après pour des espaces géographiques de proximité ou qui concernent le territoire marocain.

-Projections thermiques en Afrique de l'Ouest

En Afrique de l'Ouest, il a été pris pour référence l'espace nordique du pays de la Côte d'Ivoire, avec focalisation sur la zone du bassin versant agricole de Bandama-Blanc. A ce niveau, la température moyenne annuelle est de 26,4°C pour la période de 1950-1982 et qui passe après la rupture chronologique thermique de l'année 1982 à la valeur supérieure de 27 °C. En effet, que d'une manière corrélative l'indice standardisé de la température a évolué en allant de valeurs oscillante sur la fourchette de 0 à 1 vers des valeurs plus proches de la valeur de 1 (Yao et *al.*, 2018).

- Projections thermiques en Afrique du Nord

En Afrique du Nord, en prenant comme espace référentiel le centre continental tunisien avec pour zone d'étude le bassin versant Regueb, les prédictions thermiques à l'horizon de 2036-2065 par la méthode du scénario prospective RCP 4.5 (Thompson et *al.*, 2011), donnent des écarts positifs pour les quatre saisons de l'année, notamment (Guermazi et *al.*, 2018) : En automne de 1,1 °C à 1,3 °C ; en hivers de 1,2°C à 1,6 °C ; au printemps de 0,8°C à +1,9 °C et en été de 1,6 °C à +2,5 °C.

- Projections thermique au territoire marocain

A l'échelle de l'espace global marocain, il est projeté selon le 5^{ème} rapport du GIEC qu'un réchauffement d'atmosphère serait inéluctable aux horizons 2030, 2050 et 2080 ; à des écarts respectifs ascendants de : 1,1°C à 1,8 °C; 2,3°C à 2,9°C et 3,2 °C à 4,1 °C (GIEC, 2013).

Quant à la partie marocaine du Nord, les projections futures thermiques aux horizons des années de 2045 et 2075, prétendent respectivement des écarts positifs de 1,7 °C et de 2,6 °C à +3,1 °C, déterminés par le modèle climatique MAGICC, opérationnalisé par l'algorithme de régionalisation SCENGEN dans le cadre de l'enveloppe des scénarii SRES (GIEC, 2001). Par ailleurs, les principales données des projections thermiques de la région marocaine du Gharb (El Jihad et *al.*, 2014), sont consignées au Tableau 4.

Tableau 4 : Projections des températures au Nord du Maroc selon le modèle climatique MAGICC afférent au GIEC
(Sources : GIEC, 2001 ; El Jihad et *al.*, 2014).

Horizon de projection	Horizon 2045		Horizon 2075	
	A1B*	B2**	A1B*	B2**
Températures annuelles moyennes projetées (°C)	21	21	22,4	21,9
(Ecart en °C)	(+1,7)	(+1,7)	(+3,1)	(+2,6)

NB : (*) : A1B, scénario médian, (**) : B2, scénario optimiste.

Pour la région de Casablanca-Settat, la projection de l'écart thermique de l'air ambiant à l'horizon de l'an 2100 est dans l'intervalle de 0,15 °C à +1,00 °C, en partant de situation de départ en année de 2019, selon le modèle de la « Circulation Générale Canadienne MCGG3 » (Ouattab et *al.*, 2019). Ceci s'avère similaire par rapport à une autre prédiction thermique pour la même région, moyennant une autre méthode par la régression de tendance sur base de données de la période d'observations de 1980-2015 (Ouattab et *al.*, 2019).

III-3-Variabilité et projections de l'évapo-transpiration

III-3-1-Définitions des évapotranspirations usuelles : maximale, de référence et réelle

La notion de l'évapo-transpiration consiste à l'association de l'évaporation de l'eau à partir du sol d'une part avec la transpiration des plantes d'autre part; elle est étroitement liée à la nature du matériel végétal et aux conditions environnementales du milieu. En l'occurrence, il existe différents types d'évapo-transpiration des végétaux (Doorebos et Pruitt, 1977; Doorebos et Kassam, 1979 ; Alien et *al.* 1998). Les plus usuelles d'entre-elles sont rapportées ci-après.

-Evapo-transpiration maximale

L'évapo-transpiration maximale (ETM) est la quantité d'eau exigée sur une surface occupée par des végétaux, nécessaire pour accomplir leur croissance et leur développement sans aucune restriction hydrique ; en cas de culture conventionnelle, la satisfaction normale conditionne en fin du compte le rendement agronomique optimal (Doorebos et Pruitt, 1977; Doorebos et Kassam, 1979).

-Evapo-transpiration de référence

L'évapo-transpiration de référence (ET_o) est le volume d'eau nécessaire pour une surface emblavée par une culture de référence, le plus fréquemment est utilisé le gazon vert en remplissant les conditions suivantes : ayant une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, poussant activement, dans un état saint, végétation ombrant complètement le sol et la culture ne manquant pas d'eau. Autres cultures de référence sont d'usage à caractère herbacé à savoir la luzerne, le maïs, le sorgho, l'orge et les blés. La détermination de cette évapo-transpiration spéciale se fait par des mesures directes *in situ* sur l'espace occupée par la culture de référence ou bien indirectement par des calculs avec des formules mathématiques de la modélisation des paramètres climatiques du milieu d'observation. A ce propos, il y a une multitude de méthodes employées selon la circonstance d'usage, les moyens à disposition et aussi la fiabilité escomptée des résultats ; le procédé le plus utilisée est la méthode de Penman-Monteith (Alien et *al.* 1998).

-Evapo-transpiration réelle

L'évapo-transpiration réelle (ETR) consiste en une demande en eau de la surface d'un couvert végétal, en vue de ne satisfaire que partiellement ses nécessités hydriques. En effet, ce volume d'eau qui est à ponctionner à partir du sol du tapis végétal, ne constitue qu'une portion réduite de l'évapo-transpiration maximale (ETM). Dans ce cas, il est considéré les deux situations différentes suivantes (Doorebos et Kassam, 1979 ; Alien et *al.* 1998):

-En situation normale avec les disponibilités suffisantes en eau pour le végétal qui permettent de satisfaire ces besoins d'une manière optimale ; dans ce cas la formule mathématique relationnelle correspondante est la suivante : $ETR=ETM$.

-En situation anormale, référenciée par le comportement de « déficit hydrique », les besoins requis en eau de la culture ne sont couverts que par l'existant au sol en eau en des quantités moins suffisantes par rapport à l'optimum du végétal. En cas de rareté accentuée dans les disponibilités d'eau relativement, susceptible de porter préjudice aux plantes, ces dernières se trouvent dans la contrainte de se contenter de l'existant en eau. Par conséquent, la formule mathématique relationnelle devient alors : $ETR < ETM$.

-Relation entre l'évapo-transpiration maximale et l'évapo-transpiration de référence.

Il est défini une relation entre l'évapo-transpiration maximale et l'évapo-transpiration de référence, en faisant intervenir un coefficient cultural (K_c). Ce coefficient qui est obtenu empiriquement, est tributaire à la nature de la culture, à son stade de développement, dans une certaine mesure à la vitesse du vent et à l'humidité du milieu. Dans la plupart des cas le K_c passe d'une valeur faible au

stade initial du végétal, à une valeur maximale à l'apogée du développement des plantes, puis à nouveau ce coefficient décline au fur et à mesure de l'avancement de la plante considérée vers sa maturité ultime. La formule mathématique relationnelle est exprimée ainsi (Doorebos et Pruitt, 1977; Doorebos et Kassam, 1979 ; Alien et al. 1998) :

$$ETM = K_c \times ET_0 \quad (1) \text{ « Numéro ordre de la formule sur le document »}$$

Avec : ETM : Evapo-transpiration maximale ;
 K_c : Coefficient cultural ; et
 ET_0 : Evapo-transpiration de référence.

III-3-2-Caractérisation de l'évapotranspiration de culture

-Caractérisation de l'évapotranspiration de culture en zone maghrébine

En espace géographique des pays du Maghreb, la caractéristique de l'évapo-transpiration du couvert végétal en milieu naturel ou sur sol cultivé sous le régime pluvial est évaluée en se rapportant à la référence de la région agricole potentielle du Cap Bon, située au Nord-Est de la Tunisie sur la rive Sud-méditerranéenne. La méthode consiste à des modulations des besoins en eau des végétaux repères en fonction de leurs exigences optimales en eau, appuyées indirectement par des méthodes climatiques, avec tabulation sur données journalières des précipitations. En fonction du niveau pluviométrique de l'année, on aboutit aux cas de figures suivants (Hajri, 2006) :

- **Cas 1 : Année à pluviométrie normale (année avec des précipitations moyennes)**
 - + ET_0 annuelle est de 1 200 à 1 500 mm, dont 40% relève de la saison d'été.
 - +ETM annuelle est de 700 à 830 mm, avec taux de 45% réalisé en la saison d'été et le pic mensuel est atteint au mois de Juillet pour valeur aux alentours de 120 mm.
 - +ETR annuelle se réduit à 400 mm, avec la portion de 40% se récupère par la pluie (P) ; la part de 40% incombe à la saison du printemps. La valeur la plus élevée du ratio ETR/P est enregistrée au mois d'Avril à 1,6 (la fraction correspondante = 8/5).
- **Cas 2 : Année sèche en pluviométrie (campagne de référence de 1987/1988)**
 - +ETM annuelle reste au même ordre de 780 mm/an par rapport à l'année en précipitations moyennes.
 - +ETM mensuelle est dans une large gamme de 20 à 120 mm.
 - +ETR se réduit encore et reste équivalent au cumul des pluies durant les 10 mois consécutifs.

+Sur base des écarts entre l'ETM et l'ETR pour le cas spécial de la culture potentielle des agrumes dans des conditions de la sécheresse climatique, les indicateurs clés en approvisionnement par l'eau de cette culture sont les suivants :

-Durée moyenne de la sécheresse effective durant cette campagne singulière est de 5 à 6 mois (de Mai à Septembre/Octobre).

-Déficit annuel par rapport aux besoins normaux en eau de la culture est dans l'ordre de 350 à 400 mm (soit l'équivalent de 3 500 à 4 000 m³/ha) avec la part de 70% de ce volume relève de la seule période estivale.

- **Cas 3 : Année humide en pluviométrie (campagne de référence de 1995/1996) :**

+ETR mensuelle est égale, en cette circonstance favorable, à ETM mensuelle, excepté pour deux mois d'automne (Septembre et d'Octobre).

+ETR est approvisionnée régulièrement et d'une manière normale durant la campagne entre les mois d'Avril à Août, en tendance vers la cote de l'ETM, ce à partir de la réserve en eau du sol suffisamment stockée durant les saisons pluvieuses.

Dans cette optique, la référence se fait sur à une autre zone modèle maghrébine du Delta de la Mejerda en Tunisie. A ce niveau, il est étudié deux situations contrastées de l'année, en se fixant en une année observée de 2007 de deux jours repères : un « jour humide » en la saison hivernale et un « jour sec » en la saison estivale. Dans ce cas, l'ETR journalière sur cet espace géographique, évaluée par la télédétection spatiale en des images satellitaires LANDSAT, s'est avérée avoisinante de celle déterminée directement sur le terrain par les mesures lysimétriques directes, avec des sous-estimations respectives aux saisons d'été et d'hivers de 8 et de 14 % (Mjeira et *al.*, 2012). Sur ce même espace, par le suivi régulier spatio-temporel par télédétection spatiale concernant les deux variables ETM et ETR, il est montré le grand risque du stress hydrique estival à encourir pour la biomasse végétale, compte-tenu du fort pouvoir évaporant qui survient surtout en mi-saison d'été (Mjeira et Samaali, 2019).

-Caractérisation de l'évapo-transpiration de culture sur le territoire marocain

L'évapo-transpiration culturelle est susceptible d'être caractérisée sur l'espace marocain, à travers le suivi agronomique d'une spéculation agricole de base et de référence, à savoir la céréaliculture d'automne, en s'intéressant à l'espèce dominante des blés, à raisonner en fonction de la chronologie de l'installation et du développement de cette culture aux niveaux des régions céréalières potentielles. Les principaux résultats de cette approche sont rapportés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Evapo-transpirations cumulatives périodiques pour différentes dates des semis de la culture des blés en régions céréalières potentielles du Maroc

(Source : Baïdada (1989), cité par Berdai et al. (2011))

Région	Région de Saïss (Nord continental)			Région du Chaouïa (Centre continental-littoral)		
	Dates de semis	10 Oct.	10 Nov.	1 Jan.	10 Oct.	10 Nov.
ETM (1) en mm	352	498	540	379	473	523
EIR (2) en mm	294	318	294	272	274	542
Déficit hydrique [(3) = (1)-(2)] en mm	88	180	247	108	199	281
Taux déficit hydrique [(4) = (3)/(1)] en %	23	36	46	28	42	54
Taux couverture de besoins (2) / (1) en %	77	64	54	72	58	46

Il est retenu que le facteur « région » est moins impactant sur le cumul périodique de l'ETM et de l'ETR de la culture céréalière, alors que la date de semis est plus effective sur la variabilité de ces derniers paramètres. En effet, plus l'installation de la culture des céréales d'automne est retardée plus le déficit hydrique de la spéculation s'accroît, en raison du décalage en retardement du cycle productif de la culture, ainsi les dernières phases physiologiques critiques se trouvent contraintes à plus d'eau en saison printanières (Tableau 5). Ceux-ci se traduisent en pratique concernant les premières phases du cycle productif des blés fortement exigeantes en eau, par la nécessité d'assurer alors en zones semi-arides à la culture céréalière d'automne des irrigations d'appoint une fois les disponibilités en ressources hydriques sont suffisantes (Ait Yacine, 1995 ; Berdai et al., 2011).

Dans ce sens, pour la culture de la betterave à sucre, la spéculation agro-industrielle potentielle des grands périmètres irrigués du Maroc, l'ETM de la culture est tributaire de la précocité des sélections variétales et des dates de semis. Les évaluations hydro-agricoles de la culture, obtenues expérimentalement sur le terrain sont données au Tableau 6.

Tableau 6 : Cumuls d'évapo-transpiration maximale (ETM) de la culture de la betterave à sucre en fonction de la précocité variétale et la date de semis aux grands périmètres irrigués du Maroc.

(Source : Chati et al. (1999), cités par Berdai et al. (2011))

Groupes variétaux selon niveau de précocité	Dates des semis	ETM total (en mm)
Précoce	01/10/1986	735
	21/10/1986	747
	21/10/1986	884
Médium	15/11/1983	794
	17/11/1994	690
	17/11/1994	760
	21/11/1982	870
Tardif	11/12/1983	708
	11/12/1986	1219
	21/12/1984	793

En effet, plus la date de semis de la betterave à sucre est retardée par rapport au début de la campagne agricole, plus le cumul en ETM du cycle cultural a une tendance à la hausse, alors que les exigences en eau de la culture restent globalement indifférentes à la précocité variétale (Berdai et *al.*, 2011) (Tableau 6).

-Projection de l'évapo-transpiration de culture

A l'échelle mondiale, il est prédit que l'évapo-transpiration de référence de culture est susceptible d'augmenter tout au long du 21^{ème} siècle. A ce propos, le prototype de référence l'espace géographique méditerranéen a fait l'objet du projet Explore-2070, en rapport avec le modèle de projection agro-climatique la « Circulation Générale ». Ceci a permis de projeter pour la zone contrôlée des bassins de la Rhône-Méditerranée et de la Corse, une augmentation de l'ETO de l'ordre de 20% à l'horizon de 2046-2065, par rapport à la situation de référence de la période de 1961-1990, sur la base de calculs réguliers par la méthode climatique usuelle de Penman-Monteith. Il est remarqué ainsi que la faible dispersion statistique des données autour de la valeur médiane de l'ETO, masque l'incertitude associée aux variables annexes, utilisées dans son estimation, comme la vitesse du vent et le couvert nuageux du ciel. Une telle situation est plus tributaire aux modalités d'estimation de l'ETO par le modèle choisi de la projection. Ceci interpelle constamment à des réajustements et réétalonnage nécessaires d'évaluation de l'ETO avec appui par de tels modèles, pour usage surtout en opération de l'avertissement agro-climatique (MEDDE-France, 2012).

III-4-Variabilité du bilan hydrique au sol et projection des besoins en eau des cultures

III-4-1-Définition du bilan hydrique au sol

Le bilan hydrique au sol consiste en l'évaluation du niveau de la satisfaction des besoins en eau d'une culture donnée, par la simple confrontation des apports par rapport aux consommations en eau sur la parcelle agricole. Ce bilan est déterminé pratiquement par le niveau de l'évapo-transpiration de la culture, laquelle à retrancher par la somme des volumes de l'eau déjà existante au sol, des précipitations, de l'eau de surface, d'origine souterraine, ou par les apports de crues antérieures. En principe, il s'agit de la résultante des flux hydriques entrants/sortants au sol entre les eaux superficielles et souterraines. Le bilan hydrique (In) est exprimé en intégrant le maximum de paramètres par la formule suivante (Doorebos et Pruitt, 1977) :

$$In = [ET (\text{culture})+F+R]-[Pe + Ge + N+ \Delta W] \quad (2)$$

$$= \quad (\text{Pertes}) \quad - \quad (\text{Gains})$$

Avec :

+ET (culture)	: Evapo-transpiration de la culture
+F	: Percolation en profondeur depuis la zone racinaire
+R	: Débits superficiels et souterrains sortants
+Pe	: Pluie efficace
+Ge	: Contribution de l'eau du sous-sol
+N	: Débits superficiels et souterrains entrants
+ΔW	: Fluctuation de l'eau emmagasinée dans le sol

III-4-2-Caractérisation et variabilité du bilan hydrique au sol

Le bilan hydrique au sol est lié essentiellement au type de sol, à la nature du climat pour son pouvoir de la demande en évaporation et à la culture par son aptitude à la transpiration. En effet, sur l'espace méditerranéenne, il a été pris pour référence la région de la Sardaigne au Sud de l'Italie où le bilan hydrique sur sol non cultivé a été suivi en évaluant la différence (ETo-ETR) sur la période d'observation de 1951-2010 avec la réserve utile du sol (RU) de 125 mm. Ceci a révélé que la tendance de ce bilan est en augmentation, qui passe de la valeur de 0,91 à 1,33 mm/jour au printemps, de 0,98 à 1,84 mm/jour en été et sur toute l'année de 2,46 à 6,97 mm/jour. Pour la périodicité mensuelle, il y a accroissement du bilan hydrique, pour les minimas en Décembre de -0,10 à 0,00 mm/jour, les maximas en Juin de 0,45 à 0,89 mm/jour. En globalité, la tendance de la vidange complète du réservoir hydrique du sol au cours de l'année est de plus en plus fréquente au cours de la dernière décennie, surtout entre les années de 2002 à 2010 (Pulina, 2012).

Pour le cas spécifique des terrains cultivés, le comportement du bilan hydrique au sol confère un caractère particulier en la zone méditerranéenne (Mjejra et Samaali, 2019). Ce qui a été effectivement approuvé pour les sols de la plaine Boian en pays de la Roumanie sur la période de 2008-2013, avec une forte fluctuation des ressources en eau disponibles au sol dans les 20 cm superficiels du profil cultural. Ce qui expose, en conséquence, les cultures annuelles pluviales plus sensibles à des risques énormes du stress hydrique en cas de faibles précipitations, tel le cas pour la céréaliculture d'automne, la spéculation agricole de base alimentaire d'excellence pour les pays du pourtour de la mer de la Méditerranée (Murarescu et *al.*, 2017).

Il est à noter que le bilan hydrique au sol est possible de l'évaluer en fonction de l'ETo du milieu et de la réserve utile en eau du sol (RU). Il est cité dans ce sens le modèle qui a été conçu pour les sols du Nord tunisien à dominance en texture limino-argileuse, à une moyenne de RU de 80 mm pour les végétations herbacées et à une moyenne de RU de 160 mm (D_{160}) pour l'arboriculture ligneuse. Dans ce contexte, il est adopté une classification bioclimatique spéciale

avec six étages apparentés au climat de base méditerranéen (E.M.) et qui se défissent comme suit Gammar et Hlaoui, 2012):

- +1^{ère} étage / *E.M Per-humide* : à D_{160}/ET_0 équivaut au déficit hydrique de 2 à 3 mois.
- +2^{ème} étage / *E.M Humide* : 3 à 4 mois de déficit.
- +3^{ème} étage / *Sous-E.M Semi-aride supérieur*: 4 à 7 mois de déficit.
- +4^{ème} étage / *Sous-E.M Semi-aride inférieur*: 7 à 9 mois de déficit.
- +5^{ème} étage / *E.M Aride* : 9 à 11 mois de déficit.
- +6^{ème} étage / *E.M Saharien* : 11 à 12 mois de déficit.

III-4-3-Projection des besoins en eau des cultures

Il est projeté pour de forte augmentation en demande mondiale annuelle pour les eaux douces, rapporté par le scénario référentiel sur les perspectives de l'environnement selon le modèle IMAGE, afférent à l'organisation inter-gouvernementale l'OCDE. En effet, il est prédit de passer du volume global mondial de 3 500 milliards de m³ en année de référence de 2000 au le volume d'environ 5 500 milliards de m³ à horizon 2050, soit un accroissement moyen de 1,14 % par an. Ceci résulterait probablement de la croissance des exigences de l'eau pour les secteurs économiques clés à savoir : les activités industrielles (variation de +400 % sur intervalle de 50 ans ; volume total serait de 1 000 milliards de m³/an), la production de l'électricité (+140 %; actuel de 600 milliards de m³/an) et aussi pour les besoins ménagers domestiques (+130 %; 300 milliards de m³/an). La hausse accrue en eau est prétendue pour les secteurs précités et qui serait éventuellement au détriment du secteur de l'irrigation en agriculture, dont sa demande en eau évoluerait à l'inverse en baisse entre l'année de 2000 à l'horizon 2050 de volume de 2 400 à 2 000 milliards de m³, soit une régression de 17 %. Ceci atteste qu'à l'avenir serait une forte concurrence pour l'irrigation par les autres secteurs économiques en une logique d'émergence fulgurante (OCDE, 2012).

Quant à l'évapo-transpiration réelle des végétaux (ETR), elle devrait continuer à accroître au fil du temps. A titre indicatif, elle aurait une tendance à l'augmentation à l'horizon de 2070-2100 par rapport à la période de référence 1960-1990 sur le bassin versant du Rhône au Sud de France. Cette hausse est d'autant plus forte que le forçage radiatif du scénario choisi est important. Ainsi, l'écart est par exemple de l'ordre de 0,7 mm/jour selon le scénario de projection RCP 8.5 sur toute l'année et d'environ 0,2 mm/jour selon le scénario RCP 2.6 pour la saison du printemps. Après tous calculs faits pour les 365 jours de l'année, l'ETR des cultures accuseraient donc un accroissement moyen de 73 à 256 mm/an à horizon de 2070 (Dayon, 2015).

III-5-Impact de la variabilité climatique sur l'occupation du sol par les végétaux

III-5-1-Notion de l'occupation du sol par les végétaux

L'occupation du sol (en anglais : Land cover) est une description physique de l'espace, elle est définie comme la couverture biophysique de la surface sur les terres émergées, c'est-à-dire ce qui tapisse le sol par la verdure naturelle (FAO, 1998).

III-5-2-Applications de la télédétection spatiale pour évaluer l'occupation des sols par la biomasse végétale

La télédétection est la technique privilégiée pour évaluer la biomasse végétale et qui consiste en l'acquisition d'images d'un espace donné et permet, en effet, d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans les contacts directs avec celle-ci (Centre Canadien de la Cartographie et d'Observation de la Terre, 2020). Cette technique est expérimentée avec succès pour l'usage spécifique et pertinent en matière d'appui à la gestion des périmètres irrigués, notamment le cas modèle du périmètre irrigué du Gharb, situé au Nord-Ouest du Maroc (Omari et *al.*, 2008).

L'occupation du sol par les végétaux est élucidée par la technique de la télédétection via l'indicateur « *indice de la surface foliaire* » (abrégié par LAI et en anglais : *Leaf Area Index*). Il est mentionné un cas concret d'exemple d'usage de l'indice LAI dans l'évaluation d'incidence des pluies sur la végétation au bassin versant de Ferlo, situé au domaine sahélien sénégalais, moyennant un procédé spécifique aux précipitations, par exploitation des données satellitaires de la période de 2000-2010 sur le produit de la télédétection spatiale TRMM-3-B42, avec la résolution spatiale de 0,25° x 0,25° (Huffmann et *al.*, 2007 ; cités par Cissé et *al.*, 2015).

Aussi, il est évoqué un autre exemple modèle du recours à l'indice foliaire (LAI) pour effectuer des observations à caractère régulier sur la biomasse végétale du territoire sénégalais, au pas du temps de trois heures, avec la résolution spatio-temporelle de 1 km-8 jours, en afférant au produit MODIS-LAI (Ruhoff et *al.* 2013 ; cités par Cissé et *al.* 2015).

III-5-3-Utilisation spéciale de l'indice NDVI pour évaluer la biomasse végétale par la télédétection spatiale

-Définition de l'indice NDVI

L'indice NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) a été conçu en utilisant les bandes spectrales : rouge et proche de l'infrarouge. Cet indice confère une sensibilité à la vigueur et à l'importance du couvert végétal. Théoriquement, les valeurs de l'indice NDVI sont comprises entre les valeurs de (-)1 et (+)1. Les valeurs négatives correspondant à des éléments différents du couvert végétal (la neige, l'eau, les nuages, ...etc.), pour lesquels la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Cet indice a l'avantage d'être sensible à la fois à la teneur en pigments foliaires de la plante, donc il informe indirectement sur son activité photosynthétique et aussi renseigne sur la structure du couvert végétal contrôlé, en rapport avec à

la capacité à intercepter le rayonnement par le végétal étudié. En effet, l'indice NDVI, à travers ces caractéristiques spéciales apporte des informations en un temps donné, sur les différentes variables biophysiques décrivant la croissance des cultures, ainsi que sur leur état végétatif instantanée au moment de la prise de l'image satellitaire (Tucker, 1979).

-Modalités fonctionnelles de l'indice NDVI

Sachant que les réflectances dans le rouge et dans le proche infrarouge sont presque égales, l'indice NDVI présente des valeurs proches du zéro pour les sols nus. Néanmoins, en des couverts végétaux naturels, les valeurs du NDVI sont positives et généralement comprises entre 0,1 et 0,9. Une forte valeur de l'indice NDVI, indique que la végétation est dans un bon état sanitaire et vice-versa en cas d'état pathogénique ou de stress physiologique du végétal, cet indice acquiert de faible valeur (Jarlan et *al.*, 2015).

-Procédés pratiques de suivi de l'occupation du sol par l'indice NDVI

Il est possible de suivre l'évolution des superficies des cultures en des périmètres irrigués par la technique de la télédétection spatiale sur la biomasse végétale. Une option qui a été appliquée en des régions tunisiennes, en exploitant des images Landsat sur la période de 1981-2010 avec l'indice NDVI en des données satellitaires NOAA-AVHRR, comparées avec les données Landsat TM /ETM; ainsi on constate, des gammes de la variation des valeurs moyennes du NDVI selon les localisations: au Nord de 0,6 à 1,0 sur axe de la Mjerda (marqué par les variations mensuelles des assolements maraichers), au Centre de ce pays de 0,5 à 0,6 et au Sud de 0,1 à 0,4. La superficie irrigable au Nord, régresse en saison de l'été et se stabilise en l'hivers. Il est observé, par ailleurs, que le NDVI a augmenté annuellement en toutes les saisons, suite à des travaux d'aménagements agricoles entrepris depuis une trentaine d'années au Centre tunisien, y compris la zone étudiée (Dallel et *al.*, 2011).

Pour le cas de la plaine du Tadla, abritant la zone d'étude, il a été objet du recours à l'indice NDVI pour déterminer l'occupation des sols par les végétaux entre les mois de Juillet et Août à partir des images satellitaires Landsat avec la résolution de 15 à 120 mètres. Les images traitées sont de type Thematic Mapper (TM) aux années : 1984, 1995, 2003, 2011, ainsi que pour des images de type Operational Land Imager (OLI) aux années: 2003 et 2011. En comparaison avec des images MODIS des années de : 2003, 2011, 2013 et 2015 qui ont une résolution de 250 m à 500 m. Il en résulte de ces analyses que les surfaces végétales ont subies des extensions de 443 km² entre 1984 et 1995, en passant de l'étendue de 592 km² à 1409 km². Par conséquent, l'évolution de la superficie de la plaine en occupation par les végétaux passe du taux de 18,5% à 44 % dans un intervalle de trois décennies (Zitouni, 2016). La réparation détaillée de cette évolution est reportée au Tableau 7.

Tableau 7 : Evolution du couvert végétal au niveau de la plaine du Tadla entre les années 1984 et 2015 dont les superficies déterminées par la télédétection spatiale sur la base de l'indice NDVI
(Source : Zitouni, 2016)

Année	NDVI	Nombre des Pixels	Superficie d'occupation du sol (OS) (km2)	Contribution de la superficie OS au total de la plaine (%)
1984	0,699	657 864	592,0776	18,5
1995	0,769	841 912	757,7208	23,6
2003	0,716	755 652	680,0868	21,2
2011	0,72	1 077 269	969,5421	30,3
2013	0,75	1 488 838	1339,9542	41,8
2015	0,87	1 565 483	1408,9347	44,0

Au niveau du périmètre irrigué de Tadla, l'occupation des sols pour les principales cultures selon l'indice NDVI a été extrait spatialement, à partir d'images Landsat-8 OLI de l'année 2014, à résolution affinée de 15 m, permettant la délimitation précise des cultures de: betterave sucrière, arboriculture, céréaliculture ; mais avec moins de précision pour la luzerne (Ouzemou et *al.*, 2018). A propos de ce même périmètre, par recours à l'indice NDVI, en traitant des images du capteur Landsat-OLI 8 sur la période de Novembre 2017 à Juin 2018, à une résolution de 15 à 20 m, avec des classes de régions d'intérêt ROIs (Regions Of Interest) en selon la classification par procédé de « *Support Vector Machin (SVM)* », il est évalué le total de la superficie des cultures irriguées à 170 212 ha, dont les principales occupent la superficie de 136 245 ha (voir le détail au Tableau 8). Ceci présente un écart de 572 ha, soit moins de 1 %, par rapport aux données statistiques de l'ORMVA du Tadla. Par emblavement par culture, l'écart positif varie de 3,62 % à 5,85 % et l'écart négatif fluctue de (-)13,8 % à (-) 3,95 % (Oubicha, 2019). Le détail de ces analyses est rapporté sur le Tableau 8.

Tableau 8 : Evolution de l'occupation des sols au périmètre irrigué de Tadla, évaluée par la télédétection spatiale avec l'indice NDVI pour la campagne 2017/2018
(Source : Oubicha, 2019)

Cultures	Superficie calculée par Télédétection spatiale (en ha) (1)	Superficie par ORMVA du Tadla (en ha) (2)	Ecart entre superficies (1) - (2)	
			(en ha)	(en %)
Agrumes	13 043	12 587	456	3,62%
Oliviers	33 546	31 692	1854	5,85%
Grenadiers	2 104	1 994	110	5,52%
Piment doux (ou Niora)	1 241	1 440	(-)198,77	(-)13,80%
Céréales d'automne	42 894	41 636	1258	3,02%
Luzerne	30 450	32 824	(-)2374	(-)7,23%
Betterave à sucre	12 967	13 500	(-)533	(-)3,95%
Total 1	136 245	135 673	572,23	0,42%
Maïs	33 199	-	-	-
Autre culture	767	-	-	-
Total 2	33 967	-	-	-
Total global (Total 1 +Total 2)	170 212	-	-	-

-Suivi de l'état végétatif de la biomasse végétale par l'indice NDVI

La classification spatio-temporelle des assolements végétaux en un espace déterminé, est concevable en opérant par des groupements homogènes selon la technique de la télédétection

spatiale. Dans ce sens, il est donné pour référence le cas d'évaluation de l'occupation des sols au Nord de la Tunisie moyennant l'indice NDVI, à travers le paramètre Sum-NDVI des « phenologic metrics » à des valeurs de 0,3 et 0,8 sur la période de 2000-2010. Il est dégagé ainsi 18 groupements végétaux dont 11 avec des changements significatifs d'évolution de la biomasse végétale et 7 groupements restant sans aucun changement significatif. Dans le domaine agro-forestier, la biomasse est éclatée en trois volets selon la croissance végétative : 36 % à niveau élevé ; 37% en maintien à la normale et 27 % de faible ampleur (Feki, 2015). Par ailleurs, il est qualifié d'ordre pertinent la relation de l'indice NDVI avec la température de surface, soit un indicateur fiable de suivi du stress hydrique de la végétation. La pertinence de la méthode est approuvée en comparant une année pluvieuse (2012) avec une année déficitaire (2014) dans une région agricole du Cap Bon au Nord-Est tunisien, par des analyses couplées entre les images satellitaires du capteur MODIS et les images des séries LST Land Surface Température » (Mjejra et al., 2012 ; Mjejra et Samaali, 2019).

-Evaluation par l'indice NDVI de la relation des précipitations avec la biomasse végétale

Il a été élucidé la relation étroite entre l'indice NDVI et les précipitations, permettant d'étudier de près et avec précision l'évolution des stades de développement du couvert végétal. A titre d'exemple, au bassin versant de Tensift (Maroc), il a été mené le suivi continu de sa végétation sur la période de 1981-2010 moyennant l'indice NDVI (Zamrane et al., 2012).

Dans ce sens, il a été mis en évidence par la télédétection spatiale la corrélation entre les précipitations et les végétations, concrétisée par l'étude de cas en vaste espace du Parc National du Diawling (PND) au pays de la Mauritanie, où est constaté une évolution annuelle moyenne de l'indice NDVI de 0,21 à 0,27 ; en fonction des précipitations qui fluctuent entre 180 à 480 mm/an. La méthode adoptée consiste en l'exploitation des images de satellite géo-référencées par le logiciel ENVI sur la période de 2000-2013, suivi par l'extraction selon le procédé MODIS des images mensuelles des températures de surface pour emploi ultérieur de l'indice NDVI, en parallèle avec l'exécution du procédé TRMM (3-B-432) concernant les images mensuelles des précipitations (Abidine et al., 2017).

En effet, l'occupation des sols en des zones comportant des cultures intensives a été cartographiée par la télédétection spatiale, tel est le cas pour l'espace marocain, précisément en zone du bassin versant de Tensift (Maroc). Ceci a permis d'aboutir à la répartition en trois classes prédominantes selon l'occupation du sol par les cultures et à savoir : les vergers, les cultures annuelles et les aires non cultivées. A ce propos, il a été exploité des images de la période 2000-2006, sur des intervalles périodiques de 16 jours avec l'usage de l'indice NDVI, afférant au spectro-radiomètre MODIS d'une résolution spatiale de 250 m. Ainsi, il est constaté que les

estimations de l'exploitation des sols s'avèrent cohérentes dans l'espace et dans le temps pour la classe des vergers fruitiers, mais plus fluctuantes annuellement pour la classe des cultures annuelles (Benhadj et *al.*, 2012).

-Utilisation de l'indice NDVI en projection des besoins en eau des cultures

Il est permis avec l'usage de l'indice NDVI en télédétection spatiale, le suivi de l'évolution de l'occupation des sols par les cultures de l'irrigué et de procéder aussi à la projection pour leurs besoins en eau d'irrigation. Il est présenté pour modèle le cas du bassin versant agricole de Regueb au Centre continental de la Tunisie, objet de traitement de ses images satellitaires Landsat. En cette issue, il est prétendu pour cet espace les exigences en eau d'irrigation par les cultures à horizon de la période de 2036-2065 en quantifiant le volume total projeté de 4 à 7 millions de m³ d'eau par an (Guermazi et *al.*, 2018).

Chapitre II : IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES SYSTEMES AGRICOLES VULNERABLES EN MATIERE DE PRODUCTION VEGETALE

Il s'agit de dresser un recueil de retour des expériences de référence en matière des ajustements pratiques de la gestion des systèmes agricoles, notamment en des productions végétales sous les impacts des changements climatiques sur les cultures et avec la focalisation sur l'appétitude à la satisfaction de leurs besoins en eau.

I-Manifestations des changements climatiques en interactions climat-sol-plante

I-1-Changements climatiques et interactions climat-sol

Les sols sont des supports de base pour la dynamique des biotopes naturels, des activités agricoles et des espaces agro-forestiers. Aussi, les sols constituent une large interface avec l'atmosphère, par conséquent ils subissent les répercussions directes des changements climatiques (GIEC, 2019).

Les principales manifestations des interactions des sols avec les irrégularités du climat sont évoquées ci-après.

I-1-1-Impact des changements climatiques sur les terres arables et les écosystèmes végétaux

L'implication anthropique directe portent actuellement sur 70 % des terres émergées du globe terrestre qui sont non recouvertes par les glaces, dont environ le quart a subi de profonde métamorphose dans son état naturel, en raison des activités humaines qui sont en perpétuelle ascendance. En effet, les croissances soutenues en agriculture et en sylviculture, sont à la quête d'augmenter leurs productivités, en réponse à la demande croissante pour nourrir une population mondiale en surcroît. Ceci se conjugue avec le développement du secteur d'industrie et des autres secteurs fortement polluants en hausse anormale de l'émissions des gaz à effet de serre (GES). Les retombées afférentes concernent les dégradations des écosystèmes, avec risque d'atteinte néfaste sur la biodiversité naturelle et une accélération de tendance à la désertification des terres arables (GIEC, 2014; 2019).

I-1-2-Effets thermique des changements climatiques sur les sols

La température maximale à la surface du sol a augmenté presque deux fois par rapport à la température moyenne mondiale de l'air malgré que cette dernière avait progressé de +1,53 °C depuis la période préindustrielle, avec l'année repère de départ en 1850. Ce réchauffement excessif au sol est moins toléré par les végétaux, vu que de la baisse de la teneur en eau au sol induit un dysfonctionnement dans l'assimilation de l'eau par les racines des plantes, ce qui agit

par la suite sur la perturbation dans la croissance et le développement normaux du végétal. En effet, y a des retombées négatives sur l'agriculture, concernant les diminutions des récoltes agricoles dans les régions vulnérables, voire même des décalages dans le temps sur les cycles productifs des cultures. En outre, cette nouvelle situation du réchauffement anormal du sol est plus incidente sur la fréquence actuelle plus élevée des incendies en forêts à différents endroits du globe terrestre (GIEC, 2014; 2019).

I-1-3-Exploitation compromise des sols et productions alimentaires d'origine végétale

Notre système alimentaire surtout d'origine végétale a pour principales origines la terre du continent. Basé sur l'agriculture et sur les produits de la forêt, ce système se trouve désormais plus compromis, en raison de la démographie mondiale croissante et laquelle est prétendante à améliorer continuellement son niveau de vie (GIEC, 2014; 2019).

I-2- Changements climatiques en interactions climat-plante

Les plantes cultivées dépendent dans leur croissance et de leur développement aux facteurs environnementaux primordiaux suivants : la température, les précipitations, l'ensoleillement et le CO₂ atmosphérique. Il est rappelé que les plantes absorbent le CO₂ par leurs feuillages et entrent en des interactions avec : l'eau captée par leurs racines, les rayons solaires, la température et les disponibilités en éléments chimiques initiaux ; ce qui permet la synthèse de produits biochimiques, à travers le processus de la photosynthèse. Toutefois, en conditions de changements climatiques, malgré que l'augmentation anormale de la concentration en CO₂ atmosphérique, pourrait être favorable à la croissance intensifiée de la plante, mais il réside que l'autre principal facteur limitant est la disponibilité en eau pour le végétal en question. En outre, la qualité de certains éléments biochimiques de la biosynthèse par la plante est susceptible d'être affectée par les niveaux excessifs en CO₂ du milieu, risquant d'inhiber à des degrés variables l'absorption de l'azote par le végétal, sachant que cet élément minéral est d'ordre essentiel dans la formation de la biomasse afférente (Houghton, 2009).

II-Impacts et mesures anti-changements climatiques sur les productions végétales

II-1-Cadre mondial d'impacts des changements climatiques sur les productions végétales

Dans le contexte actuel à l'échelle mondiale, il est approuvé que les modifications en température de l'air et du régime des précipitations, influent effectivement sur les activités agricoles et plus particulièrement en baisse des productivités végétales, en raison d'interférences majeures que subissent les cultures pratiquées avec les stress conjugués thermique et hydrique (GIEC, 2014; 2019).

II-2- Zone africaine à l'impact des changements climatiques sur les productions végétales

Au niveau du continent africain les changements climatiques ont impacté en divers sites le système des productions végétales. Les effets étaient plus sévères lors des dures sécheresses aux pays du Sahel dès les années 1960. Ceci avaient perduré en Afrique de l'Ouest durant les années 1970 et 1980. Ainsi, les changements climatiques avaient depuis lors, ont induit des suites fortement négatives sur les productivités de la plupart des spéculations en production végétale (Sarr, 2006).

Dans une vision prospective pour l'agriculture africaine plus orientée vers la production végétale et en partant du fait qu'une fois sont maintenus nos actuels comportements humains planétaires, les projections des incidences des changements climatiques sont plus inquiétantes, comme il a été explicité au 5^{ème} rapport du GIEC en ses deux premières parties (GIEC, 2013 ; 2014), dont le récapitulatif est le suivant :

- Augmentation de la température de 2°C ou plus à l'horizon de l'an 2050, par rapport à la température de référence en fin du 20^{ème} siècle, ce qui entrainerait alors inévitablement la diminution des productions végétales, aussi avec les grands risques pour la baisse des rendements des cultures en fonction des ampleurs des réchauffements atmosphériques projetés et qui pourraient atteindre des écarts extrêmes de 4°C , voire plus selon les endroits propices.
- Des atteintes défavorables seraient probables sur le continent africain et qui porteraient sur la pratique des principales cultures de base, à savoir : les blés, le riz et le maïs, qui sont communément exploitées dans les régions tropicales et tempérées. Des effets plus nocifs sur l'exploitation de ces cultures essentielles dus aux changements climatiques significativement par le réchauffement planétaire excessif, ceci serait dans l'alternative si aucune mesure de redressement n'est prise à l'échelle planétaire en diminution des émissions massives des GES, surtout au reste du monde en extra-continent africain aux niveaux des pays industriels les plus pollueurs de l'environnement.
- Eventualités en de perte importante en terres agricoles dans les zones côtières, sous effet de l'élévation susceptible des niveaux des mers, conjuguée avec la salinisation tendancielle des sols de culture du littoral par l'intrusion marine des eaux de mer.
- Risque latent de l'échappement en atmosphère davantage de quantités d'élément chimique le carbone, à partir de la réserve de son stockage sur la biosphère terrestre. En effet, les manifestations des changements climatiques, engendrant la déforestation de riches espaces agro-forestiers du continent africain, contribueraient nul doute à la

dégradation progressive des écosystèmes naturels, les fiefs d'excellence de la biodiversité originale de la flore et de la faune.

- Perturbations éventuelles des systèmes hydrologiques qui sont prétendues en de nombreuses sites du continent africain, suite à la diminution des précipitations annuelles, avec les menaces sur la détérioration de la qualité de l'eau disponible et sur les volumes des ressources en eau mobilisables ; compromettant alors l'opération d'irrigation des cultures pour les productions végétales.
- Prédiction des impacts économiques à l'échelle mondiale, qui est une tâche difficile à réaliser et pourtant, il est estimé globalement de perte sur le revenu du citoyen pour taux moyen de 0,2 % à 2,0 % en cas du réchauffement de l'air ascendant à hauteur de 2°C. En ciblant l'espace africain, l'aspect économique de son agriculture serait, en effet, le plus touché, compte-tenu que la majorité des paysans y pratiquent des spéculations agricoles vivrières et à caractères aléatoire, plus vulnérables aux changements climatiques.

II-3-Mesures de faire face aux changements climatiques dans le secteur des productions végétales

II-3-1-Définition des principales voies de faire face aux changements climatiques

Des efforts sont déployés selon différentes ampleurs l'échelle planétaire, afin d'endiguer les anomalies et les perturbations écologiques dues aux changements climatiques. Ceux sont concevables en adoptant trois principales voies de mesures, à savoir : l'atténuation, la résilience et l'adaptation. Il est opté pour une voie singulière ou pour des voies combinées selon les circonstances et les moyens disponibles à déployer (Holling, 1973 ; Planton, 2013 ; ADEME, 2020).

-Notion de l'atténuation des changements climatiques

L'atténuation ou la mitigation en changements climatiques désigne les actions à entreprendre contre le réchauffement mondial d'origine humaine, visant à réduire les émissions des gaz à effet de serre (GES) ou par la séquestration au sol du dioxyde du carbone (CO₂) de l'atmosphère. Sachant que Le réchauffement climatique est qualifié de très menaçant pour la survie sur le globe terrestre (ADEME, 2020).

-Notion de la résilience aux changements climatiques

La résilience se rapporte à l'aptitude d'un corps vivant ou un système écologique à surmonter l'altération de son environnement, moyennant des interventions spéciales. En effet, les conditions nécessaires à garantir la résilience escomptée sont en fonction des cibles concernées :

les espèces végétales et animales, les populations humaines, les paysages et les biotopes. En principe, une résilience réussie vise : à préserver la richesse de la biodiversité génétique du règne des vivants et à maintenir les capacités des écosystèmes à évoluer naturellement (Holling, 1973).

- Notion de l'adaptation aux changements climatiques

Les adaptations aux changements climatiques se rapportent à des stratégies à mettre en place pour la réduction de la vulnérabilité des systèmes naturels et humains, dans le présent et le futur. En effet, les actions d'adaptation préconisées visent à compléter les mesures précitées en atténuation. L'inertie climatique engage des décennies voire des siècles à propos des perturbations survenues d'origine anthropique. Par conséquent, les mesures de l'adaptation ne seraient réalisables que par des modifications dans le comportements humain individuel et aussi collectif des personnes morales locales, nationales ou en groupements mondiaux (Planton, 2013).

II-3-2-Mobilisation internationale collective contre les effets des changements climatiques sur l'agriculture en des productions végétales

Une vision stratégique de redressement à l'échelle mondiale du secteur agricole en relation avec les changements climatiques plus focalisée sur les aspects des productions végétales, a été proposée par l'institution internationale GIEC. Les principaux axes de cette réflexion sont les suivants (GIEC, 2014(b) ; 2019) :

- Contribuer à la réduction du réchauffement atmosphérique, en projetant à réduire plus de 2°C, dans le sens du retour à la période pré-industrielle, par l'abaissement des émissions du gaz CO₂ en favorisant sa séquestration par les sols et en production de la biomasse végétale.
- Développer en grande envergure des cultures spéciales, qui présentent double fins de produire de l'énergie d'origine non fossilisée moins polluante et aussi la production de la biomasse végétale absorbant initialement le CO₂ atmosphérique.
- Réajuster avec rationalité les systèmes alimentaires humains et des élevages animaux dans le sens de réduire massivement les émissions de gaz à effet de serre.

II-3-3-Mesures prospectives mondiales en gestion des ressources en eau pour les productions végétales sous les conditions particulières des changements climatiques

La communauté internationale est plus interpellée qu'avant pour asseoir des stratégies efficaces et urgentes d'atténuation et d'adaptation en exploitation des ressources en eau mobilisables à des fins agricoles, surtout pour les productions de la matière verte et dans les nouvelles conditions de changements climatiques. A ce propos, il est recommandé une batterie de mesures correctives (GIEC, 2014 a ; 2014 b), qui sont résumées au Tableau 9.

Tableau 9 : Risques potentiels des changements climatiques sur les ressources en eau pour l'agriculture et les redressements proposés

(Sources : GIEC, 2014 a; 2014 b)

Principaux risques	Contraintes et perspectives de redressements
-Aggravation de pressions exercées par surexploitation de ressources hydriques en dégradation de qualité.	-Réduction de facteurs perturbateurs non climatiques de ressources en eau.
-Stress dû à la sécheresse accentué en régions africaines vulnérables (<i>degré de confiance élevé</i>)	-Renforcement de capacités institutionnelles en gestion de demande, d'évaluation de ressources en eau souterraine, en planification intégrée de l'eau et des eaux usées, et gouvernance intégrée de terre et eau.
-Baisse de productivité des cultures due à la chaleur et à la sécheresse dont conséquences sur moyens de subsistance et sécurité alimentaire des pays, des régions et des ménages pourraient être aggravés, ainsi qu'aux dommages causés par ravageurs, maladies et inondations sur infrastructure des systèmes alimentaires (<i>degré de confiance élevé</i>)	-Adaptations technologiques (variétés végétales tolérantes au stress, irrigation, systèmes d'observations perfectionnés, etc.)
	-Amélioration d'accès des petits producteurs au crédits financiers et autres facteurs essentiels de production ; diversification de mode de subsistance d'agriculteurs.
	-Renforcement des institutions locales, nationales et régionales d'appui à l'agriculture (y compris pour établir systèmes d'alerte précoce) et politiques d'égalité des sexes.
	-Adaptations connexes agronomiques et de valorisations agricoles (agroforesterie, post-récolte en agriculture).
-Variations d'incidence et d'extension géographique de maladies à transmission vectorielle ou d'origine hydrique dues à l'évolution des températures et des précipitations selon aires de répartition (<i>degré de confiance moyen</i>)	-Réalisation des objectifs de développement, notamment amélioration de l'accès à l'eau potable et aux systèmes d'assainissement, et renforcement de fonctions liées à la santé publique telles que la surveillance.
	-Cartographie de vulnérabilité et systèmes d'alerte précoce
	-Coordination intersectorielle.
	-Développement durable en urbain et en rural.

Les interventions escomptées sont conçues dans une vision intégrée en un ensemble cohérent d'actions à entreprendre à caractères techniques et institutionnel du développement agricole et rural (Tableau 9).

II-3-4-Mesures spécifiques entreprises en zones d'Afrique et du Moyen-Orient pour la gestion des ressources en eau en productions végétales dans la circonstance des changements climatiques

Compte-tenu des revers des changements climatiques sur le continent africain, il a été recommandé aux décideurs africains par les instances internationales habilitées de prendre les mesures escomptées pour les productions végétales. Les interventions requises sont à fédérer dans le sens de l'atténuation et de l'adaptation en exploitation des ressources en eau en agriculture des productions végétales. A cet effet, l'organisme international de l'ONU a entrepris l'instauration du « Fonds Vert pour le Climat » (Green Climate Fund), un nouvel outil de dimension mondiale à l'appui aux financements des projets prioritaires dans le cadre du soutien des pays en voie de développement les plus vulnérables et qui manquent en fonds et en expertises nécessaires (Doukpolo, 2014 ; GIEC, 2019).

-Mesures prospectives en zones Nord-Afrique et Moyen-Orient en gestion des ressources en eau pour en productions végétales en circonstance de changements climatiques

Les projections à long-terme en des changements climatiques moins favorables dans les pays du Maghreb et au Moyen-Orient en matière des productions végétales ont contraint leurs gouvernements à initier leurs programmes agricoles dans la rationalisation de la gestion des ressources en eau en agriculture et pour les ménages des populations (El Jihad et Taabni, 2017).

-Stratégie marocaine dans la gestion de ressources en eau en agriculture

Partant du fait que le pays du Maroc a connu durant les trois années successives de 2015, 2016 et 2017 d'importants déficits pluviométriques qui sont à caractère structurel. Des répercussions notables ont été relevés en affaiblissement des écoulements des eaux de surface, sur la réduction des apports d'eau aux barrages hydrauliques potentiels et en recharge anormale de nappes d'eaux souterraines. A ce propos et pour redresser à l'essentiel cette situation critique, le gouvernement marocain a lancé un programme prioritaire d'urgence sur la période de 2019-2026. Le volet agricole, afférent à ce programme comporte deux axes : le premier axe qui consiste en des « projets de développement de l'offre en eau » et le deuxième axe porte sur la « gestion de la demande, sur l'économie de l'eau et de sur la valorisation des eaux pour l'irrigation » (Royaume du Maroc, 2019). Les composantes de ce programme et sa morasse budgétaire sont apportées au Tableau 10.

Tableau 10 : Programme prioritaire du gouvernement marocain restructurant le processus de l'exploitation des eaux pour la période de 2019-2026- Volet du secteur agricole (Royaume du Maroc, 2019).

Composantes du programme	Coûts estimatifs en période 2019-2026 (en Millions de Dhs)
1. Développement de l'offre (Sous-total 1)	31 795
-Grands barrages (en cours et en projet) : + 16 Ouvrages hydrauliques + Destinations : Irrigation (I), adduction eau potable (AEP), électricité (E), protection antiinondations (PI) +Volume total des capacités des barrages: 3 Milliards de m ³	16 450
-Petits barrages colinéaires (909 Ouvrages hydrauliques, destinations: I, AEP et PI)	12 845
-Gestion des points d'eau d'abreuvement du cheptel d'élevages animaux	400
-Prospection et amélioration de la connaissance des eaux souterraines (I et AEP)	800
-Développement des périmètres PMH	1 300
2. Gestion de la demande, économie et valorisation de l'eau (Sous-total 2)	13 330
-Reconversion collective à l'irrigation localisée	5 000
-Reconversion individuelle à l'irrigation localisée	4 500
-Modernisation et réhabilitation des systèmes d'adduction d'eau à but multiple	330
-Sauvegarde de l'irrigation dans la plaine du Saïs	2 500
-Aménagement hydroagricole de la zone Sud-Est dans le Gharb	1 000
Total global (Sous-total 1+ Sous-total 2)	45 125

Le programme prioritaire sus-indiqué constitue une consolidation du Programme National de l'Economie d'Eau en Irrigation (PNEEI), sachant que ce dernier constituait déjà l'ossature du programme marocain de développement agricole « Plan Maroc Vert » sur l'échéancier de 2008-2020. Le nouveau programme prioritaire se fixe les prérogatives primordiales suivantes (Royaume du Maroc, 2019):

- La poursuite de la modernisation des réseaux d'irrigation dans le cadre de la reconversion collective à l'irrigation localisée, en vue d'améliorer leurs efficacités fonctionnelles.
- La continuité avec une grande célérité du processus de la reconversion individuelle à l'irrigation localisée, par la poursuite du régime des aides financières de l'Etat dans le cadre du Fonds de Développement Agricole (FDA).
- Le soutien à l'encadrement et au conseil agricole, en vue de doter les agriculteurs de la meilleure maîtrise en techniques d'irrigation appropriées pour une rationalité de l'utilisation de l'eau aux niveaux de leurs parcelles agricoles.

En effet, il a été alloué à ce programme prioritaire pour son volet de « l'irrigation en agriculture », le budget global de 45,13 milliards de Dirhams sur un échéancier de 2019-2026, engendrant le financement des aspects fondamentaux des équipements dédiés à l'irrigation localisée. Ce programme se focalise, en effet, sur les zones potentielles, notamment aux périmètres irrigués du Tadla, des Doukkala, du Haouz, de la Moulouya et du Gharb. En fonction des modes de la reconversion à l'irrigation localisée, le programme vise les objectifs suivants (Royaume du Maroc, 2019) :

- Reconversion en individuel : La superficie objectif est de 150 000 ha.
- Reconversion au collectif : La superficie objectif est de 220 000 ha, concernant les grands périmètres irrigués et laquelle s'éclate ainsi :
 - + 65 000 ha sont à cette date déjà achevés,
 - + 55 000 ha sont actuellement en cours de la réalisation et sont prévus pour achèvement en fin de l'année de 2022,
 - +100 000 ha sont projetés pour un lancement primaire en début de l'année 2021 et les travaux sont prévus à terminer avant la fin de 2026.

En l'occurrence, ce programme prioritaire vise la réalisation des actions complémentaires à axer sur la modernisation et la réhabilitation des systèmes d'adduction d'eau en des buts multiples, à

partir de la source des barrages hydrauliques de la retenue en des eaux de surface. Ces options sont projetées dans un cadre intégré entre des départements ministériels marocains et des organismes habilités et qui concernent les opérations suivantes (Royaume du Maroc, 2019) (Tableau 10) :

- Entretien et réhabilitation des ouvrages vulnérables du périmètre irrigué de la basse Moulouya.
- Modernisation des systèmes d'adduction et de transport d'eau entre les barrages hydrauliques et les entêtes des périmètres d'irrigation en leur aval.
- Pérennisation des ouvrages hydro-agricoles et l'instauration de mesures de la réduction de pertes d'eau d'irrigation aux niveaux des bassins hydrauliques de Tensift et d'Oum Er Rbia.
- Programmation des actions spéciales concernant: la réalisation des aménagements hydro-agricoles en zone Sud-Est de la plaine du Gharb sur superficie de 30 000 ha, ainsi que pour la poursuite des travaux du projet de la sauvegarde d'irrigation dans la plaine du Saïs sur une étendue d'environ 30 000 ha.

Chapitre III : REPOSE A LA REDUCTION DE L'EAU D'IRRIGATION : BESOINS HYDRIQUES ET VARIABILITES DES EFFICIENCES D'UTILISATION DE L'EAU PAR LES CULTURES

Il est question de donner des efficacités de référence des systèmes d'irrigation les plus usuels à l'échelle mondiale. Aussi, il est rapporté les principaux résultats des expérimentations sur la réduction de l'eau pour les cultures conventionnelles au niveau régional, concernant les niveaux des efficacités agronomiques et économiques de l'utilisation de l'eau d'irrigation.

I-Notions d'efficacité et de valorisation de l'eau d'irrigation par les cultures

L'efficacité se définit en général par le rapport aux points de la sortie et à l'entrée d'un domaine physique étudié pour respectivement entre les quantités des matériaux récupérés et les quantités injectées. Pour le cas spécial de l'efficacité de l'irrigation (E.I.), en admettant comme point de sortie est la quantité de l'eau utile à la production finale d'une culture donnée, cette quantité d'eau est divisée par la quantité d'eau initiale mise au préalable en tête de la parcelle agricole. En pratique, il est procédé en évaluant pour chaque technique d'irrigation adoptée son efficacité spécifique (Bouaziz et Belabbes, 2002 ; Hsiao et *al.*, 2007).

Dans le cas spécial pour évaluer la consommation de l'eau par une culture déterminée, cette l'efficacité est rapportée à la productivité agronomique de l'utilisation de l'eau. Cette donnée s'exprime par le rapport de la quantité produite récoltée avec le volume de l'eau pour son usage effectif par la culture en question (Van Halsema et Vincent, 2012).

I-1-Concepts des efficacités en irrigation des cultures

L'efficacité de l'irrigation (E.I.) se définit usuellement par le rapport suivant (Hsiao et *al.*, 2007) :

$$E.I. = (\text{Eau utilisée avantageusement} / \text{Eau totale appliquée}) \quad (3)$$

Il s'agit d'un concept classique d'efficacité d'irrigation qui est employé en génie hydraulique. Cette perception d'efficacité met l'accent sur la quantité d'eau libérée à partir d'une source donnée en comparaison avec la consommation réelle de l'eau par les cultures, tout en considérant séparément les événements qui surviennent à la parcelle ou au champ de culture et aussi au cours du transport de l'eau. Il apparaît donc que le concept de l'efficacité de l'irrigation est nuancé selon les deux sous-concepts primordiaux suivants (Van Halsema et Vincent, 2012):

- *Efficienc e du transport d'eau (Et)* : qui traduit la performance de la technologie d'irrigation. Ainsi, les fourchettes de la variation de cette effic ience sont g n n raleme nt utilis ees pour caler les d ebits a lib r er de la source en fonction de la technique d'irrigation, qui sont de l'ordre de 30 % a 70 % en mode d'irrigation de la surface et de 70 % a 90% en mode d'irrigation sous pression.
- *Efficienc e d'application de l'eau (Ea)* : qui s'int r esse aux ph n ome nes des flux d'eau a la parcelle. Cet indicateur est g n n raleme nt d efini comme le rapport entre l'eau consomm e e (Ec) « eau utilis e e avantageuseme nt par la plante » et l'eau effectivement appliqu e e a la parcelle (El), qui est exprim e par le rapport : $Ea = (Ec/El)$.

Il en d ecoule que la notion de l'effic ience avec ces deux termes (Ea et Et) est pr e sent e e en une effic ience globale de l'irrigation (Eg) et qui s'exprime ainsi : $Eg = Ea \times Et$.

I-2-Etapes de la d e t e r m i n a t i o n p r a t i q u e d e s e f f i c i e n c e s e n i r r i g a t i o n

Au pr e alable, il est opportun de prendre connaissance de l'acheminement de l'eau en relation avec le d e v e l o p p e m e n t a g r o n o m i q u e d e l a c u l t u r e . A c e t e f f e t , i l e s t d e f i n i s i x p r i n c i p a u x n i v e a u x d e s e f f i c i e n c e s d o n t l e s e x p l i c a t i o n s s o n t r a p p o r t e e s c i - a p r e s (Wittling et Molle, 2017) et sont sch e m a t i s e s a l a F i g u r e 2 .

-
- Niveau 1 : L'eau en entr e e a la parcelle (Pi), dont une partie est susceptible d' e t r e p e r d u e e n r a i s o n d e s f u i t e s d a n s l e s e q u i p e m e n t s i n s t a l l e s .
- Niveau 2 : L'eau appliqu e e (Ai), c'est-a-dire l'eau sortant du mat e r i e l d'irrigation (buse ou goutteur). En pr e s e n c e d u s y s t e m e d'irrigation par aspersion, une partie de cette eau peut e t r e p e r d u e s o i t p a r l' e v a p o r a t i o n , s o i t p a r u n e d e p e r d i t i o n d a n s l e t r a n s p o r t , s o i t p a r d e r i v e d u v e n t o u s o i t p a r l' i n t e r c e p t i o n p a r l e c o u v e r t v e g e t a l a e n e t r e e v e n t u e l l e m e n t d i s s i p e e a t r a v e r s l' e v a p o r a t i o n s u r l e f e u i l l a g e .
- Niveau 3 : L'eau atteignant le sol (Si), pour une partie qui se perd soit par le ruissellement ou soit par le drainage.
- Niveau 4 : L'eau retenue dans la zone racinaire (Z Ri), une partie est ponctionn e e par l' e v a p o - t r a n s p i r a t i o n d e s a d v e n t i c e s d u r a n t l e c y c l e d e d e v e l o p p e m e n t d e l a c u l t u r e . I l e s t e v e n t u e l q u' u n e p o r t i o n i n u t i l i s e e d e l' e a u q u i r e s t e d a n s l a z o n e r a c i n a i r e a p r e s l a r e c o l t e d e l a c u l t u r e .
- Niveau 5 : L'eau r e e l l e m e n t e v a p o - t r a n s p i r e e p a r l a c u l t u r e (E T R i), avec une part qui s' e l i m i n e s o u s l a f o r m e h y d r i q u e e v a p o r e e d i r e c t e m e n t a p a r t i r d u s o l .

-Niveau 6 : L'eau absorbée et effectivement transpirée par la culture (T_i). Cette eau permet au végétal d'assimiler le CO_2 de l'air ambiant en s'interférant au mécanisme de la photosynthèse qui aboutit à la production de la biomasse végétale. De point de vue agronomique, cette étape physiologique de la plante est cruciale dans le processus de la formation du rendement productif de la culture exploitée.

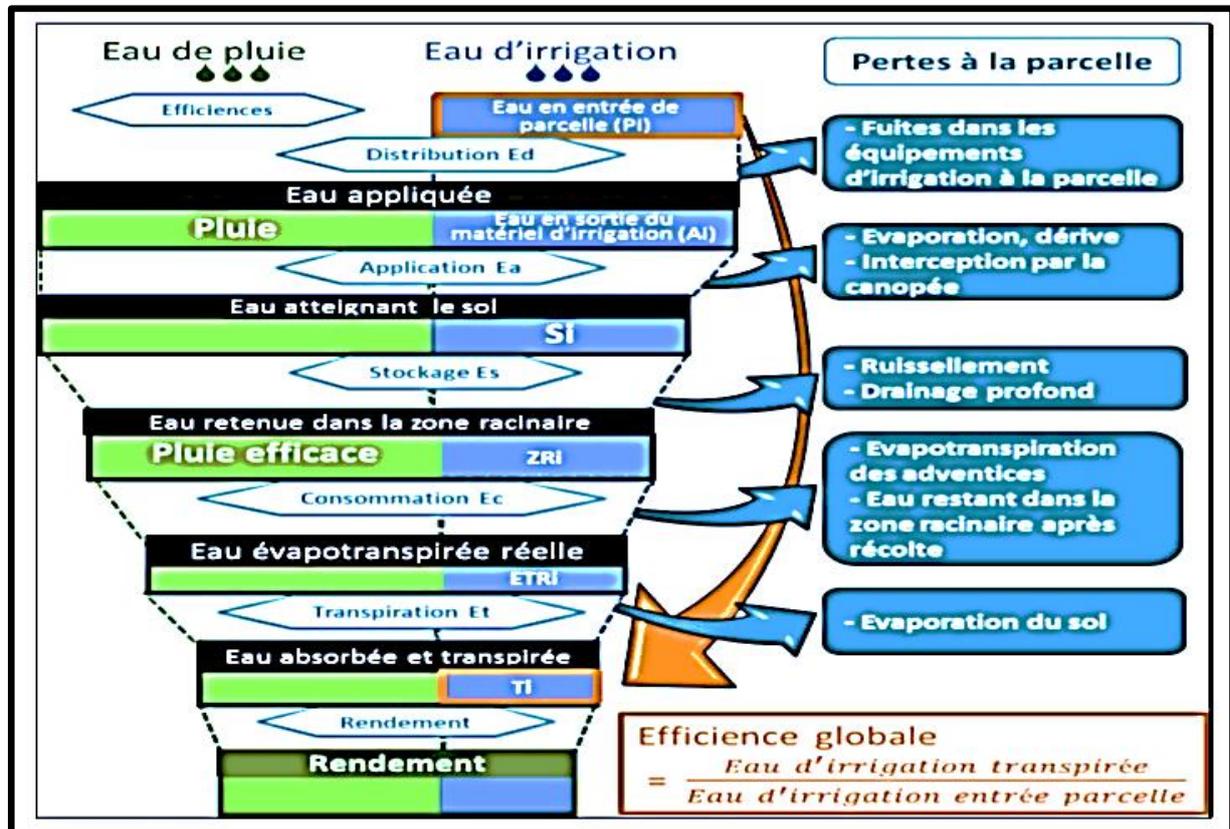


Figure 2 : Schéma des acheminements de l'eau et les étapes de détermination des efficacités De l'utilisation de l'eau pour les cultures (Source : Wittling et Molle, 2017)

Pour plus de précision les différentes efficacités de l'eau d'irrigation à la parcelle sont hiérarchisées en cinq principales étapes, qui sont explicitées ci-dessous (Wittling et Molle, 2017) et schématisées à la Figure 2:

-Etape 1 : L'efficacité de la distribution à la parcelle (E_d) ($=$ Eau appliquée / Eau en entrée de parcelle ($= A_i / P_i$)), qui est aussi appelé aussi *le coefficient d'uniformité (CU)*, un indicateur de référence fréquemment adopté pour le contrôle de performance des réseaux sous pression, y compris pour le système d'irrigation localisée.

-Etape 2 : L'efficacité d'application (E_a) ($=$ Eau atteignant le sol / Eau appliquée ($= S_i / A_i$)). Dans les conditions normales, cette efficacité pour le système d'irrigation au goutte à goutte est très proche de 100%.

-Etape 3 : L'efficacité de stockage (E_s) (= Eau retenue dans la zone racinaire / Eau atteignant le sol (= ZR_i / S_i)).

-Etape 4 : L'efficacité de la consommation (E_c) (= Eau évapo-transpirée / Eau retenue dans la zone racinaire (= ETR_i / ZR_i)).

-Etape 5 : Efficacité de la transpiration (E_t) (= Eau transpirée / Eau évapo-transpirée (= T_i / ETR_i)).

Les cinq étapes précitées composent alors l'efficacité globale de l'irrigation (E_g), laquelle a pour formule: $E_g = \text{Eau évapo-transpirée} / \text{Eau en entrée de la parcelle ou le produit} : (E_d \times E_a \times E_s \times E_c \times E_t)$.

I-3-Evaluation des volumes d'eau utilisés par étapes d'efficacités en irrigation

L'évaluation du volume d'eau à différentes étapes d'évaluation des efficacités d'irrigation est faisable par des mesures pratiques approchées ou par des mesures plus précises en utilisant des outils et des appareillages appropriés (Wittling et Molle, 2017). Les principales modalités de ces mesures sont présentées au Tableau 11.

Tableau 11 : Modalités des mesures d'évaluation des volumes d'eau en relation avec la détermination des efficacités d'irrigation

(Source : Wittling et Molle, 2017)

Type de mesures	Paramètres mesurés
	Eau à appliquer
	Précipitations à prévisions moins précises.
	Eau d'irrigation appliquée, qui sorte directement du matériel d'irrigation, évaluée par mesure du débit de l'émetteur (buse ou goutteur) multipliée par la durée d'irrigation.
Mesures directes	L'eau atteignant le sol
Eau d'irrigation entrant en parcelle	Eau de pluie, mesurée par pluviomètres.
(Mesurable par compteur ou débitmètre sur borne en entête de parcelle).	Eau irrigation, en aspersion ou irrigation localisée, atteignant sol et mesurée par collecteurs pour apprécier l'uniformité de distribution.
	L'eau retenue dans la zone racinaire
	(Eau de pluie et eau d'irrigation ne se distinguent plus).
	L'eau au sol approchée par échantillons de mesure d'humidité pondérale (gravimétrie), ou par instrumentation au champ d'humidité volumique (sondes à neutrons, sondes capacitives types FDR ou TDR, tensiomètres...).

En l'occurrence, les évaluations indirectes des exigences en eau d'une culture au niveau parcellaire, évoquées au Tableau 11, sont effectuées pratiquement à l'aide des méthodes

spécifiques. Le choix de la méthode est fondamental dans toute stratégie d'utilisation rationnelle des facteurs en cultures des productions végétales. Ainsi, les procédés agro-climatiques usuels et de référence, sont énumérés ci-après (Doorenbos et Pruitt, 1977; Doorenbos et Kassam, 1979; Alien et al., 1998).

- *La méthode du bilan hydrique* : En se basant sur l'évaluation directe de l'évapotranspiration réelle (ETR) ou l'évapo-transpiration maximale (ETM) de la culture, à déterminer par des mesurant in situ sur la variation du stock d'eau dans le profil cultural sur sol prospecté par les racines par la technique gravimétrique ou par des outils des sondes à neutron ou récemment par le recours à l'appareillage en sondes capacitives (types : TDR, FDR...). Les mesures tiennent compte, aux cas éventuels, des apports d'eau exogènes (pluies, irrigation, remontées capillaires) et des apports d'eau endogènes des flux d'eau transversaux aux sols.
- *La méthode lysimétrique* : En utilisant le dispositif du lysimètre, soit de type de drainage ou soit de type en pesée de précision, afin d'approcher directement l'ETM de la culture. Ce qui permet d'évaluer sur place le bilan hydrique sur la cuve lysimétrique simple ou par le suivi pondéral en bloc de ladite cuve. Toutefois, de tels dispositifs de mesures restent très coûteux, encombrants, difficiles à installer, fastidieux à gérer et aussi moins pratique à entretenir régulièrement.
- *Les méthodes micro-climatiques* : En faisant recours à l'approximation indirecte des besoins en eau des cultures par l'évaluation du « bilan d'énergie » au niveau de la surface du couvert végétal. Cependant, ces méthodes pointues nécessitent des équipements sophistiqués, coûteux et exigeant la technicité requise des opérateurs. Ces méthodes sont plus utilisées en des activités spéciales de la recherche scientifique (Hatfield, 1984).
- *Les méthodes climatiques-physiologiques* : Il est plus pratique de se fier aux méthodes indirectes empiriques, qui combinent l'approche climatique avec le développement physiologique de la plante cultivée. En effet, il est procédé par une modélisation spécifique très simplifiée, avec la formule: $ETM = K_c \times ET_o$, où ET_o désigne l'évapotranspiration de référence et K_c indique le coefficient cultural, ce paramètre dépend essentiellement de la nature du matériel végétal utilisé et de son stade de développement physiologique (Doorenbos et Pruitt, 1977).

I-4-Caractérisation de la nature des pertes d'eau en irrigation

Les déperditions de l'eau d'irrigation en parcelle agricole (SF_i) sont attribuées à des raisons essentielles décrites ci-après (Doorenbos et Pruitt, 1977 ; Doorenbos et Kassam, 1979 ; Alien et al., 1998 ; Wittling et Molle, 2017):

- Fuites dans les équipements d'irrigation installés à l'échelle de la parcelle (Fi) ;
- Evaporation directe et de la dérive en sens du jet d'eau dans le cas du système d'irrigation par l'aspersion (EDi) ;
- Interception passagère de l'eau par le couvert végétal sur sa partie aérienne ;
- Ruissellement d'eau à la surface du sol de la parcelle de culture;
- Drainage d'eau au sous-sol parcellaire (Di) ;
- Evapo-transpiration des adventices indésirables infestant les parcelles cultivées ;
- Eau éperdue par l'évaporation directe à partir du sol (Ei), ainsi que pour l'eau restante dans la zone racinaire après l'opération de la récolte de la culture en fin du cycle d'exploitation.

I-5-Ordres de grandeurs des efficacités des systèmes d'irrigation usuels

Les valeurs référentielles des efficacités de l'eau lors du déroulement des irrigations en parcelle sont tributaires aux types des sols et les systèmes d'irrigation usuels, définies ci-après (Wittling et Molle, 2017), et récapitulées pour divers sites agro-pédo-climatiques mondiaux au Tableau 12.

- Efficacité d'application (Ea) : la part d'eau sortante du matériel de l'irrigation et qui atteint le sol, elle est comprise entre 70% et 95% en aspersion et proche de 100% pour le goutte à goutte.
- Efficacité de la consommation (Ec) : Dans l'ordre de 85% à 99%, renseigne sur la part d'eau stockée dans la zone racinaire, destinée à être réellement évapo-transpirée par la culture.
- L'efficacité de la transpiration (Et) : La fraction de l'eau effectivement évapo-transpirée par le végétal, qui se situe entre un minimum de 20% à 50% et un maximum de 70% à 92% selon les circonstances du milieu.
- Le produit d'efficacités (Ed x Ea x Es) : Représente la part de l'eau entrante à la parcelle et stockée en zone racinaire qui est accessible à la culture, elle est évaluée entre 35% et 95 % pour l'irrigation gravitaire, de 72% à 90% pour l'aspersion et de 70% à 95% pour l'irrigation localisée.
- Le produit d'efficacités (Es x Ec) : Exprime la part de l'eau atteignant le sol, qui est évapo-transpirée par la culture. Il est évalué au taux oscillant aux alentours de la moyenne de 86 % dans la situation d'une couverture végétale intégrale du sol en conduite de culture sous système d'irrigation gravitaire.

- L'efficacité globale de l'irrigation : Déterminée par le produit ($E_d \times E_a \times E_s \times E_c$), qui porte sur la fraction nette d'eau pénétrante à la parcelle et évapo-transpirée par la culture. Les gammes des variations de cette efficacité par système d'irrigation : entre 50% et 79% pour le gravitaire, de 69% à 94% en l'aspersion et de 57% à 70% au goutte à goutte.

Tableau 12 : Efficacités d'eau des systèmes d'irrigation usuels à différents sites mondiaux et pour principales cultures
(Sources : Références citées par Wittling et Molle, (2017))

Localisation	Culture	Efficacités (comme définies dans le texte)	Système d'irrigation	Valeurs d'efficacités (%)			Auteurs
				Moyenne	Minimum	Maximum	
Divers sites	Général	Ea	Canon enrouleur	-	85 à 90		Granier et Deumier (2013)
			Gravitaire	-	70 à 75		
			Goutte à goutte	100	-		
Espagne	Maïs à grain	Ea	Couverture intégrale	92	-		Carrion et al., 2014
Général	Général	Ec	Général	-	85 à 92		Hsiao et al. (2007)
		Et	Général	-	25 à 50		
Espagne	Maïs	Es x Ec	Couverture intégrale	86	84	89	Carrion et al., 2014
		Ed x Ea x Es x Ec		79	77	82	
Italie	Maïs à grain	Ed x Ea x Es pour chaque apport d'irrigation	Gravitaire	-	53	95	Canone et al., 2015
Divers sites	Général	Ed x Ea x Es	Général	-	30 à 50		Hsiao et al. (2007)
Divers sites	Général	Ed x Ea x Es	Gravitaire	75	50	95	Howell (2003)
			Micro-irrigation	87	70	95	
Espagne Vallée de l'Ebre	Luzerne; Maïs ; Tournesol	Ed x Ea x Es	Gravitaire en sols alluviaux à forte RU	62	51	81	Lecina et al., 2005
	Luzerne; Maïs ; Tournesol	Ed x Ea x Es	Gravitaire en sols superficiels à faible RU	53	40	75	
	Tomate; Piment	Ed x Ea x Es	Gravitaire en sols superficiels à faible RU	35	27	39	
Espagne Vallée de l'Ebre	Général	Ed x Ea x Es x Ec	Gravitaire Sols superficiels à faible RU	49	-	-	Causape et al., 2006
		Ed x Ea x Es x Ec	Gravitaire Sols plus profonds	79	-	-	
USA (Bassin du fleuve Rio au New Mexico)	Luzerne ; pacanier, coton	Ed x Ea x Es x Ec	Gravitaire	66 à 60	11 à 14	90 à 95	Ahadi et al., 2013
Espagne (Huelva)	Fraise sous tunnel	Ed x Ea x Es x Ec	Goutte à goutte	70	58	81	Lozano et al., 2016
Maroc	Oignons, Pomme de terre	Ed x Ea x Es x Ec	Goutte à goutte	57	25	97	Benouniche et al., 2014
Italie	Oignons; Tomate industrielle; Tabac	Ed x Ea x Es x Ec	Goutte à goutte	63	39	81	Ghinassi, 2012

Abréviations : Ed : efficacité de distribution ; Ea : efficacité d'application ; Es: efficacité de stockage ; Ec : efficacité de consommation ; Et : efficacité de transpiration ; EG : efficacité globale d'irrigation

Sur des terrains de cultures spécifiquement à l'espace marocain, les valeurs référentielles des efficacités des irrigations sont consignées au Tableau 13.

**Tableau 13 : Données référentielles des efficacités des irrigations
aux périmètres irrigués en grande hydraulique au Maroc**

Mode d'irrigation	Efficacité des irrigations (%)						Auteurs
	Réseau		Parcelle		Global		
	Actuelle (A)	Potentielle (P)	A	P	A	P	
Gravitaire (ciel ouvert)	80	85	50	70	40	60	Bouaziz et Belabbes, 2002
Aspersion	85	95	70	85	60	80	
Irrigation localisée	91 (*)	95 (*)	92 (**)	95 (**)	84	90	(*) ORMVA du Tadla, 2020
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)x(3)	(2)x(4)	(**) Ramdi et El Khalfi, 2019

Aux périmètres irrigués du Maroc, il est relevé que l'efficacité d'irrigation à partir du départ régresse en passant de l'amont des réseaux principaux d'irrigation vers la destination finale des parcelles agricoles des agriculteurs, pour se terminer en fin du compte en une efficacité globale moins performante. L'efficacité finale exprimée par système d'irrigation est en moyenne de : 60% en système gravitaire, 80% en système d'aspersion et de 90% en système d'irrigation localisée. Le détail des données est rapporté au Tableau 13.

I-6-Efficacités agronomiques et économiques de l'utilisation de l'eau de l'irrigation

-Définition de l'efficacité agronomique d'une culture pour l'utilisation de l'eau d'irrigation

L'aspect agronomique est évalué en relation avec la consommation d'eau par l'indicateur pertinent de « l'efficacité d'utilisation de l'eau ». Cet indicateur qui a pour nomenclature EUE, renseigne sur la réponse physiologique de la culture à travers son rendement agronomique à propos de son approvisionnement hydrique tout au long du cycle de développement cultural. Pour le cas le plus usuel se rapportant à l'opération des irrigations, l'EUE est déterminée par le raisonnement sur le volume net total de l'eau d'irrigation, quantifiable par le cumul d'évapotranspiration réelle (ETR) des plantes, en relation avec la productivité végétale de la culture envisagée. L'équation de l'EUE est communément définie ainsi (Doorenbos et Kassam, 1979; Bouaziz et Belabbes, 2002):

$$\text{EUE (kg/m}^3 \text{ eau)} = (\text{Rdt/ETR}). \quad (4)$$

Avec : - Rdt : Désigne le rendement de la culture

-ETR : Evapo-transpiration cumulative par cycle cultural

Il est à signaler que le rendement impliqué dans le calcul de l'EUE est souvent exprimé en matière sèche totale ou pour une partie récoltable de la plante (grain de blé, racine de betterave...). Aussi à des fins de quantification de l'EUE, le rendement productif global de la parcelle agricole est pratiquement approché par des pesées d'échantillons des productions sur des placettes unitaires relevant de la surface totale exploitée par la culture étudiée. Quant à

l'ETR, elle est évaluée au cours du cycle de production de la culture par des méthodes directes ou indirecte, selon les conditions propices et les moyens disponibles en suivi agronomique de la spéculation agricole concernée (Doorenbos et Kassam, 1979 ; Van Halsema et Vincent, 2012).

-Définition de la valorisation économique de l'eau d'irrigation pour une culture

La valorisation de manière agro-économiste de l'eau d'irrigation de la culture est appréhendée par les indicateurs intermédiaires suivants (Bouaziz et Belabbes, 2002):

- La valeur du produit brut de la production agricole végétale à l'hectare (PB) : Qui concerne rendement agricole à l'unité de surface exploitée (Rdt) (en kg/ha ou en Tonne/ha) et à multiplier par le prix unitaire (PU) (exprimé par exemple en Dirham par kg ou par tonne de produit). La formule de calcul est: $PB \text{ (en Dirhams/ha)} = Rdt \text{ (kg/ha)} \times PU \text{ (Dirhams/kg)}$.
- La valeur ajoutée de la culture à l'hectare (VA) : Différence entre la valeur du produit brut (PB) et les charges de production (CHfm), portant sur les frais d'outputs (intrants, semences, engrais, pesticides et autres frais) et sur le coût d'utilisation du matériel agricole (par sa location ou par les amortissements d'achat d'engins des travaux à façon ou de récolte). La formule de valeur ajoutée est alors : $VA \text{ (en Dirhams/ha)} = (PB - CHfm)$.
- Le revenu réel (RR) de l'hectare : Par la déduction de la valeur ajoutée (VA) des charges de la main-d'œuvre salariale (CHmos). Le calcul se fait ainsi : $RR \text{ (dirhams/ha)} = (VA - CHmos)$.
- Le revenu net (RN) de l'hectare : Revenu réel (RR) retranché des charges de la main-d'œuvre familiale (CHmof). Le calcul se fait de la manière suivante: $RN \text{ (Dirhams/ha)} = RR - CHmof$.

En fin de compte, la valorisation économique de l'eau d'irrigation est opérée en fonction de la valeur ajoutée en exploitation de la culture rapportée à son volume utilisé en eau d'irrigation durant le cycle productif cultural (exprimée par exemple au Maroc en des unités du Dirhams par mètre cube d'eau) (Bouaziz et Belabbes, 2002).

II-Niveaux des consommations et des efficacités de l'utilisation d'eau par les cultures en situation normale et en situation de déficit hydrique par systèmes d'irrigation usuels

Le déficit hydrique prolongé, évoqué plus haut (voir le paragraphe *III-3-1-3-Evapo-transpiration réelle*, de la rubrique *A-ressources hydriques et changements climatiques*), est approuvé qu'il impacte significativement les performances agronomiques des cultures. A ce propos, il est relaté les cas spéciaux des cultures les plus pratiquées dans le périmètre irrigué de Tadla (zone d'étude). En effet, il est objet de mener des analyses comparatives entre les résultats de travaux de recherche du local par rapport à des zones à climats similaires. Ceux-ci sont abordés en

confrontant le système d'irrigation classique du gravitaire, avec les systèmes d'irrigation sous pression plus efficaces, plus particulièrement la technique d'irrigation localisée.

II-1-Cas des cultures des céréales d'automne

En vue d'évaluer la réponse de la culture des blés (*Triticum sp. L.*) à la sécheresse pluviométrique ou hydrique, notamment au début de son cycle productif et aux moments opportuns d'exigence en irrigation d'appoint, les références portent sur les résultats d'une expérimentation modèle. Il s'agit des essais culturels menés sur la culture de blé selon les deux situations : la première situation en plein champ en zone du périmètre de Tadla et la seconde situation en conduite sous-serre expérimentale à la ville de Rabat. Pour des raisons de validité des résultats des expérimentations entreprises, les deux situations sont reconduites une deuxième campagne dans les mêmes conditions expérimentales. En effet, aux campagnes de 1992/1993 et de 1993/1994, il est constaté que des hauteurs d'eau apportées en période cruciale du semis-installation de la culture sont de 15 mm à 10 mm, permettant la meilleure levée des graines du blé, avec la survie des plantules jusqu'à 40 jours. Aussi, il a été attesté que la phase physiologique du gonflement-floraison s'est avérée la plus sensible au déficit hydrique sur le long du cycle de développement de la culture. Ainsi, une seule irrigation apportée en cette phase critique induit l'amélioration du rendement final de 19 à 56 Quintaux/ha (Ait Yacine, 1995).

Aux zones irriguées marocaines en Grande Hydraulique, en des situations de déficit en eau au périmètre des Doukkala, l'EUE du blé est à peine de 0,39 à 1,67 kg/m³ (Belabbes et Kaddani, 1999), ainsi qu'au périmètre du Tadla pour 0,70 à 1,80 kg/m³ (Bouaziz et Belabbes, 2002) (détail au Tableau 14).

Tableau 14 : Consommations et efficacités agronomiques d'utilisation d'eau pour la culture du blé sous régimes de déficit hydrique aux grands périmètres irrigués du Maroc

(Source : Bouaziz et Belabbes, 2002)

Zone	Volume eau irrigation (mm/cycle cultural)	Rendement (quintaux/ha)	Efficacité utilisation en eau d'irrigation (EUE) (kg/m ³)	Bénéfice net (Dhs/ha)	Auteurs
Périmètre des Doukkala	64 à 138 (en fonction d'irrigations d'appoint en 22 cas de parcelles suivies)	26,6 à 63,3	0,39 à 1,67	1000 à 6900	Belabbes et Kaddani, 1999
Périmètre du Tadla	201,1 à 568,5	36,6 à 39,7	0,70 à 1,80	-	Bouaziz et Belabbes, 2002

En une expérimentation sur blés en région du Haouz (Maroc), avec appui de la technique de la télédétection spatiale par indice végétatif NDVI, les EUE respectives sous systèmes d'irrigation

localisée et gravitaire sont de 1,50 et 1,17 Kg/m³, pour l'écart entre les deux systèmes de +24% (Kharrou et *al.*, 2011).

Par ailleurs, lors d'un autre test sur le blé dur (*Triticum durum* L.) en région algérienne du Chlef, avec quatre traitements hydriques sous système d'irrigation gravitaire, qui sont les suivants : (i) Le non irrigué (régime pluvial), (ii) avec des irrigations précoces de la levée jusqu'à l'épiaison, (iii) avec des irrigations tardives de l'épiaison à la maturité physiologique et enfin (iv) avec des irrigations permanentes depuis la levée jusqu'à la maturité physiologique. Par conséquent, l'EUE fluctue entre 2,3 à 5,2 kg grain / m³ eau (Bouthiba et Debaeke, 2009).

En essai cultural sur le blé dur avec différents positionnements des asperseurs d'irrigation dans la région tunisienne de la Basse Vallée de Medjerda, l'EUE varie de 0,8 à 1,3 kg/m³ (Zairi et *al.*, 2000).

II-2-Cas de la culture de la betterave à sucre

La culture de la betterave à sucre (*Beta vulgaris* L.) a fait l'objet à l'échelle mondiale de nombreux tests comparatifs d'efficience en adoption du système d'irrigation localisée par rapport à d'autres systèmes d'irrigation les plus usuels, notamment les modes gravitaire et d'aspersion. A ce propos, et plus particulièrement pour les zones situées aux étages bioclimatiques semi-arides, il est rapporté les résultats saillants des essais culturaux de référence pour le territoire marocain menés à la Station des Expérimentations Hydro-Agricoles d'Ouled Ganou (SEHA) au périmètre du Tadla (Mroc). Ceux-ci ont été procédé dans un cadre partenarial, d'une part entre les deux organismes afférents au du Ministère de l'Agriculture marocaine l'ORMVA du Tadla et le Service des Essais et des Etudes de la Normalisation (SEEN) et d'autre part avec l'unité agro-industrielle de proximité relevant de la sucrerie COSUMAR, sise en région Beni Mellal-Khénifera. Les principaux résultats obtenus sont récapitulés dans les Tableaux 15 et 16.

Tableau 15 : Résultats des expérimentations comparatives de trois systèmes d'irrigation usuels (localisée, aspersion et gravitaire) sur la culture de la betterave à sucre (*Beta vulgaris* L.) au périmètre de Tadla (Maroc) « Aspect de la consommation hydrique et d'efficacité agronomique en utilisation de l'eau d'irrigation »
(Source : ORMVA du Tadla, 2019)

Campagne agricole de l'essai cultural	Système d'irrigation (L : Localisée ; A : Aspersion ; G : Gravitaire)	Volume eau irrigation (mm)	Rendement (Tonne/ha) Racine	Efficacité agronomique (Kg produit / m3 eau)	
				Racine	Sucre
2011/2012	L	544	67,83	12,49	2,28
	A	633	63,75	10,08	1,82
	G	819	20,02	6,72	1,16
2012/2013	L	402	75,94	18,91	3,26
	A	497	71,82	14,45	2,48
	G	579	61,58	10,64	1,69
2013/2014	L	586	68,6	11,7	-
	A	655	62,55	9,54	-
	G	813	53,95	6,64	-

Les systèmes d'irrigation sous pression (au localisée ou en aspersion) exigeant un volume d'eau d'irrigation allant de 402 à 655 mm par cycle cultural de la Betterave, réalisent alors une économie d'eau de 21 à 29 % par rapport à la référence en système d'irrigation gravitaire ; par ailleurs, il est constaté d'améliorations significatives en rendement racine (46 à 57 %) et en rendement sucre (22 à 35%). Ceci impacte favorablement les efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau, rapportée au produit racinaire (42 à 80 %) et au produit sucre (51 à 94%). Quant aux valorisations économiques de l'eau par la culture betteravière selon les systèmes d'irrigation testés d'une manière comparatives, elles sont indiquées au Tableau 16.

Tableau 16 : Résultats des expérimentations comparatives sur les trois systèmes d'irrigation usuels (localisée, aspersion et gravitaire) sur la culture de la Betterave à sucre (*Beta vulgaris* L.) au périmètre du Tadla – « Aspect de la marge bénéficiaire et de l'efficacité économiques en utilisation de l'eau d'irrigation »
(Source : ORMVA du Tadla, 2019)

Campagne agricole	Système d'irrigation (L : Localisée ; A : Aspersion ; G : Gravitaire)	Marge bénéficiaire (Dhs/ha)	Efficacité économique (en Dirhams /m3 eau)	
			En production	En valeur ajoutée
2011/2012	L	18 185	6,7	-
	A	14 786	5,5	-
	G	10 330	3,5	-
2012/2013	L	28 333	11,46	7,06
	A	25 789	8,81	5,19
	G	18 955	6,09	3,28

Il est relevé que les marges bénéficiaires de la culture de la betterave à sucre augmentent par rapport au système gravitaire, en présence du système d'irrigation localisée à hauteur de 59% et en cas de l'irrigation par aspersion avec un gain de 39%. Ainsi, l'efficacité économique de l'utilisation de l'eau d'irrigation augmente presque au double pour le localisée (89 %) et de moitié en aspersion (49 %) (Tableau 16).

En comparaison par rapport à la situation normale, le déficit hydrique induit d'une manière expérimentale sur la betterave à sucre sur différents sites du territoire marocain, conduit aux résultats rapportés au Tableau 17.

Tableau 17 : Effets des régimes du déficit hydrique sur consommation et efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau de la culture de la Betterave à sucre (*Beta vulgaris* L.) aux grands périmètres irrigués du Maroc (Source : Bouaziz et Belabbes, 2002).

Zone	Volume eau irrigation (mm d'eau /cycle cultural)	Rendement (Tonne/ha)		Efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation (EUE)		Auteurs
		Racine	Sucre	Racine	Sucre	
Périmètre du Tadla	447,6 à 1270,4	50,1 à 55,7	-	0,44 à 11,19		Bouaziz et Belabbes, 2002
Régimes hydriques :						
	T1 (100 % ETM)	:240	85,42	13,67	14,83	2,37
	T2 (80 % ETM)	: 180	91,17	14,20	16,73	2,61
	T3 (60 % ETM)	: 600	79,18	11,99	15,16	2,30
Périmètre des Doukkala	T4 (40 % ETM)	:180	61,30	9,25	12,34	1,86
	Témoin agriculteur	:180	74,27	10,94	14,07	2,07
Volume eau d'irrigation par mode encadrement :		Economie d'eau d'irrigation par rapport à l'ETR :				
	Exploitations « suivies »: 250 à 450 mm			20%	(ETR=450 à 551 mm)	Belabbes et Kaddani, 1999
	Exploitations « non suivies »: 480 à 650 mm			2%	(ETR=485 à 621 mm)	

En effet, le volume d'eau d'irrigation de la culture de la betterave à sucre est plus important au périmètre de Tadla, dont la position continentale induit une forte exigence en eau pour les cultures en périodes printanière et estivale, par rapport au périmètre des Doukkala qui se situe sur la zone littorale plus clémente ; on note aussi que le régime hydrique à 80% d'ETM, donne les meilleurs rendements en sucre et de l'efficacité EUE (Tableau 17).

Par ailleurs, il a été étudié la réaction agronomique de la culture de la betterave à sucre au mode de la gestion de l'irrigation localisée, ceci a été expérimenté en fonction du remplissage du réservoir en eau au sol, au niveau de la région Konya en Turquie, située au chevauchement sur les deux étages bioclimatiques aride et semi-aride, moyennant le test de trois régimes de la réduction hydrique en comparaison avec le témoin à 100% de l'ETM (Tableau 18).

Tableau 18 : Consommations et efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau pour la culture de la Betterave à sucre (*Beta vulgaris* L.) sous des régimes de déficit hydrique en fonction du niveau de stockage de l'eau au sol

(Source : Topak et al., 2011)

Régimes hydriques	Volume eau irrigation (en mm/cycle cultural)	Rendement (Tonne/ha)		Efficacité de l'utilisation eau de l'irrigation (EUE) (en kg/m ³)	Marge nette de la culture (En dollar américain/ha: \$ US/ha)	Valorisation économique en eau de l'irrigation en fonction de la marge nette (en \$ US/ha)
		Racine	Sucre			
T1: 100 % RU (en fraction de la réserve utile du sol:RU)	977	77,3	12,33	7,91	3 093,10	3,17
T2: 75 % RU	732,7	70,6	12,75	9,64	2 902,90	3,96
T3 : 50 % RU	488,5	50,3	9,05	10,3	1 681,10	3,44
T4 : 25 % RU	244,2	28,1	5,25	11,5	314,9	1,29

Il a été constaté que le régime hydrique à 75% de la réserve utile du sol (RU), est plus économique en eau d'irrigation à 25% par rapport au régime à 100 % de la RU, avec une légère amélioration du rendement en sucre à peine de 3%), alors que la valorisation économique de l'eau d'irrigation est assez augmentée de 25%. Concernant l'efficacité agronomique de l'utilisation de l'eau (EUE), elle est la meilleure pour le régime à 25% RU, réalisant un gain relatif par rapport à 100 % RU et évalué à 45 %. De point de vue de la marge économique nette pour cette culture, celle-ci est d'autant plus favorisée en fonction de l'importance du stockage d'eau au sol, avec le maximum atteint en cas du régime hydrique à 100% RU (Tableau 18).

II-3-Cas de la culture de la luzerne

La culture de luzerne (*Medicago sativa* L.) a été testée à travers une série d'essais culturaux, notamment sur différents sites du territoire marocain, dont les principaux résultats sont présentés au Tableau 19.

Tableau 19 : Consommations et efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau pour la culture de la luzerne (*Medicago sativa* L.) sous des régimes de déficit hydrique aux niveaux de grands périmètres irrigués du Maroc.

Zone de site de l'essai cultural	Système d'irrigation	Campagne agricole	Volume eau irrigation (mm/cycle cultural)		Rendement en matière sèche (Tonne/ha)	Efficacité utilisation eau irrigation (EUE) (kg/m ³)		
Périmètre du Tadla (Auteurs : Bouazzama et al., 2015)	Gravitaire	2009/2010	Régimes hydriques :					
			T1	(100 % ETM):	1607	23,1	1,44	
			T2	(80 % ETM):	1290	18,26	1,42	
			T3	(60 % ETM):	994	17,6	1,77	
		T4	(40 % ETM):	713	12,89	1,81		
		Régimes hydriques :						
		2010/2011	T1	(100 % ETM):	1656	24,18	1,46	
			T2	(80 % ETM):	1188	24,1	1,69	
	T3		(60 % ETM):	1061	16,12	1,52		
	T4		(40 % ETM):	544	10,91	2,01		
	Localisée	2009/2010	Régimes hydriques :					
			T1	(100 % ETM):	887 à 1322	20,0 à 23,6	1,79	
			T2	(80 % ETM):	665 à 1110	16,8 à 21,3	1,92	
			T3	(60 % ETM):	481 à 728	11,9 à 16,1	2,21	
		T4	(40 % ETM):	305 à 532	8,6 à 11,6	2,18		
		Régimes hydriques :						
2010/2011		T1	(100 % ETM):	776 à 1156	21,0 à 22,4	2,25		
		T2	(80 % ETM):	582 à 971	16,5 à 20,6	2,23		
	T3	(60 % ETM):	505 à 764	13,1 à 14,8	2,47			
	T4	(40 % ETM):	337 à 487	9,8 à 11,9	2,82			
Périmètre du Haouz (Auteurs : Mouradi et al., 2018)	Localisée	2013/2014	Régimes hydriques :					
			T1	(100 % ETM):	458	17,3 à 20,0	4,07	
			T2	(75 % ETM):	343	15,5 à 17,6	4,83	
			T3	(50 % ETM):	229	10,3 à 13,8	5,26	

Cette culture fourragère présente en présence du système d'irrigation gravitaire avec un régime déficitaire en eau à 40% ETM, le plus haut niveau de l'EUE de 1,8 à 2,0 Kg/m³; ce dernier indicateur s'améliore davantage en irrigation localisée pour les régimes de 40 à 100 % ETM avec des EUE de 2,2 à 5,3 Kg/m³ (Tableau 19).

II-4-Cas de la culture du maïs ensilage

Les exigences et les efficacités en eau d'irrigation pour la culture du maïs (*Zea mays* L.), plus particulièrement destinée à l'exploitation en mode d'ensilage, ont fait objet de multiple expérimentations en différents biotopes sous des conditions optimales d'approvisionnement en eau et aussi sous des conditions de déficit hydrique en fonction du système d'irrigation adopté. Les résultats essentiels pour de tels essais culturaux menées dans une zone de l'étage

bioclimatique semi-aride, spécifiquement dans des périmètres irrigués potentiels du Maroc. Sont rapportés au Tableau 20

L'efficacité en utilisation de l'eau par la culture du Maïs sous régime hydrique normal au niveau d'espaces de grands périmètres irrigués du Maroc est la plus élevée en système d'irrigation localisée à 4,5 Kg/m³; en système d'irrigation gravitaire, elle est à peine de 2,85 à 2,99 Kg/m³ ; sous le déficit hydrique de 20 à 80 % ETM, l'EUE est plus réduite de 24 à 35 % en irrigation au gravitaire, mais cette efficacité est maintenue constante en cas d'irrigation par système localisé (Tableau 20).

Tableau 20 : Consommations et efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau pour la culture du maïs (*Zea mays L.*), sous régimes de déficit hydrique en comparaison des systèmes d'irrigation gravitaire et localisée aux grands périmètres irrigués du Maroc

Système d'irrigation	Campagnes agricoles des essais	Régimes hydriques / types variétaux	Volume eau irrigation (mm/cycle cultural)	Rendement en matière sèche (MS) (T/ha)	Efficacité utilisation eau irrigation (EUE) (kg/m ³ MS)	Auteurs
Gravitaire (Zone : Périmètre de Tadla)	2008/2009	T1 (100 % ETM)	619	16,4	2,99	Bouazzama et al. , 2012
		T2 (80 % ETM)	507	10,2	2,54	
		T3 (60 % ETM)	379	7,6	2,44	
		T4 (40 % ETM)	297	5,3	2,14	
		T1 (100 % ETM)	535	12,5	2,85	
	2009/2010	T2 (80 % ETM)	404	9,5	2,77	
		T3 (60 % ETM)	335	8,1	2,62	
		T4 (40 % ETM)	249	5,1	2,41	
		T5 (20 % ETM)	147	3,9	1,84	
Localisée (Zone : Périmètre de Loukous)	2005/2006 à 2006/2007	Variétés à long cycle (plus 120 jours)	435,2	48 à 72 (frais)	14,9	Ait Houssa et al. ,2008
		Variétés à cycle moyen (100 à 120 jours)	316	40 à 47 (frais)	11,1	
		Variétés à cycle court (moins 80 jours)	151	18 à 35 (frais)	11,9	
Localisée (Zone : Périmètre de Tadla)	2009/2010	T1 (125 % ETM)	623	22,4	4,26	ORMVA du Tadla, 2019
		T2 (100 % ETM)	523	19,6	4,5	
		T3 (75 % ETM)	423	14,8	4,23	
		T3 (50 % ETM)	323	11	4,39	

Par ailleurs, l'EUE du Maïs grain est meilleure en présence du système d'irrigation localisée en cas du rationnement d'apport d'eau d'une manière plus prolongé en fin du cycle productif (régime hydrique C), testé en la région Coruche au plein territoire portugais à climat méso-méditerranéen, alors que cette efficacité n'a pas été impactée en mode d'irrigation par aspersion (Tableau 21).

Tableau 21 : Consommations et efficacités agronomiques d'utilisation d'eau pour la culture du maïs (*Zea mays* L.), en fonction de la gestion des irrigations appuyée sur le stockage de l'eau dans le sol situé sur étage bioclimatique semi-aride

(Source : Rodrigues *et al.*, 2013)

Système d'irrigation	Régimes hydriques (Gestion des irrigations en fonction de la fraction de R.U. en fonction de partie du cycle cultural)	Fractions (p) de la R.U affectées aux stades culturaux pour raisonner les volumes des irrigations				Volume eau irrigation (mm)	Rendement grain (T/ha)	Efficacité agronomique (Kg du produit / m ³ d'eau)
		Initial	Développement	Mi-cycle	Fin de cycle			
Asperston	A (Sans déficit)	0,65	0,65	0,65	0,65	432	16,86	3,90
	B (Début du cycle)	<u>1,2 x 0,65</u>	0,65	0,65	0,65	440	16,16	3,67
	C (Fin de cycle)	0,65	0,65	0,65	<u>1,2 x 0,65</u>	320	16,61	4,88
	D (Tout cycle)	<u>1,2 x 0,65</u>	<u>1,2 x 0,65</u>	0,65	<u>1,2 x 0,65</u>	384	14,47	3,77
Localisée	A (Sans déficit)	0,65	0,65	0,65	0,65	372	16,6	4,45
	B (Début du cycle)	<u>1,2 x 0,65</u>	0,65	0,65	0,65	360	16,07	4,47
	C (Fin de cycle)	0,65	0,65	0,65	<u>1,2 x 0,65</u>	336	14,78	4,40
	D (Tout le cycle)	<u>1,2 x 0,65</u>	<u>1,2 x 0,65</u>	0,65	<u>1,2 x 0,65</u>	300	14,28	4,76

II-5-Cas des cultures des productions maraichères

Il est objet de traiter les deux principales spéculations maraichères potentielles et les plus pratiquées au niveau d'un grand périmètre irrigué du Tadla, de référence et situé en une zone sur l'étage bioclimatique semi-aride sur le milieu continental, à savoir les cultures du piment rouge et de l'oignon (Hakmaoui *et al.*, 2013 ; ORMVA du Tadla, 2020).

-Culture du piment rouge (piment doux, la Niora ou le Paprika)

La culture du piment rouge (*Capsicum annuum* L.) (dénommée aussi : la Niora, le piment doux ou le Paprika), ayant un cycle cultural relativement court d'environ trois mois, a des besoins en eau sous système d'irrigation localisée allant de 228 à 571 mm/cycle, évalués après une expérimentation sous serre avec des régimes hydriques modulés selon les réductions de l'évaporation en bac « classe A » et ajustées à l'ETM par des coefficients de correction (Kb) variant entre 0,4 et 1,0 ; ainsi, les EUE correspondant sont donc : 0,93 à 1,09 Kg du produit en frais /m³ d'eau consommée (Shongwe *et al.*, 2010) (Tableau 22).

Tableau 22 : Effets du déficit hydrique sur la performance agronomique de la culture du piment rouge (*Capsicum annuum* L) conduite sous l'irrigation localisée.

(Source : Shongwe et *al.*, 2010).

Régimes hydriques	Volume eau irrigation	Rendement du fruit en matière sèche	Efficacité d'utilisation eau irrigation
(Pour base le coefficient en évaporation du bac Kb)	(mm / cycle cultural)	(Tonnes / ha)	(EUE en Kg / m ³)
T1 : K _b =0,4	228	2,5	1,10
T2 : K _b =0,6	342	3,2	0,93
T3 : K _b =0,8	456	5,8	1,27
T4 : K _b =1,0	571	6,2	1,09

Par ailleurs, avec le mode d'irrigation au gravitaire, il a été élucidé suite à un essai cultural en zone de la plaine du Kairouan au pays de la Tunisie à climat méditerranéen, que le cycle de production de la culture s'étale à 200 jours, le rendement agronomique est dans l'intervalle de 13,5 à 20,7 tonnes en matière fraîche à l'hectare et que l'EUE oscille entre 3,71 et 3,95 Kg de la matière fraîche du produit récolté par le mètre cube d'eau consommée (Rezig et *al.*, 2005). Aussi, en présence du même système d'irrigation gravitaire auprès du périmètre de Tadla afférent sur l'espace marocain, en tant que le fief d'excellence de la culture du piment rouge avec une dominance en superficie globale en ce pays à 90%, il y est relevé que le volume d'eau d'irrigation unitaire est dans la fourchette de 600 à 800 mm par cycle cultural et le rendement de fruits à l'état frais est aux alentours de 10 à 30 Tonnes/ha (Hakmaoui et *al.*, 2013).

-Culture de l'oignon

La culture de l'oignon (*Allium cepa* L.) est fréquemment pratiquée au périmètre irrigué de Tadla (Maroc) en mode productif de saison ; en se référant à une expérimentation sur le matériel végétal en sélection hybride précoce à cycle productif relativement moins allongé dont longévité de l'ordre de cinq mois, comparé avec un autre matériel végétal issu de sélection génétique locale à production tardive et ayant un cycle plus prolongé d'une durée allant de six à sept mois voire encore plus; les irrigations ont été pilotées en s'appuyant sur les coefficients culturaux (K_c), modulés en fonction des stades physiologiques de la plante cultivée à savoir : stade initial-développement, stade de la bulbaison et le stade de la maturité pour des valeurs respectives de: 1,0 ; 0,9 et 0,7 (Tableau 23).

Tableau 23 : Effets du régime de la réduction d'eau en système d'irrigation gravitaire sur les performances agronomiques de la culture de l'oignon de saison (*Allium cepa* L.) au périmètre de Tadla

(Source : Boundi, 1995).

Type variétal	Indicateurs sur la culture d'oignon	
	Sélection génétique hybride	Sélection génétique locale
Classe de cultivars selon conformité à photopériode	Jours courts-Jours moyens	Jours moyens-Jours longs
Partie du cycle productif de la culture: Transplantation-Maturité	160 jours	190 jours
Initial-Développement (ID)		1
Coefficients culturaux (K_c) par stades physiologiques	Bulbaison (B)	0,9
	Maturité (M)	0,7
	Initial (I):	T1 : 80% ETM
		T1b : 120 % ETM
Régimes de réduction hydrique par stades physiologiques	Bulbaison (B)	T2b : 100 % ETM
		T3b : 80 % ETM
		T4b : 60% ETM
Volume eau irrigation (en mm)	462	725
Rendement agronomique (Tonne / ha)	Frais	70,4
	Sec	4,7
Efficienc e de l'utilisation de l'eau d'irrigation (EUE) (en Kg eau/m ³ produit en sec)	1,017	1,021
Taux de la baisse tendancielle du rendement en fonction de la réduction d'eau (coefficient de pente : 1-Ky)		24%

Sous des tests du stress hydrique en réduction d'eau d'irrigation de la culture d'oignon, ciblant le stade physiologique sensible de bulbaison, il y a une baisse du rendement en bulbe à maturité au frais et d'une manière plus notable du rendement en matière sèche (Boundi, 1995) (Tableau 23) ; aussi le coefficient de pente de réponse du rendement à l'eau (1-Ky) est déterminé égal à 24% ; ce qui catégorise la culture d'une relative flexibilité productive par rapport à l'eau consommée selon la classification de Doorenbos et Kassam, (1979).

En irrigation localisée, la réduction de l'eau pour la culture de l'oignon de saison, testée au Nord-Ouest de la Chine en zone à climat continental semi-aride, l'efficience agronomique d'utilisation d'eau augmente dans le sens de l'accentuation de l'ampleur du déficit hydrique, surtout en cas de sa généralisation à tous les stades physiologiques du végétal (Tableau 24).

Tableau 24 : Effets de la réduction hydrique sur la performance agronomique de la culture de l'oignon (*Allium cepa* L.) conduite sous l'irrigation localisée en zone à climat semi-aride de la Chine

(Source : Zheng et al., 2013)

		Niveaux de réduction des apports d'eau par rapport à la référence de l'ETM du végétal par stade du cycle cultural							
		Tous les stades concernés		Cas normal		Stades sélectionnés affectés			
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Régimes hydriques affectés aux stades physiologiques du végétal	Initiation (10 à 16 jours)	0,4	0,6	0,8	1,0	0,4	1,0	1,0	1,0
	Développement ((30 à 36 jours)	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	0,4	1,0	1,0
	Bulbaison (36 à 46 jours)	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	0,4	1,0
	Maturité (93 à 102 jours)	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	0,4
Volume d'eau irrigation (en mm)	Minimum	102	159	219	283	261	229	196	267
	Maximum	108	182	256	331	316	247	219	319
Rendements agronomiques (en Tonne/ha)	Minimum	24,41	28,85	37,99	40,57	41,62	35,85	31,99	41,79
	Maximum	31,03	38,03	51,32	58,00	60,81	47,42	46,67	63,42
Efficience de l'utilisation d'eau (EUE) (en Kg/m ³)	Minimum	19,18	15,92	16,12	14,22	15,61	15,00	15,92	15,82
	Maximum	26,40	19,61	18,80	16,05	17,75	17,49	18,95	17,95

II-6-Cas de l'arboriculture fruitière

L'olivier et les agrumes qui constituent les deux essences arboricoles dominantes et caractéristiques du périmètre de Tadla (voir aperçu monographique sur la zone d'étude en partie « matériel et méthodes »), sont traitées ci-après en ce qui concerne les impacts de la réduction de d'eau sur leurs productivités et leurs efficacités agronomiques d'utilisation de l'eau.

II-6-1-Plantations d'oliviers

Le système d'irrigation localisée permet, par rapport au système d'irrigation gravitaire, de réaliser le profit notable en efficacité agronomique d'utilisation d'eau, allant jusqu'à 6 ou 7 fois lors d'expérimentations sur jeune verger d'oliviers (*Olea europaea* L. *subsp. europaea* var. *europaea*) au niveau du grand périmètre irrigué du Haouz (Maroc). En effet, le régime hydrique déficitaire à 70% de l'ETM, en conduite sous système d'irrigation localisée, confère un gain en EUE de 16 % comparé au régime hydrique normal à 100% ETM (Sikaoui et al., 2014) ; le détail des résultats expérimentaux est au Tableau 25.

Tableau 25: Consommation hydrique et efficience agronomiques sous régime en pour le verger d'oliviers en comparaison des deux systèmes d'irrigation gravitaire et localisée au niveau du périmètre irrigué du Haouz (Maroc)

(Source : Sikaoui et al., 2014)

Système d'irrigation	Campagne agricole de l'essai cultural	Régimes hydriques	Volume eau irrigation (mm)	Rendement (Tonne/ha)	Richesse en huile (%)	Efficience utilisation eau irrigation (Kg olive /m ³ eau)
Gravitaire	2011/2012	Témoin agriculteur	538	-	-	-
	2012/2013	Témoin agriculteur	545	9,95	8,3	1,83
Localisée	2011/2012	T1(100 % ETM)	116	-	-	-
		T2(70 % ETM)	81	-	-	-
	2012/2013	T1 (100 % ETM)	212	22,63	9,6	10,67
		T2 70 % ETM)	148	18,23	9,1	12,32

A l'échelle du pourtour méditerranéen en des zones oléicoles potentielles, où les oliviers en différents endroits soient conduits en un milieu pluvieux strict, ou soient qu'ils bénéficient au cours du cycle productif en des arrosages d'appoint ou encore en des apports d'eau réguliers par des irrigations copieuses. Dans ce sens, Il est spécifié pour des vergers d'oliviers conduits en semi-intensif en divers sites géographiques, sous système d'irrigation localisée, qu'après la réduction hydrique induite par rapport au besoin optimal en eau pour ces plantations , il a été constaté une amélioration de l'efficience agronomique de l'utilisation d'eau sur large intervalle de 1,22 à 12,42 kg d'olives fraîches par 1 m³ d'eau (Iniesta et al., 2009 ; Martin-Vertedor et al.,2011 ; Kaya et al., 2017) ; les données détaillées sont sur le Tableau 26.

II-6-2-Plantations des Agrumes

Les plantations d'orangers (*Citrus sinensis* L.), plus fréquentes en vergers dans les principales zones agrumicoles marocaines, avec prédominance de la variété *Maroc Late*, ont des coefficients culturaux (K_c), déterminés expérimentalement au périmètre irrigué de Tadla, pour différents stades physiologiques (Bouazzama et Bahri, 2009) de : Floraison : 0,50 ; nouaison : 0,55 ; chute physiologique : 0,80 ; grossissement estival du fruit : 0,88 et grossissement hivernal du fruit : 0,54.

Il est évalué pour les agrumes des besoins en eau sous système d'irrigation localisée dans les zones à climats semi-aride, tels sont les cas des périmètres irrigués de Tadla et du Haouz, des volumes aux alentours de 900 à 1032 mm par cycle productif (El Hari et al., 2010 ; Ait Houssa et al., 2020); pour des rendements moyens en fruits de 35 à 50 Tonnes/ha et efficience agronomique d'eau à la production de l'ordre de 4,72 Kg/m³ d'eau d'irrigation (Ait Houssa et al., 2020).

Tableau 26 : Consommations hydriques et efficacités agronomiques d'utilisation de l'eau pour les vergers d'oliviers en zone méditerranéenne sous le système d'irrigation localisée et soumis à différents régimes du déficit en eau.

Lieu d'expérimentation	Volume eau irrigation par régime hydrique (mm/cycle cultural)	Rendement en frais (Tonne/ha)	Richesse en huile (litre huile / 100 kg olives)	Efficacité utilisation eau irrigation (EUE) (kg olive / m ³ eau)	Auteurs
Région de Cordoba	<i>Régimes hydriques :</i>				
(Espagne)	T1 (100 % ETM) : 359 à 445	9 à 25	13 à 16	2,51 à 5,62	Iniesta et al., 2009
Vergers oléicole d'âge initial de 17 ans ;	T2 (25 % ETM, déficit continu) : 74 à 153	7 à 18	15 à 20	9,46 à 11,76	
période d'expérimentation 2004-2006	T3 (25 % ETM, déficit régularisé, sans irrigation entre Juillet/Mi-Septembre) : 88 à 161	6 à 20	14 à 20	6,82 à 12,42	
Région de Badajoz	<i>Régimes hydriques :</i>				
(Sud Ouest Espagne)	<i>Période de 2002-2004</i>				
	T1 (125 % ETM) : 537	10,13	19,62	1,89	Martin Vertedor et al., 2011
Vergers oléicole d'âge initial de 4 ans ;	T2 (100 % ETM) : 350	9,83	21,42	2,81	
période d'expérimentation 2002-2007	T3 (75 % ETM) : 262	9,94	22,57	3,79	
	T4 (Pluvieux) : 0	6,71	20,85	Indéterminé	
	<i>Période de 2005-2007</i>				
	T1 (115 % ETM) : 535	8,74	22,3	1,63	
	T2 (100 % ETM) : 374	8,09	24,65	2,16	
	T3 (75 % ETM) : 178	8,13	23,95	4,57	
Région Izmir	<i>Régimes hydriques :</i>				
(Ouest Turquie)	T5 (K=125) : 874	10,7 (4,06 à 16,50)	16,4	1,22	Kaya et al., 2017
Vergers oléicole d'âge initial de 20 ans ;	T4 (K=100) : 698	10,61 (4,43 à 16,47)	16,6	1,54	
période d'expérimentation 2008-2010	T3 (K=0,75) : 524	9,04 (7,29 à 12,30)	18	1,72	
	T2 (K=0,50) : 350	9,58 (7,29 à 13,41)	18,4	2,74	
	T1 (K=0,25) : 175	7,12 (4,80 à 9,01)	21,6	4,07	
	T6 (par humidité du sol) : 622	7,95 (6,49 à 8,44)	18,4	1,28	
	(K ₀ : coefficient ajustement d'évaporation (Ev.) en bac classe A ; formule : ET M = K _b x Ev)				

Pour les vergers du clémentinier (*Citrus clementina* T. ou *Citrus reticulata* L. en groupe variétal du clémentinier) l'efficacité EUE est la meilleure avec le système d'irrigation localisée utilisant 4 ou 6 goutteurs par arbre en double rampes (Abouatallah et al., 2012).

Le déficit hydrique de vergers d'orangers, sous système d'irrigation localisée, testé expérimentalement au périmètre irrigué du Souss (Maroc), montre que les régimes hydriques avec apports d'eau sur la base de 25 à 30% de réduction d'évaporation en bac évaporant Classe A, occasionnent d'EUE plus proches à celle du régime hydrique de l'agrumiculteur et

que majoration d'apport d'eau de 5 à 15 % induit à l'inverse une baisse d'EUE de 22 à 25 % (Boundi, 1989) ; détail de résultats au Tableau 27.

Tableau 27: Tests de déficits hydriques sur le jeune verger d'agrumes conduit sous le système d'irrigation localisée au périmètre irrigué du Souss (Maroc)

(Source : Boundi, 1989)

Régimes hydriques	Volume d'eau d'irrigation	Rendement	Efficacité utilisation eau irrigation
(en fraction de l'évaporation en bac Classe A : Ev.)	(mm/cycle cultural)	(Tonne/ha)	(EUE) (kg/m ³)
T1: 40 % Ev	696,7	20,83	2,99
T2: 35 % Ev	626,1	19,44	3,11
T3: 35 % Ev	525,1	20,83	3,97
T4 : 25 % Ev	440,6	16,67	3,78
T5 : 30 % Ev + Tensiométrie	500,7	16,11	3,22
T6 : Témoin agriculteur	542,1	21,67	4,01

La réponse du rendement en agrumes à l'eau en système d'irrigation localisée est dans le même sens, alors que l'efficacité agronomique d'eau (EUE) est pratiquement en sens inverse au taux de réduction d'eau au régime hydrique expérimental avec le démarquage du test témoin relevant de l'agriculteur, vu que ce dernier avait fait bénéficier la culture au stade du grossissement du fruit en période estivale d'apports massifs en eau (Tableau 27); ceci est plus expliqué par une autre expérimentation au périmètre du Haouz, approuvant une spectaculaire riposte des agrumes au déficit hydrique, notamment en testant une série de régimes de réduction de l'ETM aux taux de : 30 % ; 40 % ; 50 % et 60 % ; en aboutissant à des ETR respectives de : 635 ; 774 ; 851 et 1045 mm/cycle et correspondant aux rapports ETR/ETM de : 0,62 ; 0,75 ; 0,83 et 1,01 (El Hari et *al.*, 2010).

La valorisation économique de l'eau d'irrigation en production d'agrumes, à l'issue d'enquêtes auprès d'agrumiculteurs du périmètre irrigué du Gharb est dans l'intervalle de 3,9 à 6,1 Dirhams le 1 m³ d'eau consommée (Harbouze et *al.*, 2009)

III-Evaluations des besoins en eau des cultures par les techniques de l'avertissement à l'irrigation

III-1-Définition de l'avertissement à l'irrigation des cultures

L'avertissement à l'irrigation est un processus qui renseigne sur l'état agronomique actuel des cultures et permet en outre de prédire leurs besoins en eau au temps réel et en précisant les modalités pratique des irrigations, notamment pour les fréquences à fixer pour l'arrosage selon le

système d'irrigation adopté et les objectifs productifs de la culture envisagée. Ceux-ci sont à moduler en fonction des outils et les moyens logistiques mis à disposition, qui sont alors à raisonner en les options possibles de la nature des populations d'utilisateurs d'eau cibles de tout encadrement à envisager (Specky et Isbérie, 1996).

III-2-Exemples de modèles en avertissement à l'irrigation des cultures

Il est à signaler que divers modèles de l'avertissement à l'irrigation ont été conçus et mis en application sur le terrain moyennant le traitement spécifique et au temps opportun de données agro-météorologiques et édaphiques concernant les parcelles agricoles visées (Specky et Isbérie, 1996), dont il est rapporté au Tableau 28 des cas de référence pour l'espace du territoire français.

Tableau 28: Modèles de procédés de l'avertissement à l'irrigation

(Source : Specky et Isbérie, 1996)

Organisme superviseur de la diffusion d'informations	Nomenclature du produit de l'avertissement à l'irrigation	Caractéristiques clés de l'avertissement à l'irrigation adopté	Régions contrôlées ou pour la totalité du territoire français
Association climatologique de l'Hérault	Agri Conseil	Prévisions $ET_{culture}$ / ET_0 et pluviométrie; bulletins spéciaux des informations communiquées y compris en climatologie.	Région d'Hérault
Association climatologique de Garonne	-	Bulletins écrits, enregistrements de stations de mesure ; mesures gravimétriques sur teneur en eau sur parcelles de suivi (conseil individuel d'avertissement à l'irrigation).	Domaine géographique: Dordogne, Garonne, Gironde, Lot, Lot et Garonne
CACG	-	Identification et suivi hebdomadaire du déficit pluviométrique éventuel par zones contrôlées.	Sud-Ouest de la France
INRA-France	-	suivi de la Station CIMEL + exploitation du logiciel de calcul de l' ET_0 et d'évaluation de l' $ET_{culture}$.	National (France)
Météo-France	Irritel	Données météo de base, vendues ou non sous forme de fichiers, de serveurs livrables ou installés et par la télécopie. Service vidéotex interactif établi et assuré à partir du calcul journalier du bilan hydrique à double réservoir par parcelle agricole ciblée (données de conseil aux agriculteurs et de stockage auprès de Météo-France).	National (France)
Société du Canal	Équil-hydre	Abaques de suivi déterminés à partir des références des normales en $ET_{culture}$ sur sites de la région de Provence, aussi l' ET_0 est déterminée ; des conseils d'ajustements hebdomadaires sont livrables sur support de journal agricole.	Région de Provence

Parmi les plus usuels et précis des modèles européens de l'avertissement à l'irrigation, il y a lieu de citer le modèle « *Irritel* », assurant un service textuel sur vidéo interactif, sur la base de calculs du bilan hydrique journalier à l'échelle parcellaire en fonction du climat local, permettant ainsi d'appuyer en ligne l'agriculteur connecté en lui donnant la main d'accès à distance à un logiciel spécifique de d'exploitation qui est commandité par l'organisme superviseur Météo-France (Tableau 28). D'autres procédés de la même famille sont préconisés pour couvrir des zones

géographiques plus ou moins larges, avec le recours à des logiciels spéciaux et dont l'exploitation est partiellement partagée par les membres usagers producteurs agricoles et adhérents à ce type de systèmes d'encadrement, comme présenté pour des modèles référentiels au Tableau 29.

Tableau 29: Modèles de logiciels utilisés dans le processus de l'avertissement à l'irrigation sur le territoire français
(Source : Specty et Isbérie, 1996)

Organisme diffuseur de l'information conseil	Référence du logiciel utilisé	Partie usagère de l'information diffusée
ACTA	Météopro	la Chambre d'agriculture de la Loire
CIRAD	Bipode	Maïslagri, castel-sarrasin à Montpellier
Météo-France	Métir	Coop Agri à la région de la Bretagne
Société du Canal	Mira (Bilan hydrologique)	ISAGRI de la région de Provence

A ce propos, on rapporte la référence spécifique au procédé de l'avertissement à l'irrigation pour la culture de la Pomme de Terre, adopté dans le périmètre irrigué du Loukous (Maroc). En l'occurrence, ce dernier procédé se qualifie en tant qu'outil de base pour le pilotage des irrigations avec appui sur la méthode climatique de Penman-Montheit, ce qui consiste alors à évaluer régulièrement les besoins en eau de la culture de la Pomme de Terre d'une manière indirecte tout en déterminant au préalable l'ET_o, ce en application des travaux de la recherche de Van-Kempen *et al.* (1996) et de Bekraoui et Skiredj (1997), qui ont été cités par Skiredj *et al.* (2001). En effet, le procédé précité fait usage à des coefficients culturaux (K_c) en fonction de la phase physiologique de la culture, à savoir : $K_c = 0,5$ en phase de "plantation-levée" ; $K_c = 0,8$ en phase de "croissance-début recouvrement végétal du sol" ; $K_c = 0,9$ en phase de "tubérisation-grossissement des tubercules-début de jaunissement des feuilles" et $K_c = 0,7$ en phase de "mâturité du végétal". Une analyse détaillée sur ce procédé est présentée au Tableau 30.

Par ailleurs et sur un large spectre, on cite le système mondial des prévisions météorologiques numériques le « Global Forecast System (G.F.S.) », rapporté par Mughal *et al.*, (2017), cités par Hafidi *et al.* (2017). En effet, ce système comporte un modèle informatique universel terrestre avec des livrables en des analyses sur les variabilités spatio-temporelles d'indicateurs agro-météorologiques. Il est à noter que ce système, qui est géré par le Service Météorologique National des États Unis (N.W.S.), incorpore dans sa fonctionnalité une dizaine de variables atmosphériques terre-sol, notamment : la température, le vent, les précipitations et la concentration en ozone atmosphérique. Eu égard, le système « G.F.S. » couvre le globe terrestre entier avec une résolution géomatique horizontale de base à 13 kilomètres carrés, régie avec un

modèle mathématique qui s'exécute selon la périodicité de quatre fois par jour, permettant de produire des prévisions météorologiques jusqu'à une portée de 16 jours d'avance ; le système est susceptible d'être modulé à œuvrer avec une résolution spatiale plus réduite mais avec des prédictions en agro-météorologie de moins 10 jours.

Tableau 30 : Apports d'eau, performance productive agricole et efficience agronomique selon outils de l'avertissement en irrigation, modulés par stade de développement de la culture de la pomme de terre au périmètre du Loukous (Maroc)
(Source : Skiredj et al., 2001)

I- Apports d'eau d'irrigation raisonnés par stade de développement cultural

Outils d'avertissement	Stades culturaux			Total
	Plantation-Levée (30 jours)	Levée-Début grossissement (57 jours)	Début grossissement- Début maturité (27 jours)	(Plantation-Début maturité) (94 jours)
Pluie	36,5	19,5	39,0	105,0
Bac Classe A	36,0	130,0	100,0	266,0
Lysimetre à drainage naturel	36,0	150,0	140,0	326,0
Méthode de Peneman-Montheit	24,0	92,0	78,0	194,0
Mode "agriculteur"	108,0	336,0	240,0	684,0

II- Impacts du choix de l'outil de l'avertissement à l'irrigation sur la performance productive et l'efficience agronomiques combinées avec le facteur variétal

Outils d'avertissement	Matériel végétal (Variétés : Spunta « S » et Nicola « N »)	Volume eau (irrigation + pluie) (en mm)	Rendement (en T/ha)	Efficience EUE (en Kg/m ³)
Bac évaporant Classe A	S	371,0	48,5	13,56
	N		42,0	11,50
Lysimètre à drainage naturel	S	431,0	52,5	12,18
	N		44,5	10,32
Méthode Penman-Monteitt	S	299,0	49,0	16,50
	N		41,0	13,80
Mode "agriculteur"	S	789,0	49,0	6,21
	N		40,5	5,13
Moyenne	S	472,5	50,0	10,58
	N		42,0	8,90

Le système GFS, précité plus haut, a fait l'objet de test de l'exploitation sur l'espace du territoire marocain et précisément au périmètre irrigué du Souss-Massa, en l'adaptant moyennant l'usage par *le logiciel Yobeen*. Ceci a permis de comparer sur terrain les données des mesures réelles de l'évaluation des besoins en eau de la culture des agrumes. Le constat est qu'il y a une bonne fiabilité du système à une précision de 76 % à 89% selon les sites analysés (Hafidi et al.,2017). En l'occurrence, la prédiction de l'ET₀ s'avère suffisamment approchée, sachant que les prévisions sont plus effectives par le système pour les paramètres de la température de l'air et du rayonnement global. C'est malgré que les prévisions sont relevées moins attendues pour les trois autres paramètres impliqués à savoir: l'humidité relative de l'air, les précipitations et la vitesse du vent ; lesquelles sont en outre susceptibles d'être corrigées, afin de conférer à ce système un étalonnage plus affiné, en vue de l'adapter localement d'une manière plus aisée (Hafidi et al.,2017; 2019 ; 2020).

Chapitre IV : PROCESSUS DE LA RECONVERSION EN SYSTEME D'IRRIGATION A ECONOMIE DE L'EAU : CAS DU PERIMETRE AGRICOLE DE TADLA

Il est relaté le chantier potentiel modèle lancé sur le territoire marocain de la reconversion en systèmes d'irrigation innovants et plus efficaces, plus spécifiquement au niveau régional de proximité. Les aspects essentiels qui ont suscité l'intérêt pour ce processus, portent sur ses justificatifs, sa genèse, ses modalités de conception, sa consistance technique, ses échéances de réalisation dans temps, sa morasse budgétisation, ses modalités d'exécution sur terrain, ainsi que sur l'état actuel d'avancement des travaux.

I-Historique sur l'adoption du système d'irrigation classique au périmètre de Tadla.

Il est communément renseigné par un système classique d'irrigation, qu'il s'agit d'un système ancestral d'irrigation des cultures dans la catégorie du mode gravitaire, dont on mentionne parmi eux les plus usuels sont par technique de la submersion du sol en eau ou en par technique de l'irrigation à la raie (Doorenbos et Kassam, 1979). On cite particulièrement pour le périmètre irrigué du Tadla, sa spécification par un très ancien mode, d'ordre commun et jadis plus fréquent en d'autres périmètres irrigués du Maroc, sous une nomenclature locale « *Robta* ». Il est rapporté que cette technique empirique avait probablement prise son origine en zone de la montagne, où elle est encore adoptée mais avec de courts dispositifs des réseaux d'irrigation en interne à la parcelle agricole; cette technique d'irrigation est implicitement décrite comme suit (ORMVAT, 1996) :

- Découpage initial de la sole parcellaire en des sous-unités en des bassins élémentaires, nommés localement par « média », ayant pour rôle de supports à la masse d'eau d'irrigation, ayant la forme carrée et à pour distance moyenne de chaque côté de 4 à 10 m et superficie de l'ordre de 40 m² ; ces bassins comportent le plus souvent en leur sein des billons confectionnés qui sont au nombre 4 à 10 unités selon les circonstances.
- Approvisionnement en eau des bassins élémentaires à travers des canaux en terre de la distribution, appelés aussi par les agriculteurs « *seguias* », qui sont à leur tour alimentés par une canalisation principale en terre ou la « *seguia mère* ». L'eau qui coule sur cette canalisation, a pour point de départ amont à partir d'une petite brèche opérée sur l'arroseur, sachant que ce dernier dispositif qui est également en terre ou revêtu en dur, est le trait d'union de la parcelle avec le réseau hydro-agricole de l'établissement ORMVA. En effet, l'écoulement de l'eau d'irrigation suit l'itinéraire « Arroseur-Segua » en vue d'alimenter en aval les bassins élémentaires (les « *media* »).

-La submersion des billons des bassins élémentaires s'accomplie au fur et à mesure jusqu'à la saturation complète du sol en eau. L'acte est opéré par l'irrigant professionnel avec une bonne maîtrise du débit entrant à l'entête de la parcelle agricole, qui est référencé par le mot technique « *la main d'eau* ». Généralement, ce débit est subdivisé en deux, tout en tirant profit de la plus faible pente du nivellement du terrain de la parcelle. La technique traditionnelle s'adapte bien aux sols relativement chargés de mottes et aussi pour des terrains sujets aux passages répétés de travaux du sol par outil du cover-crop, tels les cas fréquents pour les parcelles du sous-périmètre irrigué des Beni Amir.

Il est soulevé un nombre d'insuffisances et de difficultés en cas de pratique sur terrain de la technique d'irrigation au gravitaire en mode « *Robta* » et qui résident essentiellement aux aspects suivants (ORMVA du Tadla, 1996) :

- Gaspillage de l'eau, estimé à environ 50% au niveau de la parcelle,
- Perte du terrain inexploité, aux alentours de 15% afférent aux ados et aux « séguias »,
- Allongement de la durée des arrosages, qui dure de 12 à 15 heures/ha pour une main d'eau en tête de parcelle à débit de 30 litres/seconde,
- Dégradation rapide des caractéristiques hydrauliques de l'arroseur suite aux multiples brèches y opérées pour l'amenée d'eau,
- Besoin important en main-d'œuvre, exigée surtout pour la confection du réseau intra-parcellaire,
- Pénibilité de l'exécution de l'opération de l'irrigation, vu qu'au moins deux irrigants sont à déployer pour le partage du débit initial entrant,
- Difficultés latentes pour couvrir les besoins en eau des cultures exploitées, notamment en période de pointe, ce qui impacterait négativement les rendements agricoles de ces spéculations,
- Frais supplémentaires à engendrer pour le pompage éventuel afin de pallier à toute insuffisance en eau pour les cultures,
- Pertes par lessivage d'éléments fertilisants avec les risques à encourir sur l'environnement, et
- Difficultés dans la réalisation des techniques de la conduite des cultures, en raison de l'encombrement de l'espace parcellaire impacté par le dispositif interne des réseaux d'irrigation y compris les « séguias » et les ados.

II-Retour d'expériences en innovations d'économie d'eau testées sur le système d'irrigation classique

En raison de la perspective de raréfaction de ressources en eau pour l'irrigation des cultures, la tendance actuelle vise l'amélioration ou la reconversion du système d'irrigation classique gravitaire par d'autres systèmes plus économes et efficaces en eau tel que le système d'irrigation localisée (Yamauchi, 1984).

Dans ce sens, des expérimentations techniques en vue d'améliorer le mode d'irrigation traditionnel le « *Robta* », préconisé au périmètre irrigué de Tadla, ont été menées in situ sur période 2000-2003 et sous la supervision de l'organisme international « ICRA » orienté en l'appui à la recherche et au développement agricole. En effet, quatre catégories de tests d'innovations afférentes ont été considérés et qui consistent en ce qui suit (ICRA et *al.*, 2003) :

- Essayer la configuration du réseau d'irrigation interne à la parcelle sous la forme de planches à des dimensions relativement plus larges.
- Tester le réseau intra-parcellaire avec le long dispositif d'irrigation, en utilisant soient des raies pour l'écoulement d'eau ou soit en mode de callant.
- Concevoir à l'essai du dispositif d'irrigation en des bassins plats à pente nulle.
- Expérimenter une installation de rampes à vannettes, en matière plastique et à connecter en leurs amonts avec l'arroseur, un canal en général en terre qui approvisionne la parcelle en eau depuis le point de l'entête.

Les résultats des essais culturels sur le terrain, afférents à ces innovations ont été aussi appuyées par des enquêtes de sondage d'opinion d'agriculteurs et d'experts en la matière. La matrice récapitulative des points forts et des limites concernant les techniques testées est au Tableau 31. Il est retenu de ces travaux, que les agriculteurs locaux éprouvaient en général leur non satisfaction aux innovations de réadaptation de leur ancien mode d'irrigation gravitaire, qu'ils jugeaient à caractère sommaire et probablement moins conséquent. En dernier lieu, la majorité des agriculteurs contactés ont éprouvés leur refus à l'adoption des innovations précitées (ICRA et *al.*, 2003).

Tableau 31 : Inventaire des innovations sur l'économie d'eau à la parcelle testées sur le système d'irrigation gravitaire au périmètre de Tadla

(Source : ICRA et al., 2003)

Technique	Caractéristiques des innovations	Points forts des innovations	Limites des innovations
« Robta » améliorée	-Amélioration du court dispositif du mode d'irrigation « <i>Robta</i> » initiale en augmentant les dimensions des planches de la sole en des superficies moyennes de 250 m ² à travers la correction du nivellement par le surfaçage mécanique	-Economie en eau d'irrigation de 10%. -Surplus de 7% de la superficie exploitée et 7% en rendement agricole, comparées au <i>Robta</i> initiale -Gain en temps d'arrosage de 2 h/ha par rapport au <i>Robta</i> initiale, pour la durée réalisée de l'ordre de 10 heures/ha à débit de 30 l/s. -Meilleure distribution de l'eau dans la parcelle agricole.	-Perte de la superficie cultivée de 8% par rapport au total de la parcelle agricole. -Temps d'arrosage de 10 hrs /ha dépasse temps de la « main d'eau » de 8 hrs /ha à l'entête de parcelle. -Destruction accidentelle du nivellement pré-réalisé suite à la confection des séguias et des ados.
Le long dispositif, raie et calant avec les siphons tubulaires	Irrigation à la raie -Appliquée en cultures sur billons, à dimensions de raies de 65 à 130 m par type cultures et sols. -Nombre de siphons par raie est en fonction de la perméabilité du sol de culture. -Ecoulement d'eau aux raies communicantes (5 unités en aval), évitant le risque du débordement.	-Technique innovante qui améliore l'efficacité de l'irrigation à la parcelle tout en évitant les pertes d'eau par le ruissellement en surface.	-Nécessité d'un terrain bien nivelé pour écoulement homogène d'eau et évitant aussi sa stagnation. -Arroseur régulièrement être entretenu par désherbage fréquent et colmatage de brèches. -Assurer la charge d'eau suffisante sur arroseur pour fonctionnement optimal des siphons tubulaires. -Pilotage difficile de la distribution par siphons.
	Irrigation par callant -Adoption de cultures semées à plats (céréales, luzerne, bersim...). -Planches rectangulaires disposées sur la largeur de la sole de dimensions de 80 à 130 m en longueur sur de 4 à 6 m en largeur. -Alimentation du calant par siphons tubulaires en y appliquant toute la main d'eau.	-Maintien du nivellement de l'arroseur sans des séguias en parcelle. -Gain de 15% superficie et amélioration du peuplement cultural. - Uniformité d'irrigation avec temps d'arrosage conforme aux consignes d'irrigation de 9 hrs/ha à débit en amont de 30 l/s. -Gain en volume d'eau par rapport au <i>Robta</i> initiale. -Facilité de travaux culturaux et de la récolte sans séguias et ados. -Moins de perte d'éléments fertilisants par la lixiviation. -Amélioration de rendements culturaux par rapport au <i>Robta</i> initiale	-Difficulté d'amorçage des siphons tubulaires. -Entrave dans le transport de siphons par les agriculteurs non-résidents à la propriété. -Exigence en charge d'eau suffisante pour faire fonctionner les siphons. -Coût supplémentaire du nivellement suite aux surfaçages répétitifs. -Encadrement spécifique d'agriculteurs irrigants.
Le bassin à fond plat	-Technique sous système d'irrigation gravitaire avec des planches à pente nulle. Destinée pour irriguer toutes les cultures semées à plat ou sur des billons.	-Application uniforme de l'eau. -Efficacité d'application d'eau est plus élevée suite à l'uniformité de la distribution en eau, aussi par la capture de pluies dans le bassin. -Non érosion du sol par la pluie ou par l'irrigation.	-Non conformes aux sols moins filtrants et profonds. -Préparation judicieuse du sol de culture. -Des bassins de petites dimensions nécessaires pour les cultures sur billons en vue du contrôle d'érosion.
Rampe à vannettes	-Dispositif en tuyau de type PVC rigide et muni de vannettes coulissantes à des écartements fixés selon le type de culture. -Les vannettes régulent le débit déversé à la raie ou au calant de 0,25 à 2,00 l/s respectivement pour la charge de 5 à 20 cm.	-Elimination des pertes d'eau par infiltration au niveau de l'arroseur. -Facilité de conduire de l'irrigation par simple ouverture des buses. -Maîtrise du débit par subdivision en petits débits (1 à 2 l/s par buse). -Bonne uniformité d'arrosage par répartition du débit entre les buses de la rampe et la gaine.	-Problème de l'arroseur en commun avec les voisins. -Coût élevé de l'innovation (20 000 DH/ha en 2003) -Ouvrage de prise à charge suffisante (plus 50 cm). -Fluctuation du débit selon charge en amont. -Détérioration rapide de la matière plastique du dispositif par les rayons solaires.

III-Choix privilégié pour le système d'irrigation localisée dans le processus de la reconversion du mode d'irrigation classique au périmètre de Tadla

III-1-Définition, caractérisation et les principaux types de l'irrigation localisée

L'irrigation localisée couvre en principe l'ensemble des techniques qui entraînent seulement l'humidification d'une partie du sol, regroupant les techniques qui apportent l'eau au pied des plantes, à proximité de la zone racinaire, avec à faible débit d'écoulement d'eau et en des apports plus fréquents (Vermeiren et Jobling, 1983).

En effet, en présence de l'irrigation localisée, il ne s'agit qu'un volume plus réduit du sol qui se maintient constamment en humidité à la capacité au champ; ce volume précis de la portion de terre demeure alors effectivement exploité par les racines de la plante. Ainsi, il est à spécifier trois principales versions de cette technique d'irrigation, qui sont modulées en fonction des conditions du milieu de culture et aussi selon les finalités productives agricoles escomptées (ICRA, 2003) :

III-1-1-Type d'irrigation localisée au « goutte à goutte »

Le transport d'eau est réalisé à travers des canalisations de nature en plastique, *les rampes*. L'apport de l'eau au niveau de la plante est effectué par des dispositifs spéciaux, *les goutteurs* ; *ces derniers* apportent ponctuellement l'eau à la surface du sol, à faible débit de 1 à 8 litres/heure et à une pression de service d'un bar. En fonction du mode de la fixation sur la rampe, on distingue : les goutteurs en déviation, les goutteurs en ligne et les goutteurs intégrés.

III-1-2-Type d'irrigation localisée au « micro-jet »

La distribution se fait moyennant des mini-diffuseurs désignés par des « *micro-jets* », qui pulvérisent l'eau sous forme de tâche sur une partie de la surface du sol ; ceci est fréquemment conçu avec un débit de 20 à 60 litres par heure et à une pression de service d'un bar. Chaque mini-diffuseur est fixé à un orifice calibré et par lequel l'eau passe sous forme de jet ; en y signalant l'adjonction d'une tête formant le « déflecteur » pour permettre au jet de se briser en une portée limitée à la distance de 1 à 2 mètres.

III-1-3-Type d'irrigation localisée en « ajutage »

L'eau passe à travers des ajutages munis d'orifices calibrés (1,2 à 2,1 mm), qui sont fixés sur une rampe à des intervalles réguliers et recouverts par de manchons brise-jet. L'eau distribuée par les ajutages ne s'infiltre pas ponctuellement, mais elle s'écoule dans une rigole cloisonnée au fond de laquelle est placée la rampe. Selon le diamètre de l'orifice de l'ajutage, le débit

d'écoulement d'eau varie dans la gamme de 35 à 100 l/ h et avec à une pression de service d'un bar.

III-2-Atouts et limitations de la technique de l'irrigation localisée

Le système d'irrigation localisée a d'assez d'atouts et aussi ses limitations, par rapport aux deux principaux systèmes d'irrigation usuels, gravitaire et aspersion, dont essentiellement les suivants (Vermeiren et Jobling, 1983 ; Phocaidès, 2008) :

III-2-1-Avantages de l'irrigation localisée

Les principaux avantages de la technique d'irrigation localisée sont (Vermeiren et Jobling, 1983):

- Gain en volume d'eau par rapport à l'irrigation gravitaire pour au moins 40%.
- Bonne maîtrise de la fertilisation minérale de la culture par la fertigation avec des engrais solubles à l'eau d'irrigation, évitant ainsi le lessivage d'éléments fertilisants pour environ un taux de 30%, permettant d'augmenter leurs disponibilités sous une forme plus fractionnée, en état plus homogénéisé au sol et fournis en association à de faibles débits d'eau.
- Apports d'eau et en éléments fertilisants au temps opportun du développement physiologique du végétal, ce qui pourrait assurer le total de la satisfaction des besoins nutritionnels.
- Equilibre assuré pour le rapport entre le volume de l'air et le volume de l'eau dans la zone racinaire de la plante, vu que le bulbe du sol humecté en présence du système de l'irrigation localisée contient habituellement assez d'air que de la terre arrosée par rapport aux deux autres systèmes d'irrigation usuels de l'aspersion ou par la submersion.
- Réduction des travaux du sol, eu égard l'économie notable en temps et en main d'œuvre.
- Utilisation possible de l'eau salée ou saumâtre, en permettant des apports plus fréquents de l'eau d'une manière plus adaptée aux cultures sensibles à la salinité excessive.
- Contrôle du développement des mauvaises herbes en parcelle agricole, plus favorisée par la réduction de la zone humectée, ainsi pour la pullulation des ennemis ravageurs et des maladies parasitaires des cultures plus atténués en faible ampleur de l'humidité du milieu.
- Profits en quantité et qualité de récoltes agricoles, tel en maîtrise du calibre commercial du fruit.
- Meilleure exploitation des terrains difficiles dont sols lourds à faible vitesse d'infiltration et sols très légers plus filtrants ; ainsi que pour les terrains accidentés ayant de forte pente.

-Automatisation de la technique est susceptible afin d'accomplir les irrigations programmables à différents points du réseau en distribution parcellaire, depuis la station de l'entête jusqu'aux distributeurs à proximité des plantes à desservir en eau.

III-2-2-Limitations de l'irrigation localisée

Les principaux aspects limitatifs de l'irrigation localisée sont (Vermeiren et Jobling, 1983):

- Investissement initial relativement considérable ;
- Technicité suffisante est nécessaire dans le pilotage et la maintenance régulière des équipements d'irrigations installés sur la parcelle agricole ;
- Sensibilité à l'obstruction des distributeurs d'eau auprès des plantes arrosées, nécessitant assez de rigueur dans leur entretien ;
- Salinisation plus risquée du sol de la culture en raison de l'accumulation progressive de sels, exigeant alors sans leurs lessivages intermittents ou au après chaque opération d'irrigation ;
- Développement racinaire des plantes plus réduit, expose la culture aux risques du stress hydrique et au déracinement sous effet de violents vents en arboriculture à ancrage affaibli.

III-3-Justificatifs au périmètre de Tadla du choix de la reconversion par le nouveau système de l'irrigation localisée.

III-3-1-Situation en phase de la pré-reconversion du système d'irrigation classique

La situation initiale précédant le processus de la reconversion du système d'irrigation classique au périmètre de Tadla a été l'objet d'intenses critiques par différentes parties. A ce propos, on fait référence aux diverses études techniques réalisées à caractères agro-économiques et sociales. On en cite entre-autres les analyses de diagnostic sur le terrain in-situ, effectuées par l'institution internationale du développement agricole l'ICRA, couvrant la période de 1970-2000, en collaboration avec d'autres organismes plus impliqués. Les constats essentiels afférents sont les suivants (ICRA et *al.*, 2003) :

- Les impacts deviennent plus prévisibles de la politique nationale lancée dès le début des années 1990, visant libéralisation des filières agricoles stratégiques, marqués par l'émergence de prestataires privées de proximité dans le service de la fourniture d'intrants agricoles ;
- La démographie régionale croissante se répercutaient en accélérant le morcellement des propriétés agricoles, favorisée encore par la disponibilité occasionnelle de fonds la migration

humaine dans les sens en interne aux régions prospères du pays que vers l'Europe occidentale ;

-La cadence plus fréquente des sécheresses, avait incité alors à entreprendre des mesures publiques restrictives en dotations d'eau pour l'irrigation d'origine les réserves des barrages hydrauliques, Ceci avait eu lieu en parallèle à la recrudescence du creusement des puits et des forages à des fins de pompage à partir de la nappe d'eau souterraine, pour les irrigations d'appoint des cultures avec des volumes accusés à la hausse ;

-La prédisposition motivée des agriculteurs du périmètre du Tadla, pour une refonte plus approfondie de leur système productif agricole classique, moyennant l'intégration d'une manière libéralisée de nouvelles spéculations agricoles plus lucratives ; aussi favorables pour adopter de nouveaux équipements performants et des procédés de la conduite plus appropriés pour leurs cultures y compris la technique efficiente de l'irrigation localisée. Comparaison

III-3-2-Enseignements en phase de la pré-reconversion à partir des expérimentations comparatives entre le système d'irrigation gravitaire et le système d'irrigation localisée

En phase de la pré-reconversion des essais comparatifs du nouveau système d'irrigation localisée avec l'ancien système d'irrigation gravitaire ont été réalisés pour les principales cultures pratiquées au périmètre du Tadla. Les résultats synthétiques de ces expérimentations sont résumés au Tableau 32.

Tableau 32 : Expérimentations de comparaison au périmètre du Tadla entre le système d'irrigation gravitaire (technique anciennement adopté) et le système d'irrigation localisée (innovation technique sous test)
(Source : ORMVA du Tadla, 2009)

Cultures	Système d'irrigation gravitaire		Système d'irrigation localisée		Variations entre systèmes d'irrigation (en %)	
	Consommation en eau3 (m/ha) (1)	Valorisation eau en valeur ajoutée (Dhs/m 3) (2)	Consommation eau (m3/ha) (3)	Valorisation eau en valeur ajoutée (Dhs/m 3) (4)	Consommation en eau $[(3)-(1))/(1)]$	Valorisation économique de l'eau $[(4)-(2))/(2)]$
<i>Cultures annuelles</i>						
Betterave à sucre	7 700 à 10 000	1,7 à 2,8	5 000 à 6000	4,4 à 5,7	39%	124%
Blé	4 500 à 5 200	4,0 à 5,0	3 000 à 3 500	8,5 à 9,8	33%	103%
Luzerne	12 000 à 14 000	1,7 à 2,0	7 000 à 10 000	3,5 à 4,4	35%	114%
Maïs ensilage	5 500 à 7 200	1,85 à 3,5	4 500 à 4 700	5,0 à 9,6	28%	193%
Melon	7 500 à 7 000	3,5 à 3,8	3 800 à 4 600	8,1 à 8,9	42%	133%
Oignon	6 000 à 6 500	4,3 à 4,8	4 200 à 4 400	6,0 à 6,9	31%	42%
<i>Arboriculture fruitière</i>						
Agrumes	10 000 à 12 000	2,7 à 3,1	6 000 à 8 000	7,3 à 8,0	36%	164%
Olivier	4 100 à 4 600	2,9 à 3,3	3 100 à 3 400	4,8 à 5,9	25%	73%

Il est montré expérimentalement que le nouveau système d'irrigation localisée est plus économique en eau d'irrigation pour un taux de 28 % à 42 % pour les cultures annuelles et au taux de 25 % à 36 % pour les cultures pérennes, avec des améliorations correspondantes sur la valeur ajoutée rapportée à l'eau d'irrigation consommée de 42% à 193% et de 73 % à 164 %, comme détaillé au Tableau 32.

IV-Genèse, conception et prescriptions techniques du projet régional de la reconversion collective en système d'irrigation localisée au périmètre de Tadla

IV-1-Investigations préliminaires et études du contexte régional en phase du pré-projet de la reconversion collective en système d'irrigation à économie d'eau au périmètre de Tadla

La situation de référence au périmètre du Tadla à la veille du lancement du projet de la reconversion collective en système d'irrigation plus efficient a été relatée à travers différentes investigations réalisées, dont les aspects saillants sont définis ci-après.

IV-1-1-Justificatif de la tendance à la baisse des précipitations au niveau du périmètre de Tadla

Le régime des pluies au périmètre du Tadla a subi une forte mutation dans le sens de la baisse graduelle annuelle des précipitations, notamment la pluviométrie moyenne de l'année a fortement chuté de 425 mm/an en période de 1963-1980 à 290 mm/an et période de 1980-2005, soit une baisse de 32 %. Il est aussi signalé qu'au cours de la dernière période précitée, les campagnes agricoles d'extrêmes sécheresse à savoir: 1980/1981, 1982/1983, 1992/1993 et 2004/2005 avaient des niveaux pluviométriques très bas respectivement de : 188; 167; 177 et 158 mm (ORMVA du Tadla, 2020 a).

IV-1-2-Justificatif de la raréfaction de ressources en eaux de surface pour l'irrigation des cultures au périmètre de Tadla

Le domaine irrigué en grande hydraulique concernant la superficie de 98 300 ha, qui contribue à hauteur de 82 % du total irrigué au périmètre de Tadla (120 000 ha) est subdivisée en deux sous-zones distinctes: les Béni Moussa à 69 600 ha et les Béni Amir à 28 700 ha (ORMVA de Tadla, 2018). Toutefois, leurs dotations en eau de barrage ont effectivement chuté lors des trois décennies précédant le processus de la reconversion en question du système d'irrigation en vigueur, les explications argumentaires sont exposées ci-dessous par sous-zone (ORMVA de Tadla, 2020 b) :

- *Sous-zone des Béni Moussa* : La dotation annuelle moyenne en eau d'irrigation s'est rétrécie de 29%, en passant d'un volume de 591 Millions de m³ durant la période de 1978-1992 à un volume de 419 Millions de m³ durant la période de 1992-2006, affichant en effet avec la forte

baisse dans la contribution au Plan Directeur Intégré d'Aménagement de l'Eau (PDAIRE), fixé au préalable pour cette sous-zone, en passant en moyen de l'ancien taux de 83 % au taux plus récent de 59%.

-Zone des Béni Amir : Les dotations annuelles moyennes en eau d'irrigation régresse notablement entre les deux intervalles temps de 1978-1992 et de 1992-2006 pour des volumes respectifs de 268 et de 202 millions de m³ (diminution de 25%), soient des baisses correspondantes par rapport au niveau de la satisfaction du PDAIRE, fixé pour la sous-zone, en évoluant du taux de 84% vers le taux de 63 %.

IV-1-3-Justificatif du pompage abusif en nappe d'eau souterraine pour l'irrigation complémentaire des cultures

Les sécheresses récurrentes des années 1980 au périmètre ont amené les agriculteurs à recourir à l'eau souterraine des puits et des forages privés. Cette option avait été incitée par les subventions encourageantes de l'Etat, en conjoint aux flux de nouveaux revenus de l'immigration à l'étranger, appuyant de tels investissements y compris d'importants équipements en des stations de pompage. Ceux-ci se montre bien par le passage du nombre de ces points de captage d'eau d'environ 800 unités en année 1970 à plus de 7000 unités en année 1984. Par conséquent, l'exploitation y était depuis lors plus abusif pour les réserves d'eau de la nappe souterraine, ce malgré qui étaient déjà affaiblies suite aux baisses pluviométriques des années antérieures. Il est aussi précisé que le niveau moyen de la nappe de l'Eocène s'est abaissé de la profondeur de 23 m en année de 1990 à une profondeur de plus de 50 m en année de 2000. Quant à la nappe phréatique, située aux couches superficielles du sous-sol, se rabattait-elle aussi de son niveau moyen de profondeur de 7 m en année 1991 jusqu'au niveau de profondeur de 18 m en l'année de 2005 (Hammani et *al.*, 2006).

D'une manière plus détaillée, le recensement exhaustif de l'année de 2006 des points d'eau existants au périmètre de Tadla répertorie le nombre de 8 310 unités, dont la part de 31% sous forme de forages, de 60% sous forme de puits et 9% en des ouvrages mixage puits-forages, avec des profondeurs variant entre 5m et 300 m, en signalant l'abandon d'un nombre de 1961 unités constatées non productives (24 % du total réalisé) (Hammani et *al.*, 2007).

IV-1-4-Justificatif de l'opportunité de substituer le système d'irrigation classique par autre système d'irrigation plus efficient

La plaine de Tadla d'un potentiel irrigable de 140 000 ha, est prédominée par des méthodes d'irrigation de submersion moins efficientes, exceptés pour quelques importants propriétaires fonciers agrumicoles plus avertis qui se sont convertis à l'irrigation au goutte à goutte et qui sont dotés de moyens financiers suffisants pour acquérir de tels équipements à coûts d'investissements

relativement élevés ; sachant qu'un taux de 70 % des exploitations ont été déjà équipées par ce système d'irrigation innovant et disposant de leur propre bassin du stockage d'eau; par conséquent, l'irrigation au goutte à goutte s'est avérée la meilleure solution (Berrada, 2009), ce qui est aussi confirmée dans des rapports d'études prospectives de l'ORMVA de Tadla (2008).

-Penchants socio-économiques pour la refonte radicale du système productif agricole en milieu irrigué

Au début des années 2000, suite à des enquêtes auprès des agriculteurs du périmètre de Tadla, ces derniers étaient en fin convaincus de la refonte de leurs systèmes de production agricoles en adoptant un package technologique approprié ; ceci serait lieu en retenant comme maillon central la technique efficiente de l'irrigation localisée, en conjoint avec leur ambition de s'ouverture sur de nouveaux marchés plus porteurs pour l'écoulement de leurs productions agricoles potentielles (ICRA et *al.*, 2003).

-Cadence très ralentie des reconversions individuelles entreprises en irrigation localisée

En considérant le régime très favorable des subventions statué par l'Etat marocain dès la fin des années 1990 pour l'encouragement à s'approprier par les exploitations agricoles en système de l'irrigation localisée selon le mode individuel, l'organisme de l'ORMVA de Tadla s'était fixé alors sur sa zone d'action, à l'horizon de l'an 2005, l'objectif d'une extension en tel équipement de 5 000 ha par an (Kobry et Eliamani, 2004). Toutefois, la réalisation de cet objectif n'avait abouti que pour seulement à un cumul de 7 144 ha sur la période de 1991-2006, correspondant, en effet, à une faible cadence d'une moyenne de 440 ha par an sur une longue durée de 16 ans (ORMVA de Tadla, 2007).

En tenant compte de la limitation du processus testé en reconversion en mode individuel de l'ancien système d'irrigation moins efficient, il s'imposerait incontestablement au périmètre de Tadla une autre alternative à mener en parallèle la reconversion collective en irrigation localisée, afin de résorber l'important potentiel restant d'une superficie globale allant de 100 000 à 140 000 ha (Bekkar et *al.*, 2007).

-Prédisposition des agriculteurs du périmètre de Tadla à l'adhésion au processus en projet de la reconversion collective du système d'irrigation classique en nouveau système d'irrigation efficient

Suite aux multiples rencontres de concertation des organismes de développement locaux et externes appuyés par des consultants nationaux et étrangers, avec les représentants des organisations professionnelles concernées du périmètre de Tadla, dont les Associations des Usagers de l'Eau Agricole (AUEA), les agriculteurs de la zone étaient en général favorables pour adhérer en masse à toute démarche éventuelle de la reconversion collective de leur système

d'irrigation gravitaire classique par autre plus rationnel et pratique tel que le système de l'irrigation localisée (Dionnet et *al.*, 2006).

IV-1-5-Consistance du projet de reconversion collective du système d'irrigation localisée au périmètre de Tadla

• Projet National de l'Economie en Eau d'Irrigation (PNEEI)

Les pouvoirs publics marocains ont initié en l'année 2008 la mise en place du Projet National d'Economie Eau d'Irrigation (PNEEI), dont les objectifs et les principales composantes sont décrites ci-après (Belghiti, 2008 ; Elksabi et Laghzali, 2011).

***Vision stratégique du PNEEI :** Au titre de principal fondement du programme national marocain pour le développement agricole, le Plan Maroc Vert (PMV), le projet PNEEI se focalise sur l'agriculture irriguée pour contribuer à son émergence économique dans des conditions particulières de la raréfaction croissante dans des de ressources en eau déjà au départ moins abondante pour le pays.

***Enjeux et raisons d'être du PNEEI, qui sont définis comme suit :**

- Rupture nette du régime pluviométrique sur la majorité du territoire marocain à partir des années 1970, avec l'avènement de plus en plus fréquent des années de sécheresse.
- Baisse tendancielle concernant les apports annuels périodiques de l'eau des pluies aux barrages hydrauliques, qui a été évaluée à de l'ordre de 20% à 30 % depuis le début des années 1980.
- Surexploitation anormale des eaux souterraines aux niveaux des zones vulnérables, à citer à titre indicatif les trois périmètres irrigués du Sais, du Haouz et du Souss, dont les rabattements respectifs de la nappe étaient de 40 m, de 20 m et de 60 m. durant la période de 1980-2006).
- Dotations annuelles en eaux pour l'irrigation en prenant pour source les barrages hydrauliques, persistaient constantes aux alentours de la moyenne de 3 milliards de m³ par an, soient en deçà des besoins d'allocations optimales en eau pour les cultures de l'irrigué aux périmètres équipés en grande hydraulique. Ces exigences en eau pour l'irrigation avaient subi en outre une évolution à la hausse en allant du volume de 5,5 au volume de 7,5 milliards de m³ par an entre les années 1995 et 2004, ce qui induisait en effet à creuser le déficit hydrique déjà existant par rapport aux dotations annuelles en eau de 46% à 64 %.
- L'agriculture irriguée se qualifie par son caractère stratégique, sachant qu'elle ne porte sur seulement la part de 15% sur le total de la superficie agricole utile du Maroc, mais participe

à l'économie agricole nationale à 45 % en une année normale. Ce rôle économique important de l'agriculture irriguée devient d'autant plus prépondérant en situation de campagne en sécheresse pluviométrique, vu que sa contribution se hausse au taux de 70% de la valeur ajoutée agricole nationale.

***Objectifs clés du PNEEI :** L'attente capitale du PNEEI est de dédoubler la courante valeur ajoutée agricole unitaire du mètre cube d'eau de l'irrigation, en se fixant les trois objectifs directeurs suivants :

- Modernisation sur la durée de 15 ans des réseaux d'irrigation en amont pour le transport d'eau, la distribution intermédiaire et aussi à la répartition en aval sur les parcelles agricoles.
- Renforcement de la reconversion en système d'irrigation localisée en une superficie objectif de 555 090 ha, afin d'atteindre ou dépasser le cumul à équiper par ce type de système d'irrigation de la superficie de 700 000 ha, ce qui représente le taux de 50% du potentiel global irrigable national.
- Promotion en parallèle du développement intégré des cultures en irrigué et à forte valeur ajoutée.

***Consistance et morasse budgétaire du PNEEI :** Le coût global alloué au PNEEI est de 36 901 millions de Dirhams (M Dhs), avec la ventilation par composantes est comme suit:

- Modernisations collectives des réseaux d'irrigation : 16 206 M Dhs (44 %)
- Modernisations individuelles des réseaux intra-parcellaires : 13 701 M Dhs (37 %)
- Interventions d'appui technique agricole : 610 M Dhs (2 %)
- Soutien à la valorisation des productions agricoles : 1 200 M Dhs (3 %)
- Mesures d'accompagnement à la réalisation du projet : 3 095 M Dhs (8 %)
- Imprévus physiques et financiers afférents au projet : 2 089 M Dhs (6 %)

Il est remarqué que le projet PNEEI se réserve le gros lot pour les reconversions projetées en système d'irrigation localisée (superficie objectif : 550 090 ha) pour le montant de 29 900 millions de Dhs (75% du cout total du projet), une importante part (81%) de la dernière enveloppe est réservée à la zone irriguée en grande hydraulique.

***Montage financier et indicateurs clé de gestion du PNEEI :** Le financement du projet est supporté par des fonds publics marocains spéciaux à hauteur de 80 % du coût global. Le reste financier

(20% du coût) est des contributions directes des organismes impliqués étatiques et semi-publics, lesquels se partagent les tâches des études, de la coordination, du pilotage, de l'exécution, du contrôle des travaux et du suivi-évaluation des réalisations des composantes du projet.

• **Déclinaison régionale du projet PNEEI au périmètre de Tadla**

La déclinaison régionale du projet PNEEI au niveau du périmètre de Tadla a pour finalités de mettre à disposition des agriculteurs locaux des équipements en parcelle du système d'irrigation localisée, en assurant le conseil agricole escompté pour le démarrage de la nouvelle technique. En l'occurrence, ce périmètre est concerné par la plus étendue superficie du pays à équiper de 88 740 ha pour un coût de 6 milliards de Dhs. Ainsi, les contributions de cet espace régional dans le projet national par rapport au global des grands périmètres irrigués sont de 22 % de la superficie programmée et de 25% des investissements consentis (Belghiti, 2008 ; Elksabi et Laghzali, 2011).

Les caractéristiques régionales du projet PNEEI pour le périmètre de Tadla sont explicitées ci-après.

a) Agencements projetés de l'espace agricole à équiper et les coûts des investissements de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla.

Au préalable, il a été adopté par différents bureaux d'études consultés, une approche multicritère pour l'aménagement de l'espace agricole susceptible au périmètre de Tadla (Elksabi et Laghzali, 2011). En conséquent, le projet PNEEI a ciblé la zone potentielle de grande hydraulique en ce périmètre, en vue d'y reconverter collectivement à l'irrigation localisée le total de superficie de 49 040 ha, ce qui représente plus de la moitié (55%) du programme arrêté par ce projet pour cette zone (ORMVA de Tadla, 2012).

En effet, les zones potentielles reconvertibles avec la nouvelle technique d'irrigation efficiente, ont été établies en fonction de l'origine énergétique de l'eau à utiliser sous pression, leur disposition cartographique est présentée sur la carte de la Figure 3.

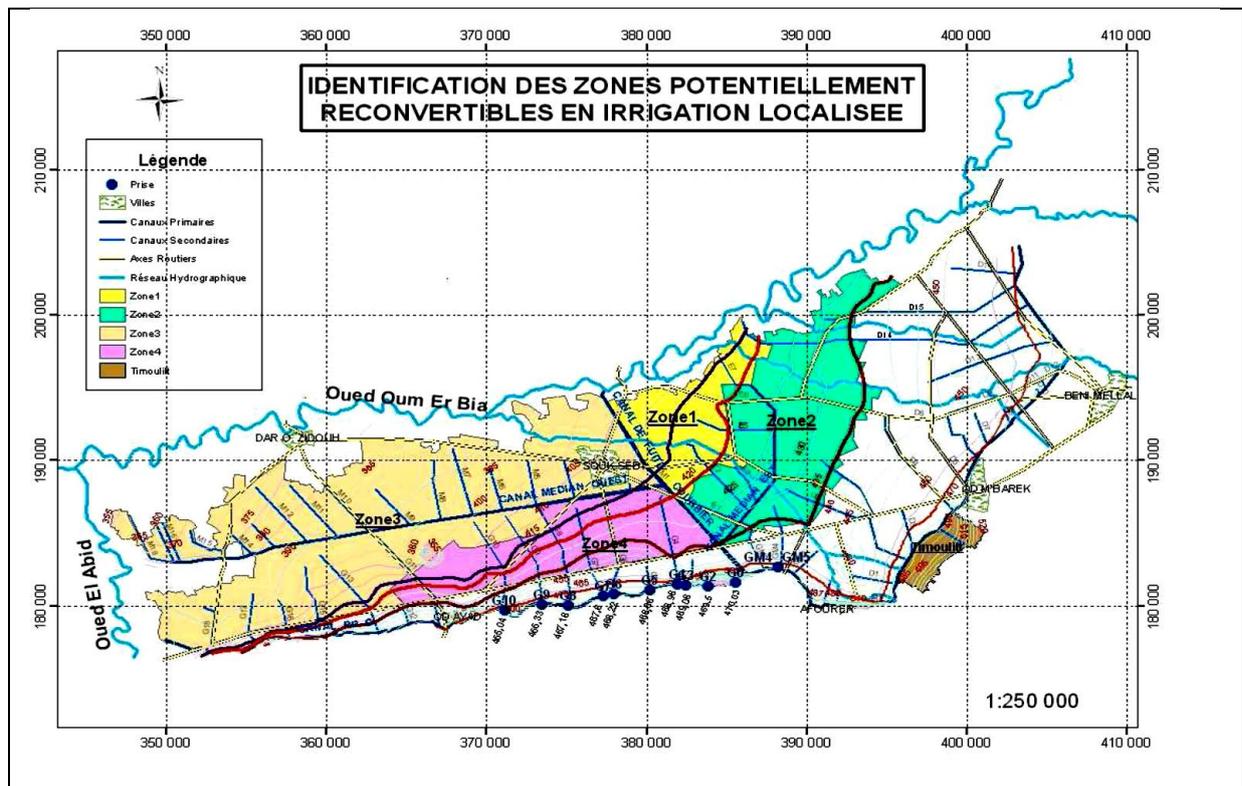


Figure 3 : Potentiel en superficies susceptibles à la reconversion en système d'irrigation en zone des Béni Moussa relevant du périmètre de Tadla (Source : Elksabi et Laghzali, 2011)

Il est aussi projeté, en parallèle, dans ce périmètre l'opération de la reconversion individuelle à l'irrigation localisée, qui s'étend sur la superficie totale de 39 700 ha ; mais sa répartition est d'une manière spatiale dispersée, tributaire de la volonté des agriculteurs qui désirent à équiper leur exploitations agricoles (ORMVA de Tadla, 2012) (Tableau 33).

Tableau 33 : Tranches d'exécution des aménagements de la reconversion collective à l'irrigation localisée avec la répartition par zones des associations professionnelles AUEA et par sources de financement du projet au périmètre de Tadla (Source : Elksabi et Laghzali, 2011).

Tranche	Secteurs hydrauliques	AUEA affectée	Superficie (Ha)	Nombre d'exploitations	Source de financement
Première tranche	Total 1^{ère} tranche		10 235	3 073	-
	M4M5	AUEA Alittihad	1 984	488	Partenariat-Banque Mondiale
	M6M7	AUEA Alomrania	2 061	685	
	M8M9	AUEA Annour	3 331	844	
	M1M2M3	AUEA Arraja	2 859	1 056	Partenariat Banque Africaine de Développement
Deuxième tranche	Total 2^{ème} tranche		12 100	2 926	-
	M10M11	Brahmia	1 660	270	Partenariat-Banque Mondiale
	M12M13M14	Al Amana	1 687	471	
	M15M16M17M18	Tissir	1 217	337	
	G18	Essounboula	1 430	408	
	G11G12	Oum El kheir	1 979	429	
	G13G14G15	Al Falah	2 513	471	
G16G17	Moussaouia	1 614	540		
Total global		10 AUEA	22 335	5 999	-

Dans le souci de mener à bien les travaux d'exécution, les études d'ingénierie de la reconversion au collectif en système d'irrigation localisée au périmètre de Tadla ont recommandé une sectorisation de la zone du projet, comme détaillé sur le Tableau 33 et montré sur la carte de la Figure 4.

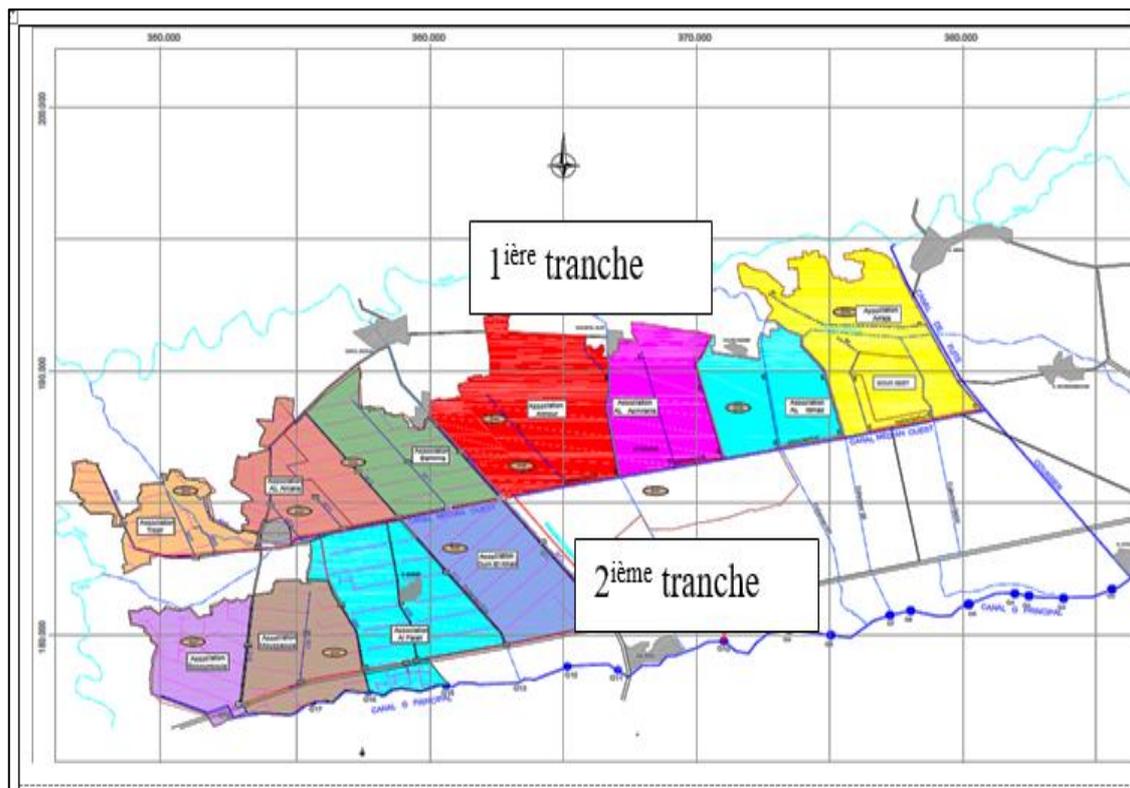


Figure 4 : Répartition géographique des secteurs prioritaires projetés pour la reconversion collective en irrigation localisée dans le périmètre de Tadla (Source : ORMVA de Tadla, 2020a).

En priorité, le processus de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla se focalise sur l'espace relevant de dix groupements associatifs AUEA, chronologiquement en deux tranches de travaux d'équipements sur superficies de 10 235 ha et de 12 100 ha (Tableau 33), avec des coûts respectifs de réalisation de 600 et de 950 millions de Dhs (ORMVA de Tadla, 2020a).

b) Architecture et modalités fonctionnelles des équipements de la zone de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla

Les chantiers des travaux de la réalisation du projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée sont à accomplir selon les deux volets suivants : le 1^{er} volet, concerne les travaux d'aménagements des canalisations de l'amenée d'eau et des ouvrages d'art à l'état collectif ; le 2^{ème} volet, est spécifique aux travaux à entreprendre sur les parcelles agricoles pour l'installation de la trame ultime du système d'irrigation muni de ses accessoires annexes (Elksabi et Laghzali, 2011).

Les modalités des configurations et les principes de fonctionnements des équipements inhérents sont relatés à titre indicatif au Tableau 34 pour la 1^{ère} tranche du projet en question au périmètre de Tadla.

Dans ce sens, le management préconisé du déroulement des irrigations dans la zone de la reconversion collective à l'irrigation localisée s'articule sur cinq principaux fondements, à savoir les suivants (Belghiti, 2008) :

- Définition des paramètres structuraux de l'irrigation localisée pour la zone de reconversion;
- Asseoir le système de prédiction des besoins en eau des cultures en relation avec les débits d'équipement des réseaux ;
- Modalités de la programmation des dotations en eau d'irrigation via le barrage hydraulique ;
- Mode de gestion intégrée des réseaux d'irrigation pour l'approvisionnement des parcelles en eau;
- Procédés du pilotage de la filtration collective d'eau d'irrigation en amont de la zone de la reconversion, relayée à la filtration parcellaire à la charge des agriculteurs usagers.

Il est à signaler que dans ce cas le mode d'irrigation adopté aux niveaux des parcelles agricoles est soumis au fonctionnement simultané d'ouvrages spéciaux, les Prises Propriétés (PP), lesquelles sont afférentes à un groupe déterminé d'irrigants, généralement au nombre de 2 à 4 et opérationnel en une plage horaire préprogrammée (ORMVA du Tadla, 2012). Il est aussi indiqué, qu'il est fixé au préalable d'une manière automatique le débit fonctionnel maximum à ne pas dépasser à l'entête de la parcelle desservie, ainsi que pour la pression de service de l'eau entrante en amont (Elksabi et Laghzali, 2011).

c) Projection de l'économie en eau d'irrigation en post-projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée.

Il est attendu après l'avènement complet du projet de la reconversion collective à l'irrigation au périmètre de Tadla, que les besoins en eau d'irrigation des cultures pour l'espace agricole des deux premières tranches confondues d'une superficie cumulative de 22 235 ha sont pour volume global de 138,5 millions de m³ par an. Ainsi, le gain de l'économie en eau d'irrigation qui serait dégagé est estimé à 42 millions de m³ par an, occasionnerait alors une baisse de 23% par rapport au volume initial de l'eau d'irrigation en pré-projet. Par le raisonnement en superficie unitaire, la consommation actuelle en eau d'irrigation brute passerait de la moyenne de 9 805 m³ à l'hectare par an sous le système d'irrigation gravitaire au nouveau volume moyen prétendu de 7 783 m³/ha/an en système d'irrigation localisée, ce qui serait alors en post-reconversion effectivement favorable aux agriculteurs afin d'accomplir leur intensification culturale requise, avec de

meilleures valorisations agronomiques et agro-économiques de l'eau d'irrigation (ORMVA de Tadla, 2012).

Tableau 34 : Modèles des configurations et des principes de fonctionnements des équipements hydroagricoles de la 1^{ère} tranche du projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre du Tadla
(Source : Elksabi et Laghzali, 2011)

1 Architecture des équipements (1 ^{ère} tranche ; superficie de reconversion : 10 235 ha)									
	1-Régulation hydraulique des canaux principaux	<ul style="list-style-type: none"> • Régulation par l'aval pour le canal G ; • Rehaussement des berges du canal G ; • Revêtement départ du canal G sur 12 km ; • Réalisation des ouvrages de prise ; • Construction du bassin de régulation et de stockage ; et • Gestion automatisée des vannes : Télé-contrôle et Télégestion. 							
11 Aménagements externes	2-Adduction, conduites secondaires et réseaux de distribution	<ul style="list-style-type: none"> • 4 adducteurs desservant 4 secteurs: linéaire de 32,5 km et de diamètres de conduite de 1 à 1,2 m ; • Réseau de conduites secondaires; réseau de distribution et ouvrages annexes (chambre de vannes, ventouses et vidanges...) • Tracé du réseau de distribution : adaptation au réseau existant en canaux à ciel ouvert secondaires et tertiaires ; • Une prise par bloc en installation directe sur conduites tertiaires. 							
	3- Stations de filtration collective	<ul style="list-style-type: none"> • 4 stations de filtrations collectives à tamis en fin des adducteurs • Débit nominal d'une station de filtration allant de 1 à 1.84 m³/s. 							
12 Travaux d'équipements internes	Dispositif irrigation localisée en parcelle agricole	Composantes principales du dispositif : Station entête (filtration, fertigation, contrôle manométrique...), reliée par conduites d'amenée et de distribution aux goutteurs d'arrosage.							
2 Conception									
21 Déterminants de base du dimensionnement d'équipement interne	a) Paramètres de l'irrigation localisée	<ul style="list-style-type: none"> • Durée d'irrigation = jour (pair /impair). • Mode irrigation: Demande restreinte en 2 groupes. 							
	b) Régime de dotations en eau	<ul style="list-style-type: none"> • Demande en eau brute d'irrigation en tête du périmètre. • Calcul sur base du mois de pointe (Juillet). • Besoin annuel maximal en eau d'irrigation = 7 783 m³/ha/an. 							
	c) Besoins en eau des cultures	+177 millions de m ³ /an avec efficience globale de départ bassin Afourer. +Taux d'Intensification Cultural (T.I.C.) projeté = 116%.							
	d) Débit équipement	+ Le module de débit unitaire adoptée est : 1,5 litres /secondes /ha							
22 Eléments d'interface de l'équipement interne avec l'extérieur	a) <u>Prise bloc</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Secteur hydraulique subdivisé en blocs d'environ 30 ha/Unité. • 1 bloc / 1 prise sur la conduite tertiaire. • 1 Prise Bloc comporte amont-aval : Vanne de sectionnement, chasse-pierres, limiteur de débit, régulateur de pression et soupape anti-bélier, compteur/parcelle. • 1 bloc d'irrigation: Nombre propriétés; superficie : 1 à x 10 ha. • 1 propriété desservie par 1 Prise Propriété (PP). • Station de tête de l'agriculteur branchée à l'aval de la PP. • PP comporte amont-aval : Vanne de sectionnement, stabilisateur de débit, compteur d'eau, manchette, limiteur de débit, et vanne de sectionnement en dehors de l'abri pour coupure d'isolation du réseau de distribution 							
(Équipement au niveau du bloc : Bornes d'irrigation et conduites de raccordement aux parcelles)	b) <u>Prise propriété:</u>								
23 Agencement de l'équipement interne à la parcelle (à la charge de l'agriculteur):	a) Station de tête	Assemblages essentiels : <ul style="list-style-type: none"> • Clapet antiretour, • Une soupape de sécurité, • Un injecteur d'engrais, • Un filtre en seconde mise, et • Manomètres de contrôle du système. 							
Les exploitations seront desservies par des prises propriétés	b) Conduite principale	Reliant les portes-rampes au point d'eau, en Polyéthylène (P.E). ou en Polyvinyle compacté (PVC) rigide ou en d'autres matériaux.							
	c) Portes-Rampes	Dimension de lumière de 40 à 140 mm et alimentant les rampes.							
	d) Rampes	<ul style="list-style-type: none"> • Nature : PVC plastifié ou en P.E. • Epaisseur : 1 mm • Dimensions: 12 à 32 mm ; en goutteurs d'écartements constants • Pression de service : 1 bar. • Structure de l'équipement des parcelles : <table border="0"> <tr> <td><i>Grandes cultures - Maraichage</i></td> <td><i>Arboriculture</i></td> </tr> <tr> <td>- Ecartement entre rampes</td> <td>: 0,80 m 2.5 à 3 m</td> </tr> <tr> <td>- Espacement entre goutteurs</td> <td>: 0,40 m 0,75 m</td> </tr> <tr> <td>- Débit goutteurs</td> <td>: 2 litres/heure 4 l / h</td> </tr> </table>	<i>Grandes cultures - Maraichage</i>	<i>Arboriculture</i>	- Ecartement entre rampes	: 0,80 m 2.5 à 3 m	- Espacement entre goutteurs	: 0,40 m 0,75 m	- Débit goutteurs
<i>Grandes cultures - Maraichage</i>	<i>Arboriculture</i>								
- Ecartement entre rampes	: 0,80 m 2.5 à 3 m								
- Espacement entre goutteurs	: 0,40 m 0,75 m								
- Débit goutteurs	: 2 litres/heure 4 l / h								

d) Attentes en promotion agricole dans la future zone de la reconversion collective à l'irrigation localisée

Il est escompté d'importantes performances promotionnelles du projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla. On évoque ci-après les aspects saillants afférents.

d-1-Refonte des assolements cultureux en phase du post-projet

Des mutations approfondies ont été projetées sur les assolements cultureux entre la situation actuelle et la situation objectif en adoptant un système d'irrigation localisée, dont les indicateurs clés sont présentés sur le Tableau 35.

En phase du pré-projet de la reconversion, il est prédit l'évolution des assolements cultureux en une campagne moyenne de la superficie de 21 000 ha/an à environ 26 000 ha/an, soit une augmentation de 22 % et une amélioration du Taux d'Intensification Cultural (référéncé aussi par le ratio T.I.C.) du niveau de 0,95 au niveau de 1,16 avec le gain prévu de +21 points.

Sur le plan de la reconfiguration des assolements cultureux, l'innovation adoptée en système d'irrigation localisée, serait plus avantageuse spécialement pour les filières agricoles à haute valeur ajoutée, notamment pour les agrumes, le maraichage, l'olivier et la betterave à sucre en des élargissements respectifs de leurs soles culturales de : 170% ; 78% ; 66% et 50% ; avec une tendance prétendue de remplacement des cultures classiques moins rentables, tels pour les cas des céréales d'automne qui seraient en baisse de 28% en superficie en fin du projet ; le détail des analyses est rapporté au Tableau 35.

Tableau 35 : Variabilités projetées des assolements culturels annuels entre avant et après projet de reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre du Tadla (Source : ORMVA du Tadla, 2012)

Cultures	Situation « départ » (avant reconversion)		Situation « objectif » (après reconversion)		Comparaison entre situations "départ (1)" et "objectif (2)"
	Superficie (en ha/an) (1)	T.I.C. (*)	Superficie (en ha/an) (2)	T.I.C.	
SAU assolée (ha)	21 139,80	94,60%	25 811,60	115,60%	22,10%
Betterave à sucre	2 278,80	10,20%	3 392,60	15,20%	48,90%
Céréales d'automne	7 642,80	34,20%	5 502,20	24,60%	28,00%
Agrumes	1 258,90	5,60%	3 396,90	15,20%	169,80%
Olivier	2 558,60	11,50%	4 252,80	19,00%	66,20%
Autres plantations	28,40	0,10%	-	-	-
Luzerne	4 054,30	18,20%	2 947,60	13,20%	27,30%
Mais fourrager	380,00	1,70%	2 224,80	10,00%	485,50%
Autres fourrages	934,70	4,20%	651,90	2,90%	30,30%
Maraichage	1 885,10	8,40%	3 352,60	15,00%	77,90%
Mais grain	118,20	0,50%	90,20	0,40%	23,70%
SAU (**) totale (ha)	22 337,00		22 337,00	-	-

Abréviations : (*) T.I.C. : Taux d'intensification cultural ; (**) SAU : Superficie agricole utile.

A propos des emblavements de la luzerne, une culture plus exigeante en eau, ils sont prévus en réduction de 27%. La culture luzernière est susceptible d'être substituée au fur et à mesure des campagnes agricoles par la culture rivale le maïs fourrager, une culture à cycle court et plus efficiente en utilisation de l'eau d'irrigation ; en l'occurrence, il est attendu la multiplication par le facteur de 5 fois de la surface cultivée de départ qui ne dépasse initialement les 400 ha par an (Tableau 35).

d-2 Projections en productivité des filières agricoles en post-projet

Les principales incidences prétendues de ce projet sur l'évolution des rendements des cultures de la zone de reconversion en question sont présentées au Tableau 36.

Tableau 36: Rendements moyens annuels comparatifs entre les situations de départ et les situations projetées à l'achèvement du projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla (Source : ORMVA du Tadla, 2012).

Cultures	Rendement de situation de départ (Quintaux/ha)	Rendement de situation « objectif » (Quintaux/ha)	Taux d'amélioration des rendements
<i>Céréales</i>			
Blé dur	53	70	32%
Blé tendre	52	70	35%
Orge	21	45	114%
Maïs	30	50	67%
<i>Cultures fourragères</i>			
Bers im	295	340	15%
Luzerne	500	600	20%
Maïs Fourrager	400	500	25%
Orge fourragère	300	400	33%
Autres Fourrages	240	340	42%
<i>Cultures industrielles</i>			
Betterave sucrière	530	850	60%
Sésame	11	18	64%
<i>Maraichage</i>			
Maraichage d'hiver	250	300	20%
Maraichage d'été	330	350	6%
<i>Arboriculture fruitière</i>			
Olivier	32	70	119%
Agrumes	270	400	48%

Le recours à l'irrigation localisée au collectif est susceptible d'améliorer les productivités des cultures principalement pratiquées au périmètre irrigué de Tadla, notamment pour les cultures industrielles (60 à 64 %), pour l'arboriculture fruitière (48 à 119 %), pour la céréaliculture d'automne (32 à 114%) et pour les cultures fourragères (15 à 42%) ; les comparatifs détaillés des rendements cultureux sont au Tableau 36.

e) Projections en productions végétales après la réalisation du projet

Les prévisions productives agricoles de ce projet sont indiquées pour l'essentiel des filières agricoles de la zone au Tableau 37.

Tableau 37 : Niveaux productifs comparatifs moyens annuels entre les situations de départ et les situations des projections après le projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla (Source : ORMVA du Tadla, 2012).

Cultures	Productions en situation de départ	Productions en situation « objectif »	Taux d'amélioration des productions
	(Quintaux)	(Quintaux)	
Céréales			
Céréales d'automne	366 854	357 643,00	3%
Maïs grain	3 546	4 510,00	27%
Fourrages			
Luzerne	2 027 150	1 768 560	13%
Maïs Fourrager	152 000	1 112 400	632%
Autres Fourrages	224 328	221 646	1%
Culture sucrière			
Betterave sucrière	1 207 764	2 883 710	139%
Maraichage			
Cultures maraichères	546 665	1 072 832	96%
Arboriculture			
Olivier	81 875	297 696	264%
Agrumes	339 903	1 358 760	300%
Total	4 950 085	9 077 757	83%

Le projet en question ambitionne à la réalisation annuelle de volume productif agricole global de l'ordre de 91 000 tonnes, soit une hausse de 83% par rapport à la situation du départ. Ceci résulterait de la multiplication de la performance productive par 2,5 à 3 fois en arboriculture fruitière, par un facteur de 1,4 fois pour la culture sucrière betteravière, par deux fois concernant le maraichage ; quant aux productions fourragères, il y aurait aussi amélioration du volume annuel (+29%) suite au multiple par 6 fois de la production du maïs fourrager, malgré en contrepartie la baisse productive serait pour les luzernières (-13%), en raison surtout des nettes contractions présumées pour les superficies de ces dernières (-27%), qui seraient moins pratiquées en raison de leur relative forte exigence en eau d'irrigation (voir le détail aux Tableaux 35, 36 et 37).

f) Impacts prévisionnels du projet sur l'amélioration les revenus des agriculteurs

Le revenu global additionnel projeté pour les agriculteurs bénéficiaires de la nouvelle technique d'irrigation serait d'environ 429 millions de Dhs par an à l'échelle de la superficie initiale à

reconvertir (22 335 ha), correspondant au gain unitaire agricole de 19 000 Dhs à l'hectare assolé (ORMVA de Tadla, 2012).

g) Etat d'avancement du projet de reconversion en irrigation localisée au périmètre du Tadla

Les stades atteints actuellement des réalisations des travaux du projet de reconversion sont récapitulés au Tableau 38.

Tableau 38 : Récapitulatif des réalisations en cours de travaux du projet de la reconversion à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla, en fin de l'exercice 2019

(Source : ORMVA du Tadla, 2020a)

Reconversion en irrigation localisée	Programme (ha)	Réalizations (en ha)				
		Equipements externes		Equipements internes		
		Achevés	En cours achèvement	En cours achèvement (collectif)/ Achévé (individuel)	Etude d'approbation en cours (individuel)	Mise en eau
Collective	49 040	10 235	12 100	10 235	-	4 418
Individuelle	39 700	-	-	29 340	5 773	29 340
Total	88 740	10 235	12 100	39 575	5 773	33 758

Les travaux de la reconversion à l'irrigation localisée au périmètre de Tadla ont concerné en fin de l'exercice 2019 des aménagements sur le cumul de la superficie de 57 448 ha, avec les éclatements par mode entrepreneurial comme suit (ORMVA du Tadla, 2020a) :

-Reconversions individuelles : programme de 35 113 ha dont 29 340 ha (84%) est réalisé et mise en service et le reste de 5 773 ha (16%) est en cours d'étude ou en travaux.

-Reconversions collectives : programme de 22 335 ha dont l'avancement en équipements externe a dépassé la moitié du programme.

Il est à noter que les chantiers des travaux des équipements internes en mode collectif aux niveaux des parcelles agricoles, qui sont ouverts depuis l'année 2011 sur la superficie de 10 235 ha, sont achevés en 2019 pour la superficie cumulative de 4 418 ha, qui sont en effet dans un état de fonctionnalité effective avec le nouveau système d'irrigation localisée, en substitut à l'ancien système d'irrigation gravitaire (détail des données au Tableau 38).

h) Mesures d'accompagnement du projet de reconversion en irrigation localisée au périmètre de Tadla

A ce projet sont associées les mesures d'accompagnement prioritaires suivantes (ORMVA de Tadla, 2020a) :

- Appui à la gestion des réseaux d'irrigation sous pression par usage d'outils performants de pilotage des irrigations tels par le dispositif de la télégestion et par appui du système SIG ;
- Maintenances régulières ponctuelle et professionnelle des réseaux sous pression, y compris les stations de la filtration collective, des ouvrages des Prises Blocs et des ouvrages des chambres des vannes.
- Assoir et exploitation du système de l'avertissement à l'irrigation moyennant l'encadrement pointu et au temps réel pour les usagers d'eau du réseau de la reconversion;
- Assurer le conseil pertinent de mise en valeur agricole aux profits d'agriculteurs exploitants ;
- Suivi d'impact environnemental, dans le cadre du Plan de la Gestion Environnementale (PGE), en tant qu'observatoire sur l'évolution du niveau de la nappe souterraine, de l'intensité du pompage, de la qualité des eaux de surface d'irrigation, ainsi que pour le suivi d'évolution des paramètres pédologiques;
- Suivi-évaluation régulier des chantiers de travaux de la reconversion, en vue tout ajustement éventuel nécessaire et à temps, avec le retour d'expériences à exploiter implicitement dans la programmation et les réalisations sur secteurs ou tranches ultérieurs du projet en question.

PARTIE II :
**ZONE D'ETUDE, DONNEES EXPLOITEES,
MATERIEL ET METHODES**

Chapitre I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET LA BASE DE DONNEES EXPLOITEES

La zone d'étude est à caractériser pour ses aspects édapho-climatiques et pour ses potentialités en infrastructures hydro-agricoles, ainsi que ses pour ses activités agricoles et socio-agro-économiques. Par ailleurs, il est indiqué la nature de la base de données exploités afférentes aux indicateurs agro-climatiques de cette zone, sujettes à des modalités de traitements statistiques et numériques.

I-Présentation de la zone d'étude

I-1-Situation géographique

La zone d'étude qui s'identifie au périmètre du Tadla, se localise entre les longitudes ouest $6^{\circ} 18' 08''$ et $7^{\circ} 04' 39''$ et entre les latitudes nord du $32^{\circ} 10' 16''$ à $32^{\circ} 40' 10''$, en constituant la majeure partie de la plaine du Tadla (ORMVA du Tadla, 2018 ; 2020c), visualisé sur carte de la Figure 5.

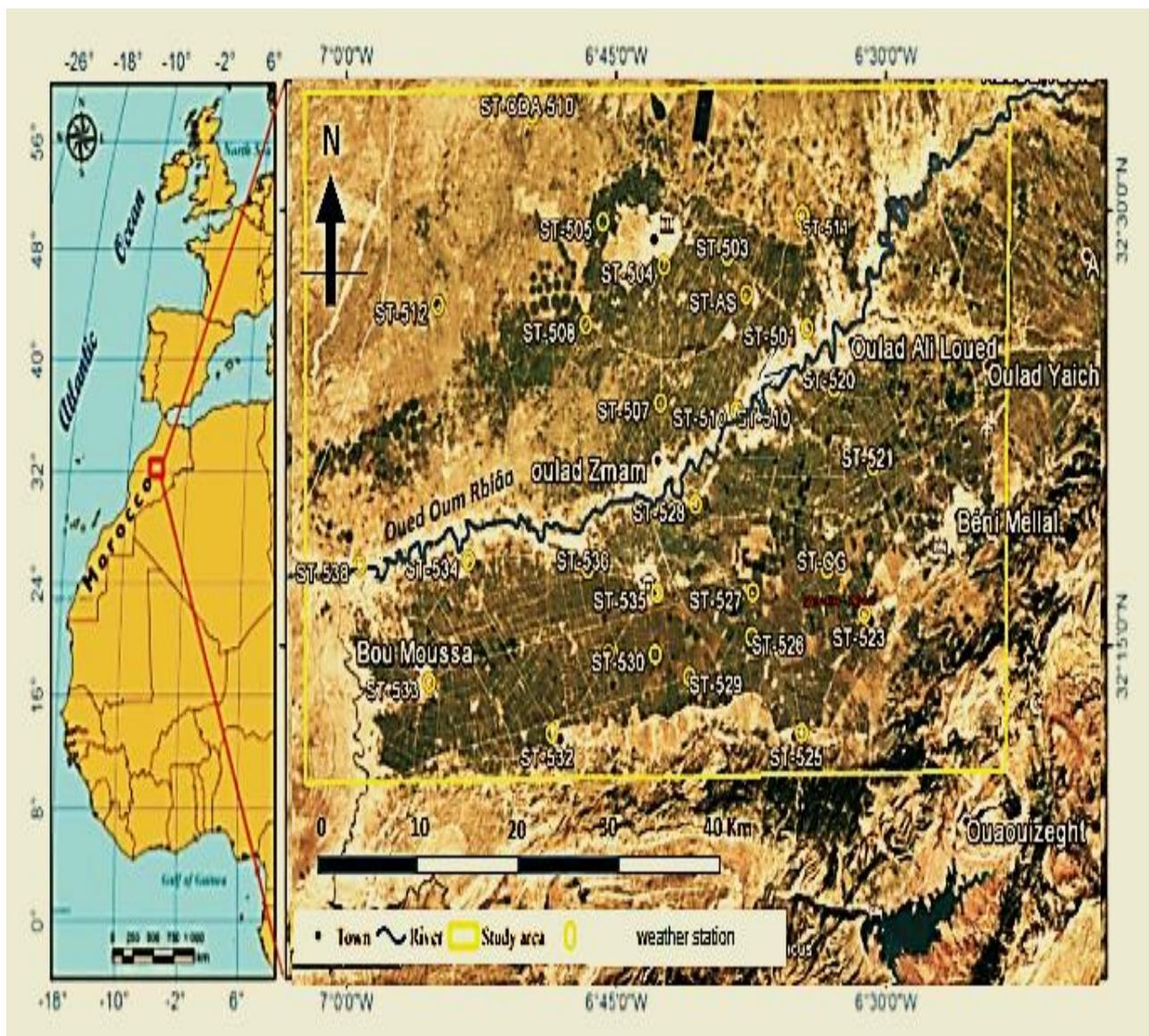


Figure 5 : Situation géographique de la zone d'étude et les points de localisation des stations de mesures pluviométriques

Cette zone se situe au centre du territoire marocain à 200 km au Sud-Est de Casablanca, sur une étendue de 3600 km². Sa topographie est à dominance plane, à une altitude autour de 400 m. La zone est traversée en toute sa longueur par la rivière Oum Er Rbia, qui la scinde en deux sous-zones indépendantes, à savoir : le périmètre des Béni Moussa sur la rive gauche et le périmètre des Béni Amir sur la rive droite (ORMVA du Tadla, 2018 ; 2020c).

La population du périmètre de Tadla s'élève à 649 204 citoyens, selon le recensement national de 2014, avec prédominance des habitants du milieu rural pour environ la part de 65 % du total. Les agriculteurs de cet espace représentent environ 58 000 habitants, dont la moitié (47 %) se localise sur les terres irriguées (ORMVA du Tadla, 2018).

I-2-Climat

Le climat de la zone est de type méditerranéen, spécifiquement semi-aride, avec une période sèche entre Avril et Octobre, et une période humide de Novembre à Mars. La pluviométrie annuelle est à caractère irrégulier, fluctuant autour de 300 mm. La température de l'air est d'une moyenne annuelle de 19°C. L'évaporation annuelle est au niveau de 1 800 mm (ORMVA du Tadla, 2019). L'étude de la caractérisation du régime pluviométrique, de la variabilité thermique et de l'évapo-transpiration végétale sera abordée par la suite et d'une manière plus détaillée.

I-3-Géologie

La zone d'étude, en tant que principale composante de la plaine du Tadla, avait pris genèse de l'effondrement entre Meseta marocaine et chaîne de l'Atlas, dont les délimitations sont : au Nord, le plateau central (Crétacé) ; à l'Est le massif primitif de Rehamna ; à l'Ouest et au Sud, par les plis calcaires du Moyen Atlas (Moniod, 1973).

La séquence litho-stratigraphique de cette zone est définie essentiellement ainsi entre le Trias et le Mio-plio-quadernaire (B.R.G.M., 1993): *i*) Trias : de natures argilo-grézeuse, basaltique, argilo-salifère ; *ii*) Infra-lias et Lias : argilo-dolomitique ; *iii*) Infra-cénomarien : de silico-clastique, à argile rouge et grès gris; *iv*) Cénomarien transgressif : laminites argilo-carbonatées; *v*) Céno-mano-turonien marin : en calcaire, à faune marine franche; *vi*) Sénonien : en zones à fortes subsidences) ; Sénonien marin : à bio-calcarinites ; *vii*) Éocène : en dépôts phosphatés; *viii*) Mio-plio-quadernaire : le miocène est conglomératique et le plio-quadernaire en faciès fluviolacustres du Villafranchien.

I-4- Sols

Le périmètre du Tadla, se dote globalement de sols relativement fertiles; les principaux types de sol répertoriés sont de quatre catégories (Souidi et *al.*, 1994) :

-*Les sols iso-humiques* : comprenant les sols bruns subtropicaux modaux, les sols bruns subtropicaux salins-*sodiques* et les sols châtaîns modaux. Cette catégorie de sols est la plus majoritaire de la zone, qui représentent la part de 83 % du total de la superficie.

-*Les sols calci-magnésiques* : sont au taux de 11 % de la superficie et concernent les sols bruns calcaires et les sols rendezini-formes.

-*Les sols ferrallitiques* : sont répertoriés au type de sols à sesquioxydes de fer (1%);

-*Les sols hydro-morphes* : sont faiblement fréquents pour moins de 1% de la superficie.

-Le reste des sols : sont à caractère peu évolués et ne sont représentés que pour 4% du global en superficie.

I-5-Hydrogéologie et qualité des eaux des nappes souterraines

Le complexe aquifère de la plaine du Tadla s'étend sur une grande superficie d'environ 10 000 km² au niveau du bassin moyen de l'Oum Er Rbia. Il s'agit d'un système aquifère multicouche de quatre composantes principales qui sont inter-liées et à savoir du bas en haut : l'aquifère carbonate du Turonien, localement Céno-mano-turonien, l'aquifère carbonate du sénonien, l'aquifère calcaréo-sableux de l'Éocène et le groupe des aquifères alluvionnaires mio-plio-quadernaires (B.R.G.M., 1993). Le dernier aquifère est représenté par un complexe fluvio-lacustre très hétérogène, contenant une alternance de calcaires lacustres, de marno-calcaires et de conglomérats. Cette entité hydrogéologique bien individualisée, est composée de deux nappes situées de part et d'autre de l'Oum Er Rbia, notamment : la nappe des Béni Moussa au Sud et la nappe des Béni Amir au Nord (Hammani et *al.*, 2004). La qualité des eaux de nappe de la plaine du Tadla est globalement en étroite relation avec la variabilité physico-chimique des eaux des drainages, régulièrement issus du large périmètre agricole irrigué (El Halouani et *al.* 2017)

I-6-Aménagements hydroagricoles

Le mode d'irrigation le plus dominant dans le périmètre de Tadla est le gravitaire, approuvé plus gaspillant en eau. Par conséquent, la zone est intégrée au programme national de l'économie d'eau d'irrigation (PNEEI), en vue de reconvertir en majorité le système d'irrigation classique par le nouveau système d'irrigation localisée et selon deux alternatives soit en individuelle ou soit en collective.

Le périmètre irrigué du Tadla, la zone d'étude, d'une superficie de 120 000 ha avec équipement en réseau en grande hydraulique de superficie de 98 300 ha, répartie entre le sous-périmètre des Béni Moussa pour 69 600 ha, approvisionné en eaux du barrage Bin El Ouidane (capacité : 1,3 Milliards de m³ d'eau) et le sous-périmètre des Béni Amir sur 28 700 ha, desservi par le barrage

EL Hansali (capacité : 740 Millions de m³). Le reste des superficies irrigables de 22 000 ha, concerne l'irrigation par le système pivot, le secteur irrigué en piémont de la zone en petite et moyenne hydraulique (PMH) et par l'irrigation en pompage à partir de la nappe d'eau souterraine en des endroits dispersés (ORMVA du Tadla, 2018).

I-7- Mise en valeur agricole

Le périmètre du Tadla trouve son essor économique agricole à des conditions favorables conjuguées, notamment en fertilité des sols, aux ressources d'eau d'irrigation relativement suffisantes, en à l'infrastructure hydro-agricole moderne ainsi qu'à l'existence de la structure potentielle de l'encadrement de proximité des agriculteurs. Au niveau de ce périmètre, la superficie agricole utile (SAU) s'étend sur 260 000 ha, soit 72 % du total du périmètre avec pour sa moitié est irrigable. En effet, le périmètre comporte régulièrement un assolement annuel irrigué très diversifié, sur un total emblavé, à titre indicatif en 2018/2019 de 148 700 ha, dont 71 % en des cultures annuelles et le reste de 29 % est réservé à l'arboriculture fruitière. Aussi, le milieu strictement pluvial ayant une SAU de 133 000 ha, comporte des cultures prédominées par les céréales d'automne, essentiellement en blés, mais avec des productivités tributaires aux pluviométries très aléatoires des campagnes agricoles (ORMVA du Tadla, 2020).

II-Description et agencements de la base de données

II-1- Base de données des précipitations au périmètre de Tadla

La base de données exploitée pour l'étude des précipitations, a pour source les 27 stations agrométéorologiques de la zone, qui se situent aux sièges des entités du terrain relevant de l'organisme du développement agricole l'ORMVA du Tadla et sont repérées sur la carte de la Figure 5.

La période d'observations est de 60 années agricoles, en signalant que l'année ou la campagne, débute du 1^{er} septembre au 31 Août, couvrant l'intervalle-temps de 1958/1959 à 2017/2018. Les références d'identification des stations de mesures sont rapportées au Tableau 39.

Les lacunes en données des précipitations ont été comblées selon la méthode de la pondération inverse à la distance (IDW : Inverse Distance Weighted), par l'interpolation spatiale de valeurs manquantes en un point donné tout en se référant aux données déjà existantes pour les cinq points les plus voisins (Shepard, 1968).

Tableau 39 : Identification et caractérisation des stations des mesures pluviométriques

(Période d'observations de 1958 à 2018)

Stations	N° station	Sous Périmètres	Découpage hydroagricole	Communes locales	Latitude (en degré décimal)	Longitude (en degré décimal)	Altitude (en m)
501	1			BRADIA	32,44904	6,52868	439
503	2			HEL MERBAA	32,49110	6,61800	445
AS	3				32,46843	6,59654	441
504	4			KRIFAT	32,4843	6,68850	436
505	5	Béni Amir	AGR	BENI OUKIL	32,50961	6,75735	440
507	6		Béni Amir	OULED ZMAM	32,69192	6,69192	415
508	7			KRIFAT	32,44800	6,77486	416
510	8			BENI OUKIL	32,57349	6,84426	465
511	9			KHALFIA	32,51589	6,53523	464
512	10			BENI CHEGDAL	32,45697	6,93983	409
520	11			BRADIA	32,41407	6,49830	445
521	12			SIDI JABEUR	32,36804	6,45427	462
OG	13		AGR	OULED GNAOU	32,30616	6,50465	449
523	14		Béni Moussa Est	OULED MBAREK	32,28061	6,46358	476
525	15			AFOURER	32,21005	6,53183	474
526	16			OULED	32,26538	6,58727	438
527	17			BOURAMOUNE	32,29153	6,58631	430
528	18			SIDI AISSA	32,34263	6,65059	415
529	19	Béni Moussa		BENI AYAT	32,24111	6,65533	444
530	20			SOUK SEBT	32,25353	6,69301	434
531	21			OULED NASSER	32,25321	6,74462	417
532	22		AGR	OULED AYAD	32,20524	6,80568	439
533	23		Béni Moussa Ouest	HAD BOUMOUSA	32,23287	6,94245	386
534	24			DAR OULD ZIDOUH	32,30551	6,90118	376
535	25			SOUK SEBT	32,28971	6,69201	412
536	26			OULED NASSER	32,30287	6,76874	399
538	27			HAD BOUMOUSA	32,30088	7,02236	353

II-2-Base de données en température et en évapo-transpiration du périmètre de Tadla

Les données de température et d'évapo-transpiration de référence au périmètre du Tadla ont été collectées sur quatre stations agro-météorologiques, qui sont disposées d'une manière représentative dans l'espace de la zone d'étude (voir Figure 5), sur la période d'observations de 1970 à 2018. Les références de ces stations de mesures sont données au Tableau 40.

Tableau 40 : Indications sur les stations météorologiques de mesures de la température et de l'évapotranspiration de référence au périmètre de Tadla

(Période d'observations de 1970 à 2018)

Stations des mesures	Sous périmètre	N° de station	Communes Locales	Latitude de la station (en degré décimal)	Longitude de la station (en degré décimal)	Altitude (en m)
Ahl Souss (AS)	Béni Amir	3	Hel Merbaa	32,46843	6,59654	441
Fkih Ben Salah (FBS)	Béni Amir	28	Fkih Ben Salah	32,4843	6,68850	436
Ouled Gnaou (OG)	Béni Moussa	13	Ouled Gnaou	32,30616	6,50465	449
Exploitation de Mabrouk Ali (MBA)	Béni Moussa	29	Had Boumoussa	32,25952	6,94088	327

Les analyses explicites de la variabilité thermique et de l'évapotranspiration du végétal pour l'espace du milieu de la zone d'étude seront plus développées ci-après dans le présent document.

Chapitre II : METHODES ADOPTEES

Il a été adopté un système méthodologique cohérent qui intègre d'une part les méthodes statistiques de la caractérisation bioclimatique de la zone d'étude, appuyé par la cartographie spatio-temporelle des tendances des paramètres agro-climatiques ; et d'autre part avec des enquêtes thématiques et des expérimentations culturales en comparaison de systèmes d'irrigation classique à l'efficient.

I-Démarche méthodologique du travail de recherche

Il a été opté pour des enquêtes thématiques chez les agriculteurs, qui ont été relayées par des essais culturaux en station expérimentale pour l'évaluation des besoins en eau des principales cultures pratiquées et sur les modalités du déroulement des irrigations à l'échelle parcellaire, ce avait aussi lieu d'une manière comparative entre l'ancien et fréquent système d'irrigation classique avec l'innovation technique en cours d'adoption à savoir par le système d'irrigation localisée.

La démarche scientifique préconisée est achevée par des projections à long terme selon des simulations possibles des besoins en eau des cultures stratégiques, par types de systèmes d'irrigation et en considérant les éventualités des changements climatiques.

Les aspects succincts des méthodes adoptées sont présentés ci-après, dont les consistances détaillées sont portées aux annexes.

II-Inventaire des méthodes adoptées au travail de recherche

II-1-Méthodes d'étude de la variabilité agro-climatique

En vue de caractériser l'aspect pluviométrique, les méthodes suivantes sont recommandées :

- Méthode d'intervalle de confiance (McKee et *al.*, 1993)
- Indice pluviométrique d'écart à la normale (Jouilil et *al.*, 2013)
- Indice des précipitations standardisé (IPS) (OMM, 2012).
- Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 (moyennes mobiles pondérées) (Assani, 1999).
- Analyses multivariées des variances par le recours à la méthode usuelle *d'analyse en composantes principales* (ACP) (Yergeau et Poirier, 2013)

II-2--Méthodes d'étude de tendance sur séries temporelles des indicateurs agro-climatiques

Dans l'objectif de cerner les sens et l'importance de l'évolution des paramètres agro-climatiques clés à savoir en pluviométrie, en température de l'air, en évapotranspiration végétale simulée et aussi en niveau de l'aridité du milieu, les méthodes suivantes sont les plus conseillées (Sebbar et *al.*, 2011 ; Traoré et *al.*, 2017 ; Lenssen et *al.*, 2019):

- Test de Mann-Kendall (Kendall et Stuart, 1976).
- Méthode de Sen's (Braumer, 1997).
- Tests d'homogénéité sur les séries temporelles avec la confrontant de quatre méthodes statistiques pertinentes:
 - + Test de Pettitt (Pettitt, 1979).
 - + Méthode bayésienne de Lee et Heghinian (Lee et Heghinian, 1977).
 - + Statistique U de Buishand (Buishand, 1984).
 - + Segmentation de Hubert (Hubert et *al.*, 1989).

II-3-Méthodes d'évaluation du bilan hydrique au sol

Il est objet de faire appel pour évaluer le bilan hydrique au sol à des méthodes spécifiques aux zones bioclimatiques semi-arides et méditerranéen (Pulina, 2012).

II-4-Méthodes d'évaluation et d'étude de l'évolution de l'aridité d'un espace géographique

L'aridité de l'espace agricole étudié est approchée par trois méthodes usuelles en milieu semi-aride, à savoir (De Parcevaux et *al.*, 1990) :

- Méthode par les Diagrammes de Gaussen.
- Méthode par l'Indice de De Maritonne.
- Méthode par le Quotient d'Emberger.

II-5-Cartographie spatio-temporelle des tendances agro-climatiques

Des cartes thématiques sur les tendances des paramètres agro-climatiques pertinents, ont été élaborées avec appui par la technique SIG, en utilisant la méthode de la « Pondération Inverse à la Distance » (I.D.W.: Inverse Distance Weighted) (Shepard, 1968).

II-6-Enquêtes thématiques sur terrain chez les agriculteurs

En vue du diagnostic effectif sur l'opération de l'irrigation auprès de la population des agriculteurs, en fonction des cultures pratiquées et du système d'irrigation adopté, deux enquêtes complémentaires sur le terrain au périmètre du Tadla, ont été accomplies. Les consistances de ces enquêtes sont les suivantes:

- **1^{ère} Enquête agricole** : à caractère technique et porte sur la caractérisation comparative entre le systèmes d'irrigation classique gravitaire et le nouveau système d'irrigation efficient, en s'intéressant aux campagnes agricoles de 2016/2017 et 2017/2018.
- **2^{ème} Enquête agricole** : orientée sur les aspects agro-économiques des exploitations agricoles des agriculteurs, en confrontant les deux phases en avant et en après réalisation du projet de la reconversion collective en système d'irrigation localisée. Cette enquête s'est déroulée au fur et à mesure de l'avancement des activités agricoles entreprises par les agriculteurs enquêtés, ce durant trois campagnes successives (2015/2016, 2016/2017 et 2017/2018).

Les volets abordés par ces enquêtes sont :

- Occupations du sol par les cultures.
- Productivités des cultures.
- Efficiences agronomique de l'utilisation de l'eau d'irrigation.
- Valeurs financières des productions agricoles.
- Marges nettes d'exploitation des cultures.
- Valeurs ajoutées des spéculations agricoles.
- Valorisation économique de l'eau d'irrigation par culture.
- Niveau d'intensification culturale par système d'irrigation.

Les canevas des questionnaires de ces enquêtes et les références des exploitations enquêtées sont rapportés aux annexes.

II-7-Expérimentations agricoles en irrigation des cultures

En vue de comparer entre-eux les systèmes d'irrigation usuels au périmètre de Tadla, des essais cultureux ont été menées dans la station expérimentale SEHA-Ouled Gnaou relevant de l'ORMVA du Tadla, lors des deux campagnes de 2014/2015 et de 2017/2018.

Les cultures visées par ces expérimentations, sont les plus pratiquées dans ce périmètre et concernent les céréales d'automne, la betterave à sucre, la luzerne, le maïs et le maraichage.

Les protocoles expérimentaux détaillés des essais cultureux entrepris sont portés aux annexes.

II-8-Evaluation des besoins actuels en eau d'irrigation des cultures

Les exigences en eau d'irrigation pour les principales cultures du périmètre de Tadla ont été déterminées conformément aux étapes suivantes :

- Quantification des besoins nets et bruts en eau d'irrigation par culture et par système d'irrigation (Doorenbos et Pruitt, 1977; Doorenbos et Kassam, 1979; Alien et *al.*, 1998), dont les modèles des canevas des irrigations sont consignés en annexes.
- Détermination des efficacités des systèmes d'irrigation (Hsiao et *al.*, 2007 ; Wittling et Molle, 2017).
- Evaluations des efficacités agronomiques de l'utilisation de l'eau d'irrigation (E.U.E.) par les cultures (Bouaziz et Belabbes, 2002 ; Van Halsema et Vincent, 2012).

II-9-Projections à long terme des besoins en eau d'irrigation des cultures

Les projections à long-terme des besoins en eau des principales cultures du périmètre de Tadla sont effectuées selon des simulations à l'horizon de l'an de 2050, tout en tenant compte des éventualités alternatives futures des changements climatiques dans la zone d'étude (FAO et INRA-Maroc, 2015).

III-Traitements statistiques et numériques des données

Les traitements informatiques de la masse des données afférentes aux aspects étudiés précités ont été opérés avec le support des logiciels suivants : « SPSS », « R » et « Excel » et aussi le logiciel par logiciel « *Khronostat* ». Les amples informations à ce propos sont évoquées à l'Annexe I.

PARTIE III :
RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre I : ETUDE DE LA VARIABILITE DU REGIME PLUVIOMETRIQUE AU PERIMETRE DE TADLA

Les résultats de la caractérisation du régime pluviométrique de la zone d'étude se rapportent aux caractérisationet aux tendances des cumuls annuels des précipitations et saisonnières intra-annuels selon les différentes méthodes adoptés.

I- Caractéristique des précipitations annuelles au périmètre de Tadla

L'examen des paramètres statistiques descriptifs sur les données pluviométriques, révèle que le volume annuel moyen des précipitations dans la zone varie du minimum de 274 mm au maximum de 336 mm, avec l'écart entre ces deux valeurs extrêmes est de 62 mm/an (Tableau 41).

Tableau 41: Identifications et caractérisation des stations de mesures pluviométriques sources de données pour l'étude

(Période d'observations de 1958 à 2018)

Stations Pluviométriques	N° Station	Pluviométrie annuelle moyenne (mm)	Ecart-type (mm)	Coefficient de variation CV (%)
501	1	311	112	36
503	2	295	112	38
AS	3	292	107	37
504	4	292	110	38
505	5	293	110	37
507	6	283	113	40
508	7	290	107	37
510	8	293	114	39
511	9	298	112	38
512	10	277	112	40
520	11	314	120	38
521	12	331	120	36
OG	13	351	108	31
523	14	336	112	33
525	15	334	108	32
526	16	305	114	38
527	17	307	119	39
528	18	290	116	40
529	19	309	119	39
530	20	297	114	38
531	21	292	122	42
532	22	285	122	43
533	23	279	121	43
534	24	280	123	44
535	25	306	117	38
536	26	299	113	38
538	27	274	121	44

Le coefficient de variation (CV %), calculé pour chaque station de mesure, fluctue dans la gamme de 31 à 44 %. Les valeurs de ce coefficient ont tendance d'accroître en passant de l'Est à l'Ouest de la zone d'étude, ainsi qu'avec la baisse du niveau de l'altitude ; notamment pour les stations suivantes : CDA 538 et CDA 534 en un CV à 44 % ; les CDA 533 et CDA 532 pour CV de 43% ; le CDA 512 à 40% et le CDA 510 à 39%. Quant aux plus faibles CV %, ils sont

affichés aux sites d'extrême Ouest de la zone et aussi à proximité du piémont affleurant la montagne du Moyen Atlas, notamment pour la Station expérimentale d'Ouled Gnaou–SEHA (31%), et aux sites des stations du CDA 525 (32%) et du CDA 523 (33%).

En globalité, ces coefficients de variation importants et irréguliers sur les données pluviométriques nous amènent à faire approfondir la réflexion en utilisant des méthodes statistiques spécifiques et plus affinés, en vue de la caractérisation de ces tendances. Des options afférentes seront alors ultérieurement plus développées sur le présent document.

L'analyse des pluviométries annuelles moyennes calculées à partir des données enregistrées sur les stations de mesures montre des variabilités de moins d'ampleur dans l'espace, vu que le coefficient de variation est dans la moyenne de 15 % (gamme de 1% à 56 %) et les erreurs standard sont dans une moyenne de (+/-) 10,4 mm/an. Par contre il y a de fortes fluctuations dans le temps des cumuls annuels des précipitations dans une tendance à la baisse, comme atteste l'équation de régression linéaire à une pente négative avec coefficient de corrélation de $R=0,6$, avec illustration par la courbe de la Figure 6.

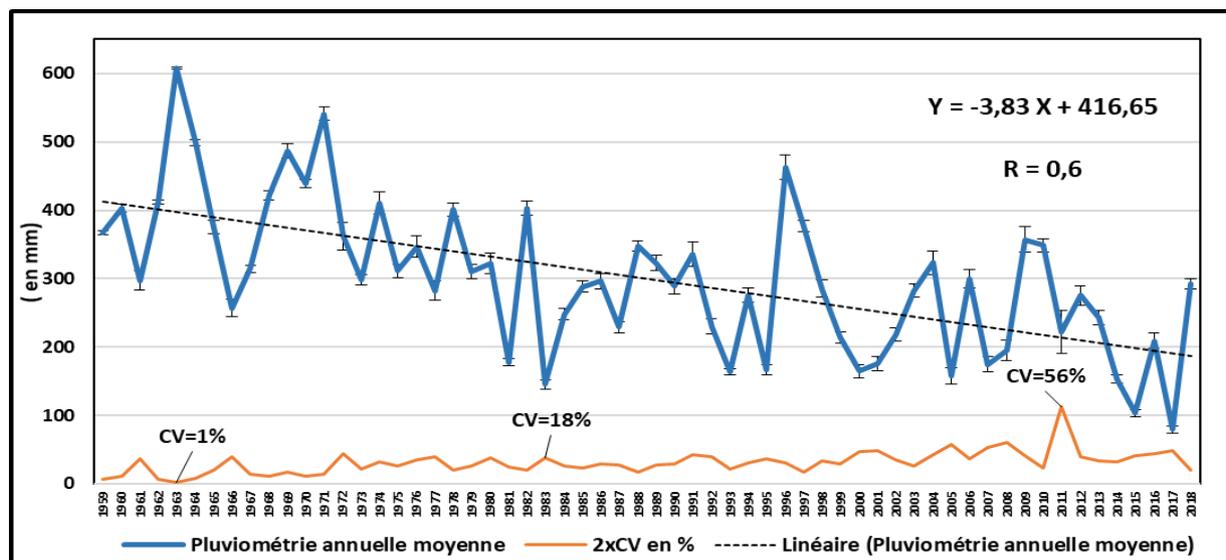


Figure 6: Evolution des précipitations annuelles moyennes avec marge de variations et courbe de tendance en affichant équation de la droite de régression linéaire pour le périmètre du Tadla en période 1958-2018.

II-Variabilité pluviométrique annuelle

II-1-Seuils à la sécheresse volumétrique pluviométrique au périmètre de Tadla

Les seuils à la sécheresse (Li) du périmètre de Tadla en volume, relevés sur les intervalles de confiance (IC) des séries pluviométriques annuelles sur la période d'observations de 1958 à 2018, fluctuent entre le minimum de 244 mm/an à la station CDA 538 à l'extrême Sud-Ouest de la

zone d'étude, jusqu'au maximum de 324 mm/an en station d'Ahl Souss au Nord-Est de cette zone (Tableau 42).

II-2-Seuils à la sécheresse en proportion pluviométrique au périmètre de Tadla

Le seuil à la sécheresse, en pourcentage pluviométrique oscille entre le taux de 8 % et 11%, en passant respectivement des stations de l'Est (à Ahl Souss, CDA 523 et CDA 525) aux stations de l'Ouest de la zone (CDA : 531, 532, 533, 534 et 538). Les valeurs détaillées de ces seuils par stations pluviométriques sont portées au Tableau 42.

Tableau 42 : Seuils à la sécheresse, intervalles de confiance pluvieux, écarts à la normale en pluviométrie et fréquences selon la pluviosité des années au périmètre de Tadla en période de 1958 à 2018.

Stations	Seuil à la sécheresse (Li de IC en mm)	Seuil de sécheresse d'écart à la normale calculé par IDP %	Fréquences selon la pluviosité des années			Stations	Seuil à la sécheresse (Li de IC en mm)	Seuil de sécheresse d'écart à la normale calculé par IDP %	Fréquences selon la pluviosité des années		
			Sèches (S)	Normales (N)	Humides (H)				S	N	H
501	282,6	9%	37%	20%	43%	523	307,6	8%	35%	28%	37%
503	266,7	10%	43%	15%	42%	525	307,3	8%	38%	20%	42%
AS	323,6	8%	42%	25%	33%	526	275,9	9%	38%	23%	38%
504	264,8	9%	42%	13%	45%	527	277,5	10%	43%	18%	38%
505	265,6	9%	43%	17%	40%	528	260,8	10%	42%	22%	37%
507	254,8	10%	40%	23%	37%	529	279,0	10%	32%	35%	33%
508	263,5	9%	42%	20%	38%	530	268,3	10%	47%	13%	40%
510	264,1	10%	40%	23%	37%	531	261,6	11%	40%	18%	42%
511	270,0	9%	35%	25%	40%	532	254,2	11%	37%	22%	42%
512	249,1	10%	35%	28%	37%	533	248,4	11%	48%	15%	37%
520	283,3	10%	40%	20%	40%	534	249,5	11%	42%	23%	35%
521	301,1	9%	37%	22%	42%	535	276,5	10%	45%	15%	40%
OG	265,2	9%	40%	20%	40%	536	270,5	10%	38%	22%	40%
						538	243,6	11%	43%	20%	37%

Il est constaté que les années déficitaires en précipitations sont au taux variant de 32 % à 48 % aux stations respectives CDA 529 et CDA 533. Le taux fréquentiel pour les années normales est de 13 % à 35 % aux stations correspondantes du CDA 504-CDA 530 et du CDA 529. La proportion en des années relativement humides sont dans la gamme de 33 % à 45 % respectivement au couple de stations d'Ahl Sous-CDA 529 et à la station CDA 504 (Tableau 42).

Le taux élevé en années sèches au périmètre de Tadla (32 % à 48% des cas), trouve explication à l'existence de deux intervalles-temps, relativement assez prolongées et qui sont dominées par des déficits pluviométriques annuels sévères. Le premier intervalle s'étale de 1981 à 1999, qui reste décalé que pour seulement trois années, à caractère pluvieux normal, par rapport au second intervalle avec des années fortement sèches entre 1998 et 2007 (voir la Figure 6).

II-3-Evolution de l'indice des précipitations standardisé (SPI)

Selon l'indice IPS global de la zone d'étude sur la période d'observations de 1958 à 2018, il est relevé une répartition fréquentielle spécifique, qui se définit ainsi : pour les années sèches (à IPS < - 0,5), pour les années normales (à IPS compris entre -0,5 et 0,5) et pour les années humides (à

IPS > 0,5) pour des taux respectifs comparables de 33%, de 35% et de 32%. L'évolution de l'IPS est donnée à la Figure 7.

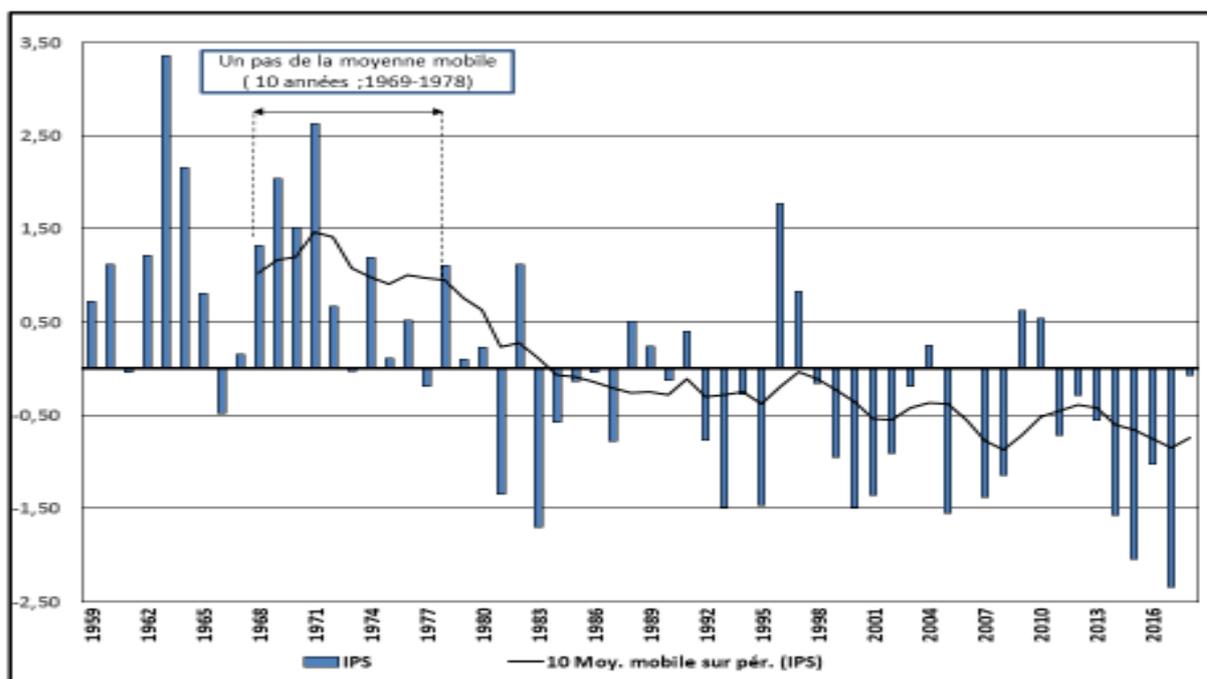


Figure 7 : Evolution de l'indice des précipitations standardisé (IPS) au périmètre du Tadla pour la période de 1958 à 2018.

L'analyse de l'évolution de l'IPS avec appui par la moyenne mobile en des pas de 10 périodes, a permis d'identifier les trois phases pluviométriques distinctes suivantes (Figure 7) :

-*Période 1* (de 1958 à 1971) : Marquée par la dominance en des années fortement pluvieuses.

-*Période 2* (de 1972 à 1979) : Intermédiaire à pluviométries annuelles proches de la normale.

-*Période 3* (de 1980 à 2018) : Caractérisée par des années sèches et perdure depuis 39 ans.

Ces données de l'IPS seront par la suite confrontées aux résultats ultérieurs des analyses par les méthodes de la détection des ruptures chronologiques sur les séries pluviométriques étudiées.

I-4-Indice par le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2

Par l'application de la méthode de l'indice par le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 avec des moyennes mobiles pondérées, il a été décelé la nette séparation chronologique des séries pluviométriques. En effet, par cette méthode, il a été dégagé trois nouvelles phases distinctes autres que par la méthode de l'IPS, comme illustré à la Figure 8 et qui sont définies comme suit :

-Période A (entre 1958 et 1979) : Les précipitations annuelles suivent une tendance de dépassement de la normale pluviométrique de la zone.

-Période B (entre 1980 et 1987) : Le cumul pluviométrique de l'année est dans une phase transitoire pour quelques années avec des alternances irrégulières entre années humides, normales et sèches.

-Période C (entre 1988 et 2018) : La pluviométrie a un caractère déficitaire qui est prédominant. La circonstance dure depuis 39 ans.

La tendance des précipitations selon cet indice pour deux modèles de stations de mesures pluviométriques, est illustrée dans les Figures 8 et 9, sachant que l'une des stations est située dans le sous-périmètre des Béni Amir, représenté par la station Ahl Souss et l'autre est afférente au sous-périmètre des Béni Moussa par la station Ouled Gnaou.

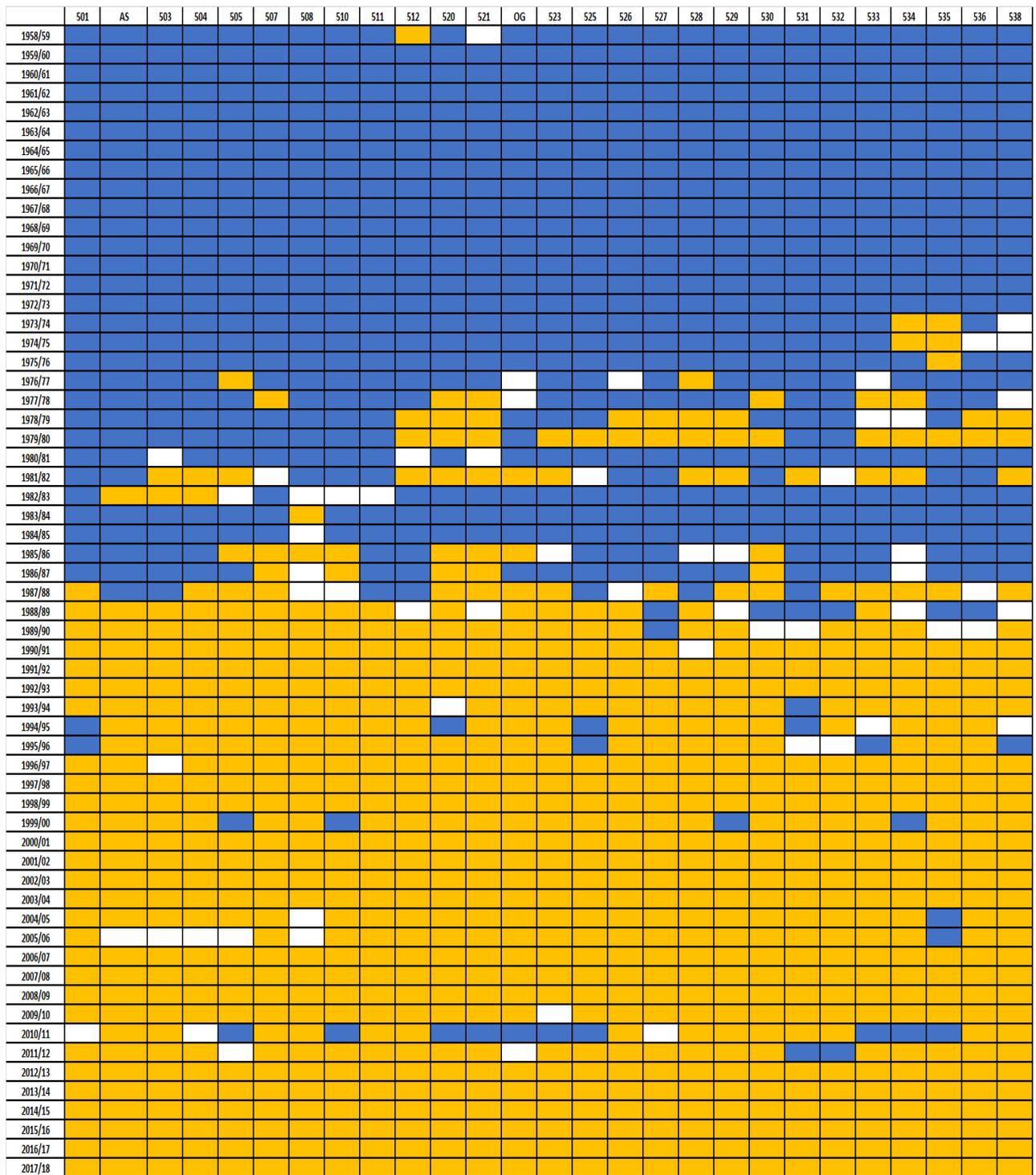


Figure 8 : Schématisation des données de l'indice pluviométrique par la méthode du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 au périmètre de Tadla sur période 1958 à 2018 (représentation des valeurs positives, nulles et négative respectivement par les couleurs des cases en bleu, en blanc et en orange).

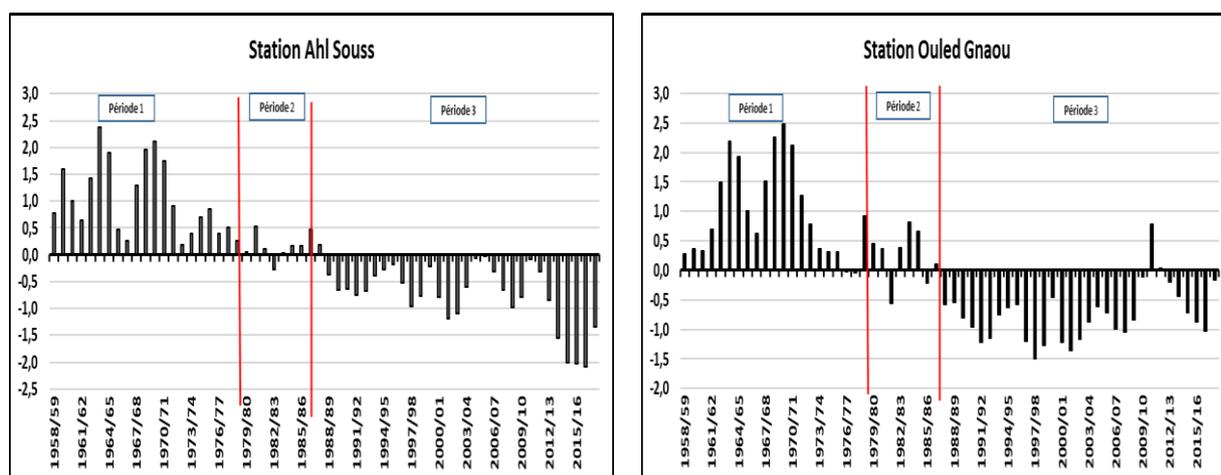


Figure 9 : Evolution de l'indice en filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 de la pluviométrie annuelle aux niveaux des deux stations repères Ahl Souss (graphe de gauche) et Ouled Gnaou (graphe de droite) au périmètre de Tadla sur la période de 1958 à 2018.

En général, il est constaté une similitude dans l'allure de l'évolution des pluies selon cette méthode plus affinée pour l'ensemble des stations pluviométriques repères de notre étude. En effet, il se profile de les mêmes trois phases pluviométriques contrastés déjà précitées.

I-5-Etude de la tendance pluviométrique annuelle

Les résultats des analyses de tendance pluviométrique par les méthodes de Mann-Kendall et de Sen's sont présentés ci-après.

a) Test de Mann-Kendall sur les pluviométries annuelles

Les résultats de ce test sont rapportés sur le Tableau 43.

Tableau 43 : Tests statistiques de tendance pluviométrique par la méthode de Mann-Kendall au périmètre de Tadla pour la période de 1958 à 2018.

Stations	Paramètres du test de Mann-Kendall					Stations	Paramètres du test de Mann-Kendall				
	TauB de Kendall	UMK de Mann Kendall	p-value du test	Hypothèse Ho: Absence de tendance	Sens de la tendance		TauB de Kendall	UMK de Mann Kendall	p-value du test	Hypothèse Ho: Absence de tendance	Sens de la tendance
501	0,385	-4,346	0,00001	non	Baisse	526	0,468	-5,283	0,00001	Non	Baisse
503	0,346	-3,906	0,00005	non	Baisse	527	0,440	-4,967	0,00001	Non	Baisse
504	0,306	-3,454	0,00029	non	Baisse	528	0,407	-4,595	0,00001	Non	Baisse
505	0,350	-3,951	0,00004	non	Baisse	529	0,431	-4,866	0,00001	Non	Baisse
507	0,444	-5,012	0,00001	non	Baisse	530	0,407	-4,595	0,00001	Non	Baisse
508	0,350	-3,951	0,00004	non	Baisse	531	0,485	-5,475	0,00001	Non	Baisse
510	0,334	-3,771	0,00008	non	Baisse	532	0,490	-5,532	0,00001	Non	Baisse
511	0,369	-4,166	0,00001	non	Baisse	533	0,443	-5,001	0,00001	Non	Baisse
512	0,426	-4,809	0,00001	non	Baisse	534	0,436	-4,922	0,00001	Non	Baisse
520	0,407	-4,595	0,00001	non	Baisse	535	0,362	-4,087	0,00001	Non	Baisse
521	0,424	-4,787	0,00001	non	Baisse	536	0,434	-4,899	0,00001	Non	Baisse
523	0,390	-4,403	0,00029	non	Baisse	538	0,497	-5,611	0,00001	Non	Baisse
525	0,325	-3,669	0,00013	non	Baisse	AS	0,336	-3,793	0,00005	Non	Baisse
						OG	0,279	-3,150	0,00118	Non	Baisse

Il est relevé une tendance au sens de la baisse des séries des précipitations annuelles, compte-tenu du signe négatif de la statistique U_{MK} de Mann-Kendall, en signalant que les valeurs de

l'indice *tau* de Mann-Kendall pour toutes les stations pluviométriques sont à des p-values très hautement significatives (< 0,001).

Ces constats statistiques, vues leurs variabilités significatives, ouvrent la voie pour passer au suivant test plus précis de Sen's.

b) Test de Sen's sur la pluviométrie annuelle

Les résultats de ce test sont donnés au Tableau 44.

Tableau 44 : Résultats du test statistique de la tendance pluviométrique par la méthode de Sen's du périmètre de Tadla pour la période de 1958 à 2018

Stations	Indicateurs du test de Sen's				Stations	Indicateurs du test de Sen's			
	Intervalle de confiance de la pente de tendance à la signification de 95%			Hypothèse Ho: Tendance non significative		Intervalle de confiance de la pente de tendance à la signification de 95%			Hypothèse Ho: Tendance non significative
	Borne inférieure	Valeur moyenne	Borne supérieur			Borne inférieure	Valeur moyenne	Borne supérieur	
501	0,118	0,081	0,044	Non	526	0,128	0,098	0,067	Non
503	0,112	0,077	0,042	Non	527	0,121	0,091	0,061	Non
504	0,110	0,074	0,037	Non	528	0,120	0,088	0,056	Non
505	0,114	0,079	0,043	Non	529	0,115	0,084	0,052	Non
507	0,126	0,094	0,062	Non	530	0,122	0,089	0,057	non
508	0,120	0,084	0,048	Non	531	0,121	0,093	0,066	non
510	0,111	0,077	0,042	Non	532	0,122	0,094	0,066	non
511	0,118	0,084	0,050	Non	533	0,117	0,087	0,057	non
512	0,112	0,081	0,050	Non	534	0,115	0,086	0,057	non
520	0,129	0,098	0,066	Non	535	0,112	0,079	0,046	Non
521	0,117	0,087	0,057	Non	536	0,126	0,095	0,063	Non
523	0,116	0,082	0,048	Non	538	0,126	0,095	0,063	Non
525	0,115	0,078	0,041	Non	AS	0,118	0,081	0,044	Non
					OG	0,105	0,067	0,028	Non

Le test de Sen's confirme bien les résultats du test précédent de Mann-Kendall de la tendance des pluies annuelles qui est en régression au fil du temps pour toutes les stations de mesures. En effet, la valeur moyenne de la pente de la tendance (médiane des régressions) est de 0,085 sur une gamme de 0,098 à 0,067 ; respectivement pour les stations CDA 520 et Ouled Gnaou (Tableau 44).

c) Tests d'homogénéité pour pluviométrie annuelle

A priori d'effectuer les tests d'homogénéité sur les séries chronologiques pluviométriques, des tests statistiques préliminaires de vérification des conditions exigées ont été menés. Les résultats de ces tests sont ci-dessous :

-*Caractère aléatoire* : Confirmé par le test de la corrélation sur rang, par la référence au même test de Mann-Kendall (Tableau 43), ce qui montre que les séries des mesures ne présentent aucune saisonnalité anormale des données.

-*Indépendance des données* : Vérifiée le test de l'auto-corréloogramme avec usage du logiciel *Khronstat* (Boyer, 1998 ; Traoré et al., 2017).

-Normalité de la distribution des données : Validée par le test Chapiro-Wilk (Tableau en annexes);

-Egalité des variances (homo-scédasticité) : Favorable à travers le test de Fisher (paramétrique) le test de Levene (non paramétrique), sur des segments de séries à l'issue des éclatements des séries pluviométriques initiales suite aux tests de détection de rupture chronologique (voir tableau détaillé porté aux annexes).

Quant aux résultats des tests pertinents d'homogénéité visés en premier lieu au sujet de la détection de scission des séries temporelles étudiées, ils seront présentés ci-après avec les analyses afférentes.

c.1. Test de rupture de Pettitt

Il est repéré par ce test que pour majorité des stations de mesures, les ruptures chronologiques sont restreintes à l'intervalle-temps de 1978 à 1982, pour les cas de 25 stations sur le total de 27 stations, soit au taux de 93 %. La rupture chronologique n'est anticipée qu'une seule fois en l'année 1975 sur site de la station CDA 534, située à l'Ouest de la zone d'étude. Par contre, la rupture en question s'est davantage retardée en l'année 1992 en une seule à l'extrême Sud-Est en station CDA 525, sur la ligne de frontière de la plaine avec la zone piémont (Dir) de la chaîne montagneuse du Moyen-Atlas. Les statistiques de ce test sont sur le Tableau 45.

Tableau 45 : Tests de Pettitt de détection de rupture chronologique de la pluviométrie au périmètre du Tadla pour la période de 1958 à 2018.

Station	Test de Pettitt			Station	Test de Pettitt		
	Dates de rupture	Probabilité dépassement	Niveau signification		Dates de rupture	Probabilité dépassement	Niveau signification
501	1978	3,16E04	Très hautement significatif	523	1980	6,29E05	Très hautement significatif
503	1979	2,76E03	Très significatif	525	1992	7,53E03	Très significatif
AS	1979	4,91E03	Très significatif	526	1978	6,29E05	Très significatif
504	1979	4,43E03	Très significatif	527	1980	1,46E05	Très significatif
505	1978	2,54E03	Très significatif	528	1978	2,62E04	Très significatif
507	1982	3,40E05	Très hautement significatif	529	1980	6,29E05	Très significatif
508	1979	2,10E03	Très significatif	530	1980	1,75E05	Très significatif
510	1982	4,66E03	Très significatif	531	1982	2,76E05	Très significatif
511	1978	7,35E04	Très hautement significatif	532	1982	1,17E05	Très significatif
512	1982	2,04E04	Très hautement significatif	533	1978	1,53E04	Très significatif
520	1978	1,97E04	Très hautement significatif	534	1975	7,19E05	Très significatif
521	1980	4,83E06	Très hautement significatif	535	1980	7,80E04	Très significatif
OG	1978	3,80E04	Très hautement significatif	536	1980	5,49E05	Très significatif
				538	1982	6,29E05	Très significatif

En effet, par le test de Pettitt, il est déterminé des ruptures qualifiées de très significatives sur les séries pluviométriques de 8 stations (30 % de cas) et des ruptures très hautement significatives pour les autres stations qui sont au nombre de 19 (70 % de cas).

c.2. Test de rupture de Buishand

Il a été abouti par ce test à de résultats comparables par rapport à ceux obtenus par le test précédent et avec d'excellente signification à 99%. A l'issue du test de Buishand, les ruptures temporelles sur des séries des précipitations annuelles sont concentrées sur intervalle de 1978 à 1982. Ceci est à l'exception de la station CDA 525 dont ladite rupture est plus retardée en l'année 1998, qui pourrait être justifié par sa position géographique au limitrophe Sud de la plaine du Tadla avec la zone de montagne de l'Atlas. Les données détaillées de ce test sont présentées au Tableau 46.

Tableau 46 : Tests de détection de rupture de Buishand sur chronologie pluviométrique au périmètre de Tadla pour la période de 1958 à 2018.

Station	U max de Buishand		Station	U max de Buishand	
	Dates de rupture	niveau signification en « ellipse du Bois »		Dates de rupture	niveau signification en « ellipse du Bois »
501	1979	99%	523	1980	99%
503	1979	99%	525	1998	99%
AS	1979	99%	526	1978	99%
504	1979	99%	527	1980	99%
505	1978	99%	528	1978	99%
507	1982	99%	529	1980	99%
508	1979	99%	530	1980	99%
510	1978	99%	531	1980	99%
511	1978	99%	532	1982	99%
512	1982	99%	533	1978	99%
520	1978	99%	534	1980	99%
521	1980	99%	535	1980	99%
OG	1978	99%	536	1980	99%
			538	1982	99%

c.3. Test de rupture de Lee et Heghinian

Ce test confère au regroupement de la majorité des ruptures chronologiques sur la courte période de 1978-1980. Ceci est avéré plus précoce d'une à deux années par rapport aux constats des deux précédents tests, en concernant 67 % des stations de mesures (nombre de 18). En période antérieure de 1971-1976, il a été constaté 30 % des cas de rupture (8 stations). Toujours la station CDA 525 se démarque particulière par l'année de rupture la plus récente en 1998 (Tableau 47).

Tableau 47 : Tests de détection de rupture de Lee et Heghinian sur chronologie pluviométrique au périmètre de Tadla pour la période de 1958 à 2018.

Stations	Test de Lee et Heghinian		Stations	Test de Lee et Heghinian	
	Dates de rupture	Probabilité associée		Dates de rupture	Probabilité associée
501	1979	0,35	523	1978	0,25
503	1979	0,13	525	1998	0,12
AS	1979	0,17	526	1976	0,27
504	1979	0,17	527	1980	0,59
505	1974	0,20	528	1978	0,18
507	1978	0,22	529	1980	0,18
508	1972	0,27	530	1980	0,28
510	1972	0,15	531	1980	0,15
511	1978	0,24	532	1980	0,14
512	1979	0,17	533	1971	0,81
520	1978	0,38	534	1975	0,46
521	1980	0,37	535	1975	0,31
OG	1978	0,27	536	1980	0,18
			538	1975	0,24

c.4. Méthode de segmentation de Hubert

Par cette méthode, il a été aussi repérer des scissions dans les séries temporelles pluviométriques. En effet, il a été identifié des ruptures primaires lors de deux périodes de 1970-1975 et de 1978-1980, respectivement en 44% des cas (12 stations) et en 56% des cas (15 stations). Comme signalé auparavant, l'unique station CDA 525 est particulière et qui est concernée par une rupture tardive en 1998 sur ses données pluviométriques.

Les calculs finaux de ce test sont consignés au Tableau 48

Tableau 48 : Résultats de la segmentation de Hubert sur les séries pluviométriques au périmètre de Tadla pour la période de 1958 à 2018.

Stations (St)	Dates de rupture	Segmentation de Hubert				St	Dates de rupture	NP	Segmentation de Hubert		
		Nombre rupture (NP)	Moyenne annuelle avant rupture (mm) (1)	Moyenne annuelle après rupture (mm) (2)	Taux de réduction (en %) : [(1) (2)] / (1)				Moyenne annuelle avant rupture (mm) (1)	Moyenne annuelle après rupture (mm) (2)	Taux de réduction en (en %) : [(1) (2)] / (1)
501	1978	1	402,8	264,9	34	523	1978	1	429,0	289,3	33
503	1979	1	364,5	255,2	30	525	1998	1	369,6	264,2	29
AS	1979	1	364,2	253,1	30	526	1974; 1998	2	421,9	300,4	29
504	1979	1	366,440	252,4	31	527	1980	1	406,7	249,9	39
505	1974	1	388,5	258,5	33	528	1978	1	384,3	242,6	37
507	1978	1	381,3	234,1	39	529	1978; 1995; 1996	3	403,9	274,5	32
508	1972	1	395,0	258,6	35	530	1980	1	392,5	241,4	39
510	1972	1	394,9	261,6	34	531	1974; 1999	2	413,2	295,5	28
511	1978	1	385,4	254,5	34	532	1974; 1999	2	410,7	281,3	32
512	1970 ; 1997	2	390,6	283,8	27	533	1971	1	429,0	237,3	45
520	1978	1	413,6	263,5	36	534	1975	1	409,3	229,5	44
521	1980	1	434,6	271,5	38	535	1975	1	408,5	265,2	35
OG	1978	1	437,3	307,2	30	536	1972; 1999	2	417,3	297,4	29
						538	1971; 2010	2	422,0	255,8	39

Avec cette méthode, il est soulevé la particularité d'avoir de multiple ruptures chronologiques sur les séries pluviométriques. En effet en 26 % des cas (6 stations) il y a la double rupture, dont une au Nord-Ouest du sous-périmètre des Béni Amir (en station CDA 512) et les autres sont éparpillées au sous-périmètre des Béni Moussa. La manifestation en triple ruptures concerne la station CDA 529, qui domine l'espace de la bande Dir longeant la partie d'extrême Sud du périmètre de Tadla.

La méthode de segmentation de Hubert décèle des ruptures secondaires et tertiaires à partir du milieu des années 1990. Ceci est remarqué à la veille de la phase critique des années sévèrement sèches entre 1998 et 2009, comme a été déjà illustré plus haut sur le graphique de la Figure 6.

En l'occurrence, après la rupture en tendance des pluies, le taux de la réduction minimale du volume pluviométrique est de 27 %. Ceci concerne la station CDA 512, en passant de la moyenne annuelle des précipitations de 391 mm/an en pré-rupture à 284 mm/an en post-rupture. Quant au maximum du taux de la réduction pluviométrique, il est évalué à 45%. C'est pour le cas de la station CDA 533, où la moyenne annuelle des pluies évolue entre l'avant et l'après rupture temporelle de 429 à 237 mm/an.

III-Tendance des précipitations annuelles au périmètre de Tadla

En se référant aux résultats des précédents tests d'homogénéité des séries pluviométriques annuelles dans la zone d'étude, il est retenu l'année agricole repère de **1977/1978**, référencée par la courte expression en année 1978, comme date principale de scission chronologique des pluies au périmètre de Tadla, avec illustration du constat sur la Figure 10.

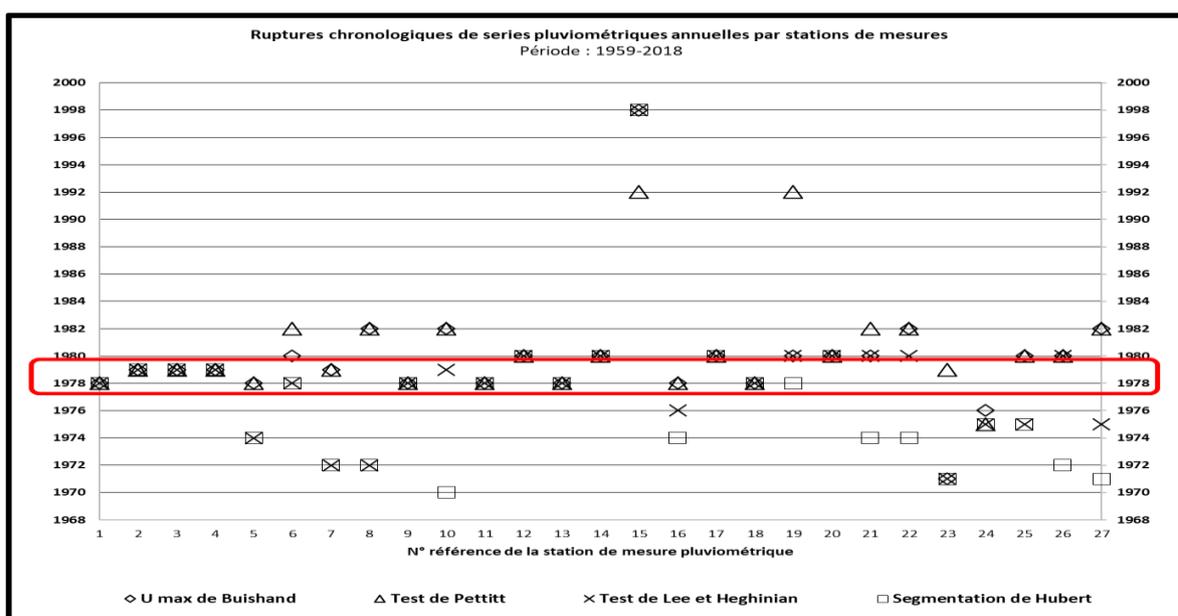


Figure 10 : Chronogramme des ruptures pluviométriques selon les méthodes d'homogénéisation

Il est démontré qu'en première sous-période de 1958-1978 d'avant-rupture, la pluviométrie était à une moyenne de **397 mm/an** et aussi fluctuant dans l'intervalle de confiance de [359 mm/an ; 436 mm/an]. Ce qui est affiliée en après rupture à l'autre sous-période de 1979-2018 en une pluviométrie moyenne de **254 mm/an**, variant dans l'intervalle de confiance de [228 mm/an ; 280 mm/an].

Il est retenu, en effet, que le taux global de la réduction des précipitations annuelles est de **36 %** (22 à 48 %).

Le contraste pluviométrique entre ces deux sous-périodes contiguës et homogènes est illustré au graphique de la Figure 11.

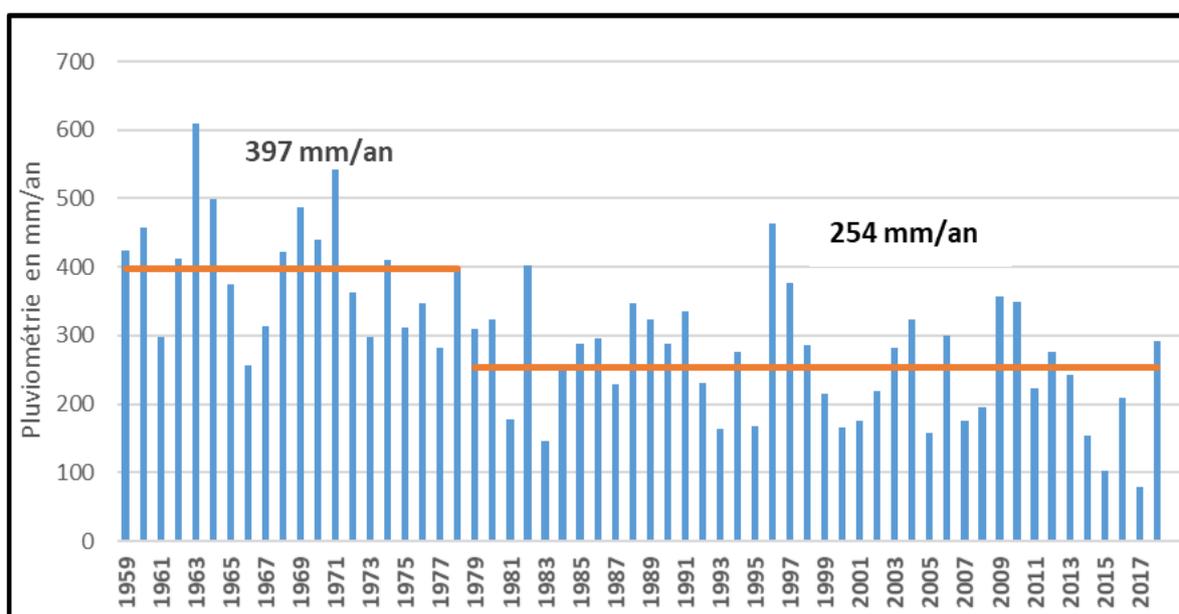


Figure 11 : Evolution des précipitations annuelles en avant et après la rupture chronologique des précipitations au périmètre de Tadla pour la période de 1958 à 2018

Suite à l'identification des ruptures sus-indiquées, les rapprochements aux résultats antérieures afférents aux méthodes d'analyses de la variabilité du régime des précipitations, sont récapitulés au Tableau 49 et illustrés aux graphiques de la Figure 12.

Tableau 49 : Classification des pluviométries annuelles pour les stations de mesures selon les périodes d'avant et d'après ruptures ayant été détectées par les tests statistique d'homogénéité

St	Fréquences des années en fonction de l'indice pluviométrique IPS									St	Fréquences des années en fonction de l'indice pluviométrique IPS								
	Avant rupture pluviométrique (Années :1959-1978)			Après rupture de série pluviométrique (1979-2018)			Pour série pluviométrique complète (1959-2018)				Avant rupture pluviométrique (1959-1978)			Après rupture de série pluviométrique (1979-2018)			Pour série pluviométrique complète (1959-2018)		
	S	N	H	S	N	H	S	N	H		S	N	H	S	N	H	S	N	H
501	5%	25%	70%	48%	30%	23%	33%	28%	38%	523	0%	40%	60%	48%	40%	13%	32%	40%	28%
503	10%	25%	65%	50%	28%	23%	37%	27%	37%	525	5%	50%	45%	43%	33%	25%	30%	38%	32%
AS	15%	20%	65%	48%	28%	25%	37%	25%	38%	526	0%	30%	70%	53%	35%	13%	35%	33%	32%
504	10%	25%	65%	45%	33%	23%	33%	30%	37%	527	0%	30%	70%	58%	25%	18%	38%	27%	35%
505	15%	25%	60%	50%	30%	20%	38%	28%	33%	528	5%	30%	65%	53%	33%	15%	37%	32%	32%
507	5%	55%	40%	50%	35%	15%	35%	42%	23%	529	0%	30%	70%	48%	43%	10%	32%	38%	30%
508	10%	55%	35%	45%	33%	23%	33%	40%	27%	530	0%	35%	65%	63%	20%	18%	42%	25%	33%
510	10%	55%	35%	48%	35%	18%	35%	42%	23%	531	5%	30%	65%	45%	40%	15%	32%	37%	32%
511	10%	25%	65%	45%	35%	20%	33%	32%	35%	532	0%	30%	70%	43%	45%	13%	28%	40%	32%
512	5%	25%	70%	48%	38%	15%	33%	33%	33%	533	10%	15%	75%	55%	33%	13%	40%	27%	33%
520	0%	30%	70%	58%	23%	20%	38%	25%	37%	534	10%	15%	75%	58%	33%	10%	42%	27%	32%
521	0%	25%	75%	55%	33%	13%	37%	30%	33%	535	10%	25%	65%	55%	18%	28%	40%	20%	40%
OG	5%	40%	55%	53%	35%	13%	37%	37%	27%	536	5%	30%	65%	53%	28%	20%	37%	28%	35%
										538	5%	25%	70%	50%	35%	15%	35%	32%	33%

Abréviations : St : Station ; S : Années sèches ; N : Années normales ; H : Années humides

Le raisonnement sur le passage remarquable entre les phases de l'avant à l'après rupture en question, en relation avec la classification de l'importance pluviométrique des campagnes agricoles, est l'objet des histogrammes du graphique gauche de la Figure 12.

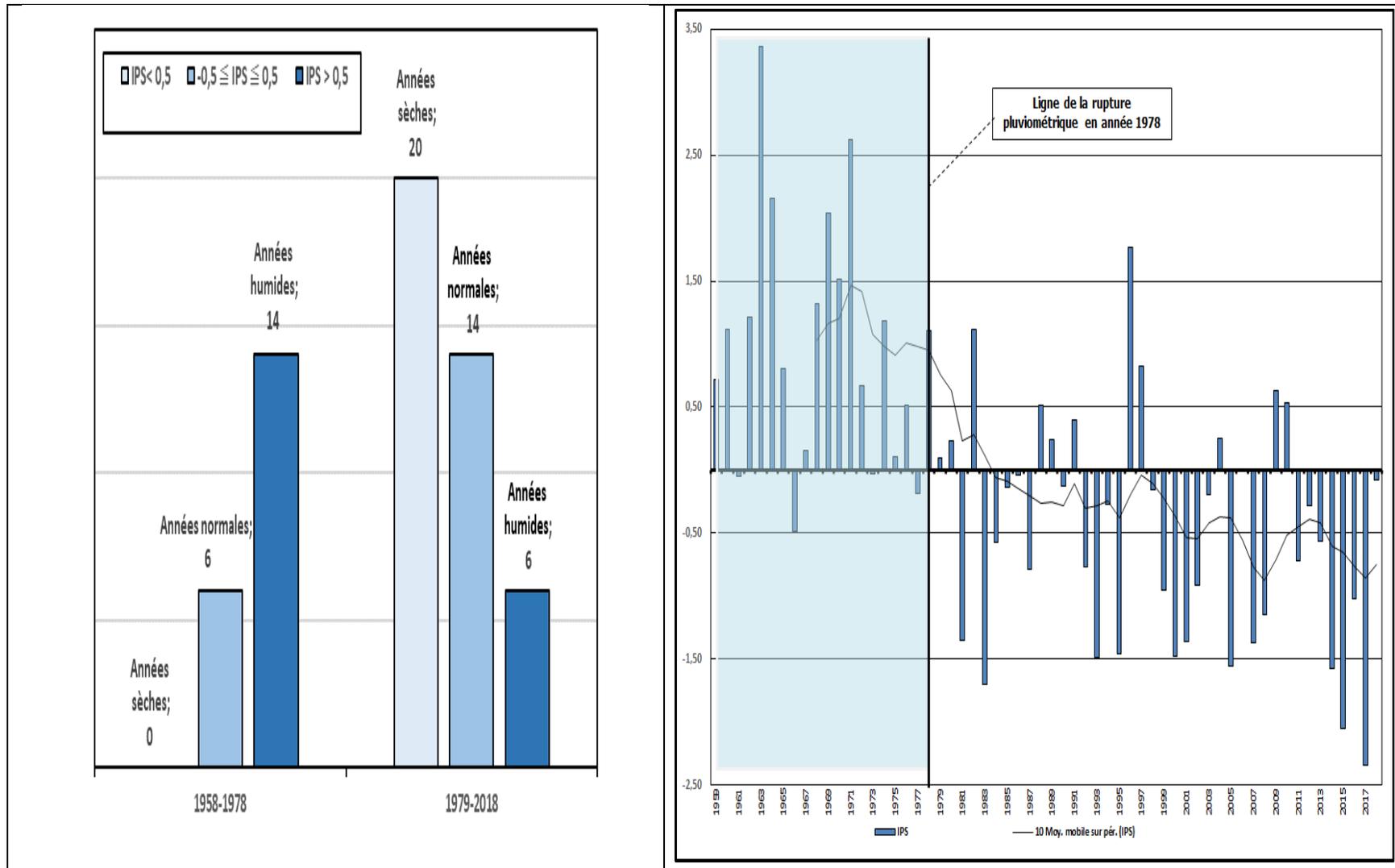


Figure 12 : Détection de la rupture chronologique pluviométrique avec la classification des cumuls des pluies annuelles (*graphique de la gauche*) avec des rapprochements avec l'Indice des Précipitations Standardisés (IPS) (*graphique de la droite*) au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1958-2018).

La synthèse des résultats précédents conduit à une classification plus précise des campagnes agricoles en fonction de la pluviométrie annuelle, à savoir comme suit (Tableau 49 et Figure 12):

Classe des campagnes sèches :

-*Avant-rupture* : Repérage de 0% à 15 % sur total des sites observés, matérialisé respectivement par 8 stations à l'Est de la zone d'étude (Béni Moussa Est) et par 10 autres stations en des dispositions entre le Nord et le Sud-Ouest de cette zone.

-*Après-rupture* : Remontée en flèche de la proportion de sites les plus vulnérables de 43% à 63 % du total des lieux, concernant stations respectives CDA 525 et CDA 530.

Classe des campagnes normales :

-*Avant-rupture* : Représentativité fluctuante entre 15% et 55 % sur le total des cas, correspondant aux 2 sites au Sud de zone (Ouest des Béni Moussa) et aux 3 cas au Nord de la zone (Centre-Ouest des Béni Amir).

-*Après-rupture* : Maintien du taux stationnaire qui varie entre 18% à 45 % sur le total des lieux observés et à savoir pour les stations respectives CDA 535 et CDA 532.

Classe des campagnes humides :

-*Avant-rupture* : Pourcentage en années humides entre minimum de 35 % des cas (centre Ouest des Béni Amir) et maximum de 75 % des cas (extrêmes Sud des Béni Moussa).

-*Après-rupture* : Fréquence en années très pluvieuses régresse fortement en des taux entre 10 % et 28 % aux stations respectives CDA 534-CDA529 et CDA 535.

En globalité, l'importance de spécification pluviométrique en années sèches, normales et humides est fortement modifiées de part et d'autre de la rupture chronologique, en allant des fréquences de départ correspondantes aux valeurs de : 0% (aucune campagne) ; 30 % et 70 % à de nouvelles fréquences respectives de : 50% ; 35 % et 15 % ; comme illustré au graphique de la gauche à la Figure 12.

Les répartitions spatio-temporelles des précipitations annuelles dans la zone d'étude pour les deux périodes identifiées d'avant et d'après rupture de la chronologie pluviométrique, sont cartographiées par la méthode SIG et sont présentées aux Figures 13 et 14.

En période de l'avant-rupture chronologique pluviométrique, il se profile quatre aires géographiques homogènes pour les cumuls des précipitations annuelles, ayant les étendues

suivantes, exprimées en mm par an : [368 ; 383[; [383 ; 396[; [396 ; 409[et [409 ; 439] (voir la carte de la Figure 13).

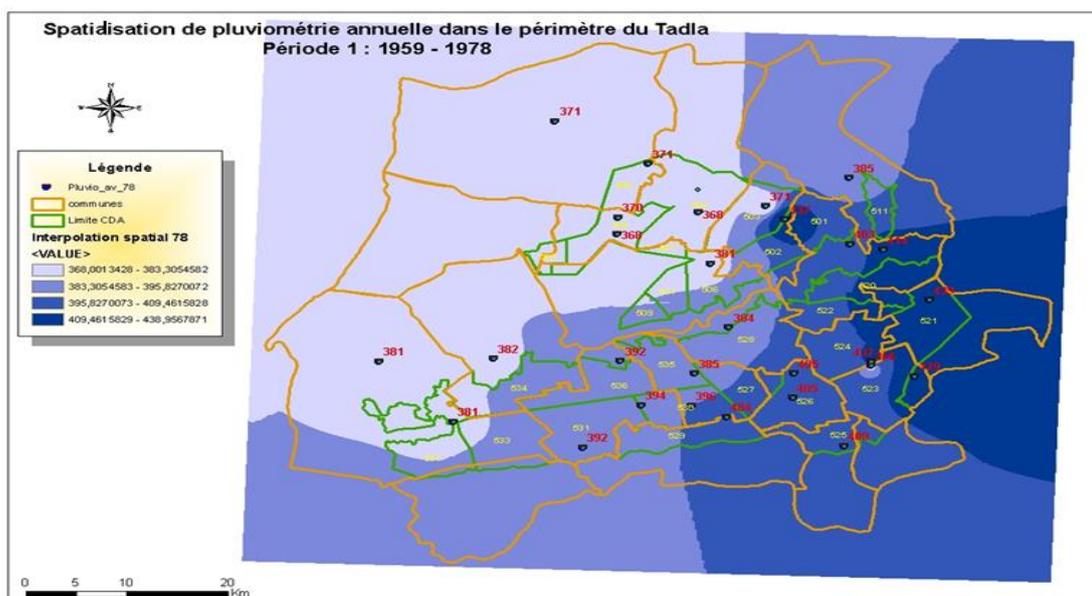


Figure 13 : Carte pluviométrique en avant la rupture de la chronologie des précipitations au périmètre du Tadla pour la période de 1958 à 1978

En après rupture chronologique sur séries des pluies en l'année « charnière » de 1978, il y a mise en évidence de « *front de la réduction des précipitations* » d'une importance de 120 à 150 mm/an. Le fait est cartographié à la Figure 14.

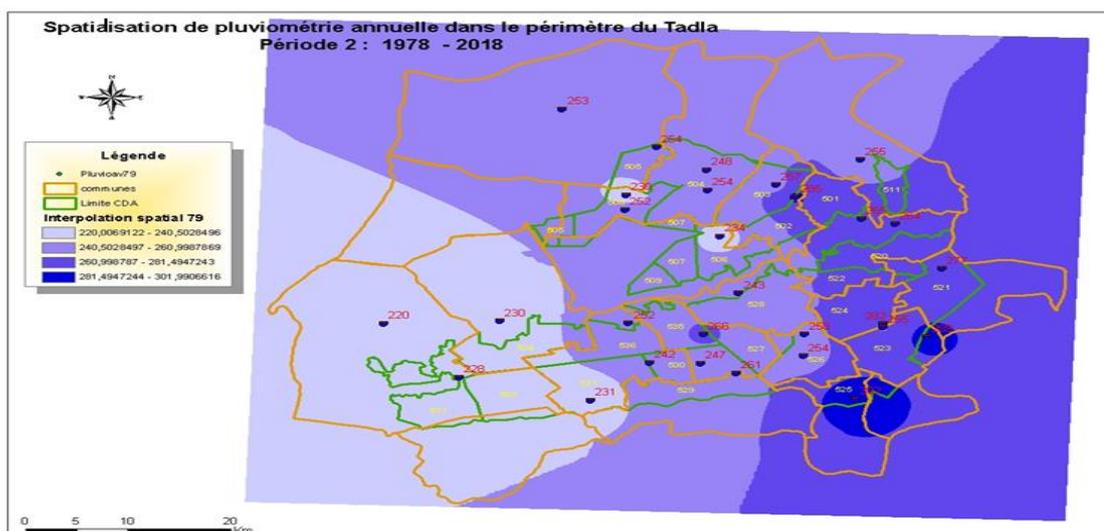


Figure 14 : Carte pluviométrique en après la rupture de la chronologie des précipitations au périmètre du Tadla pour la période de 1979 à 2018

Au fil du temps, le front du dessèchement pluvieux identifié, avait sévi en faisant déplacé les isohyètes dans la direction du Nord vers le Sud de du périmètre de Tadla. ceci avait lieu avec la même ampleur approximative sur la globalité de l'espace géographique observé (voir différences entre les Figures 13 et 14).

Chapitre II : ETUDE DES SAISONNALITES DES PRECIPITATIONS AU PERIMETRE DE TADLA

I-Tests statistiques préliminaires sur les données pluviométriques périodiques précédant les tests de tendance des distributions

Les tests statistiques de tendance entrepris sur les séries pluviométriques périodiques des précipitations ont un caractère non paramétrique. Pour des raisons de précision de nos analyses ultérieures, des tests préliminaires de validité des distributions des données ont été réalisés concernant les conditions de la normalité et de l'inexistence de la colinéarité. Les résultats récapitulatifs de ces tests avec interprétations sont donnés ci-après.

I-1-Tests de la normalité des distributions

La condition de la normalité des données pluviométriques périodiques est vérifiée par le test *Chapiro-Wilk*, test choisi parmi les plus usuels qui est conforme au traitement d'échantillons de taille réduite inférieure ou égale au nombre de 50, vu que la taille supérieure de notre échantillon est de N=60 ans d'observations. Ce dernier test est complété par un autre test de la normalité qui est appliqué aux échantillons de grande taille à savoir le test *Kolmogorov-Smirnov* (Rakotomalala, 2008). Les résultats détaillés par ces deux tests sont présentés en annexe.

a) Test Chapiro-Wilk de la normalité

Il est rapporté pour les précipitations périodiques à travers ce test les constats suivants :

- *Variables mensuelles* : 77 % de la satisfaction favorable de normalité.
- *Variables trimestrielles* : 50 à 100 % en des satisfaisants, dont 59 % au trimestre Septembre-Octobre-Novembre (SON), 48% au trimestre Décembre-Janvier-Février (DJF) et 100 % en commun pour les deux trimestres Mars-Avril-Mai (MAM) et Juin-Juillet-Août (JJA).
- *Variables semestrielles* : 48 % en confirmation de la normalité.
- *Variable annuelle* : 4 % en satisfaction en normalité.

Il est attesté favorable la normalité des distributions en précipitations périodiques ; en allant de sa généralisation sur sites des mesures depuis la variable mensuelle à la variable semestrielle, malgré l'insatisfaction pour la variable pluviométrique à cadence annuelle qui est considérée à titre de témoin dans ces analyses.

b) Tests Kolmogorov-Smirnov de la normalité

Les constats saillants de ce test sur les variables périodiques pluviométriques sont les suivants :

- Variables mensuelles* : 98 % de la satisfaction de normalité de distribution des données.
- Variables trimestrielles* : 45 % de cas conformes en normalité, dont 22 % au trimestre
SON ; 33% au DJF; 26 % au MAM et 100 % au JJA.
- Variables semestrielles* : 6 % en confirmation.
- Variable annuelle* : 4 % en satisfaction de la normalité.

Selon le test *Kolmogorov-Smirnov* et comme au précédent test *Chapiro-Wilk*, la condition de la normalité est vérifiée d'une manière effective pour les séries de base pluviométriques mensuelles au périmètre de Tadla pour la période d'observations de 1958 à 2018.

I-2-Tests de la colinéarité des distributions

Le test de la colinéarité s'avère donc favorable à 93 % des cas pour les stations de mesures dont les variables mensuelles des précipitations sont au taux de 52 à 100 %, les variables trimestrielles à 15 %, les variables semestrielles de 41 à 96 % et la variable annuelle est à 33 %.

En effet, tout risque de biaiser les tests corrélatifs afférents à la réalisation des méthodes multivariées est à propos de colinéarité des distributions mise en jeu (Rakotomalala, 2008).

Le détail des résultats du test de vérification de la colinéarité des séries périodiques des précipitations est consigné sur tableau porté en annexe.

II-Evaluation de tendance des précipitations périodiques

La tendance des précipitations périodiques au périmètre de Tadla a été appréhendé par le couplage du test de Mann-Kendall avec le test de Sens's. Les résultats et analyses afférents sont présentés ci-après.

II-1-Résultats des tests statistiques de tendance des variables périodiques pluviométriques

Les recueils de résultats d'approche tendancielle par le test Mann-Kendall et le tests Sens's sont présentés dans les Tableaux 50 et 51.

II-2-Tendances des précipitations mensuelles

L'inventaire des stations pluviométriques ayant présenté de tendance significative avec le pas mensuel des précipitations est rapporté au Tableau 52.

Tableau 52 : Classification des tendances des précipitations mensuelles au périmètre de Tadla pour la période de 1958 à 2018.

Sens de tendance	Précipitations mensuelles																							
	Sep.		Oct.		Nov.		Déc.		Jan.		Fév.		Mar.		Avr.		Mai		Jui.		Jul.		Aut	
	Négative (N)	Positive (P)	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
Nombre de stations à tendance		17			1		5		3		25		27		27		27		8					
% stations par sens de tendance	0%	63%	0%	0%	4%	0%	19%	0%	11%	0%	93%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	30%	0%	0%	0%	0%	0%
% stations ayant de tendance	63%		0%		4%		19%		11%		93%		100%		100%		100%		30%		0%		0%	
Nombre station à niveau « significatif » du test (p<0,05)		17			1		5		3		11								3					
Nombre station niveau « très significatif » du test (p<0,01)											14		27		27		27		5					
% niveau « significatif » du test (p<0,05)		100%			100%		100%		100%		44%								38%					
% niveau « très significatif » du test (p<0,01)											56%		100%		100%		100%		63%					

Il est retenu de la classification de tendance des précipitations mensuelles ce qui suit (Tableau 52):

- Neuf sur douze mois de l'année agricole (Septembre-Août) enregistrent de tendance significative, soit au taux de 75 % de la fréquence en variables mensuelles.
- L'unique mois de Septembre, qui a été repéré pour sa tendance positive significative, sachant que c'est le mois qui initie l'année agricole ; tel cas a été constaté pour la majorité des stations de mesures pluviométriques (17 unités ; 63 % de cas).
- Huit mois sont en tendance négative significative avec des fréquences de 4% à 100 % concernant les mois de : Novembre, Décembre, Janvier, Février, Mars, Mai et Juin. Ces mois repérés couvrent la moitié de la saison hivernale et la partie de début de la saison d'été.
- Les trois mois d'Octobre, Juillet et Août ne comportent aucune tendance significative, en signalant que les deux derniers mois forment la grande partie de la saison estivale.

-La signification du test de la tendance pluviométrique est au début de la campagne (entre les mois de Septembre à Janvier) se trouve au juste simple (p-value à 5%) et qui passe entre les mois de Février à Juin au niveau du très significatif (p-value à 1%).

Il est globalement abouti qu'en plus des variables mensuelles sans tendance significative, lesquelles ont été écartées initialement par le test Mann-Kendall, le test Sens's élimine encore la variable mensuelle des précipitations de Novembre sans signification dans la tendance. En fin de compte, sont huit variables mensuelles qui sont retenues pour leur tendance conforme, à savoir pour les mois suivants : Septembre, Décembre, Janvier, Février, Mars, Avril, Mai et Juin.

II-3-Tendance des précipitations périodiques pluri-mensuelles

Le recueil sur les tendances pluviométriques aux périodes trimestrielles, semestrielles et annuelles, rapporté au Tableau 53 présente différents niveaux de signification.

Tableau 53 : Recueil en tendance des précipitations trimestrielles, semestrielles et annuelles pour le périmètre de Tadla
(Période d'observations de 1958 à 2018).

Sens de tendance	Précipitations saisonnières								Précipitations semestrielles				Précipitations annuelles	
	SON		DJF		MAM		JJA		Semestre humide (Septembre-Février)		Semestre sec (Mars-Août)		Campagne annuelle (Septembre-Août)	
	Négative (N)	Positive (P)	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
Nombre de stations			27		27		2		13		27		27	
% stations par sens de tendance	0%	0%	100%	0%	100%	0%	7%	0%	48%	0%	100%	0%	100%	0%
% stations ayant tendance	0%		100%		100%		7%		48%		100%		100%	
Nombre station à niveau « significatif » du test (p<0,05)			5				2		7					
Nombre station niveau « très significatif » du test (p<0,01)			22		27				6		27		27	
% niveau « significatif » du test (p<0,05)			19%				100%		54%					
% niveau « très significatif » du test (p<0,01)			81%		100%				46%		100%		100%	

Abréviations : SON: Septembre-Octobre-Novembre; DJF: Décembre-Janvier-Février; MAM: Mars-Avril-Mai; JJA: Juin-Juillet-Août

Les analyses de tendance sur intervalles pluri-mensuelles sont relatées comme suit (Tableau 53) :

a) Précipitations trimestrielles

- Parmi quatre trimestres de l'année, il y a trois trimestres à tendance significative négative qui sont: Décembre-Janvier-Février (DJF), Mars-Avril-Mai (MAM) et Juin-Juillet-Aout (JJA) avec généralisation à toutes les stations des mesures pour les deux premiers trimestres (100%) quant au dernier trimestre estival, il est très faiblement représenté (7% des cas).

-Le tests de tendance à un niveau très significatif est en majorité des cas en présence des deux périodes hivernale (DJF) et printanière (MAM). Le juste niveau significatif est concerné par la période estivale (JJA). Pas de tendance significative n'est en période automnale (SON).

Il est gardé par le test Sens's les deux variables trimestrielles DJF et MAM, correspondant aux saisons d'hivers et du printemps). Par ailleurs, est écarté par non-conformité par test Sen's, la variable JJA (saison d'été). A signaler que la variable SON (saison automnale) a été éliminée au départ par le premier test Mann-Kendall pour raison de tendance pluviométrique non significative.

b) Précipitations semestrielles

-Les deux semestres humide et sec sont en tendance significative à la baisse pour leurs précipitations. Ceci a discerné la moitié des stations de mesures des pluies lors du premier semestre et pour totalité des stations au second semestre.

-Les niveaux de signification de tendance au semestre humide sont équitables aux taux de 54% et de 46%, respectivement en cas du juste significatif (probabilité d'erreur $p < 0,05$) et au cas du très significatif ($p < 0,01$). Concernant le semestre sec, la tendance ne dépasse guère le niveau du juste significatif ($p < 0,05$).

+Les deux variables semestrielles (humide et sec), de point de vue pluviométrique, ont été retenues satisfaisantes aux conditions affirmatives par le deuxième test tendanciel de Sens's.

c) Précipitations annuelles

Les cumuls pluviométriques annuelles, considérés en tant que témoins dans les analyses périodiques pluviométriques, sont assujettis à des tendances d'abaissements significatifs selon le test Mann-Kendall ; ce qui a été observé auprès de toutes les stations pluviométriques et d'une manière très significatives ($p < 0,01$). En relai par l'autre test tendanciel de Sens's, la variable annuelle se trouve aussi sélectionnée à posteriori, laquelle est d'ordre utile dans les comparaisons avec les variables pluviométriques périodiques en intra-annuel qui ont été déjà sélectionnées par ce test.

III-Relations chronologiques tendanciennes entre les variables périodiques des précipitations

Les interactions en cascade des tendances des précipitations périodiques sont approchées par l'arborescence chronologique, avec illustration à la Figure 15.

Précipitations périodiques de l'année			
Mois	Saison	Semestre	Année entière
Sep.	SON	Sh	Intervalle annuel
Octobre			
Nov.			
Déc.	DJF		
Jan.			
Fév.			
Mar.	MAM	Ss	
Avr.			
Mai			
Jui.	JJA		
Juillet			
Août			

Désignations des colorations: Sens et niveaux de signification des tendances des précipitations par période

- : Non significatif
- : Sens négatif et juste significatif
- : Sens négatif et très significatif
- : Sens positif et juste significatif

Figure 15 : Arborescence chronologique des tendances des précipitations périodiques mensuelles (Septembre à Août), trimestrielles (SON, DJF, MAM, JJA), semestrielles (humide et sec) et annuelle au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1958 à 2018).

Il ressort de cette arborescence chronologique (Figure 15) les points saillants suivants :

- La tendance mensuelle des précipitations au début de l'année agricole est au sens significatif positif (Septembre). Ce sens se repli par la suite à l'état stationnaire sans aucune variation significative et sur courte durée (mois d'Octobre). Par la suite, la tendance évolue en phase intermédiaire au sens inverse de la négativité sur longue de 9 mois (en chaque mois depuis Novembre à Juin). Enfin, en saison estivale, il n'y a présence d'aucune variation significative par mois (entre Juillet et d'Août).
- La tendance pluviométrique au trimestre est influencée en cascade par les tendances mensuelles, notamment pour le trimestre automnal « SON » avec ses trois mois déjà affectés par trois tendances différentes (positive, stationnaire et négative), dont la résultante est pour la tendance non significative. Quant aux trois autres trimestres (DJF, MAM, JJA), ils sont plus impactés en majorité de cas par des mois en tendance significative négative ; ainsi le niveau de variation de la tendance très significatif est concordant pour deux trimestre sur trois concernés.
- Les effets tendanciels des mois ou des saisons sont fédérés sur les deux périodes semestrielles (sec et humide) et sur la période annuelle. En l'occurrence, ces périodicités en multiple de semestre se trouvent en dernier lieu avec des niveaux de tendance à la baisse et à des niveaux très significatifs.

IV-Sens géodésique de tendance des précipitations périodiques

Les tendances des précipitations périodiques affectées aux coordonnées géodésiques des stations de mesure correspondantes au périmètre de Tadla, sont repérées d'une façon schématique à la Figure 16.

Tableau 54 : Affectations des tendances des précipitations périodiques significatives en fonction du sens géographique pour le périmètre de Tadla (Période d'observations de 1958 à 2018).

Périodes observées de précipitations	Latitude	Longitude	Altitude
	Sens : Sud-Nord	Sens : Ouest-Est	Sens : Bas-Haut
Période mensuelle			
Septembre	(+)	(+)	(+)
Novembre	(Ind.)	(-)	(-)
Décembre	(-)	(-)	(-)
Janvier	(-)	(-)	(-)
Juin	(-)	(+)	(+)
Période saisonnière			
Juin-Juillet-Août (JJA)	(-)	(+)	(+)
Période semestrielle			
Semestre humide (Septembre-Février=SemH)	(-)	(-)	(-)
Codification des signes et abréviations	(+) (-) (Ind.)	: Sens de progression : Sens de regression : Etat d'indifférence	

Il se profile selon l'analyse géographique des tendances des périodicités en question, les constats suivants (Tableau 54) :

-Sens Sud-Nord :

Un sens géographique qui est plus exprimé par la tendance significative positive du mois de Septembre et à l'inverse pour les trois mois de Décembre, Janvier et Juin, à tendance négative significative. Le même cas est pour le trimestre estival Juin-Juillet-Août (JJA) et le semestre humide (de Septembre à Février). Par contre, il y a une l'indifférente de point de vue géographique pour la variable mensuelle de Novembre.

-Sens Ouest-Est :

Dans ce sens, il y a une correspondance avec l'accroissement en tendance significative qui est positive en Septembre et négative en Juin et au trimestre d'été (JJA). Par contre, il est constaté peu en fréquence pour la tendance significative négative aux mois de Novembre, de Décembre et de Janvier ; même cas pour la variable-semestre humide (période : Septembre-Février).

-Aspect altitude :

En remontant le relief de la zone d'étude dans le sens du bas vers le haut, la fréquence va aussi en progression pour la tendance pluviométrique significative. Ceci concerne les variables-mois de Septembre et de Juin, la variable-trimestre estival (JJA) qui boucle l'année agricole. A l'inverse plus on gagne de la hauteur en l'altitude, plus la tendance à caractère significatif est en baisse, spécifiant les variables-mois de Novembre, de Décembre, de Janvier et la variable-semestre humide (entre Septembre et Février).

Des analyses plus implicites sur ces aspects d'ordre géographique seront abordées dans les analyses statistiques multi-variées ultérieures et précisément avec la méthode de l'ACP.

V-Analyses de tendance des saisonnalités des précipitations par la méthode de l'ACP

En afférent au test corrélatif primaires de Mann-Kendall sur les 19 variables périodiques de tendance des précipitations, il a été retenu selon le test Sen's pour 13 variables susceptibles à coefficients régressifs conformes (en bornes de l'intervalle de confiance de même signe) (Tableaux 50 et 51).

Les résultats des analyses de tendance par la méthode de l'ACP sur les 13 variables périodiques des précipitations précitées qui ont été triées auparavant, sont données ci-après.

V-1-Sélection restreinte par ACP des variables périodiques pertinentes en précipitations

L'ACP qui a démarré avec un effectif de 13 variables requises (sur total initial de 19), s'est restreinte en fin de compte à 7 variables ; en raison que ces dernières s'apprêtant à constituer les groupements homogènes exigés. Pour rappel, les itinéraires empruntés dans le processus des sélections successives des variables pour le traitement ultérieur par l'ACP sont reportés au Tableau 55.

Tableau 55 : Sélections successives des variables périodiques des précipitations au périmètre de Tadla suite aux traitements statistiques requis (Période d'observations de 1958 à 2018).

Variables périodiques de précipitations	Situation initiales avant traitements statistiques	Elimination des variables après traitements statistiques successifs		
		Test Mann-Kendall	Test de Sen's	Méthode ACP
Périodes mensuelles				
Septembre	(+)	(+)	(+)	(+)
Octobre	(+)	E	E	E
Novembre	(+)	(+)	E	E
Décembre	(+)	(+)	(+)	(+)
Janvier	(+)	(+)	(+)	E
Février	(+)	(+)	(+)	E
Mars	(+)	(+)	(+)	E
Avril	(+)	(+)	(+)	(+)
Mai	(+)	(+)	(+)	E
Juin	(+)	(+)	(+)	(+)
Juillet	(+)	E	E	E
Août	(+)	E	E	E
Périodes saisonnières				
Septembre-Octobre-Novembre (SON)	(+)	E	E	E
Décembre-Janvier-Février (DJF)	(+)	(+)	(+)	E
Mars-Avril-Mai (MAM)	(+)	(+)	(+)	(+)
Juin-Juillet-Août (JJA)	(+)	(+)	E	E
Périodes semestrielles				
Semestre humide (Septembre-SemS)	(+)	(+)	(+)	(+)
Semestre sec (Mars-Août=SemS)	(+)	(+)	(+)	(+)
Période annuelle				
Année agricole (Annuel)	(+)	(+)	(+)	E

Signe et abréviation: (+) : Variable retenue ; E : Variable éliminée

V-2-Tests préliminaires sur données de variables avant réalisation de l'ACP

Les résultats des tests préliminaires usuels précédant l'ACP, qui sont effectués sur les moyennes annuelles des distributions des variables périodiques pour les précipitations au périmètre du Tadla, à propos de la vérification des conditions de la normalité, de la colinéarité, de

l'indépendance des variables et de l'homogénéité de variances sont analysés ci-après, le détail des données est sur les tableaux de calculs portés aux annexes.

a) Test de la normalité avant ACP sur les variables pluviométriques périodiques

Il est retenu des tests de la normalité (« *test de Chapiro-Wilk* » et « *test de Kolmogorov-Smirnov* »), que cette condition est vérifiée à 75% des cas pour les variables mensuelles, elle est non satisfaite pour la seule variable trimestrielle Mars-Avril-Mai (MAM), mais elle est respectée à 50% pour les variables semestrielles.

b) Test de la colinéarité avant ACP sur les variables pluviométriques périodiques

Il est approuvé que les tests de la colinéarité s'avèrent favorables pour toutes les variables étudiées, sachant que le VIP (*Variance Inflation Factor*), n'a pas dépassé le seuil maximum de 10 (Rakotomalala, 2008).

c) Test de l'indépendances avant ACP entre les variables pluviométriques périodiques

Les tests de l'indépendance sont satisfaits sur 33 % des combinaisons en couples des variables en question.

d) Tests d'égalité des variables précédant l'analyse par ACP des variables pluviométriques périodiques

Les tests de Levene d'homogénéité des variances pour les variables périodiques des précipitations sur la base de la moyenne, sont validés au taux de 81%. La confirmation des tests sur la base de la médiane, n'est satisfaite que pour le taux de 57 %.

V-3-Résultats de l'ACP sur les tendances des variables périodiques des précipitations

a) Corrélations entre variables traitées

Les relations corrélatives entre les variables périodiques des précipitations en zone d'étude sont définies au tableau suivant.

Tableau 56 : Matrice des corrélations de variables périodiques de tendances de précipitations au périmètre de Tadla (Période de 1958 à 2018).

	Septembre	Décembre	Avril	Juin	MAM	SemH	SemS
Septembr	1,000						
Décembre	0,232	1,000					
Avril	0,063	0,599	1,000				
Juin	-0,246	-0,133	-0,209	1,000			
MAM	0,232	0,521**	0,821***	-0,049	1,000		
SemH	0,237	0,585***	0,634***	-0,267	0,510**	1,000	
SemS	0,439*	0,583***	0,660***	-0,116	0,754***	0,682***	1,000

Niveaux de signification (unilatérale) du coefficient de la corrélation : (*) : significatif ($p < 0,05$) ; (**): très significatif ($p < 0,01$) et (***) : très hautement significatif ($p < 0,001$).

Il est révélé à travers la matrice des corrélations entre les variables, que ces dernières sont effectivement corrélées entre-elles, ce compte-tenu qu'environ 50 % des cas est constaté satisfait

(Tableau 56). Les coefficients corrélatifs sont alors à des niveaux significatifs acceptables et justifiant ainsi l'ACP à engendrer (Yergeau et Poirier, 2013).

b) Test de la validité de l'ACP sur les variables traitées

L'ACP menée a été, en l'occurrence, vérifiée pour sa validité globale moyennant les tests appropriés (Hair *et al.*, 1998) et dont les résultats sont rapportés au tableau récapitulatif du bas.

Tableau 57 : Evaluation de l'ACP par l'indice KMO et test de Bartlett sur variables périodiques de tendance des précipitations au périmètre de Tadla (Période de 1958 à 2018).

Indice KMO et test de Bartlett		
Indice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) pour mesure qualité d'échantillonnage.		0,723
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-carré approx.	91,916
	d.d.l.	21
	Signification	7,525E-11

L'ACP est donc entérinée pour son adoption, sachant que l'indice KMO a pour valeur de 0,723 (Tableau 57), tout en se référant à la grille des interprétations (voir le guide de la méthode de l'ACP en annexe), en effet, la matrice des corrélations se qualifie entre le niveau « bien » (indice : 0,7) et le niveau « excellent » (indice : 0,8). Le test de sphéricité de Bartlett est avec sa signification presque nulle est donc s'est avéré acceptable ($p\text{-value} < 0,001$) (Hair *et al.*, 1998).

Par conséquent, les variables analysées sont effectivement indépendantes les unes par rapport aux autres. Ceci implique le rejet de l'hypothèse nulle de « la matrice des corrélations d'identité » (à des corrélations égales à zéro) (Yergeau et Poirier, 2013).

c) Valeurs propres et composantes d'ACP sur les variables retenues

Les valeurs propres de la matrice des coefficients de corrélation, les pourcentages des variances expliqués et la variance cumulée par axe de l'ACP, sont présentés au tableau ci-après.

Tableau 58 : Valeurs propres et composantes de l'ACP sur tendance des précipitations périodiques au périmètre du Tadla (Période d'observations : 1958-2018).

Composantes	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Valeurs propres	3,714	1,141	0,868	0,556	0,418	0,197	0,106
% de la variance	53,052	16,294	12,406	7,942	5,978	2,818	1,511
% de la variance cumulée	53,052	69,346	81,752	89,693	95,671	98,489	100,000

Les indicateurs de l'ACP montrent que les deux premiers axes des composantes F1 et F2, sont exprimés au pourcentage de 69,34 % en variance cumulée, dont le 1^{er} axe contribue avec 53,05 % et le 2^{ème} axe avec 16,29 %. En effet, ces deux aspects sont à retenir pour les analyses et les interprétations ultérieures, sachant que le cumul de la variance expliquée est proche de la norme

minimale exigée de 70 % (Hair et *al.*, 1998). Cette dernière préoccupation est aussi bien confirmée par le tracé d'effondrement, qui est illustré dans la Figure 17.

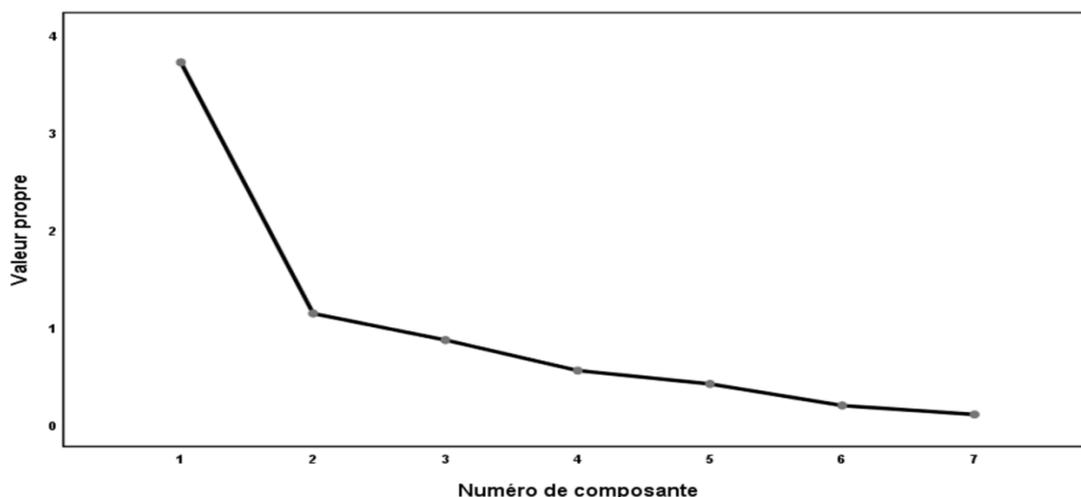


Figure 17 : Tracé d'effondrement de valeurs propres en axes de l'ACP sur les variables périodiques de tendances des précipitations au périmètre de Tadla (Période de 1958 à 2018).

Le « *coude de Cattell* » (Hair et *al.*, 1998) selon son allure sur graphique, coïncide effectivement en coordonnée à l'abscisse pour la composante F2 de l'ACP envisagée (Figure 17).

d) Eléments caractéristiques de l'ACP sur les variables traitées

Les valeurs des composantes de l'ACP sur les variables analysées, leurs qualités de représentations et les contributions respectives sont consignées au tableau ci-dessous.

Tableau 59 : Valeurs de composantes, qualités de représentation et contributions en ACP pour les variables périodiques des précipitations au périmètre de Tadla (Période de 1958 à 2018).

Variables de tendances périodiques de précipitations	Composantes		Qualités de représentation			Contributions (%)	
	F1	F2	Cos ² (1)	Cos ² (2)	Extraction	F1	F2
	(1)	(2)	(3)=(1) ²	(4)=(2) ²	(3) + (4)	(5)=[100*(1) ² / (Valeur propre F1=3,714)]	(6)=[100*(2) ² / (Valeur propre F2=1,141)]
Septembre	0,397	-0,678	0,157	0,460	0,617	4,238	40,279
Décembre	0,765	0,077	0,585	0,006	0,591	15,742	0,520
Avril	0,860	0,262	0,739	0,069	0,808	19,911	6,006
Juin	-0,273	0,730	0,074	0,533	0,608	2,002	46,757
MAM	0,845	0,265	0,714	0,070	0,784	19,223	6,168
SemH	0,810	-0,052	0,655	0,003	0,658	17,647	0,236
SemS	0,888	0,002	0,788	5E-06	0,788	21,227	5E-04

Les points prééminents des analyses des résultats aboutis sont les suivants (Tableau 59) :

i) Qualités des représentations :

*Les qualités totales d'extraction des variables (somme de \cos^2) varient dans la fourchette de 0,59 à 0,81 et indiquent alors que le maximum d'information est bien expliqué.

*Sur l'axe *F1*, la qualité d'extraction (\cos^2) des variables est importante pour le groupe de 5 variables : Décembre, Avril, MAM, SemH et SemS, ayant des valeurs comprises entre 0,59 et 0,79, mais cette qualité demeure très faible pour les deux variables de Septembre et Juin, à valeurs inférieures à 0,20.

*Sur l'axe *F2*, la qualité d'extraction (\cos^2) est élevée pour les deux variables de Septembre et de Juin, qui est de l'ordre de la valeur de 0,50. Comparées à l'autre groupe en 5 variables restantes (Décembre, Avril, MAM, SemH et SemS) qui présentent de faible niveau en cette valeur de moins de 0,07.

ii) Contributions des variables traitées :

*En axe *F1*, les fortes contributions à l'extraction d'information qui concernent les 5 variables : Décembre, Avril, MAM, SemH et SemS, sont dans la gamme du taux de 16 à 21 % par variable ; contre la faible contribution unitaire de moins 4 % pour les deux variables de Septembre et Juin.

*En axe *F2*, la contribution des deux variables de Septembre et de Juin, est d'une forte qualité d'extraction avec le pourcentage de 40 à 47 %, comparées à l'autre groupe de 5 variables (Décembre, Avril, MAM, SemH et SemS) ayant une qualité d'extraction plus réduite et qui ne dépasse pas le taux unitaire de 6%.

e. Représentations graphiques sur axes factoriels de l'ACP

Le graphique du « *cercle des corrélations* » qui caractérise notre ACP pour les variables périodiques des tendances des précipitations périodiques pour le périmètre de Tadla (zone d'étude) est montré à la Figure 18.

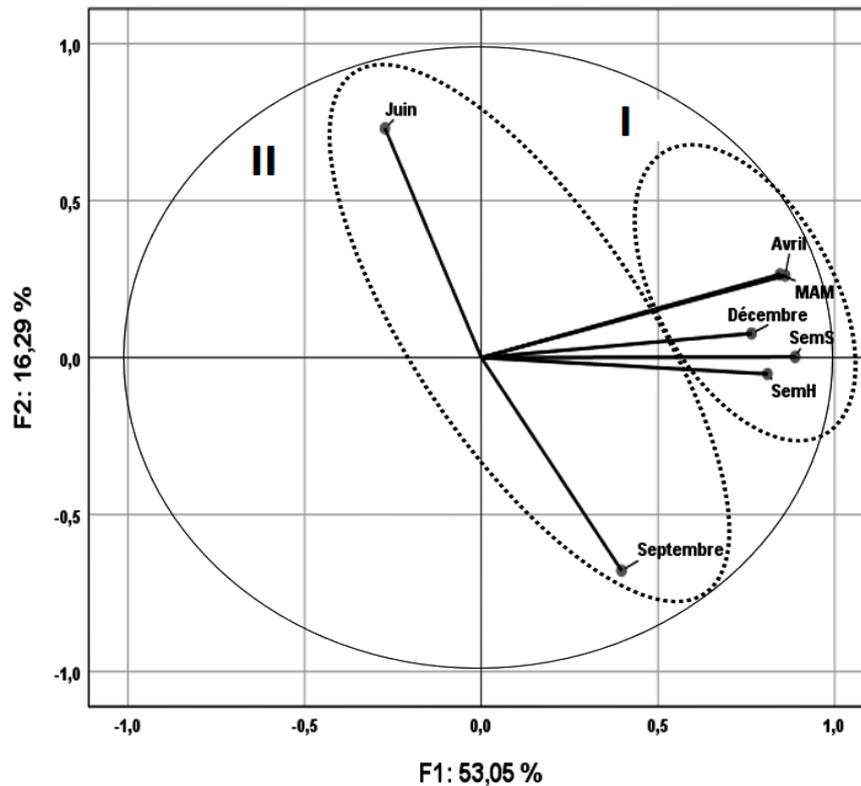


Figure 18 : Cercle des corrélations de l'ACP pour les variables périodiques de tendances de précipitations au périmètre de Tadla (Période de 1958 à 2018)

L'exploration graphique de l'ACP sur les axes F1-F2 des tendances périodiques pluviométriques, nous renseigne largement par les éléments suivants (Figure 18) :

- L'importance des représentations des variables est matérialisée par la proximité à la circonférence du « *cercle de corrélations* » pour les 3 variables mensuelles (Septembre, Avril et Juin), pour la seule variable trimestrielle Mars-Avril-Mai (MAM) et pour les deux variables du semestre sec (SemS) et du semestre humide (SemH).

- L'ampleur des représentations est relativement réduite pour la seule variable restante à savoir pour la période mensuelle de Décembre.

- Les délimitations distinctes sont plus marquantes sur le graphique pour deux groupes homogènes de variables, dont le premier groupe (I) concerne les 5 variables : Décembre, Avril, MAM, SemH et SemS ; le second groupe (II) est consacré aux 2 variables se rapportant aux tendances des précipitations mensuelles de Septembre et de Juin.

V-4-Spatialisation des résultats de l'ACP pour les tendances des précipitations périodiques

Le graphique du « *tracé double* » de l'ACP menée sur les variables des tendances des précipitations périodiques pour le périmètre de Tadla, a été conçu en considérant lesdites variables comme les « *variables de l'ACP* » et les stations des mesures pluviométriques de la zone d'étude en tant que les « *individus de l'ACP* ». L'illustration de ce « *tracé double* » est portée à la Figure 19.

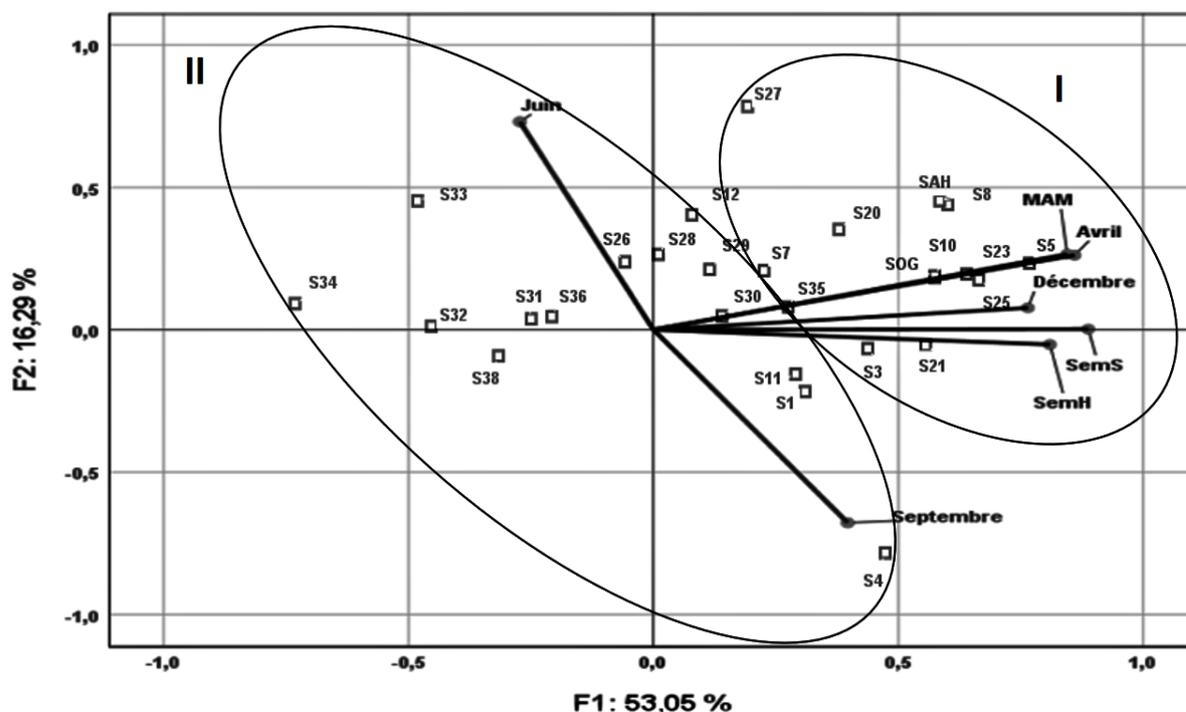


Figure 19 : Tracé-double de l'ACP sur les tendances des variables des précipitations périodiques au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1958 à 2018).

A l'issue de la configuration spatiale sous le support du « *tracé double* » de l'ACP (Figure 19), les groupements des variables des tendances des précipitations périodiques sont alors affectés aux sites géographiques des stations de mesures pluviométriques de la zone étudiée. Les faits sont récapitulés aux Tableaux 60 et 61.

Tableau 60 : 1^{er} groupement géographique des sites des stations pluviométriques en fonction des tendances des précipitations périodiques, selon l'ACP au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1958 à 2018)

Groupement 1 (ACP)

*Repéré par les 13 sites pluviomètres :

-Stations de la zone des Béni Amir : S3 ; S5 ; S7 ; S8 ; S10 ; SAH

-Stations de la zone des Béni Moussa : S20 ; S21 ; S23 ; S25 ; S27 ; S35 ; SOG

*Variables périodiques des précipitations :

+2 mensuelles : Décembre et d'Avril

+1 trimestrielle : Mars-Avril-Mai, et

+ 2 semestrielles : sèche et humide

En l'occurrence, la régionalisation des tendances périodiques des précipitations est marquée par deux groupements spatiaux homogènes à savoir: le groupement G I , qui est géo-référencé par 13

sites de stations pluviomètres et caractéristiques des 5 variables (mois de Décembre et d'Avril, trimestre printanier (Mars-Avril-Mai) et les 2 semestres) (Tableau 60). Par ailleurs, l'autre groupement G II qui est jalonné par 14 sites de mesures pluviométriques, se rapporte aux deux variables mensuelles de Septembre et de Juin (Tableau 61).

Tableau 61 : 2^{ème} groupement géographique des sites des stations pluviométriques en fonction des variables des tendances des précipitations périodiques, selon l'ACP au périmètre du Tadla

(Période d'observations de 1958 à 2018)

Groupement 2 (ACP)

*Repéré par 14 sites pluviomètres :

-Stations de la zone des Béni Amir : : S1 ; S4 ; S11 ; S12

-Stations de la zone des Béni Moussa : S26 ; S28 ; S29 ; S30 ; S31 ; S32 ; S33 ; S34 ; S36 ; S38

*Variables périodiques des précipitations :

+2 mensuelles : Septembre et Juin

La disposition géographique de ces groupements spatiaux d'ordre homogène pour les tendances périodiques des pluies est montrée sur la carte de la Figure 20.

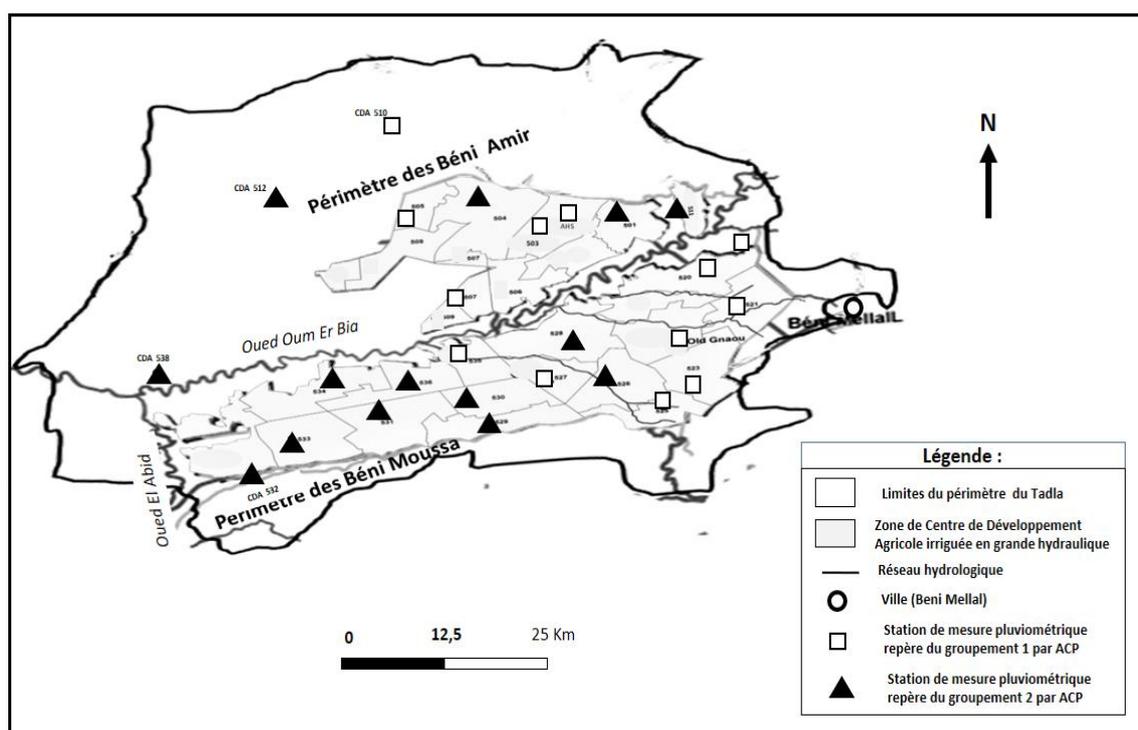


Figure 20 : Régionalisation de tendances périodiques de précipitations au périmètre du Tadla

(Période d'observations de 1958 à 2018).

Il est constaté visiblement sur l'espace physique du périmètre de Tadla que les tendances des pluies périodiques au sein d'une même année agricole, se cantonnent en de deux groupements identifiés avec leur délimitation géographique correspondant et à savoir les suivants (Figure 20) :

- 1^{er} groupement géographique :

- +Se rapporte à cinq variables de tendances des pluviométriques périodiques: Décembre ; Avril ; trimestre Mars-Avril-Mai ; semestres sec et humide) :
- +Représente spatialement la partie Est du périmètre de Tadla, y compris une portion de la zone du piémont (Dir) au limitrophe de la chaîne montagneuse du Moyen Atlas marocain.

- 2^{ème} groupement géographique Gg2 :

- +Concerne deux variables de tendances des pluviométriques périodiques : Septembre et Juin) :
- +Est spécifique à la partie Ouest du périmètre de Tadla, aux voisinages à l'Est de la plaine du Haouz et au Sud de la plaine du Chaouia.

Chapitre III : VARIABILITES THERMIQUE ET DE LA DEMANDE CLIMATIQUE EN EVAPORATION AU PERIMETRE DE TADLA

I-Descriptifs thermique et de la demande climatique en évaporation au périmètre de Tadla

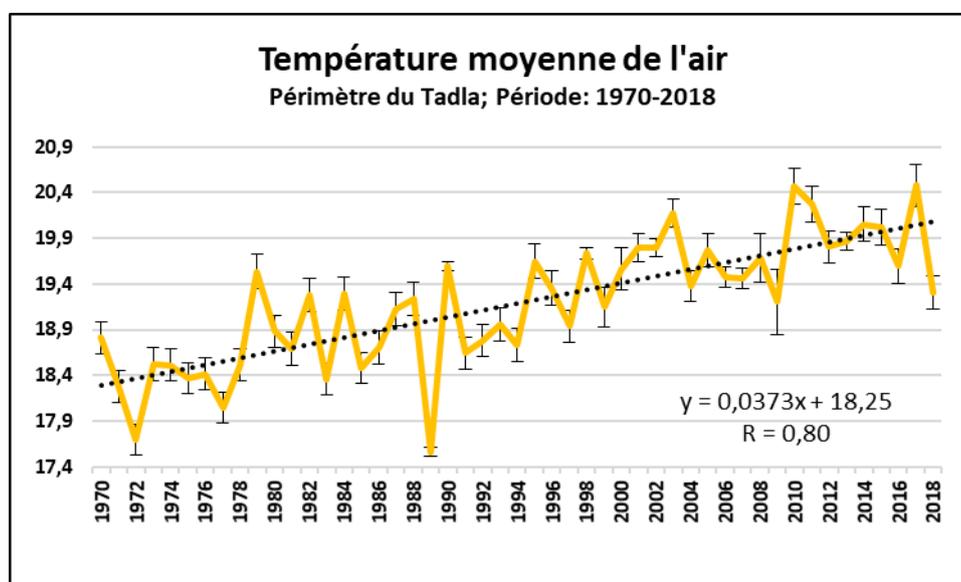
I-1- Caractéristique de la température au périmètre du Tadla

La température annuelle moyenne au périmètre de Tadla est aux alentours de 19°C (Tableau 39C). La zone se caractérise par la température moyenne des trois mois les plus froids de l'année de 4,7°C contre 35,5°C pour les trois mois les plus chauds, soit un écart thermique de l'ordre de 30 °C (Tableau 62).

Tableau 62 : Températures moyennes annuelles des mois les plus froids et des mois les plus chauds de l'année par stations au périmètre de Tadla
(Période d'observations de 1970 à 2018)

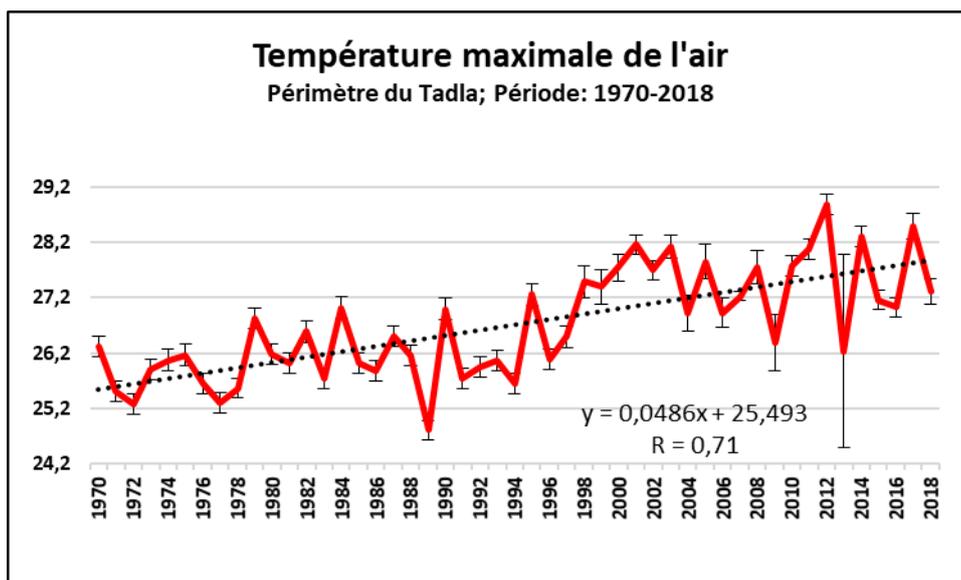
Stations des mesures	Trois mois les plus froids de l'année				Trois mois les plus chauds de l'année				Moyenne annuelle
	Décembre	Janvier	Février	Moyenne	Juin	Juillet	Août	Moyenne	
AS	5,2	4,1	5,5	4,9	31,9	36,4	36	34,8	18,9
FBS	5,1	4	5,7	4,9	32,9	37,9	37,2	36,0	19,7
OG	4,6	3,4	5	4,3	32,4	37,2	36,7	35,4	18,9
MBA	4,9	3,6	5,2	4,6	32,6	37,4	36,9	35,6	19,2
Moyenne	5,0	3,8	5,3	4,7	32,4	37,2	36,7	35,5	19,2
CV (%)	5%	7%	5%	5%	1%	1%	1%	1%	2%

Il est observé que l'évolution de tendance de la température annuelle est dans le sens de la hausse sur la période de cinq dernières décennies (entre 1970 et 2018), comme illustré au graphique de la Figure 21.



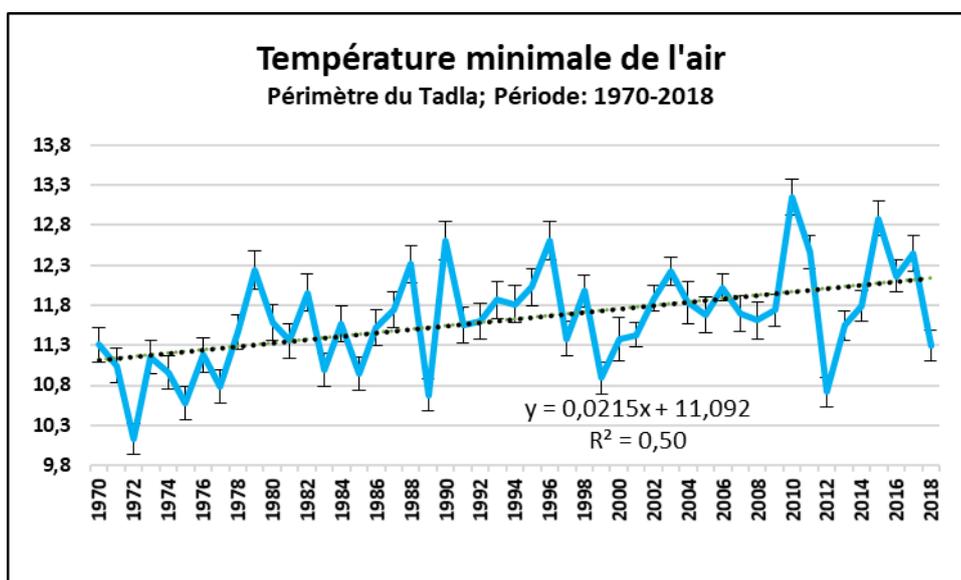
Figures 21 : Evolution de température moyenne annuelle au périmètre de Tadla (Région Béni Mellal-Khénifera, Maroc)
(Période d'observations de 1970 à 2018)

Ceci trouve explication dans la tendance à l'augmentation de la moyenne annuelle des maximas de température en l'air ambiant du périmètre de Tadla, représenté sur graphique de la Figure 22.



Figures 22: Evolution de température maximale moyenne annuelle au périmètre de Tadla (Région Béni Mellal-Khénifera, Maroc)
(Période d'observations de 1970 à 2018)

De même pour, la moyenne annuelle des minimas de température qui a évolué dans la tendance à l'élévation sur le périmètre de Tadla, représenté graphiquement en Figure 23.



Figures 23: Evolution de température minimale moyenne annuelle au périmètre de Tadla (Région Béni Mellal-Khénifera, Maroc)
(Période d'observations de 1970 à 2018)

A l'examen des températures extrêmes journalière enregistrées au périmètre de Tadla, il est retenu en principe que le niveau minimum absolu de l'année est atteint à la moyenne de -1,3 +C sur un intervalle périodique restreint le plus souvent entre le 30 Décembre et le 25 Janvier.

Quant à la valeur maximale absolue de température de l'année, elle passe à la limite supérieure moyenne de 45,4 °C sur l'intervalle saisonnier plus fréquent entre le 10 Juillet et le 12 Août en chaque année (Tableau 63).

Tableau 63 : Températures extrêmes moyennes de l'année par stations au périmètre de Tadla
(Période d'observations de 2014 à 2018)

Stations des mesures	Température maximale absolue		Température minimale absolue	
	Valeur (°C)	Intervalle de fréquence d'enregistrement	Valeur (°C)	Intervalle de fréquence d'enregistrement
AS	45,2	17 Juillet au 03 Août	-0,6	30 Décembre au 25 Février
FBS	45,7	10 Juillet au 05 Août	-0,8	01 Janvier au 11 Février
OG	45,3	15 Juillet au 07 Août	-2,2	30 Décembre au 06 Février
MBA	45,4	23 Juin au 12 Août	-1,5	02 Janvier au 06 Février
Moyenne	45,4	10 Juillet au 12 Août	-1,3	30 Décembre au 25 Février
CV (%)	0,4%	-	-49,4%	-

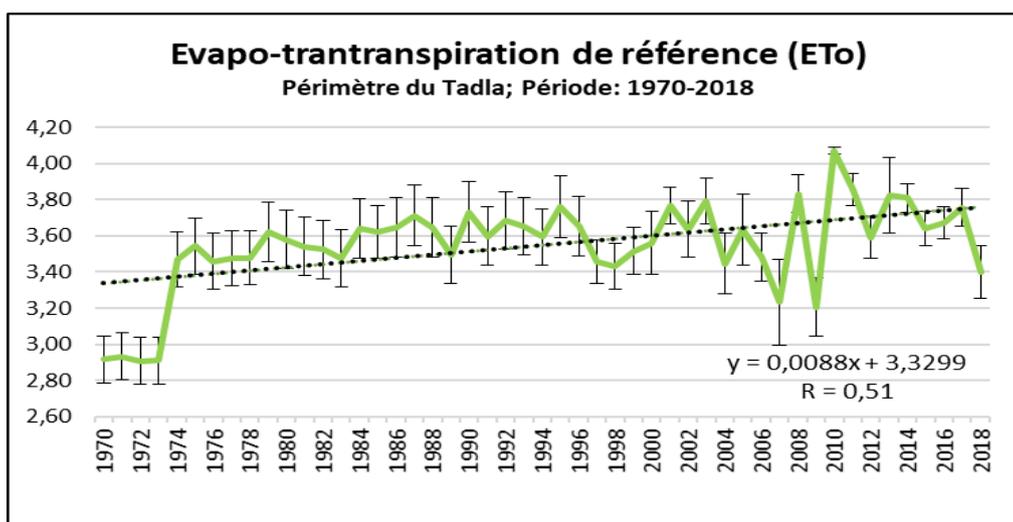
I-2- Caractéristique de de l'évapo-transpiration de référence (ETo) au périmètre de Tadla

L'ETo du périmètre de Tadla est d'une moyenne annuelle de 3,6 mm/jour, soit l'équivalent de 1 314 mm par an ou rapporté à la surface est pour valeur de 13 140 m³ à l'hectare (Tableau 64).

Tableau 64 : Evapotranspiration de référence (ETo) annuelle par stations du périmètre de Tadla
(Période d'observations de 1970 à 2018)

Stations des mesures	Moyenne annuelle de l'ETo (en mm/jour)
AS	3,1
FBS	3,6
OG	3,5
MBA	3,9
Moyenne	3,6
CV (%)	7%

Egalement, la tendance de la demande climatique en évaporation exercée sur le végétal et qui est simulée par l'évapotranspiration de référence, a été mesurée au périmètre de Tadla depuis le début des années 1970 et illustré à la Figure 24.



Figures 24 : Evolution de l'évapo-transpiration de référence moyenne annuelle au périmètre du Tadla (Région Béni Mellal-Khénifera, Maroc)
(Période d'observations de 1970 à 2018)

L'évapotranspiration de référence au périmètre de Tadla évolue dans un sens de l'accroissement tendanciel, comme visualisé graphiquement sur la Figure 24.

II-Résultats des tests de tendance thermique et de la demande climatique en évaporation

II-1-Tests préliminaires de vérification de la normalité des distributions des séries de mesures

Les résultats des tests préliminaires statistiques sur les séries de mesures d'indicateurs agro-climatiques montrent que les distributions suivent la loi normale pour la majorité des situations (Taux de validation : 70%). Le détail des données de ces tests est rapporté dans le Tableau 65

Tableau 65 : Résultats des tests de la normalité précédant les tests d'homogénéité sur les séries agro-climatiques au périmètre du Tadla.
(Période d'observations de 1970 à 2018)

Indicateur ou indice climatique	Station météorologique	Distribution
Température minimale	OG	Normale
	AS	Normale
	MBA	Normale
	FBS	Normale
Température maximale	OG	Non normale
	AS	Non normale
	MBA	Normale
	FBS	Normale
Température moyenne	OG	Normale
	AS	Normale
	MBA	Normale
	FBS	Normale
Evapo-transpiration	OG	Non normale
	AS	Non normale
	MBA	Non normale
	FBS	Non normale
Indice de De Maritonne	OG	Normale
	AS	Normale
	MBA	Normale
	FBS	Normale

II-2-Tests de tendance de variabilité et d'homogénéité thermique et de la demande climatique en évaporation

Il est présenté ci-après les résultats de tendance de la variabilité thermique et de la demande climatique en évaporation selon la méthode Mann-Kendall et aussi concernant les tests en quatre méthodes menées séparément au sujet de l'homogénéité des données ; ce en quête d'identifier d'éventuelle rupture sur les séries chronologiques périodiques étudiées.

II-2-1- Test de Mann-Kendall sur les températures et sur l'évapo-transpiration

Les résultats de ce test sont consignés dans le Tableau 66.

Tableau 66 : Résultats des tests statistiques de tendance par la méthode de Mann-Kendall sur les indicateurs agro-climatiques au périmètre du Tadla

(Période observations de 1970 à 2018).

Indicateur ou indice climatique	Station Météorologique	Paramètres du test de Mann-Kendall		
		$U_{\text{Mann-Kendall}}$	Hypothèse H_0 : Absence de tendance	Niveau de signification du test
Température minimale	OG	4,9133	Non	Hautement significatif
	AS	2,4998	Non	Très hautement significatif
	BAM	4,7064	Non	Très hautement significatif
	FBS	3,1031	Non	Très hautement significatif
Température maximale	OG	5,1719	Non	Très hautement significatif
	AS	5,5684	Non	Très hautement significatif
	BAM	5,4822	Non	Très hautement significatif
	FBS	5,6374	Non	Très hautement significatif
Température moyenne	OG	6,1890	Non	Très hautement significatif
	AS	5,890	Non	Très hautement significatif
	BAM	6,4994	Non	Très hautement significatif
	FBS	6,7752	Non	Très hautement significatif
Evapo-Transpiration	OG	3,6548	Non	Très hautement significatif
	AS	6,1546	Non	Très hautement significatif
	BAM	3,9824	Non	Très hautement significatif
	FBS	5,3443	Non	Très hautement significatif
Indice de De Maritonne	OG	3,9996	Non	Très hautement significatif
	AS	3,1376	Non	Très hautement significatif
	BAM	4,2065	Non	Très hautement significatif
	FBS	2,4480	Non	Très hautement significatif

La totalité des tests par la méthode Mann-Kendall, met en évidence l'existence en la quasi majorité des cas de variabilités à des niveaux très hautement significatifs pour les tendances des paramètres traités. Ceci approuve que des modifications effectives sont survenues au cours du temps sur l'évolution sur de différentes séries climatiques en question.

Faits qui ouvrent une large voie pour mener en relais d'autres tests encore plus poussés et notamment sur homogénéité temporelle de ces séries périodiques agro-climatiques.

II-2-2- Tests d'homogénéité sur la température et sur l'évapo-transpiration

Les résultats des quatre tests réalisés sur l'homogénéité des tendances des paramètres agro-climatiques, qui ont concernés le test de Pettitt, le test de Buishand, le test de Lee et Heghinian et la méthode de segmentation de Hubert sont reportés et analysés ci-après.

a) Test de rupture de Pettitt

Les données aboutis par ce test sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau 67 : Tests de détection de rupture de Pettitt sur les chronologies agro-climatiques au périmètre du Tadla
(Période d'observations de 1970 à 2018)

Indicateur ou indice climatique	Station Météorologique	U _{Pettitt}	Hypothèse Ho: Absence de tendance	Paramètres du test de Pettitt		Dates de rupture
				Probabilité de dépassement	Niveau de signification du test	
Température minimale	OG	-426	Non	2,30E-04	Très hautement significatif	1989
	AS	-	Oui	-	Non significatif	-
	BAM	-402	Non	6,21E-04	Très hautement significatif	1989
	FBS	-255	Non	7,76E-10	Significatif	1985
Température maximale	OG	-	Oui	-	Non significatif	-
	AS	-570	Non	8,39E-08	Très hautement significatif	1996
	BAM	-499	Non	7,88E-06	Très hautement significatif	1997
	FBS	-564	Non	2,49E-07	Très hautement significatif	1997
Température moyenne	OG	-378	Non	1,36E-06	Très hautement significatif	1994
	AS	-506	Non	5,54E-06	Très hautement significatif	1994
	BAM	-531	Non	1,52E-06	Très hautement significatif	1994
	FBS	-571	Non	1,68E-07	Très hautement significatif	1994
Evapo-transpiration (ETo)	OG	-281	Non	3,86E-02	Très hautement significatif	1983
	AS	-345	Non	5,22E-03	Très hautement significatif	2000
	BAM	-	Oui	-	Non significatif	-
	FBS	-324	Non	1,05E-02	Hautement significatif	1983
Indice de De Maritonne	OG	343	Non	5,50E-03	Très hautement significatif	1991
	AS	286	Non	3,35E-02	Hautement significatif	1998
	BAM	364	Non	2,66E-03	Très hautement significatif	1991
	FBS	--	Oui	-	Non significatif	-

Il est identifié par ce test des ruptures sur les séries chronologiques à propos de tous les paramètres étudiés. En effet, il a été repéré pour les températures minimales, maximales et moyennes, pour l'ETo et pour l'Indice d'aridité de De Maritonne des ruptures chronologiques circonscrites aux intervalles respectifs suivants : 1985-1989; 1996-1997 ; {1994} ; 1983-2000 ; 1991-1998 (Tableau 67).

Il est à noter aussi que ce test s'est accompli avec la prédominance du niveau « très hautement significatif » pour les cas envisagés.

b) Test de rupture de Buishand

Les résultats de ce test sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 68 : Tests de la détection de rupture de Buishand sur les séries temporelles agro-climatiques au périmètre du Tadla

(Période d'observations de 1970 à 2018)

Indicateur ou indice Climatique	Station Météorologique	Paramètres du test de de Buishand			
		U_{Max}	Hypothèse Ho: Absence de tendance	Niveau signification en « ellipse du Bois »	Dates de rupture
Température minimale	OG	-9,6735	Non	Très hautement significatif	1988
	AS	-4,5184	Non	Significatif	1977
	BAM	-9,2776	Non	Très hautement significatif	1989
	FBS	-5,700	Non	Très hautement significatif	1985
Température maximale	OG	-	Oui	Non significatif	-
	AS	-	Oui	Non significatif	-
	BAM	-16,7184	Non	Très hautement significatif	1999
	FBS	-0,1072	Non	Très hautement significatif	1997
Température moyenne	OG	-13,1122	Non	Très hautement significatif	1994
	AS	-11,8612	Non	Très hautement significatif	1994
	BAM	-13,9367	Non	Très hautement significatif	1994
	FBS	-15,8837	Non	Très hautement significatif	1994
Evapo-transpiration	OG	-	Oui	Non significatif	-
	AS	-	Oui	Non significatif	-
	BAM	-	Oui	Non significatif	-
	FBS	-	Oui	Non significatif	-
Indice de De Maritonne	OG	38,9163	Non	Très hautement significatif	1991
	AS	29,6265	Non	Très hautement significatif	1979
	BAM	41,8347	Non	Très hautement significatif	1979
	FBS	29,3571	Non	Très hautement significatif	1979

En l'occurrence, le test de Buishand repère aussi des ruptures sur les séries temporelles pour tous les paramètres mise en épreuve, à savoir pour les températures minimales, maximales et moyennes et pour l'Indice de De Maritonne, sur les intervalles propices respectifs : 1977-1989; 1997-1999 ; { 1994 } ; { 1994 } ; 1979-1991.

Il est à signaler qu'en présence de ruptures en question, le niveau du test se qualifie de très hautement significatif ; avec l'exception pour le paramètre de l'ETo, dont le test n'a décelé aucune rupture sur sa série pluri-annuelle de données (Tableau 68).

c) Test de rupture de Lee et Heghinian

Les résultats essentiels du test sont assemblés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 69 : Tests de détection de rupture de Lee et Heghinian sur séries chronologiques agro-climatiques au périmètre du Tadla

(Période d'observations de 1970 à 2018)

Indicateur ou indice climatique	Station météorologique	Paramètres et résultats du test de de Buishand	
		Probabilité associée	Dates de rupture
Température minimale	OG	0,2358	1989
	AS	0,2546	1977
	BAM	0,1692	1989
	FBS	0,7046	1997
Température maximale	OG	-	-
	AS	-	-
	BAM	0,4617	1999
	FBS	0,7046	1997
Température moyenne	OG	0,3832	1997
	AS	0,3648	1994
	BAM	0,3421	1994
	FBS	0,4704	1994
Evapo-Transpiration (ETo)	OG	-	-
	AS	-	-
	BAM	-	-
	FBS	-	-
Indice de De Maritonne	OG	0,1540	1978
	AS	0,1220	1979
	BAM	0,2831	1979
	FBS	0,1442	1979

Il a été constaté également par ce test des clivages dans la chronologie des séries périodiques pour les indicateurs de températures minimales, maximales et moyennes, respectivement aux gammes annuelles suivantes: 1977-1997 ; 1997-1999 ; 1994-1997 ; 1978-1979. Concernant l'ETo, le test n'a révélé par contre aucune telle rupture (Tableau 69).

d) Segmentation de Hubert

Les principaux résultats des calculs par méthode sont consignés dans le tableau suivant.

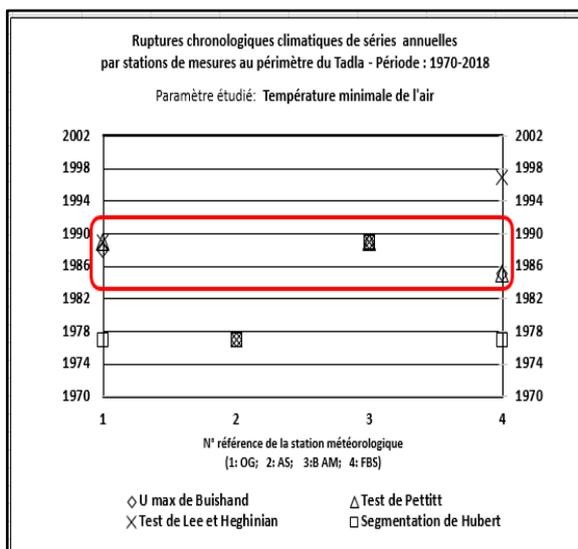
Tableau 70 : Segmentation de Hubert appliquée sur les séries temporelles agro-climatiques au périmètre du Tadla
(Période d'observations de 1970 à 2018)

Indicateur ou indice Climatique	Station météorologique	Dates de rupture	Nombre rupture (NP)	Paramètres et résultats de la segmentation de Hubert				
				Avant rupture		Après rupture		Ecart entre après et avant rupture [(2)- (1)]
				Valeur moyenne (1)	Ecart-type	Valeur moyenne (2)	Ecart-type	
Température minimale (en mm)	OG	1977	2	10,38	0,39	11,17	0,52	0,79
		2000		11,17	0,52	11,81	0,64	0,64
	AS	1977	1	10,93	0,37	11,60	0,58	0,67
	BAM	1989	1	11,13	0,55	11,91	0,57	0,78
Température maximale (en mm)	OG	1993	2	25,95	0,54	26,84	0,81	0,89
		2009		26,84	0,81	27,76	0,69	0,92
	AS	1996	1	25,11	0,55	27,48	0,63	1,97
	BAM	1999	1	26,17	0,56	27,61	0,74	1,44
Température moyenne (en mm)	OG	1978	2	18,06	0,31	18,66	0,48	0,60
		1997		18,66	0,48	19,54	0,44	0,88
	AS	1978	2	18,12	0,32	18,69	0,50	0,57
	1997	18,69		0,50	19,48	0,41	0,79	
BAM	1978	2	18,19	0,30	18,84	0,49	0,65	
	2000		18,84	0,49	19,81	0,49	0,97	
FBS	1978	2	18,59	0,34	19,21	0,50	0,62	
	1997		19,21	0,50	20,31	0,41	1,10	
Evapo-Transpiration (en mm/jour)	OG	1973	1	2,93	0,05	3,62	0,14	0,69
		-		-	-	-	-	
	AS	-	-	-	-	-	-	
	BAM	-	-	-	-	-	-	
FBS	1973	2	2,90	0,00	3,61	0,29	0,71	
	2012		3,61	0,29	4,30	0,61	0,69	
Indice de De Maritonne	OG	1971	1	17,200	2,828	10,422	2,792	6,778
		1991		16,200	2,263	9,633	2,764	6,567
	AS	2013	2	9,633	2,764	5,300	2,978	4,333
	BAM	1974	2	15,400	3,201	8,717	2,696	6,683
2010		8,717		2,696	5,231	2,404	3,486	
FBS	1979	1	12,150	2,701	8,462	3,140	3,688	

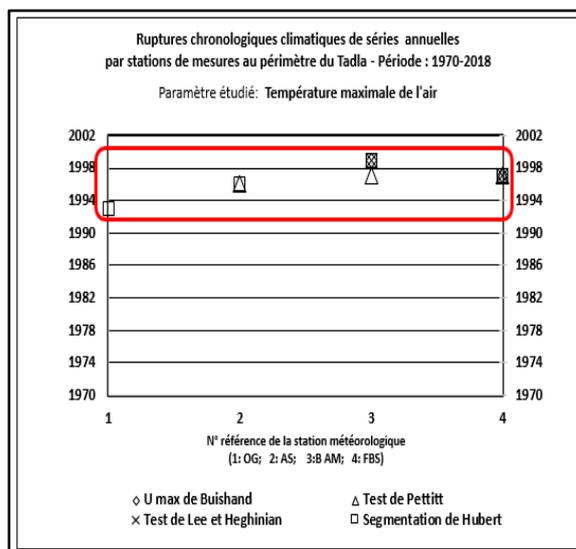
Il est repéré par cette méthode de fréquentes segmentations statistiques sur les séries chronologiques agro-climatiques. En effet, il y a au moins deux ruptures successives pour chaque paramètre étudié, avec le caractère répétitif de l'espacement dans le temps de 24 à 33 ans. Ces coupures temporaires sont exprimées aux bornes des intervalles des indicateurs des températures minimales, maximales et moyennes, de l'ETo et des valeurs de l'Indice de De Maritonne respectivement en 1977-2000, 1993-2009, 1978-2000, 1973-2012 et en 1971-2013 (Tableau 70).

II-2-3-Determination des dates optimales de ruptures des séries chronologiques thermique et de demande climatique en évaporation

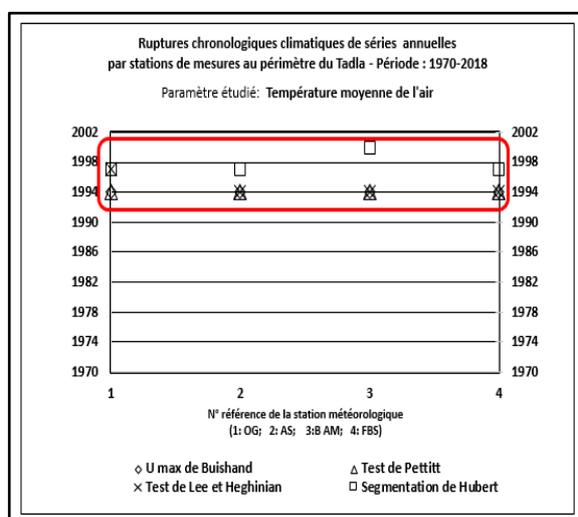
A l'issue des résultats des tests précités d'homogénéité, sont déterminées graphiquement les dates optimales des ruptures des séries chronologiques correspondant aux paramètres ainsi : températures minimale en 1989, température maximale en 1997, température moyenne en 1995 et ETo en 1978; comme sont illustrées aux graphes de la Figures 25. Pour l'Indice de De Maritonne, via de méthodologie similaire, l'année de rupture optimale est en 1988.



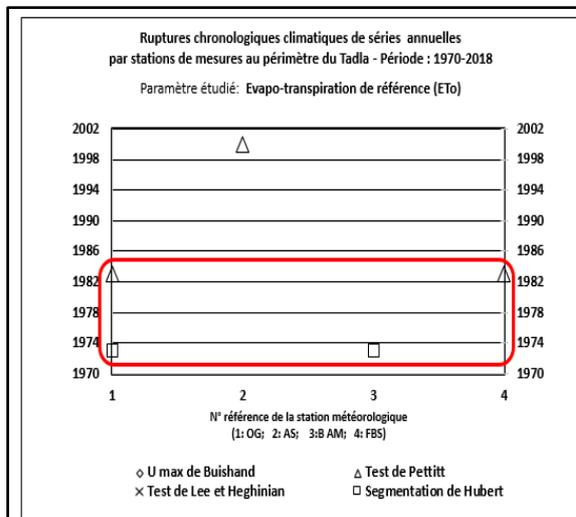
Graphique A : Température maximale



Graphique B : Température minimale



Graphique C : : Température moyenne



Graphique D : : ETo

Figures 25 : Graphiques des ruptures temporelles pour paramètres : Température maximale (graphique A), Température minimale (graphique B), Température moyenne (graphique C), ETo (graphique D) au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1970 à 2018).

III-Cractérisation de tendance thermique et de la demande climatique en évaporation pour le périmètre de Tadla

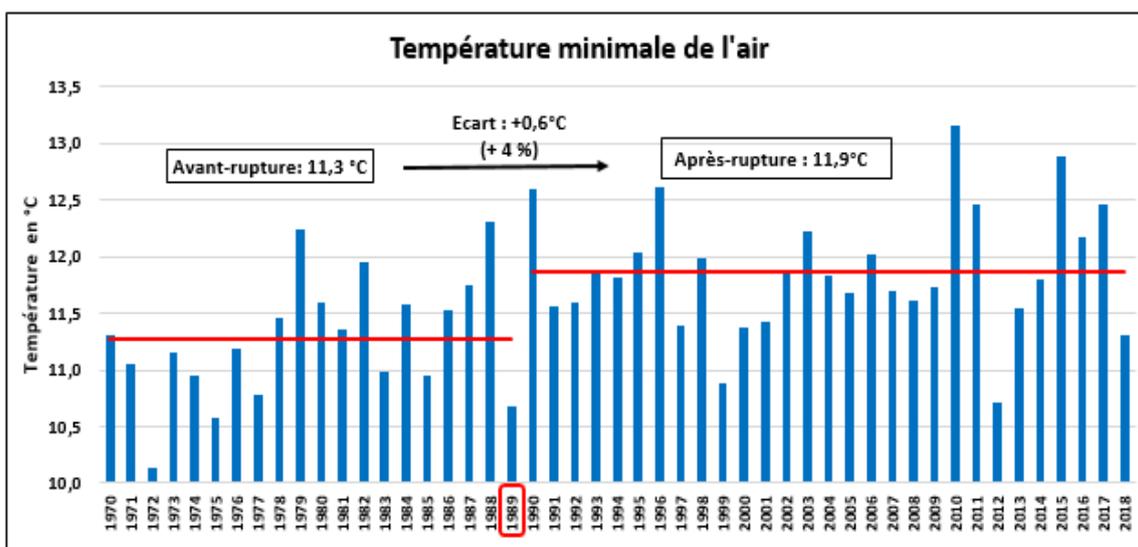
A la lumière des précédents tests d'homogénéité réalisés et après avoir pris connaissance des dates butoirs des ruptures chronologiques sur les séries de données de paramètres agro-climatiques étudiés, il est présenté ci-après leurs évolutions sous forme de graphiques à histogrammes et sur des cartes SIG en des thématiques spatio-temporelles.

III-1-Tendances thermiques au périmètre de Tadla

Les analyses des tendances des paramètres thermiques de températures minimale, maximale et moyenne, sont relatées plus bas.

III-1-1-Températures minimale

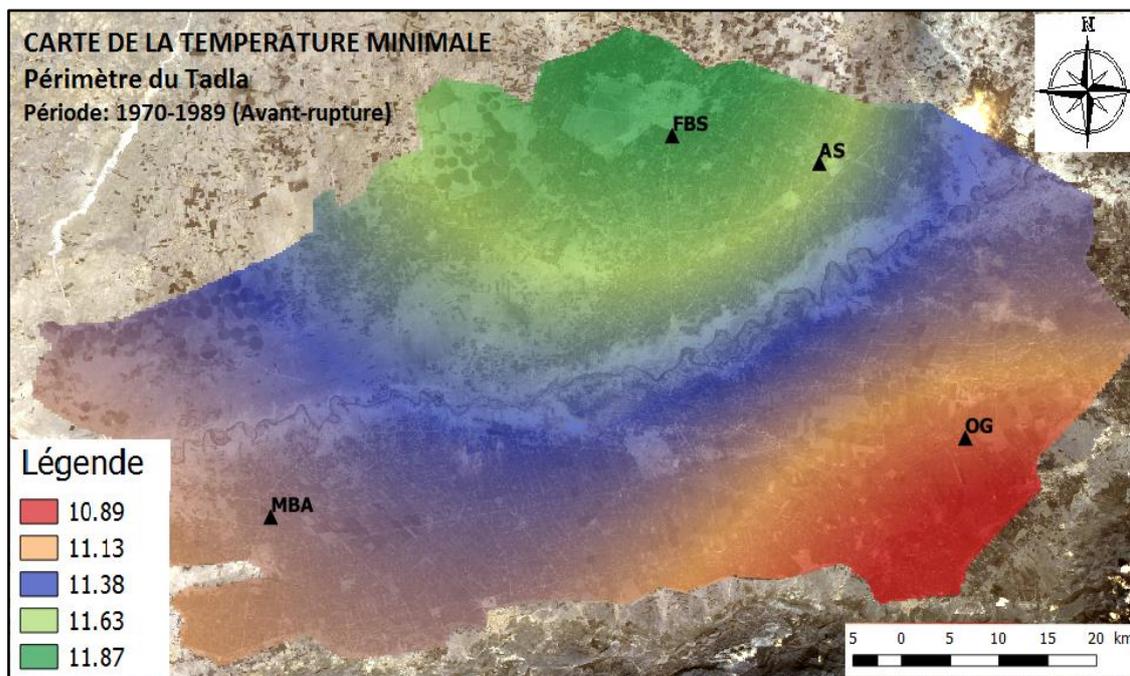
La température minimale moyenne du périmètre de Tadla a évolué de part et d'autre de la date de la rupture en année 1989 de la valeur de 11,3 à 11,9°C ; soit un réchauffement du milieu de 0,6°C (4%), constat et qui perdure en période de 1990 à 2018 (Figure 26).



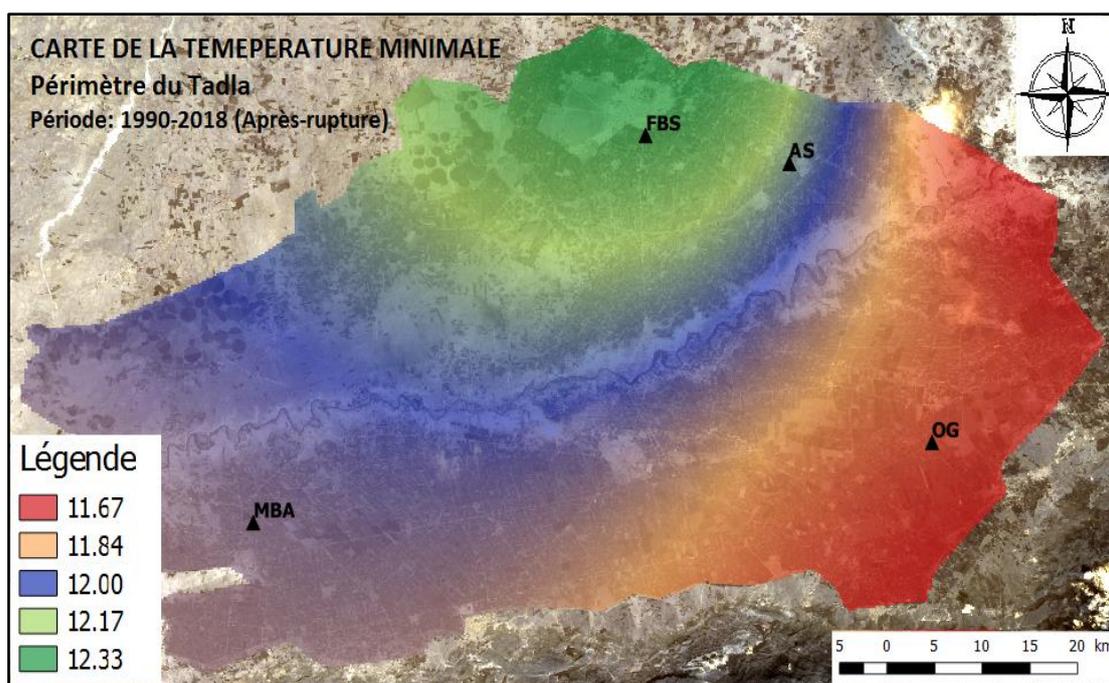
Figures 26 : Tendence de la température minimale au périmètre du Tadla en avant et en après la rupture chronologique

(Période d'observations de 1970 à 2018)

De point de vue tendance spatio-temporelle à l'échelle de ce périmètre, il se profile en après la date de rupture, un contraste thermique en sa cotation minimale, qui est relativement plus chaud sur les terrains de la zone bour du Nord du périmètre, comparé à la zone Sud en piedmont à proximité de la chaîne des montagnes du Moyen Atlas (voir les cartes de la Figure 27).



Carte A : Température minimale en situation d'avant la rupture chronologique

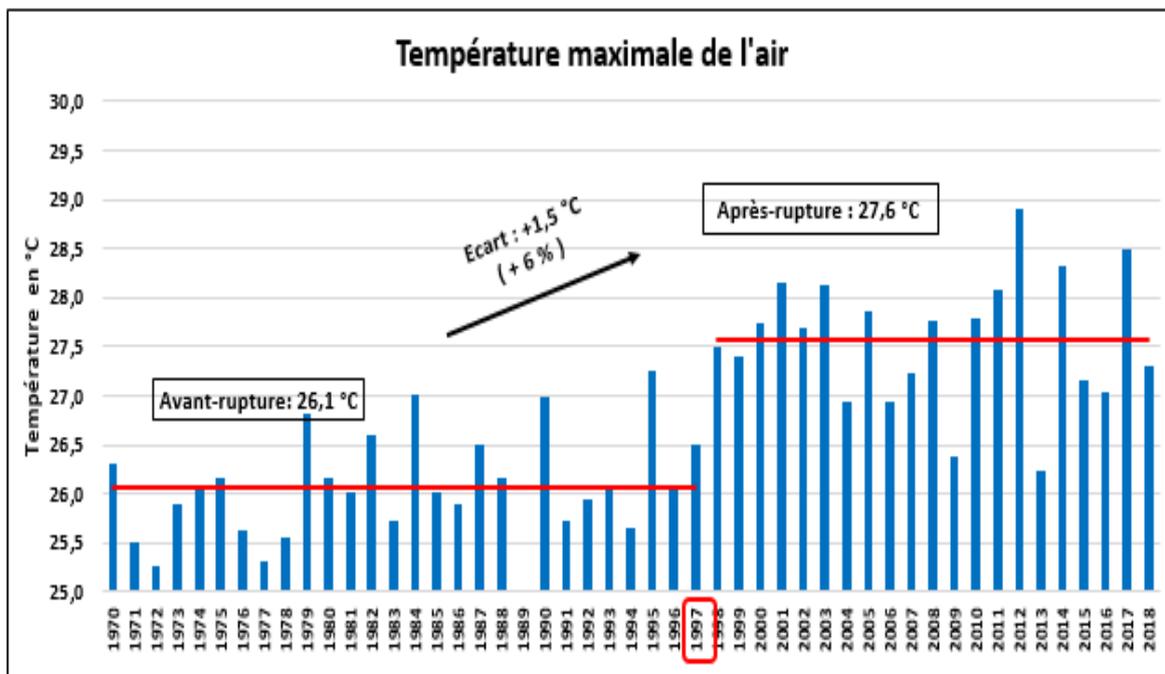


Carte B : Température minimale en situation en après la rupture chronologique

Figure 27: Cartes de tendance spatio-temporelle de la température minimale en avant (Carte A) et en après rupture chronologique (Carte B) au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1970 à 2018).

III-1-2-Températures maximale

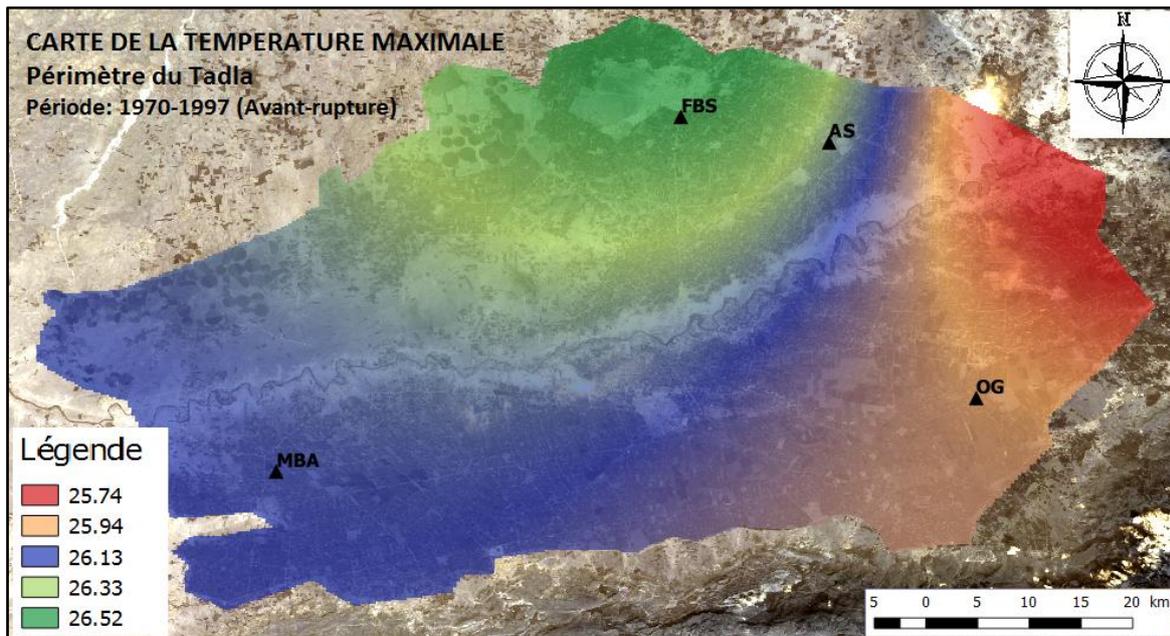
La température maximale du périmètre est passée après la rupture de l'année 1997 de 26,1 à 27,6 °C ; soit un important relatif réchauffement du milieu ambiant qui est évalué à 1,5 °C (6%). Le fait plausible qui se maintient entre sur dernière période de 1998 et 2018 (Figure 28).



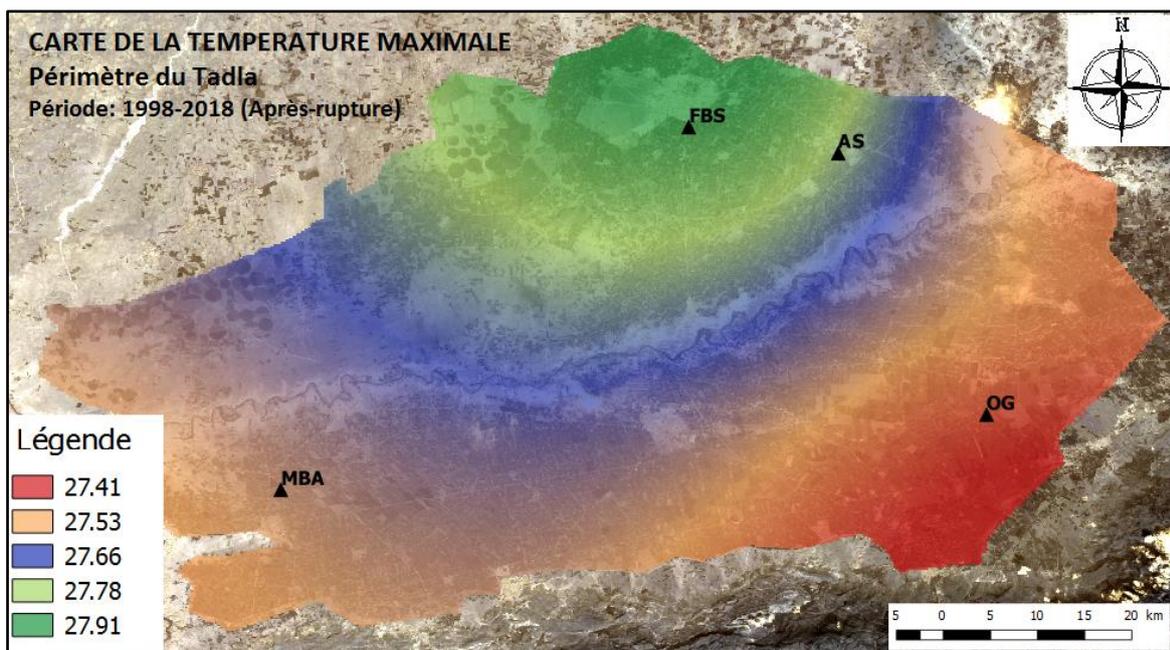
Figures 28 : Tendances de la température maximale au périmètre du Tadla en avant et en après la rupture chronologique

(Période d'observations de 1970 à 2018).

Selon la vision spatio-temporelle à l'échelle du périmètre de Tadla, la tendance après la rupture en question (1997) est constatée d'une manière presque homogène dans cet espace. Toutefois une nuance relative est signalée pour les trois zones suivantes : au Centre-Nord (partie de la zone bour), au Sud-Ouest (partie de la zone irriguée) et au Sud-Est (grande partie de la zone Dir), avec respectivement à caractère relativement chaud, moins chaud et faiblement chaud (voir les cartes de la Figure 29).



Carte A : Température maximale en situation d'avant la rupture chronologique

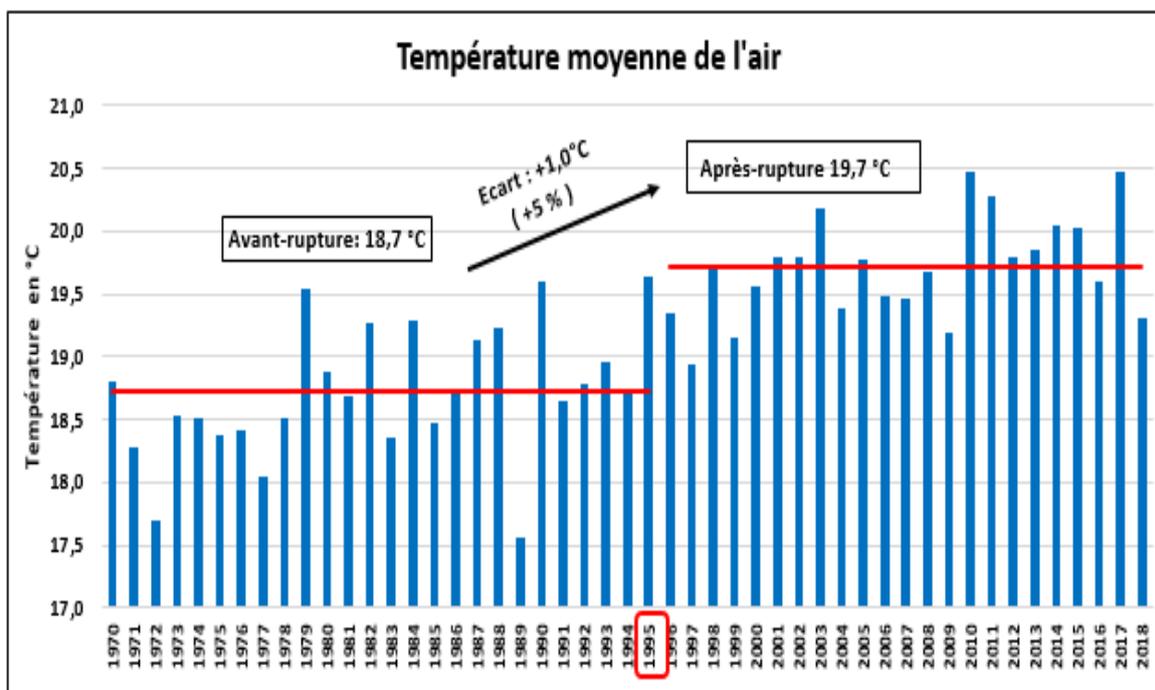


Carte B : Température maximale en situation en après la rupture chronologique

Figure 29: Cartes de tendance spatio-temporelle de la température maximale en avant (Carte A) et en après rupture chronologique (Carte B) au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1970 à 2018).

III-1-3-Températures moyenne

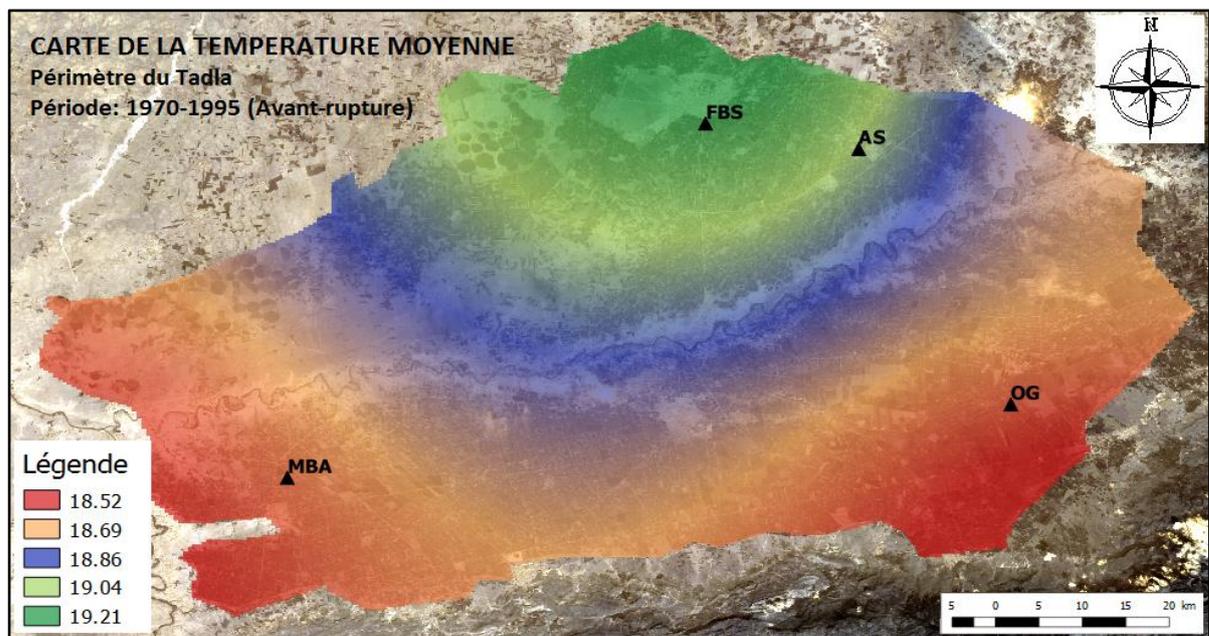
La température moyenne du périmètre a sursauté après sa rupture d'évolution en année de 1995 de 18,7 à 19,7 °C ; mettant aussi en évidence le réchauffement moyen du milieu de 1 °C (5%). La circonstance qui a sévié durant les deux dernières décennies (1996-2018) (Figure 30).



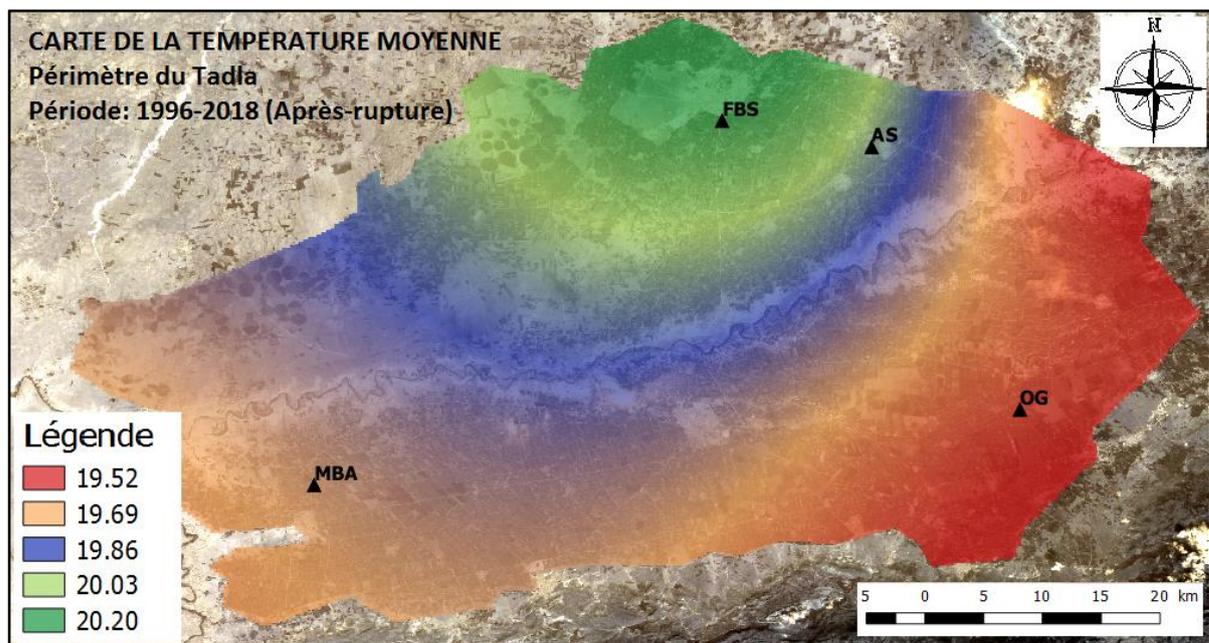
Figures 30 : Tendances de la température moyenne au périmètre du Tadla en avant et en après rupture chronologique

(Période observation de 1970 à 2018)

La cartographie de la température moyenne révèle que la tendance du réchauffement du milieu touche l'ensemble du territoire de ce périmètre, mais en de différentes ampleurs. L'accroissement thermique est relativement plus accentué en zone Sud-Ouest, laquelle abrite une partie relativement importante de la zone potentielle irriguée de ce périmètre (voir les cartes de la Figure 31).



Carte A : Température moyenne en situation d'avant rupture chronologique



Carte B : Température moyenne en situation en après rupture chronologique

Figure 31: Cartes de tendance spatio-temporelle de la température moyenne en avant (Carte A) et en après rupture chronologique (Carte B) au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1970 à 2018).

Dans l'objectif de développer d'éventuelles analyses thermiques implicites en relation avec la pluviométrie mensuelle dans le périmètre de Tadla, selon une cadence mensuelle, des courbes de régression des précipitations mensuelles en fonction du temps ont été élaborées pour la période en après la rupture chronologique de la température moyenne (année de scission chronologique : 1988) (Figures 32 et 33).

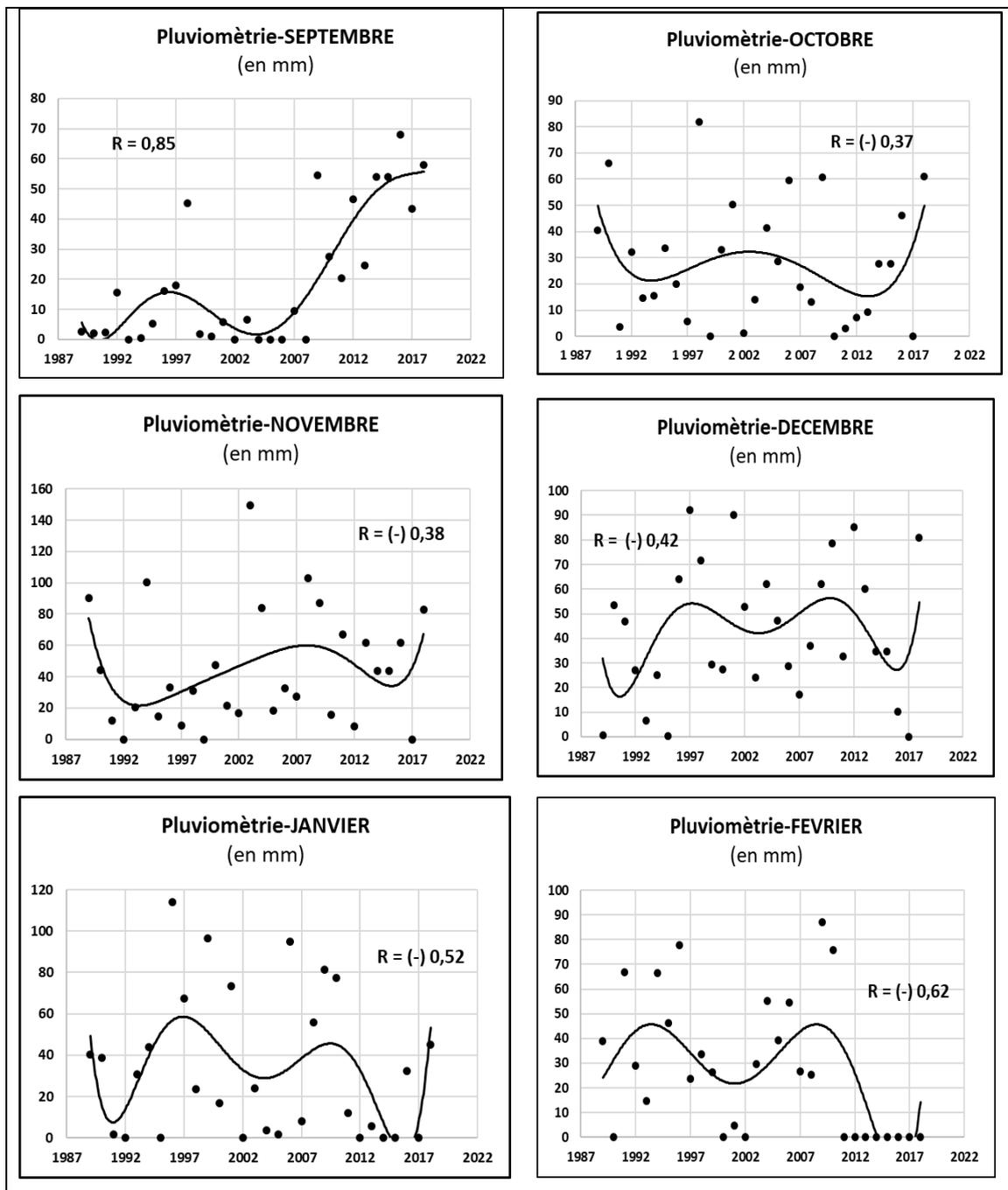


Figure 32 : Courbes de régression de relation « Année-Pluviométrie mensuelle » au périmètre de Tadla définie par mois de Septembre à Février (Période : 1989-2018 ; après rupture chronologique d'ETo).

Il est à signaler que les courbes des tendances en question suivent le meilleur modèle sélectionné, qui est de type polynomial, avec des coefficients de la corrélation en des niveaux variant entre la moyenne et la bonne acceptabilité (Figures 32 et 33).

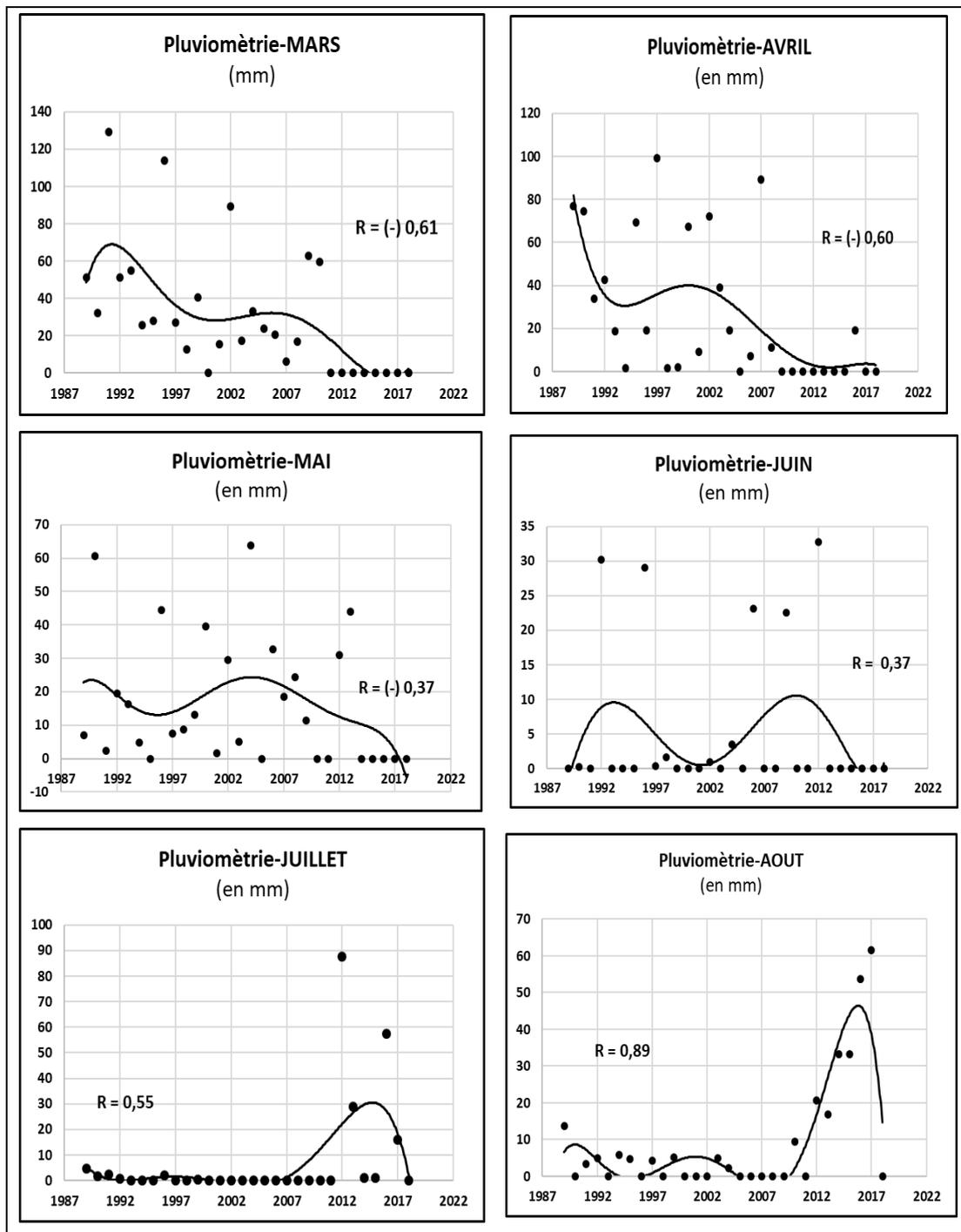


Figure 33 : Courbes de régression de relation « Année-Pluviométrie mensuelle » au périmètre du Tadla définie par mois de Mars à Août (Période : 1989-2018 ; après rupture chronologique d'ETo).

III-2-Tendance en demande climatique en évaporation au périmètre du Tadla

III-2-1-Evolution de tendance d'évapo-transpiration de référence au périmètre de Tadla

Le paramètre d'évapo-transpiration de référence, l'indicateur renseignant sur la demande climatique en évaporation d'un sol enherbé, a subi précocement sa rupture chronologique aux séries des mesures en l'année 1978, coïncidant avec la date de la rupture pluviométrique. L'ETo évolue après cette rupture de 3,2 à 3,6 mm/jour ; soit pour un écart positif de 0,4 mm/jour (13%) (Figure 34).

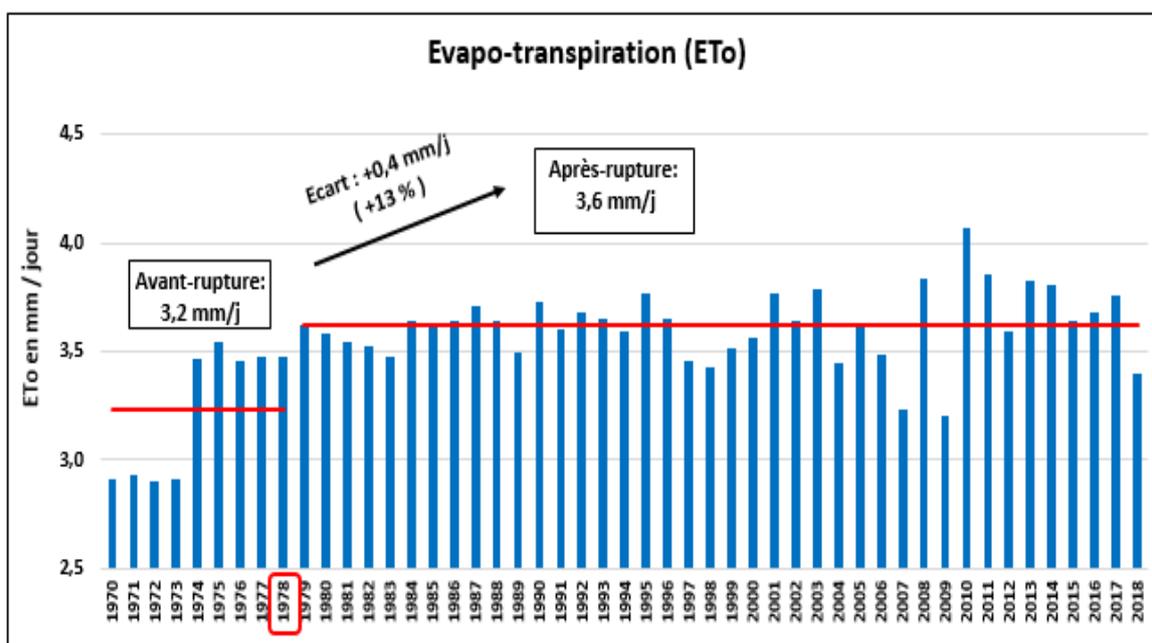
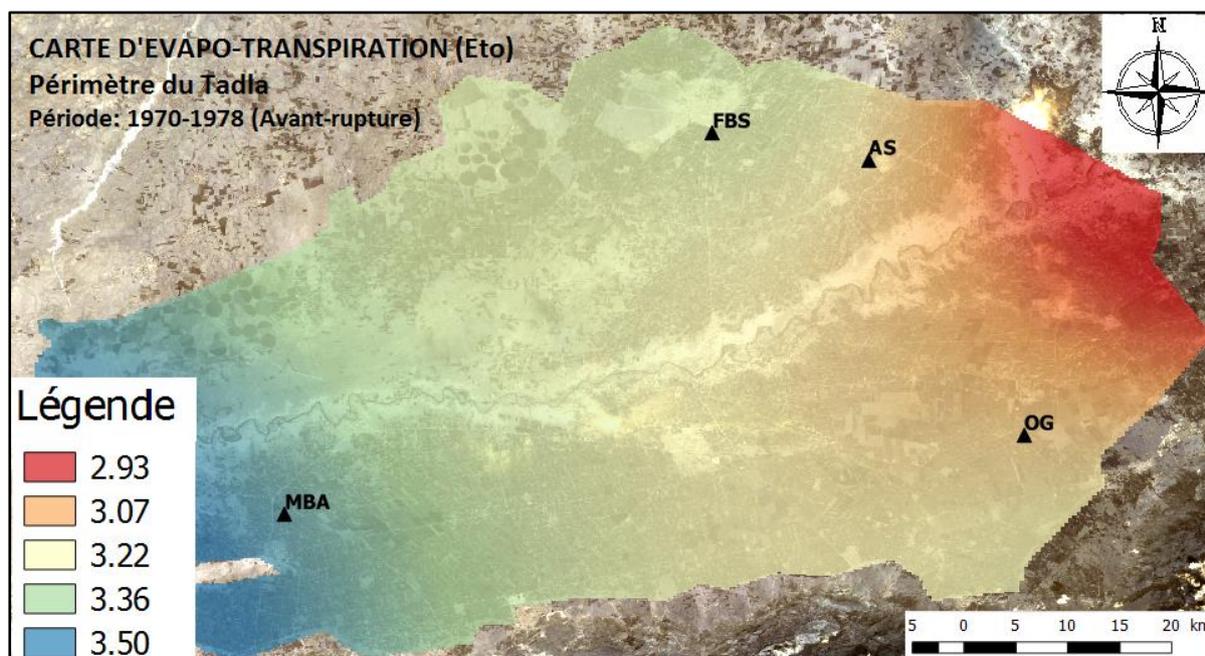


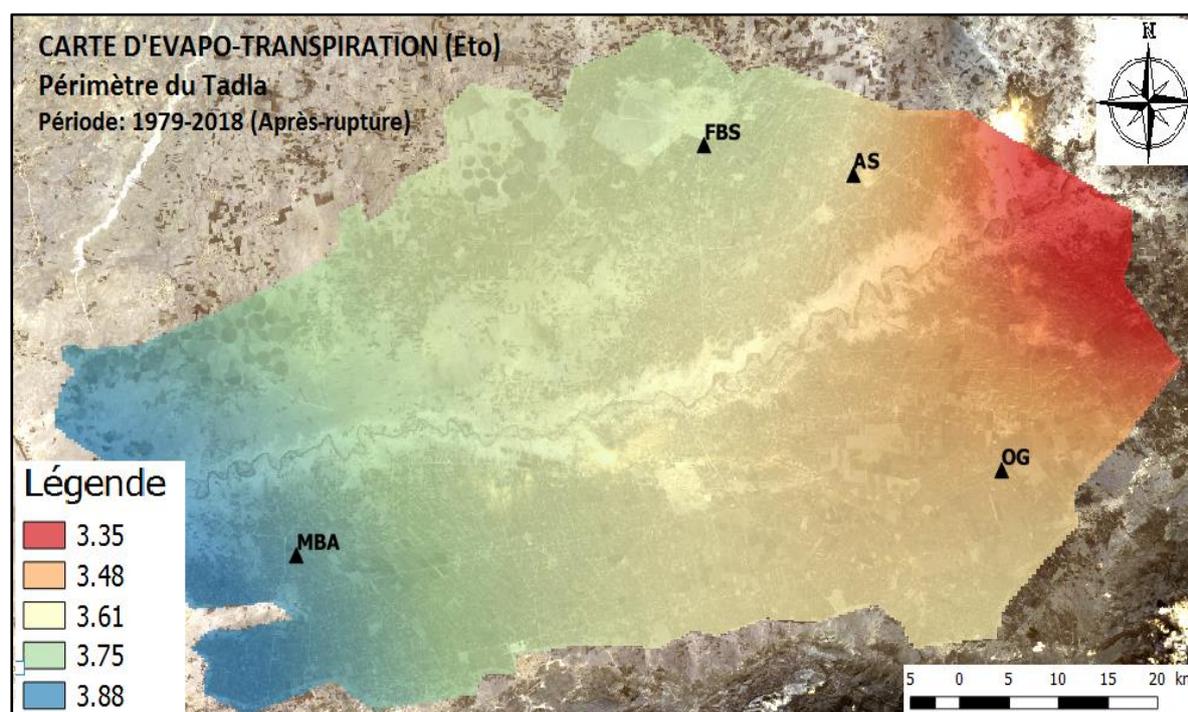
Figure 34 : Tendances de l'évapo-transpiration de référence au périmètre du Tadla en avant et en après rupture chronologique (Période d'observations de 1970 à 2018)

III-2-2-Cartographie de tendance de l'évapo-transpiration de référence au périmètre de Tadla

La carte SIG de l'évapo-transpiration de référence illustre la hausse relative en valeur moyenne de ce paramètre auprès de la zone Sud-Ouest, suivi de la large zone du Centre avec des valeurs intermédiaires et enfin en zone d'extrême Est du périmètre à des valeurs relativement les plus basses. Après rupture chronologique, on assiste à la persistance des mêmes niveaux de la répartition spatiale, ceci en dépit de l'accroissement constaté de l'ETo (voir cartes de la Figure 35).



Carte A : Evapo-transpiration en situation d'avant rupture chronologique



Carte B : Evapo-transpiration en situation en après rupture chronologique

Figure 35: Cartes de tendance spatio-temporelle de l'évapo-transpiration de référence en avant (Carte A) et en après rupture chronologique (Carte B) au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1970 à 2018).

III-3-Relation entre la température et l'évapo-transpiration au périmètre du Tadla

L'expression de l'évapo-transpiration de référence en fonction par la température à travers des courbes-abaques par mois, en se référant aux données de la station météorologique d'Ouled Gnaou sur le périmètre de Tadla en après-rupture chronologique thermique moyenne (en 1989) est donnée aux graphiques des (Figures 36 et 37).

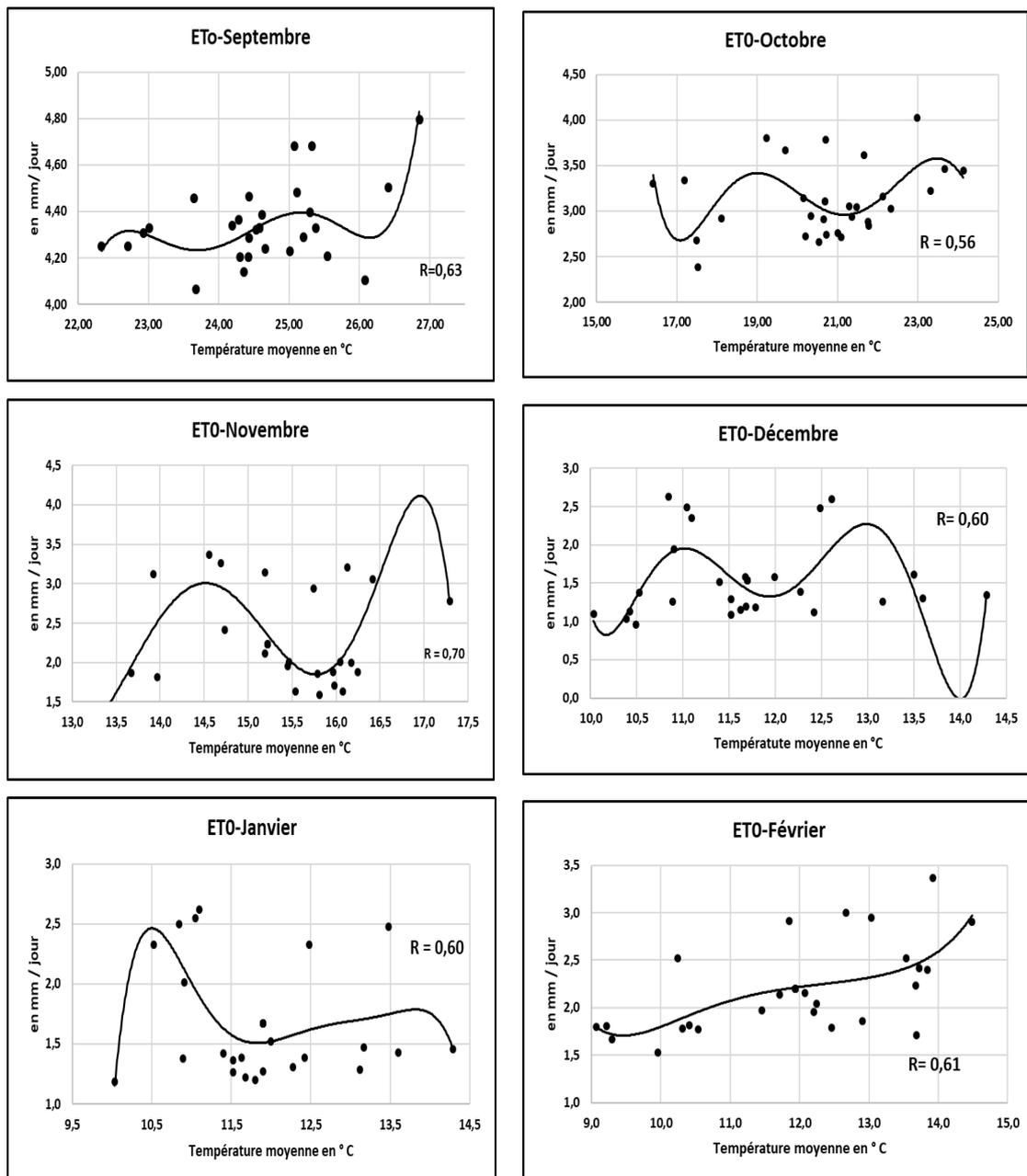


Figure 36 : Courbes de régression de relation Température-Evapotranspiration au périmètre de Tadla pour les mois de Septembre à Février (Période : 1989-2018 ; après rupture chronologique d'ET0).

Il est à noter que la relation entre de l'évapo-transpiration de référence avec la température est selon la méthode régressive comporte des globalement des coefficients de corrélation dans les niveaux requis (Figures 36 et 37).

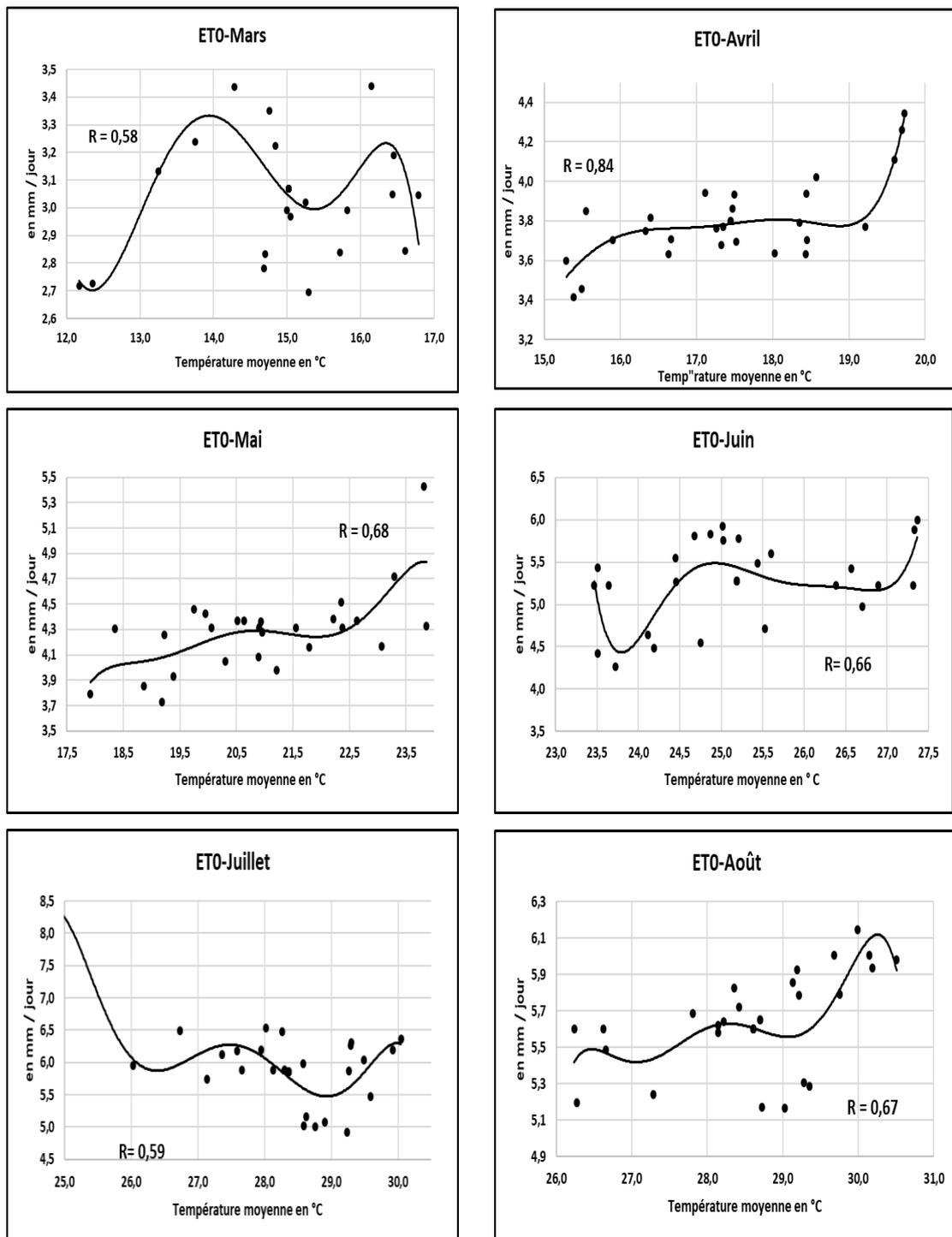


Figure 37 : Courbes de régression de relation Température-Evapotranspiration au périmètre de Tadla pour les mois de Mars à Août
(Période : 1989-2018 ; après rupture chronologique d'ETo).

IV-Bilan hydrique au sol au périmètre de Tadla

Le bilan hydrique au sol au périmètre de Tadla ayant été déterminé selon une cadence mensuelle par la différence entre l'ETo et les précipitations efficaces, a été doublement établi par mois et d'une manière cumulative au cours de l'année et pour les deux situations d'avant et en après-rupture chronologique des paramètres en question.

Les résultats afférents des analyses sont présentés et commentés ci-après avec illustration par des graphiques.

IV-1-Bilan hydrique mensuel au sol au périmètre de Tadla

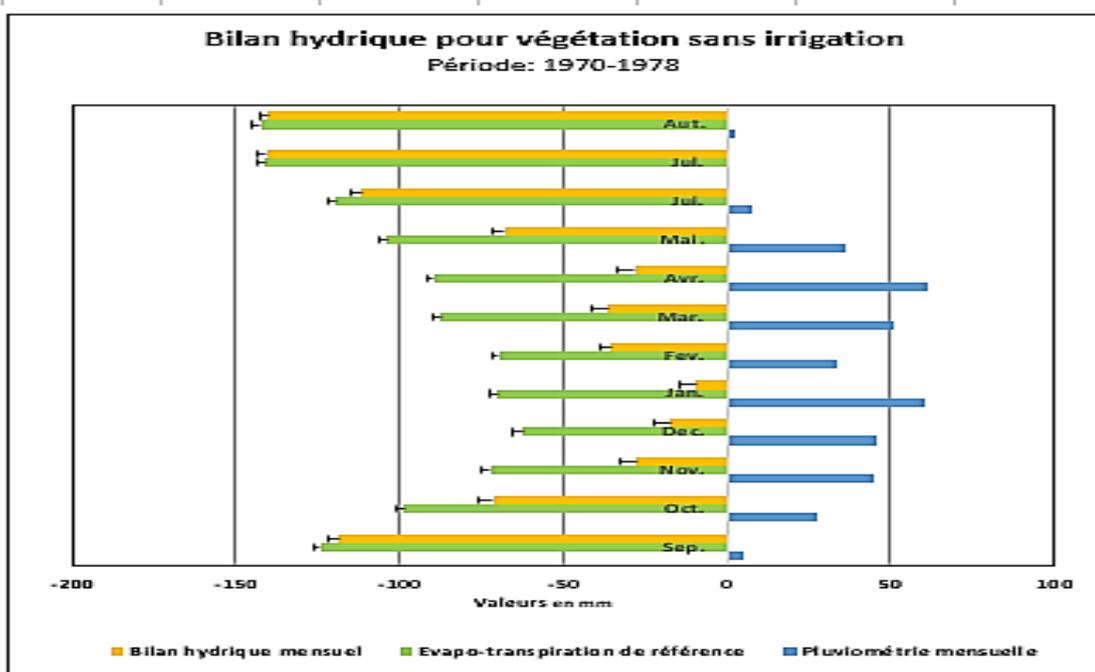
IV-1-Evaluation du bilan hydrique au sol mensuel global au périmètre de Tadla en avant et en après la rupture chronologie de l'évapo-transpiration de référence.

En tenant compte seulement des précipitations interceptées au périmètre de Tadla, le bilan hydrique au sol qui concerne la végétation du milieu à caractère pluvieux, est constamment négatif pour tous les mois de la campagne. Ceci avait lieu à différentes amplitudes des mois et qui ne dépassent guère la barre mensuelle de -150 mm/mois avant la rupture chronologique de l'année 1978.

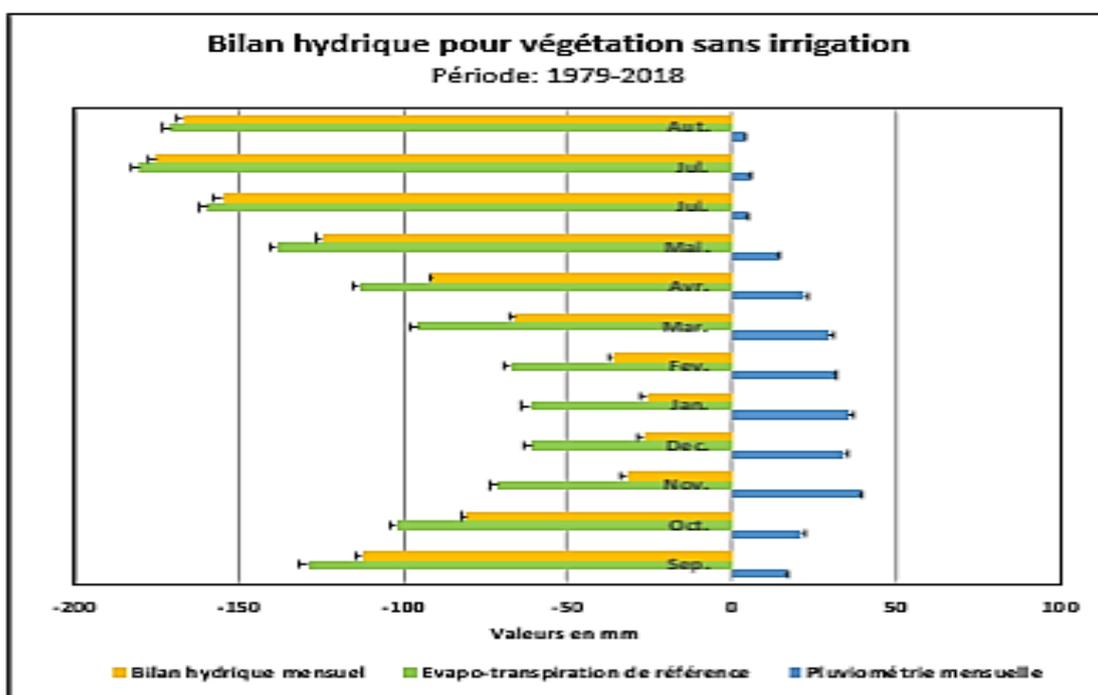
Après la rupture chronologique (précipitations et ETo), le déficit hydrique au sol se creuse davantage à partir du mois de Mars, avec des dépassements supérieurs par rapport au seuil de l'avant rupture de - 150 mm/mois, notamment pour les mois de la saison estivale en la phase de l'après rupture (voir graphes de la Figure 38).

IV-1-2-Bilan hydrique cumulatif annuel caractéristique du périmètre de Tadla

En raisonnant selon le bilan hydrique au sol cumulatif annuel sur base mensuelle, la disparité entre les situations d'avant et en après la rupture chronologique de l'année 1978 (précipitations et ETo), la situation devient plus délicate dès le mois de Février en continuant à s'accroître au fil des mois restant de la campagne agricole (Figure 39).



Graphe A : Bilans hydriques au sol mensuels avant-rupture chronologique de la pluie et de l'ETo



Graphe B : Bilans hydriques au sol mensuels après-rupture chronologique de la pluie et de l'ETo

Figure 38 : Tendence des bilans hydriques au sol mensuels le périmètre de Tadla en avant-rupture (graphe A) et en après-rupture (graphe B) chronologique de la pluie et de l'ETo (Période : 1970-2018).

A l'achèvement de la campagne agricole, le bilan hydrique au sol cumule une valeur déficitaire de **- 805 mm/an** (équivalent à -8 050 m³ d'eau par hectare et par an), en période d'avant-rupture chronologique (en l'année 1978), contre un volume aussi déficitaire mais plus important et qui

est évalué à **- 1 093 mm/an** (équivalent à -10 930 m³/ha/an) en période d'après-rupture ; soit alors un taux d'accroissement toujours dans le sens de la négativité de **35,78 %** (Figure 39).

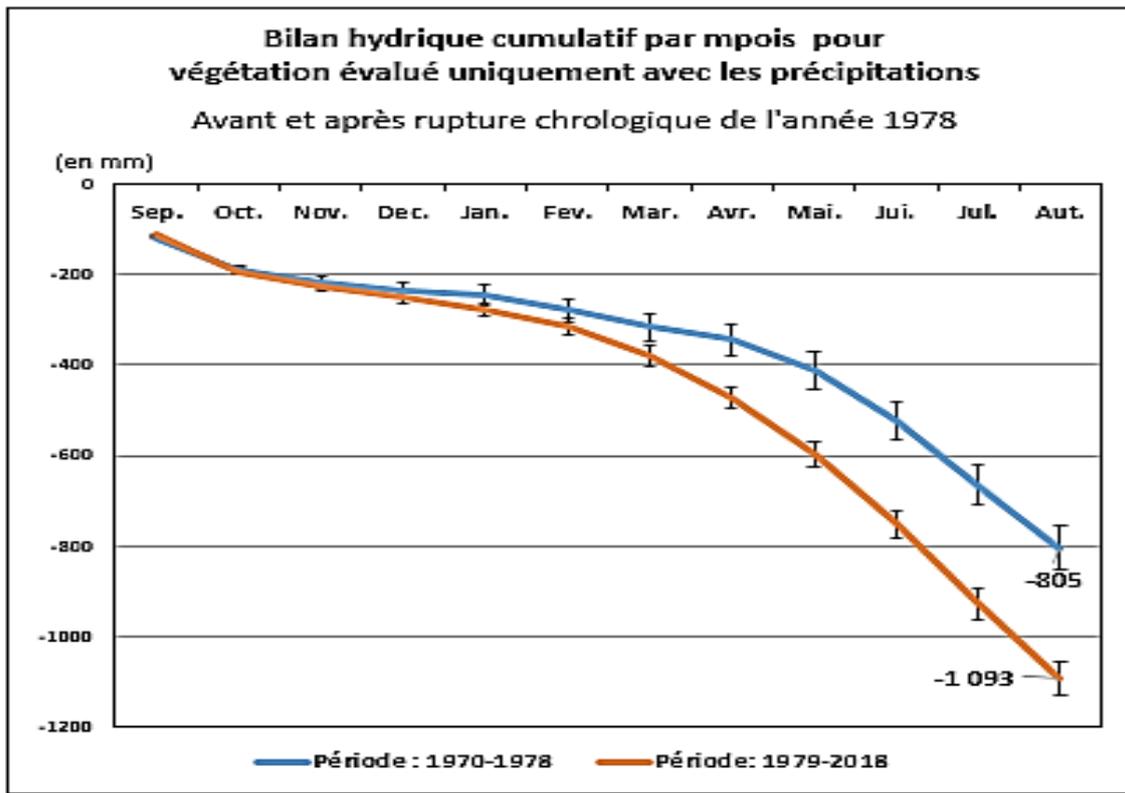


Figure 39 : Tendence de la variabilité du bilan hydrique au sol cumulé d'une manière comparative entre l'avant et l'après rupture chronologique des paramètres agro-climatiques au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1970 à 2018).

Chapitre IV : VARIABILITE EN NIVEAU D'ARIDITE AU PERIMETRE DU TADLA

I-Diagrammes de Gausсен

L'élaboration des diagrammes de Gausсен pour les stations météorologiques retenues pour le périmètre du Tadla avait pour assise les trois périodes interposées entre les années successives des ruptures chronologiques. La première période est de 1970-1978, spécifique seulement pour le paramètre des précipitations (rupture en 1978). La deuxième période est de 1979-1995 en intermédiaire à propos du couple de paramètres précipitations-température moyenne. La troisième période est de 1996-2018 et spécifie uniquement à la température moyenne (rupture en 1995). Les résultats sont récapitulés au Tableau 71.

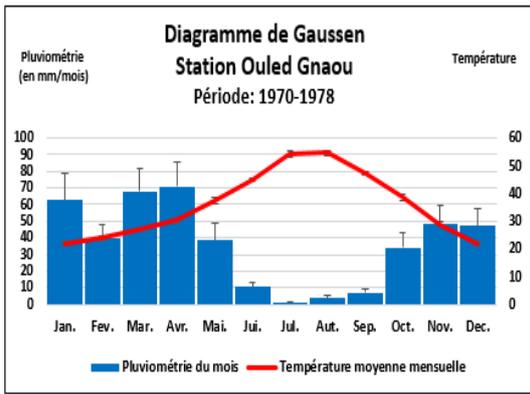
Ces aspects sont analysés ci-après et illustrés aux Figures 43 et 44 pour les différents diagrammes établis pour les périodes desdites ruptures et en fonction des stations de mesures.

Les durées des périodes sèches en fonction des trois périodes des ruptures chronologiques précitées, extraites à partir des Diagrammes de Gausсен réalisés sont rapportées au Tableau 71.

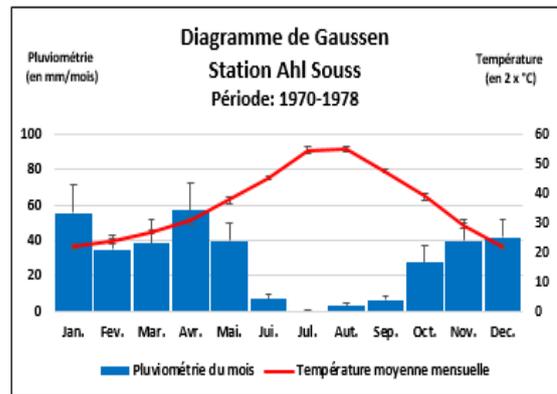
Tableau 71 : Tendances de la variabilité de la période sèche sur le diagramme de Gausсен au périmètre de Tadla (Période de 1970 à 2018)

Intervalle annuel séparant les ruptures chronologiques des indicateurs agro-climatiques	Durée de la période sèche (en nombre de jours)
1970-1978	221 (+/- 43)
1979-1995	192 (+/- 15)
1996-2018	235 (+/- 28)

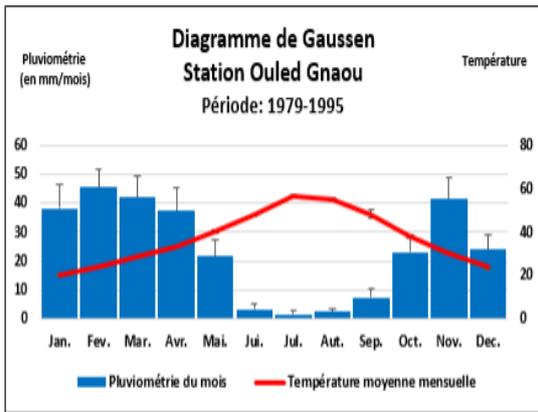
Il se profile de ces résultats qu'en passant de la dernière date de la rupture chronologique des indicateurs agro-climatiques, coïncidant avec celle de la température moyenne du périmètre (année de 1995), que la période sèche a significativement évolué de **192 à 235 jours**, soit un allongement de **43 jours** (Tableau 71 ; Figures 40 et 41).



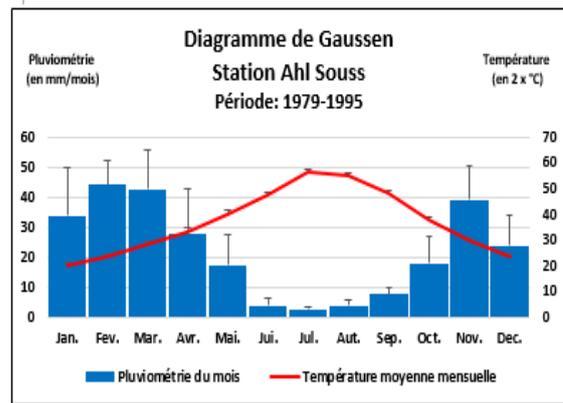
Graphique A : Période de 1970 à 1978



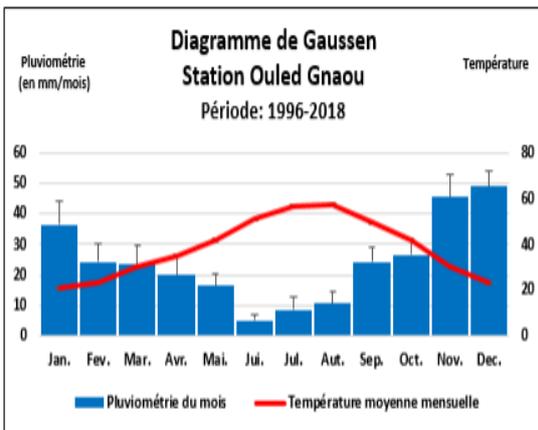
Graphique D : Période de 1970 à 1978



Graphique B : Période de 1979 à 1995

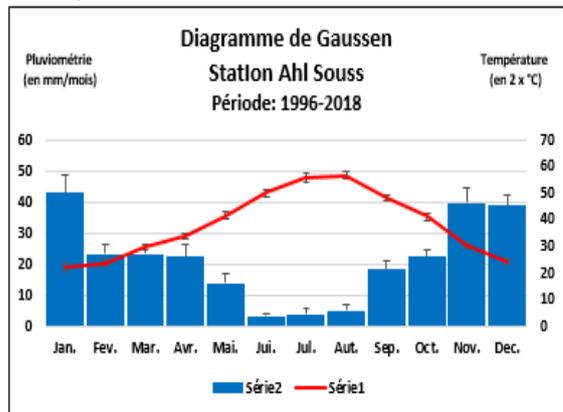


Graphique E : Période de 1979 à 1995



Graphique C : Période de 1996 à 2018

STATION D'OULED GNOU



Graphique F : Période de 1996 à 2018

STATION AHL SOUSS

Figure 40 : Diagrammes de Gausse au périmètre de Tadla aux niveaux des stations agro-climatiques Ouled Gnaou (graphes A à C) et Ahl Souss (graphes D à F) (Période d'observations de 1970 à 2018).

En effet, il se traduit fidèlement et d'une manière conjointe le réchauffement atmosphérique tendanciel avec la tendance de la réduction graduelle des précipitations, surtout en fin de la saison printanière pour le périmètre de Tadla (Figures 40 et 41).

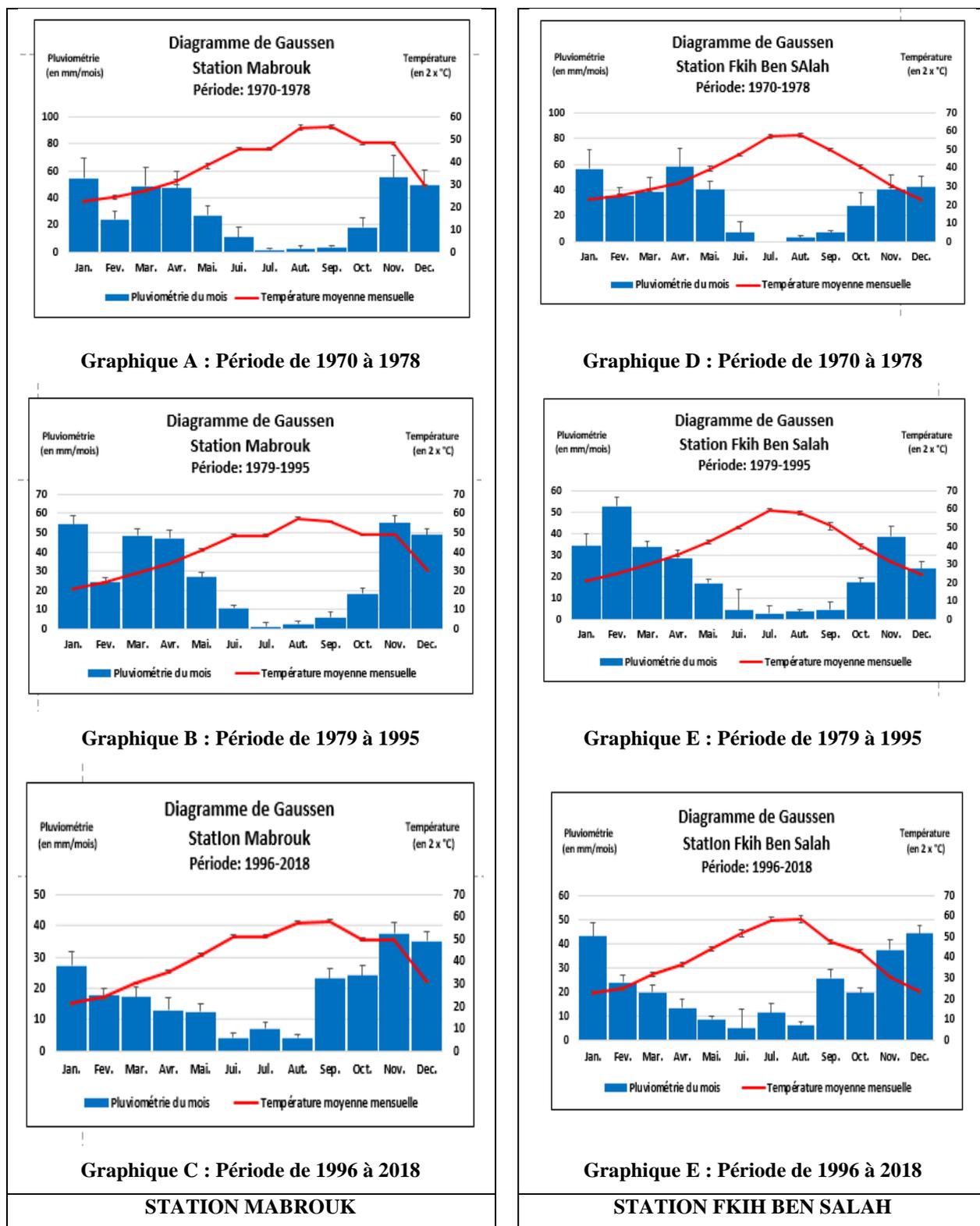


Figure 41 : Diagrammes de Gausson au périmètre de Tadla aux niveaux des stations agro-climatiques Mabrouk (graphes A à C) et Fkih Ben Salah (graphes D à F) (Période d'observations de 1970 à 2018).

II-Indice de De Maritonne

Les résultats numériques de l'évolution de l'indice d'aridité de De Maritonne pour le périmètre de Tadla sont restitués au Tableau 72.

Tableau 72 : Tendence de la variabilité de l'indice d'aridité de De Maritonne au périmètre de Tadla
(Période de 1970 à 2018).

Intervalle annuel séparant les ruptures chronologiques des indicateurs agro-climatiques	Indice moyen De Maritonne I.M. (en mm/ °C)
1970-1988	11 (+/- 1)
1989-2018	9 (+/- 1)

La valeur moyenne de l'indice d'aridité de De Maritonne pour le périmètre de Tadla passe entre l'avant à l'après-rupture chronologique (année de 1988) de 11,2 à 8,6 mm/°C (Tableau 72). Ceci est à l'origine de l'accentuation d'aptitude à l'aridité du milieu lors de l'intervalle mensuel de Janvier à Mars, comme est illustré dans la Figure 42.

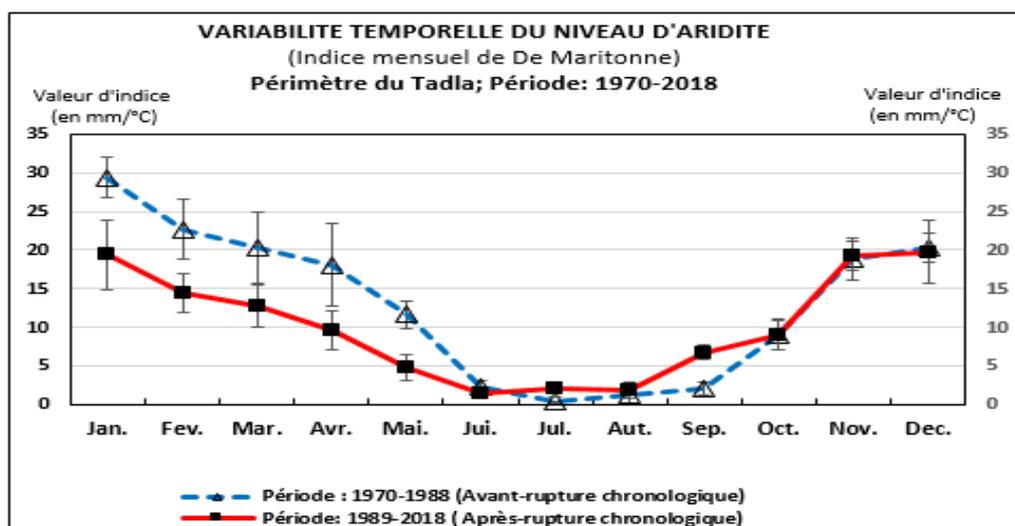
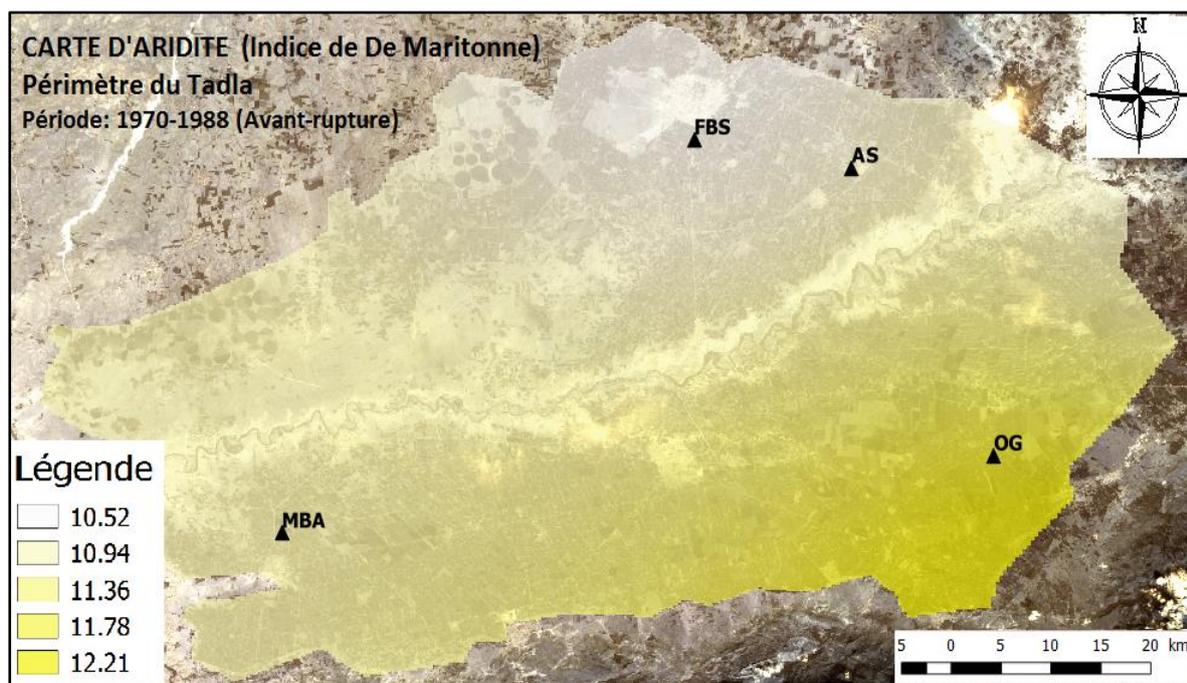
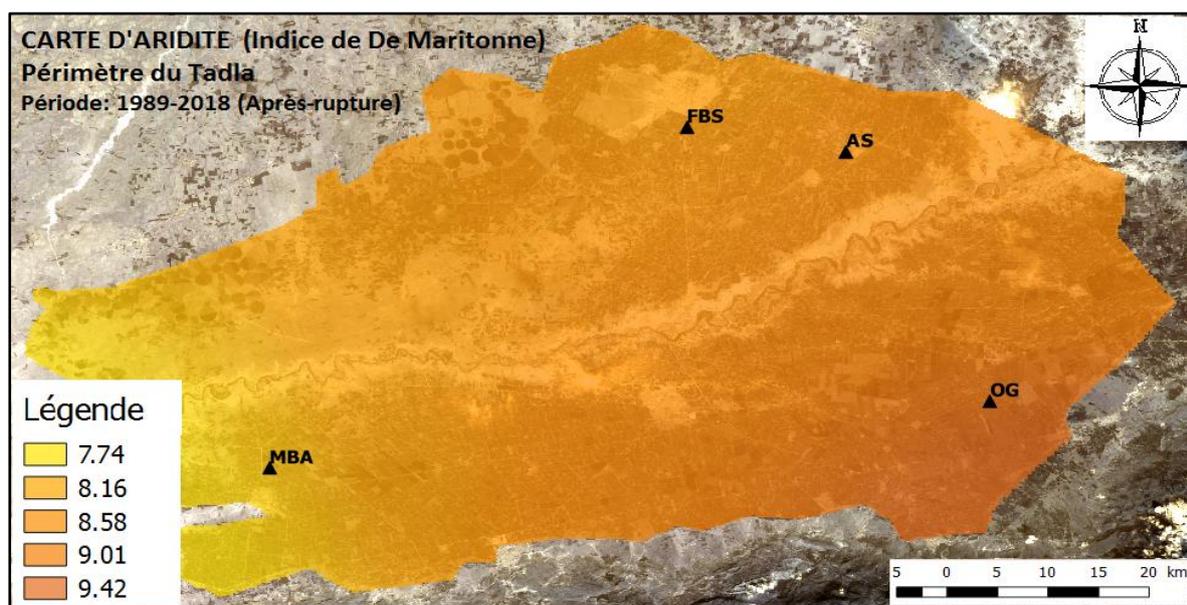


Figure 42: Tendence de la variabilité de l'indice mensuel d'aridité de De Maritonne au périmètre de Tadla
(Période d'observations de 1970 à 2018).

De point de vue spatio-temporelle, après le clivage dans la chronologie de tendance de l'indice de De Maritonne, repérée en l'année 1988, l'aridité a fortement augmenté à différents endroits du périmètre du Tadla, avec l'accélération dans sa zone Sud-Est, dont les cartes thématiques sont sur la Figure 43.



Carte A : Niveaux d'aridités en situation d'avant rupture chronologique



Carte B: Niveaux d'aridités en situation en situation en après rupture chronologique

Figure 43 : Cartes d'évolution spatio-temporelle de l'aridité au périmètre du Tadla entre l'avant (Carte A) et l'après (Carte B) de la rupture chronologique sur paramètres agro-climatique (Période d'observations de 1970 à 2018).

III-Quotient d'Emberger

Les résultats des calculs de l'évolution du Quotient d'Emberger (Q.E.) pour le périmètre de Tadla, sont données au Tableau 73.

Tableau 73 : Tendances de la variabilité de l'indice mensuel d'aridité de De Maritonne au périmètre de Tadla
(Période de 1970 à 2018).

Intervalle annuel séparant les ruptures chronologiques des indicateurs agro-climatiques	Quotient d'Emberger (Q.E.) en mm/ (°C) x(°C)
1970-1978	28 (+/- 5)
1979-1995	21 (+/- 4)
1996-2018	19 (+/- 3)

Le périmètre du Tadla se caractérisait en avant la rupture chronologique en question avec un Q.E de $28 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}^2$. Ce quotient s'est replié en fin de compte après deux scissions temporaires pour un écart négatif de 11 unités à l'au-delà de l'année de fatidique de 1995 (Tableau 73).

Chapitre V : CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LEURS IMPACTS SUR LES BESOINS EN EAU DE L'IRRIGATION DES CULTURES AU PERIMETRE DE TADLA

Au préalable des projections d'évolution des besoins en eau d'irrigation des cultures du périmètre du Tadla sous les impacts éventuels des changements climatiques prévisionnels, il est objet de déterminer leurs exigences actuelles en eau d'irrigation selon les systèmes d'irrigation usuels adoptés. A ce propos, il est présenté les résultats des enquêtes agricoles réalisées, suivi des évaluations par les calculs et à travers les expérimentations pour la détermination des besoins nets et bruts en eau d'irrigation des cultures. Ceux-ci sont relayés par les extrapolations au périmètre de Tadla pour les besoins en eau des assolements cultureux actuels et projetés à long terme par systèmes d'irrigation adoptés, tout en tenant compte de l'éventualité des changements climatiques.

I-Résultats des enquêtes agricoles auprès des agriculteurs sur l'usage comparatif des deux systèmes d'irrigation gravitaire et localisée.

A l'issue des deux enquêtes complémentaires de caractérisation du processus d'irrigation des cultures menées au périmètre de Tadla, auprès d'agriculteurs superviseurs directs de leurs exploitations agricoles, des renseignements ont été tirés et sont récapitulés au Tableau 74.

Tableau 74 : Principaux résultats des enquêtes sur l'opération de l'irrigation auprès d'exploitations agricoles du périmètre de Tadla avec la comparaison des systèmes d'irrigation gravitaire et localisée

(Campagnes agricoles des enquêtes de 2015/2016 à 2017/2018)

Cultures	Volume eau irrigation	Rendement	Efficience agronomique d'eau (EUE)	Valeur de production	Marge nette	Valeur ajoutée	Valorisation eau irrigation
	m3 / ha	T / ha	Kg / m3 eau	Dhs / ha	Dhs / ha	Dhs / ha	Dhs / m3 eau
Céréales d'automne							
Syst. Gravitaire (1)	6 720	5,40	0,80	19 900	5 586	14 440	2,15
Syst. Irr. Localisée (2)	3 450	6,58	1,91	23 030	6 618	15 490	4,49
Ecrat : (2)/(1)	-49%	22%	137%	16%	18%	7%	109%
Betterave à Sucre							
Syst. Gravitaire (1)	8 950	66,00	7,37	31 189	10 229	24 049	2,69
Syst. Irr. Localisée (2)	5 170	86,08	16,65	36 765	12 535	27 845	5,39
Ecrat : (2)/(1)	-42%	30%	126%	18%	23%	16%	100%
Luzerne							
Syst. Gravitaire (1)	11 520	55,00	4,77	32 140	19 040	30 200	2,62
Syst. Irr. Localisée (2)	8 940	65,00	7,27	37 984	23 614	34 602	3,87
Ecrat : (2)/(1)	-22%	18%	52%	18%	24%	15%	48%
Mais Ensilage							
Syst. Gravitaire (1)	7 000	45,00	6,43	18 279	4 639	6 759	0,97
Syst. Irr. Localisée (2)	5 370	55,39	10,31	22 500	8 204	10 524	1,96
Ecrat : (2)/(1)	-23%	23%	60%	23%	77%	56%	103%
Agrumes							
Syst. Gravitaire (1)	12 000	27,00	2,25	53 859	26 344	49 139	4,09
Syst. Irr. Localisée (2)	8 000	42,00	5,25	84 450	45 038	79 205	9,90
Ecrat : (2)/(1)	-33%	56%	133%	57%	71%	61%	142%
Oliviers							
Syst. Gravitaire (1)	7 680	4,20	0,55	18 840	8 606	16 804	2,19
Syst. Irr. Localisée (2)	5 450	8,00	1,47	40 340	13 638	37 599	6,90
Ecrat : (2)/(1)	-29%	90%	168%	114%	58%	124%	215%
Oignon							
Syst. Gravitaire (1)	6 000	57,50	9,58	28 750	9 032	24 150	4,03
Syst. Irr. Localisée (2)	5 800	83,57	14,41	33 428	11 806	27 998	4,83
Ecrat : (2)/(1)	-3%	45%	50%	16%	31%	16%	20%
Melon							
Syst. Gravitaire (1)	6 720	32,50	4,84	37 000	16 000	32 850	4,89
Syst. Irr. Localisée (2)	4 830	52,70	10,91	78 750	42 010	56 510	11,70
Ecrat : (2)/(1)	-28%	62%	126%	113%	163%	72%	139%

Les analyses des données de ces enquêtes sur milieu réel de l'agriculture du périmètre de Tadla, sont données ci-après, modulées en fonction des aspects directeurs phyto-techniques et agro-économiques.

- ***Consommation en eau d'irrigation par les cultures***

-Les cultures en irrigué bénéficient d'apports d'eau par les agriculteurs sous le système d'irrigation gravitaire, qui oscillent entre un minimum pour le maraichage de 6 000 m³/ha en oignon et 6 720 m³/ha en melon à niveau maximum pour les cultures pérennes d'agrumes à 12 000 m³/ha) et pour la luzerne à 11 520 m³/ha.

-Le système d'irrigation localisée contribue effectivement à économiser l'eau d'irrigation dans un taux variant entre 3% à 49 % selon les cultures.

- ***Productivités des cultures***

Le recours au système d'irrigation localisée par les agriculteurs leur a permis d'améliorer les rendements de leurs cultures, avec un taux de gain allant de 18 % pour la luzerne à 90 % pour les oliviers. Aussi sur le plan productif, les plantations d'oliviers se trouvent désormais mieux valorisées avec la nouvelle technique d'irrigation plus efficiente.

- ***Efficiences agronomique de l'utilisation d'eau d'irrigation***

-Les efficiences agronomiques de l'utilisation de l'eau d'irrigation (EUE) au niveau des exploitations agricoles du périmètre de Tadla montrent des disparités pour les cultures. En effet, l'EUE passe de 0,80 Kg/m³ d'eau en cultures des céréales d'automne à 9,58 Kg/m³ pour la culture maraichère de référence d'oignon d'hivers.

-A l'exception des cultures céréalières, les autres cultures affichent des valeurs d'EUE plus élevées par rapport aux résultats des expérimentations, ce compte-tenu que les agriculteurs utilisent massivement de l'eau du pompage pour le complément d'irrigation en plus de l'eau du barrage fourni à une stricte mesure. Cette attitude de l'agriculteur est dans le sens de maximaliser leurs rendements de campagne surtout pour la culture industrielle de la betterave à sucre, contractée avec l'unique usine sucrière locale.

-L'utilisation de l'irrigation localisée chez les agriculteurs s'est montrée plus bénéfique dans l'accroissement de l'EUE des cultures.

- ***Valeurs des productions agricoles***

En milieu irrigué, les recettes de vente des productions des cultures sont évaluées dans la fourchette de e 18 840 à 37 000 Dhs/ha sous l'irrigation gravitaire. Les accroissements financiers

productifs après la reconversion au système d'irrigation localisée sont à des taux fluctuant entre 16% pour la céréaliculture et au multiple de 1,14 fois pour l'olivier et à 1,13 fois la culture maraichère de référence du melon.

- ***Marge nette agricole***

Le bénéfice net réalisé à l'échelle de l'exploitation agricole en irrigué évolue du minimum de 4 639 Dhs/ha pour la culture du maïs ensilage, ayant un court cycle productif de 4 à 5 mois,) à la valeur au maximum de 26 344 Dhs/ha pour les plantations agrumicoles. Le système d'irrigation localisée, intervient dans l'accroissement de la marge nette agricole dans une gamme du taux de 16% pour le melon et de 18 % pour les céréales à élévations maximales en taux de 71% pour les agrumes et de 77% pour le maïs d'ensilage.

- ***Valeur ajoutée agricole***

Les cultures conduites sous l'irrigation gravitaire dégagent des valeurs ajoutées dans un intervalle de 6 759 Dhs/ha pour le maïs d'ensilage à 49 139 Dhs/ha en agrumiculture. Par ailleurs, l'irrigation localisée s'implique à augmenter davantage le taux de gain de 7% pour la culture de blés et à le multiplier par facteur de 1,24 fois pour les vergers des oliviers.

- ***Valorisation économique de l'eau d'irrigation***

L'eau d'irrigation se valorise économiquement sous le système gravitaire en son plus bas niveau de de 0,87 Dhs par le mètre cube d'eau en présence du maïs ensilage en passant à des niveaux plus élevés pour les cultures du melon, des agrumes et du maraichage (oignon) respectivement aux valeurs de 4,89 ; 4,09 et 4,03 Dhs/m³. La valorisation économique de l'eau est améliorée pour toutes les cultures en intégrant l'irrigation localisée, en réalisant un surplus par rapport à la technique du gravitaire de 20% pour le maraichage (oignon) jusqu'au multiple de 2,15 fois pour la spéculation oléicole.

II-Evaluation des besoins nets en eau actuels des cultures du périmètre de Tadla.

Les données des besoins nets en eau qui ont été déterminés pour les principales cultures du périmètre de Tadla par systèmes d'irrigation gravitaire et localisée, sont présentées d'une manière détaillée sur des canevas des calculs et les récapitulatifs au Tableau 75.

Tableau 75: Besoins nets en eau d'irrigation des principales cultures du périmètre de Tadla

(Campagnes de référence : 2014/2015 à 2017/2018)

Culture	Système d'irrigation	Campagne de référence	Rang annuel	Besoins nets en eau d'irrigation (mm)	Ecart entre système d'irrigation localisée (2)/gravitaire (1)
Céréales d'automne (Blés)	Gravitaire (1)	2016/2017	A3	445,30	-12%
	Localisée (2)	2016/2017	A3	391,20	
Betterva à sucre	Gravitaire	2014/2015	A1	575,83	-8%
		2015/2016	A2	514,34	
	Localisée	2014/2015	A1	491,82	
		2015/2016	A2	466,38	
Luzerne	Gravitaire	2016/2017	A3	845,09	-6%
	Localisée	2016/2017	A3	791,67	
Maïs ensilage	Gravitaire	2014/2015	A1	491,82	-7%
	Localisée	2014/2015	A1	458,44	
Agrumes	Gravitaire	2017/2018	A4	701,07	-7%
	Localisée	2017/2018	A4	652,79	
Oliviers	Gravitaire	2017/2018	A4	504,21	-5%
	Localisée	2017/2018	A4	479,65	
Maraichage (Pomme de Terre)	Gravitaire	2016/2017	A3	560,48	-12%
	Localisée	2016/2017	A3	494,80	

Les besoins annuels nets d'irrigation des cultures se situent dans la gamme de 445 à 845 mm par cycle productif cultural en cas du système d'irrigation gravitaire et de 391 à 792 mm/cycle productif en cas du système d'irrigation localisée. Les réductions d'eau correspondant sont donc de 5 à 12 % en passant du premier au deuxième système d'irrigation (Tableau 75).

Il est alors approuvé que le système d'irrigation localisée confère une relative meilleure performance par le rationnement dans le temps des besoins nets en eau pour les cultures à l'échelle parcellaire. Ceci étant avant l'exécution de l'opération de distribution d'eau au niveau de la parcelle agricole. Sachant que cette distribution intègre un complément d'eau pour la compensation de l'écart à l'origine de l'efficacité de la technique d'irrigation adoptée.

En fin du compte, le raisonnement déjà initié pour les besoins nets en eau des cultures sera parachevé ci-après en intégrant les besoins bruts en eau d'irrigation des spéculations agricoles envisagées.

III-Evaluation des besoins bruts en eau actuels de l'irrigation et les performances agronomiques liées à l'eau pour les cultures du périmètre de Tadla.

Il est objet d'exploiter les résultats des expérimentations des essais culturaux réalisés durant la période de 2014/2015 à 2017/2018 au niveau de la station expérimentale de référence nationale SEHA-Ouled Gnou, située au sein du périmètre irrigué du Tadla, dont les fiches des protocoles expérimentaux sont portées en annexe et les illustrations *in situ* sont sur les Figures 44-46.

En effet, ces essais ont permis d'aboutir à des caractérisations agronomiques spécifiques à l'utilisation de l'eau d'irrigation pour les principales cultures pratiquées dans le périmètre de Tadla. L'essentiel des résultats expérimentaux est évoqué ci-après pour chaque culture étudiée.

III-1- Caractéristiques agronomiques en relation avec l'eau pour les céréales d'automne

Les principaux résultats des essais en céréales d'automne sont sur le Tableau 76 avec illustration à la Figure 44.

Tableau 76 : Résultats des essais culturaux sur céréales d'automne dans la Station SEHA-Ouled Gnaou au périmètre de Tadla

Objectif de l'expérimentation	Référence de l'essai	Campagne agricole de	Résultats de l'essai		
			Volume eau irrigation (en m ³ /ha)	Rendement (en Qx/ha)	Efficiences agronomique d'utilisation eau irrigation EUE (en Kg/m ³ eau)
Comportement variétal	1 ^{er} Essai cultural	2016/2017	6 720	62,21 ± 1,01.	0,93 ± 0,01.
	2 ^{ème} Essai cultural	2017/2018	1 920	67,17 ± 2,33	3,50 ± 0,12.

Les céréales d'automne (blés) ont une productivité similaire pendant deux campagnes successives, soit de 62 à 67 quintaux à l'hectare, mais avec des exigences en eau d'irrigation très variables en raison de l'état très pluvieux de la campagne 2017/2018, ce qui s'est répercuté sur l'EUE fluctuant donc entre 1,0 à 3,5 Kg en grain de blé par mètre cube d'eau fourni par l'irrigation (Tableau 76).

III-2 Caractéristiques agronomiques en relation avec l'eau pour la betterave à Sucre

La culture de la betterave à sucre a été soumise au périmètre du Tadla à deux types d'expérimentation à savoir les suivantes (Figure 44):

- Comparaison de trois systèmes d'irrigation localisée, aspersion et gravitaire avec réalisation des essais culturaux en deux versions pendant les campagnes de 2014/2015 et de 2015/2016.

- Modalités du pilotage des irrigations de la culture de la betterave à sucre avec le système d'irrigation localisée, moyennant des tests de réduction d'eau par rapport aux exigences. Les essais culturaux ont été menés pendant les campagnes de 2016/2017 et de 2017/2018. Les aboutissements de ces expérimentations sont formulés ci-après

III-2-1 Comparaison des trois techniques d'irrigation sur la betterave à sucre

Les résultats des travaux de comparaison des trois systèmes d'irrigation appliqués à la betterave à sucre sont présentés dans le Tableau 77.

Tableau 77 : Résultats des essais culturaux des techniques d'irrigation sur la betterave à sucre à la Station SEHA-Ouled Gnaou au périmètre de Tadla (1^{ère} version)

	Système d'irrigation	Volume d'irrigation (m ³ /ha)	Produit: Racine		Produit: Sucre		
			Rendement (T/ha)	Efficience agronomique (Kg/m ³ eau)	Rendement (T/ha)	Efficience agronomique (Kg/m ³ eau)	
Indicateurs agronomiques	Localisée	5 400 a	64,92 a	12,02 a	11,89 a	2,20 a	
	Aspersion	6 110 b	61,05 ab	9,99 b	11,01 ab	1,80 ab	
	Gravitaire	8 950 c	59,48 b	6,65 c	10,26 b	1,15 b	
2014/2015	Ecart par rapport au système d'irrigation gravitaire	Localisée	-39,66%	9,15%	80,75%	15,89%	91,30%
		Aspersion	-31,73%	2,64%	50,23%	7,31%	56,52%
2015/2016	Indicateurs agronomiques	Localisée	5 170 a	75,00 a	14,51 a	13,17 a	2,55 a
		Aspersion	5 957 b	74,25 a	12,46 b	12,3 a	2,06 b
	Ecart entre les systèmes d'irrigation localisée et d'aspersion		-13,21%	1,01%	16,39%	7,07%	23,37%

Les analyses en guise de ces essais culturaux comparatifs sur la betterave à sucre à propos des techniques comparatives d'irrigation sont données ci-dessous.

a) Comparaison des trois techniques de systèmes d'irrigation : Gravitaire-Aspersion-Localisée

La culture de la betterave à sucre exige un volume d'eau d'irrigation de 5 400 à 8 950 m³/ha selon le système d'irrigation. Le système d'irrigation localisée économise effectivement de l'eau d'irrigation par rapport au gravitaire à 40% et reste presque similaire par rapport au système d'irrigation en aspersion.

Quant à l'efficience agronomique de l'utilisation de l'eau par la culture betteravière, elle varie de 6,7 à 12,0 kg/m³ d'eau en production racinaire et de 1,2 à 2,2 kg/m³ en production du sucre. En notant que comparé au gravitaire, le système du localisé réalise de meilleure performance aussi

bien qu'en produit racine (81 % de gain) qu'en produit sucre (+91 % de gain), suivi par la technique de l'aspersion avec des accroissements respectifs de 50 % et de 57% (Tableau 77).

b) Comparaison de deux techniques d'irrigation : Aspersion-Localisée

Dans cet essai à caractère répétitif pour la deuxième campagne par rapport à l'essai précédent, en se limitant aux deux systèmes d'irrigation à savoir goutte à goutte et l'aspersion, lesquels ont déjà attestés leur efficacité améliorée par rapport au système d'irrigation gravitaire. La culture de la betterave exprime un besoin en volume d'eau d'irrigation variant entre 5 170 et 5 957 m³/ha selon la technique d'irrigation.

Le système d'irrigation localisée approuve encore son aptitude à l'économie d'eau en un taux de gain de 13%. Quant à son efficacité agronomique d'utilisation de l'eau d'irrigation, elle est aussi plus avantageuse en production racinaire (+16 %) et en production du sucre (+23 %). Ceux-ci ont eu lieu malgré que les rendements (racine et sucre) étaient presque rapprochés pour les deux systèmes d'irrigation comparées (Tableau 77).



*1^{er} Essai cultural des céréales d'automne
(campagne 2016-2017)*



*2^{ème} Essai cultural des céréales d'automne
(campagne 2017-2018)*



*Système d'irrigation localisée
Essai cultural comparatif des systèmes d'irrigation sur betterave à sucre (2014-2015)*



Système d'irrigation par aspersion



*Système d'irrigation localisée
Essai cultural comparatif des systèmes d'irrigation sur betterave à sucre (2015-2016)*



Système d'irrigation par aspersion

Figure 44 : Illustrations sur essais culturaux de céréaliculture et de la betterave à sucre (expérimentations 1) réalisés dans la station SEHA-Ouled Gnaou (Périmètre de Tadla ; période : 2014-2018)

III-2-2 Effet de la réduction d'eau pour la culture de la betterave à sucre

Les résultats des expérimentations sur l'impact de la réduction d'eau au cours du cycle productif de la betterave à sucre sont présentés au Tableau 78 et en des images sur les lieux à la Figure 45.

Tableau 78 : Résultats des essais de la réduction d'eau sur la production de la betterave à sucre à la Station SEHA-Ouled Gnaou dans le périmètre de Tadla (2^{ème} version)

	Régime hydrique	Pluie (mm)	Volume eau irrigation (m3/ha)	Produit: Racine		Produit: Sucre	
				Rendement (T/ha)	Efficiences agronomique d'utilisation d'eau (kg/m3)	Rendement (T/ha)	Efficiences agronomique d'utilisation d'eau (kg/m3)
2016/2017	100% ETM	195,5	5 350,0	68,07 b	12,72 a	13,28 a	2,48 a
	90% ETM	195,5	4 890,0	60,02 ab	12,27 a	14,59 a	2,98 a
	80% ETM	195,5	4 430,0	57,27 a	12,93 a	10,92 a	2,47 a
	70% ETM	195,5	3 970,0	42,53 a	10,71 a	8,64 a	2,18 a
2017/2018	100% ETM	378,6	4 124,3	59,48 a	14,42 a	2,68 a	0,65 a
	90% ETM	378,9	3 769,3	60,66 a	16,09 ab	3,10 a	0,82 b
	80% ETM	378,6	3 414,4	61,44 a	18,0 ab	2,46 a	0,72 ab
	70% ETM	378,6	3 026,2	61,39 a	20,29 b	3,26 a	1,08 ab

A l'issue d'essais entrepris sur le système d'irrigation gravitaire, il a été constaté que la réduction de l'eau pour la betterave sucrière est susceptible d'abaisser le rendement racinaire, vu qu'une diminution de l'apport d'eau nécessaire de 30 % de l'ETM, induit la régression du tonnage produit de 68,1 à 42,5 T/ha, alors que le rendement en sucre reste indifférent à l'approvisionnement en eau.

L'efficience de l'utilisation d'eau par la culture betteravière (EUE), est significativement la meilleure sous le régime hydrique à 70% ETM pour le produit racine (20,3 Kg/m3) et pour le produit sucre. L'EUE reste irrégulière vis-à-vis la réduction de l'eau d'irrigation (Tableau 78).

III-3 Caractéristiques agronomiques en relation avec l'eau pour la Luzerne

Les résultats saillants des essais culturaux réalisés sur la culture fourragère la luzerne, sont présentés dans le Tableau 79 et sur Figure 45.

Tableau 79 : Résultats des essais culturaux sur luzerne

(Station SEHA-Ouled Gnaou, périmètre de Tadla)

Objectif de l'expérimentation	Campagne agricole	Volume eau irrigation (en m3/ha)	Résultats de l'essai			
			Rendement (en T/ha)		Efficience agronomique d'utilisation eau irrigation EUE (en Kg/m3 eau)	
			Matière fraîche	Matière sèche	Matière fraîche	Matière sèche
Comportement variétal	2016/2017	7 680	35,13 ± 0,29	8,48 ± 0,06	4,57 ± 0,04	1,10 ± 0,01



Essai de réduction hydrique sur betterave à sucre sous irrigation localisée (2016-2017)



Essai cultural de la luzerne (2016-2017)



1-Régime hydrique à 100 % ETM



2-Régime hydrique à 90 % ETM



3-Régime hydrique à 80 % ETM



4-Régime hydrique à 70 % ETM

Essai de réduction hydrique sur betterave à sucre sous irrigation localisée (2017-2018)

Figure 45 : Illustrations sur essais culturaux de luzerne et de la betterave à sucre (expérimentations 2) réalisés dans la station SEHA-Ouled Gnaou (Périmètre de Tadla ; période : 2016-2018)

La jeune luzernière installée d'âge seulement de 16 mois, a été soumise à 4 coupes durant la campagne d'essai et a exigé un volume d'eau d'irrigation sous le système d'irrigation gravitaire

de 7 680 m³/ha pour réaliser un rendement en frais de l'ordre de 35 T/ ha, correspondant à 8,5 T/ha en matière sèche et correspondant aux EUE respectives de 4,6 et 1,1 Kg/m³.

III-4 Caractéristiques agronomiques en relation avec l'eau pour la culture du maïs

Les résultats de deux essais culturaux sur le maïs à des fins de la production d'ensilage pour l'affouragement des animaux d'élevages (ovins et bovins), sont récapitulés dans le Tableau 80 et conjointement en des photos sur la Figure 46.

Tableau 80 : Résultats des essais culturaux sur le Maïs ensilage réalisés à Station SEHA-Ouled Gnaou, périmètre du Tadla

Campagne	Objectif de l'expérimentation	Variétés/ Régime hydrique	Pluie (en mm)	Volume eau irrigation (m ³ /ha)	Produit: Grain		Produit: Ensilage	
					Rendement (T/ha)	Efficienc e agronomique d'utilisation d'eau (kg/m ³)	Rendement (Qx/ha)	Efficienc e agronomique d'utilisation d'eau (kg/m ³)
2016/2017	Impact de réduction de l'eau	100% ETM	30,4	5 460	19,6 a	3,60 a	105 a	1,92 a
		125% ETM	30,4	6 590	22,4 b	3,40 a	118 a	1,79 a
		75% ETM	30,4	4 110	14,8 c	3,60 a	69 b	1,68 a
		50% ETM	30,4	3 170	11,0 d	3,47 a	47 c	1,48 a
National	Inscription au Catalogue	Précoces	25	1 056	55,26 a	52,33 a	21,39 a	20,26 a
	National	Tardives	25	1 152	75,22 b	65,30 b	26,25 b	22,79 b

La variation de l'apport d'eau à la culture du maïs par rapport à ses exigences normales sous conduite du système d'irrigation localisée, avec des volumes d'irrigation allant de 3 170 à 6 590 m³/ha s'est accompagnée dans le même sens par la fluctuation des niveaux des rendements en grain et en ensilage. Par ailleurs, l'efficience EUE a été maintenue constante pour les deux cas de la production en grain et d'ensilage du maïs (Tableau 80).

Il est aussi constaté que les variétés tardives du maïs ont les meilleures performances productives et elles valorisent agronomiquement mieux l'eau par apport aux variétés précoces (Tableau 80).



*Epis récoltés à la maturité en culture
du maïs d'ensilage conduite sous le système d'irrigation localisée*



Culture du maïs sous d'irrigation localisée



Disposition du système d'irrigation gravitaire

Essai de réduction d'eau pour culture du Maïs ensilage-grain (2017-2018)



*1^{er} Essai culturel de la Pomme de Terre
(2014-2015)*



*2^{ème} Essai culturel de la Pomme de Terre
(2017-2018)*

Essais culturels en culture de la Pomme de Terre

Figure 46 : Illustrations sur essais culturels du maïs et maraichage (expérimentations 3) réalisés dans la station SEHA-Ouled Gnaou (Périmètre de Tadla ; période : 2016-2018)

III-5 Caractéristiques agronomiques en relation avec l'eau pour le maraichage

Les résultats des essais culturaux de la spéculacion maraichère modèle la Pomme de Terre sont résumés au Tableau 81. Aussi des photos illustrant les expérimentation sur terrain sont sur la Figure 46.

Tableau 81 : Résultats d'essais culturaux sur la Pomme de Terre accomplis au niveau de la Station SEHA-Ouled Gnaou au périmètre du Tadla

Objectif de l'expérimentation	Référence de l'essai	Campagne agricole	Résultats de l'essai		
			Volume eau irrigation (en m ³ /ha)	Rendement (en T/ha)	Efficience d'utilisation d'eau EUE (en Kg/m ³)
Inscription au Catalogue Officiel National des variétés agricoles	1 ^{er} Essai	2014/2015	6 720	33,51 ± 0,55	4,55 ± 0,08
	2 ^{ème} Essai	2016/2017	7 680	35,82 ± 0,13.	4,66 ± 0,02.

L'exigence en eau d'irrigation par la Pomme de Terre en culture d'hivers et sous irrigation gravitaire est évaluée de 6 720 à 7680 m³/ha, en réalisant un rendement de 33,5 à 35,8 T/ha et une efficience d'utilisation d'eau qui est de l'ordre de 4,6 Kg/m³ d'eau (Tableau 81).

III-6-Ordres de grandeurs des efficiences agronomiques d'utilisation de l'eau par les cultures dans le périmètre du Tadla déterminées expérimentalement

Le récapitulatif des résultats des essais culturaux précités concernant les efficiences agronomiques d'utilisation d'eau d'irrigation (EUE) est présenté dans le Tableau 82.

Tableau 82 : EUE des cultures menées dans le périmètre de Tadla

(Période : campagnes agricoles de 2015 à 2018)

Cultures soumises aux expérimentations	Système d'irrigation	Efficience EUE (en kg/m ³)
Céréales d'automne	Gravitaire	0,93 à 3,5
Betterave à sucre	Gravitaire	0,65 à 2,48
	Localisée	2,20 à 2,55
	Aspersion	1,80 à 2,06
Luzerne	Gravitaire	1,10
Mais ensilage	Gravitaire	Précoce (frais) : 32,77 à 65,74
		Tardif (frais): 44,01 à 93,48
Maraichage (Pomme de Terre)	Gravitaire	4,55 à 4,66

L'efficience EUE pour une même culture avec même système d'irrigation reste plus dépendante aux conditions du déroulement de l'essai cultural, dont il est cité essentiellement pour les causes-à-effets météorologiques de chaque campagne agricole. Il est à noter, aussi, que cette efficience s'améliore davantage avec le système d'irrigation localisée sur culture de la betterave sucrière

(rendement sucre) et augmente avec le caractère tardif des variétés exploitées en culture du maïs destiné à l'ensilage (Tableau 86).

IV-Détermination de l'efficience d'application de l'eau à la parcelle pour les systèmes d'irrigation gravitaire et localisée au périmètre de Tadla

En se référant aux données déterminées ultérieurement concernant les besoins nets en eau d'irrigation pour les principales cultures conduites dans le périmètre de Tadla (Tableau 75) et en exploitant les résultats des expérimentations réalisées (Tableaux 76-81), il est évalué les efficacités comparatives des deux systèmes d'irrigation gravitaire et localisée, dont résultats sont cités au Tableau 83.

Tableau 83 : Besoins en eau bruts et efficacités des systèmes d'irrigation gravitaire et localisée pour les principales cultures conduites dans le périmètre de Tadla, en se référant aux enquêtes et expérimentations
(Campagnes de référence de 2014 à 2018)

Culture	Système d'irrigation	Campagne de référence	Rang annuel	Besoins bruts en eau d'irrigation		Efficacité du système d'irrigation	
				Volume d'eau (m3/ha)	Ecart entre système d'irrigation Localisée (2)/Gravitaire (1) (en %)	Rapport entre besoins nets et besoins bruts d'eau d'irrigation (%)	Ecart entre système d'irrigation Localisée (2)/Gravitaire (1) (en nombre de points)
Céréales d'automne (Blés)	Gravitaire (1)	2016/2017	A3	6 720	-37%	66,25%	26
	Localisée (2)	2016/2017	A3	4 240		92,26%	
Betterve à sucre	Gravitaire	2014/2015	A1	8 950	-43%	64,34%	32
		2015/2016	A2	9 640		53,35%	
	Localisée	2014/2015	A1	5 400		91,08%	
		2015/2016	A2	5 170		90,21%	
Luzerne	Gravitaire	2016/2017	A3	11 480	-27%	73,61%	21
	Localisée	2016/2017	A3	8 390		94,36%	
Maïs ensilage	Gravitaire	2014/2015	A1	7 680	-36%	64,04%	30
	Localisée	2014/2015	A1	4 878		93,98%	
Agrumes	Gravitaire	2017/2018	A4	10 000	-28%	70,11%	20
	Localisée	2017/2018	A4	7 230		90,29%	
Oliviers	Gravitaire	2017/2018	A4	6 800	-24%	74,15%	19
	Localisée	2017/2018	A4	5 158		92,99%	
Maraichage (Pomme de Terre)	Gravitaire	2016/2017	A3	7 680	-33%	72,98%	23
	Localisée	2016/2017	A3	5 130		96,45%	

Il est retenu que les cultures les plus exigeantes pour les besoins bruts en eau de l'irrigation à l'échelle parcellaire, quel que soit le système d'irrigation adopté sont : la luzerne (8 390 à 11 480 m3/ha), suivie par les agrumes (7 230 à 10 000 m3/ha) et ensuite la betterve à sucre (5 170 à 9 640 m3/ha). Les cultures les moins nécessiteuses en eau sont les céréales d'automne (4 240 à 6 720 m3/ha) et les plantations d'oliviers (5 158 à 6 800 m3/ha) (Tableau 83).

Il est à signaler qu'après calcul de l'efficience d'application de l'eau à la parcelle (rapport entre les besoins nets et les besoins bruts en eau de l'irrigation), il est démontré que la technique d'irrigation localisée réalise de meilleure efficience avec un taux allant de 90,3 % à 96,5 % par rapport à l'irrigation gravitaire dont le taux ne dépasse pas au maximum la barre de 74 % (Tableau 83).

V-Occupation du sol par les cultures et l'intensification culturale en relation avec la source d'eau d'irrigation au périmètre de Tadla

V-1-Occupation du sol par les cultures dans la globalité de la zone irriguée au périmètre de Tadla

La zone irriguée du périmètre de Tadla est un support d'occupations du sol par diverses cultures sur un total de superficie annuelle qui s'élève à 101 922 ha en campagne de référence de 2017/2018. La grande part de l'assolement (82,2 %) est prédominée essentiellement par les cultures des céréales d'automne, la luzerne et les oliviers en des contributions respectives de 22,8 % ; 26,8% et 21,76 % ; alors que les 17,8 % restant sont répartis entre les cultures d'agrumes (9,8%), la betterave à sucre (7,2%) ; le maraichage (0,7%) et le maïs ensilage (0,7%). Il est rapporté pour ce périmètre, qu'il est à son juste niveau requis de l'exploitation des assolements cultureux, sachant que le taux de l'intensification cultural (T.I.C) actuel est à sa valeur équilibrée de 1,04.

Par ailleurs, il est noté que les besoins bruts en eau d'irrigation pour l'essentiel des cultures irriguées afférentes au réseau hydro-agricole ont été évalués à environ 846 millions de m³ par an, dont la quasi dominance à 93 % des superficies incombe à la culture fourragère de la luzerne (36%), les plantations arboricoles fruitières (32%) et aussi aux céréales d'automne (36%) (Tableau 83).

Les prélèvements d'eau pour l'ensemble de la zone du réseau hydro-agricole (gravitaire et goutte à goutte), à partir des barrages locaux sont en campagne de 2017/2018 pour un volume annuel de 622 millions de m³ accordé par l'Agence du Bassin Hydraulique d'Oum Rbia (ORMVA du Tadla, 2020 b). Ce volume d'eau qui arrive à peine à couvrir les besoins bruts en eau des cultures de la zone réseau pour seulement les 73% des exigences. Le reste des besoins en eau non satisfaits (27%) est apporté par les agriculteurs pour combler le déficit, via le pompage sur place à partir de la nappe d'eau souterraine d'eau ou à défaut sont délaissées passivement les cultures aux faits réels des déficits hydriques inéluctables (Tableau 83).

Le volume annuel d'eau nécessaire à l'hectare assolé dans le périmètre du Tadla est estimé à 8 297 m³/ha, contre la dotation en eau du barrage pour volume de 6 003 m³/ha/an, l'écart à restituer donc est de 2 214 m³/ha/an, qui constitue alors le volume potentiel unitaire de pompage rapporté à la l'unité de la surface à exploiter en zone irriguée du réseau hydro-agricole (Tableau 84).

Tableau 84 : Assolements cultureux et intensification culturale en relation avec la source d'eau d'irrigation dans le périmètre du Tadla (Campagne de référence : 2017/2018).

Cultures	Superficie (en ha)	Part de la culture dans l'assolement	Besoins bruts totaux eau irrigation par culture	Eau de barrage		Eau de pompage de nappe souterraine		Volume total des besoins en eau d'irrigation à l'hectare assolé	Part maximale de contribution du pompage au volume eau irrigation exigée
				Dotation totale au périmètre	Dotation eau à l'hectare assolé	Potentiél total de complément eau exigée	Prélèvement eau par hectare assolé		
	(en ha)	(en %)	(en 1000 m ³)	(en 1000 m ³)	(en m ³ / ha)	(en 1000 m ³)	(en m ³ / ha)	(en m ³ / ha)	
Céréales d'automne	34 516	16,93%	209 374	620 000	6 083	225 646	2 214	8 297	27%
Betterave à Sucre	7 325	3,59%	60 021						
Luzerne	27 323	13,40%	300 660						
Mais Ensilage	90	0,04%	601						
Agrumes	9 966	4,89%	111 619						
Oliviers	22 031	10,81%	159 372						
Maraichage	671	0,33%	3 999						
TOTAL	101 922 (1)	100,00%	845 646						
Superficie zone réseau hydro-agricole équipée	98 300 (2)								
Taux d'intensification cultutal : T.I.C. [(1)/(2)]	1,04								

V-2-Evolution comparative de l'occupation du sol entre avant et après projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée selon les méthodes télédétection spatiale et statistique terrestre

Sur l'espace pilote au niveau des réseaux M4-M7 relevant du CDA 536 en zone d'action de l'ORMVA du Tadla, d'une superficie agricole utile (SAU) de 3 662 ha, , l'évolution de l'occupation du sol par les cultures entre avant et après projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée, a été approché d'une manière comparative par la méthode de la télédétection spatiale avec indice NDVI et par la méthode statistique terrestre, dont les résultats sont exposés et analysés ci-après.

En effet, les occupations du sol de la zone précitée pour les deux campagnes agricoles références de 2013/2014 et de 2017/2018 aux dates respectives du 17/07/2014 et du 15/07/2018, avec appui de cartes SIG suite au traitement d'images satellitaires Landsat_OLI8 avec indice NDVI sont présentées aux Figures 47 et 48.

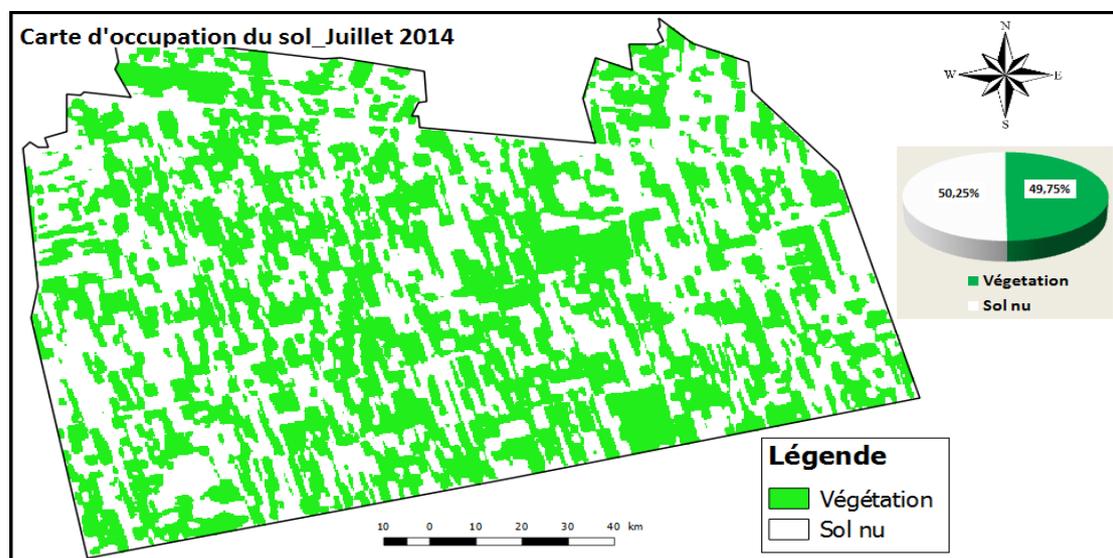


Figure 47 : Carte d'occupations du sol en mi-Juillet 2014 en zone des réseaux M4-M7 du périmètre de Tadla, en avant-projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée.

En passant de l'avant (année: 2014) à l'après (année: 2018) lancement de la reconversion collective à l'irrigation localisée en cette zone, le taux de l'occupation du sol par les cultures en date de mi-juillet a évolué de 49,75 à 59,80, % (Figures 47 et 48).

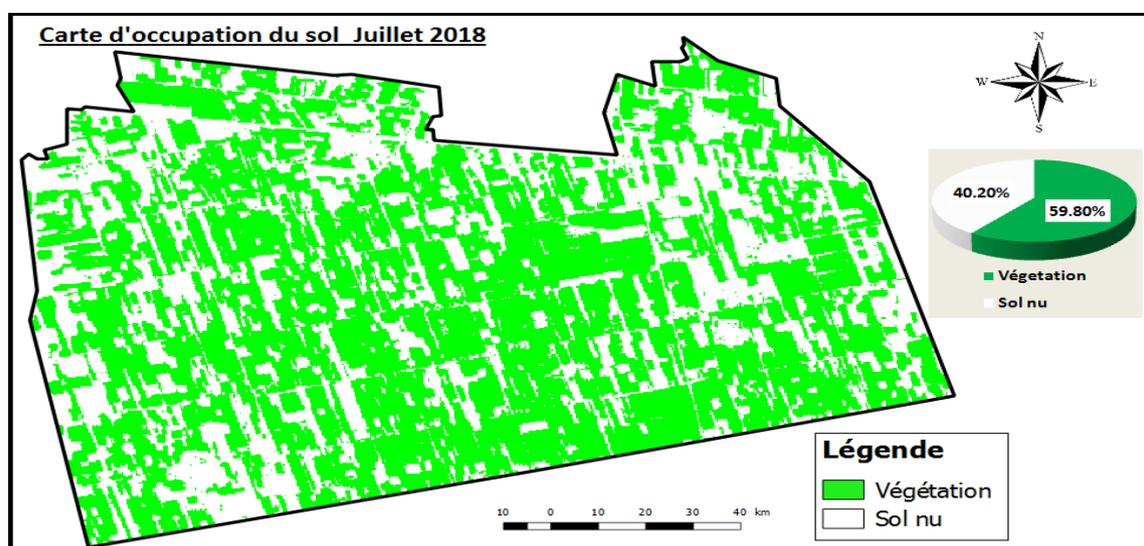


Figure 48 : Carte d'occupations du sol en mi-Juillet 2018 en zone des réseaux M4-M7 du périmètre de Tadla, en après-projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée.

Les analyses comparatives entre les deux méthodes de la télédétection spatiale et par les statistiques terrestres concernant l'évaluation de l'occupation du sol par les cultures sont rapportées dans le Tableau 85.

Tableau 85 : Occupations du sol entre avant/ après projet de reconversion collective à l'irrigation localisée par méthodes comparatives de la télédétection spatiale et des statistiques terrestres aux campagnes 2013/2014 et 2017/2018 sur la zone modèle des réseaux M4-M7 (périmètre de Tadla)

		Campagne 2013/2014			Campagne 2017/2018		
		Septembre- Avril (1)	Mai-Août (2)	Total emblavé [(1)+(2)]	Septembre- Avril (1)	Mai-Août (2)	Total emblavé [(1)+(2)]
Statistiques/CDA	Emblavements (en ha)	3 391	3 338	3 932	3 939	3 861	4 713
	Céréales d'automne	891	891	891	1 138	1 138	1 138
	Betterave	363	363	363	290	290	290
	Luzerne	689	689	689	816	816	816
	Mais	0	79	79	0	148	148
	<u>Plantations</u>	<u>844</u>	<u>854</u>	<u>844</u>	<u>842</u>	<u>842</u>	<u>842</u>
	Agrumes	339	348	339	336	336	336
	Oliviers	506	506	506	507	507	507
	Maraichage	604	461	1 065	852	626	1 478
	SAU	3 662	3 662	3 662	3 662	3 662	3 662
TIC (CDA)		1,07			1,29		
Télédétection spatiale par indice NDVI	Emblavements (en ha)						
	Occupation du sol par NDVI	2 119			2 547		
	Betterave à sucre restante	73			58		
	Nouveaux emblavements entre Mai-Août	503			831		
	Assolement total/campagne	3 894			- 4 769		
TIC (NDVI)		1,06			1,30		
Ecart entre statistiques CDA et Télédétection spatiale	Statistiques CDA (Mi-Juillet) (3)	2 157			2 491		
	Télédétection (Mi-Juillet) (4)	2 119			2 547		
	Ecart [(4)-(3)] en ha	-38			56		
	Ecart [(4)-(3))/(3)] en%	-1,75%			2,25%		

Il est constaté que l'occupation du sol est impacté par la technique de l'irrigation localisée, plus efficace, en substitut au système d'irrigation gravitaire, sur l'amélioration du taux de l'intensification cultural, qui est passé de 1,06 à 1,30. La méthode de la télédétection spatiale par indice NDVI s'est avérée pratique et plus précise, vu que l'écart relatif avec les données des statistiques terrestres n'a pas dépassé le faible taux de 2 % soit au sens d'augmentation ou au sens de diminution de la superficie mesurée (Tableau 85).

VI-Projections alternatives à long terme des besoins en eau des cultures au périmètre de Tadla

VI-1-Modalités des projections à long terme des précipitations et de l'évapo-transpiration dans le périmètre du Tadla.

Une vision futuriste en agriculture serait difficile pour de longue durée, notamment pour les prédictions des besoins en eau des cultures qui sont tributaires aux choix des assolements culturaux, des aléas pluviométriques, du contexte technologique en évolution et aussi aux tendances du marché pour la commercialisation des productions agricoles. A cet effet et en considérant aussi l'implication effective des changements climatiques pour les décennies ultérieures, il serait judicieux de tabler sur une durée minimale d'une trentaine à une quarantaine d'années prochaines raisonnable pour le secteur agricole du périmètre de Tadla.

Ainsi, l'horizon de l'an 2050 est fixé pour mener les investigations nécessaires pour établir les projections des précipitations et en évapo-transpiration de référence, moyennant le simulateur fiable et usuel pour l'espace marocain à savoir le système MOSAICC (FAO et INRA-Maroc, 2015). A travers les manipulations répétitives du dernier système, moyennant ses seize alternatives possibles, la sélection la plus favorable s'est portée sur la combinaison prévisionnelle la plus optimiste qui associe le scénario RCP 4.5 avec le modèle CANESM.

Les résultats essentiels de la démarche prévisionnelle agro-climatique sont les suivants :

<i>-Période de référence initiale</i>	: 2010-2020.
<i>-Période fixée des projections</i>	: 2050-2060.
<i>-Réchauffement thermique prétendu</i>	: Ecart positif de 1 à 3°C
<i>-Variabilité prévisionnelle des précipitations Annuelles</i>	: Réduction de 11 mm sur le cumul pluviométrique annuelle.
<i>-Variabilité prévisionnelle de l'évapo-transpiration de référence</i>	: 1 mm/jour sur la moyenne ETo journalière annuelle.

VI-2-Evaluations des projections à l'horizon 2050 des besoins nets en eau d'irrigation pour les cultures du périmètre du Tadla.

Les résultats précités des projections agro-climatiques ont été exploités dans les évaluations prévisionnelles des besoins nets en eau d'irrigation pour les principales cultures projetées à long-terme dans le périmètre de Tadla. Le détail des calculs est présenté aux tableaux en annexes et le récapitulatif des prévisions en question sont données au Tableau 86.

Tableau 86 : Situation actuelle et projections à l'horizon 2050 des besoins en eau d'irrigation pour principales cultures du périmètre de Tadla (Base de calculs simulatifs des campagnes de 2014/2015 à 2017/2018)

Cultures en irrigué	Situation actuelle				Situation projetée				Ecart à l'ETM		Ecart sur besoins nets eau irrigation	
	Période de référence: 2015-2018				Horizon de: 2050				[(2)/(1)]		[(3)/(4)]	
	ETo (mm)	ETM (mm) (1)	Pluie (mm)	Besoins nets eau irrigation (mm) (3)	ETo (mm)	ETM (mm) (2)	Pluie (mm)	Besoins nets eau irrigation (mm) (4)	Volume (mm)	%	Volume (mm)	%
Céréales d'automne												
Blés	666,88	560,72	239,90	445,30	849,86	714,57	230,78	617,79	153,85	27,44%	172,49	38,73%
Cultures industrielles												
Betterave à sucre	672,34	677,40	179,60	575,83	856,82	863,27	172,77	734,88	185,87	27,44%	159,05	27,62%
Cultures fourragères												
Luzerne	1 330,25	959,19	289,20	845,09	1 695,25	1 222,37	278,20	1 105,27	260,18	30,79%	260,18	30,79%
Mais ensilage	503,83	544,14	89,10	491,82	642,07	693,44	85,71	642,10	149,30	27,44%	150,28	30,56%
Arboriculture fruitière												
Agrumes	1 238,84	902,31	378,60	701,07	1 581,49	1 151,94	364,20	888,49	249,63	27,67%	187,43	26,73%
Olivier	1 238,84	664,56	378,60	504,21	1 581,49	848,40	364,20	715,49	183,85	27,66%	211,28	41,90%
Maraichage												
Pomme de Terre d'hivers	518,26	596,44	78,90	560,48	660,46	760,10	75,90	714,46	163,65	27,44%	153,98	27,47%

A l'horizon 2050, les besoins nets annuels en eau pour les principales cultures, en conduites sous le système d'irrigation gravitaire, seraient dans la gamme de **618 à 1 105 mm/an** (équivalents de 6 180 à 11 050 m³/ha/an) respectivement en des valeurs extrêmes pour les céréales d'automne et pour la luzerne. Les taux d'accroissement projetés de ces besoins hydriques par rapport à la situation de référence (période : 2014-2018) seraient dans un intervalle de **27 à 39 %** en des cas de limites inférieure et supérieure respectives des cultures du maraichage et des plantations agrumicoles. Les explications résident aux changements climatiques, qui s'impacteraient probablement en des augmentations effectives de l'ETM des cultures, qui ont été estimées pour taux ascendants simulés de **27 à 31%** en fonction des cultures considérées (Tableau 86).

VI-3-Projections à l'horizon 2050 des exigences en volumes d'eau d'irrigation par hectare assolé dans le périmètre irrigué de Tadla.

Compte-tenu des données antérieures abouties, les projections des besoins en eau d'irrigation des cultures du périmètre de Tadla, sont selon trois situations, à savoir la première situation de départ en adoptant les campagnes référentielles de 2014 à 2018, suivi du 1^{er} scénario des projection à l'horizon de l'an 2050 avec le maintien des cultures en conduite exclusivement sous le système

d'irrigation gravitaire sans sa reconversion et achevé avec le 2^{ème} scenario en des projections à l'an 2050 avec spécificité de la reconversion totale du système d'irrigation gravitaire par le système d'irrigation localisée (plus efficient).

Les données détaillées de ces situations alternatives sont portées dans les Tableaux 87-89 et les analyses synthétiques sont les suivantes :

*** Situation de départ :**

Les besoins bruts en eau d'irrigation pour les cultures en zone du réseau hydro-agricole avec le système d'irrigation gravitaire sont évalués à la moyenne de 8 356 m³ par hectare assolé, dont la contribution avec les eaux des barrages hydrauliques desservant le périmètre est pour volume de 6 083 m³/ha équipé, soit le taux de la couverture à 72,8% de ces besoins en eau.

***Situation projetée du 1^{er} scenario à horizon de l'an 2050:**

Les exigences en eau d'irrigation seraient pour un volume de 11 283 m³/ha assolé avec l'accroissement de 35% par rapport à la situation de départ.

***Situation projetée du 2^{ème} scenario à horizon de l'an 2050:**

A ce sujet, il est posé l'hypothèse qui consiste à l'achèvement total à l'horizon de l'an 2050 du processus déjà lancé au périmètre de Tadla depuis l'année 2015 en vue de la reconversion du système d'irrigation gravitaire en système d'irrigation localisée. A l'horizon de l'an 2050, il est prétendu le volume d'eau nécessaire à l'irrigation des cultures pour l'hectare assolé d'une moyenne de 7 831 m³, soit une diminution de 6 % par rapport à la situation actuelle de départ.

Toutefois, il persisterait encore le déficit à couvrir par la dotation en eau de barrage, mais avec un volume plus réduit d'une moyenne de 1 748 m³/ha, ce qui représente le taux de 22% du total dû en eau, contre un taux de 27 % exprimé par le système d'irrigation gravitaire en sa situation de départ (année : 2018). Ceci serait bien attendu en tenant compte des incidences à long-terme des changements climatiques au niveau du périmètre de Tadla (zone d'étude).

Tableau 87 : Situation de départ des besoins en eau d'irrigation pour les principales cultures conduites sous le système d'irrigation gravitaire en période de 2014-2018 sur la globalité du périmètre de Tadla

	Superficie par culture	Besoins unitaires nets en eau irrigation	Efficace du système d'irrigation	Besoins unitaires bruts en eau irrigation	Besoins totaux bruts en eau irrigation par culture	Besoins totaux bruts en eau irrigation	Volume total des besoins en eau irrigation à l'hectare assolé	Volume total d'eau irrigation accordée	Volume accordé en eau à l'hectare assolé	Volume déficit en eau à l'hectare assolé (pompage)	Volume total du déficit en eau (pompage)
Cultures	(en ha)	(en m3/ha)	en %	(en m3/ha)	(en Millions m3)	(en Millions m3)	(en m3/ha)	(en Millions m3)	(en m3/ha)	(en m3/ha)	(en Millions m3)
Céréales d'automne	33 416	4 453	66%	6 722	224,6	735,0	8 355,6	535	6 083	2 273	199,9
Betterave à Sucre	6 575	5 758	64%	8 950	58,8						
Luzerne	26 123	8 451	74%	11 481	299,9						
Mais Ensilage	50	4 918	64%	7 680	0,4						
Agrumes	876	7 011	70%	10 000	8,8						
Oliviers	20 703	5 042	74%	6 800	140,8						
Maraichage	221	5 605	72%	7 736	1,7						

Tableau 88 : Projections à long-terme des besoins en eau d'irrigation pour les principales cultures sur la globalité du périmètre de Tadla en comparaison avec la situation actuelle de référence aux campagnes de 2014/2015 à 2017/2018

Situation projetée au scenario 1 : Cultures maintenues sous le système d'irrigation gravitaire en période de 2040-2050

	Superficie par culture	Besoins unitaires nets en eau irrigation	Efficace du système d'irrigation	Besoins unitaires bruts en eau irrigation	Besoins totaux bruts en eau irrigation par culture	Besoins totaux bruts en eau irrigation	Volume total des besoins en eau irrigation à l'hectare assolé	Volume total d'eau à accorder	Volume à accorder d'eau à l'hectare assolé	Volume déficit en eau prévu à l'hectare assolé (pompage)	Volume total prévisionnel du déficit en eau (pompage)
Cultures	(en ha)	(en m3/ha)	en %	(en m3/ha)	(en Millions m3)	(en Millions m3)	(en m3/ha)	(en Millions m3)	(en m3/ha)	(en m3/ha)	(en Millions m3)
Céréales d'automne	33 416	6 178	66%	9 325	311,6	992,5	11 283,0	535	6 083	5 200	457,4
Betterave à Sucre	6 575	7 349	64%	11 422	75,1						
Luzerne	26 123	11 053	74%	15 015	392,2						
Mais Ensilage	50	6 421	64%	10 027	0,5						
Agrumes	876	8 885	70%	12 673	11,1						
Oliviers	20 703	7 155	74%	9 649	199,8						
Maraichage	221	7 145	72%	9 861	2,2						

Tableau 89 : Projections à long-terme des besoins en eau d'irrigation pour les principales cultures sur la globalité du périmètre de Tadla en comparaison avec la situation actuelle de référence aux campagnes de 2014/2015 à 2017/2018.

Situation projetée au scenario 2 : Equipements des parcelles des cultures en l'après reconversion totale du système d'irrigation gravitaire en système d'irrigation localisée à l'horizon de l'an 2050

	Superficie par culture	Besoins unitaires nets en eau irrigation	Efficace du système d'irrigation	Besoins unitaires bruts en eau irrigation	Besoins totaux bruts en eau irrigation par culture	Besoins totaux bruts en eau irrigation	Volume total des besoins en eau irrigation à l'hectare assolé	Volume total d'eau à accorder	Volume à accorder d'eau à l'hectare assolé	Volume déficit en eau prévu à l'hectare assolé (pompage)	Volume total prévisionnel du déficit en eau (pompage)
Cultures	(en ha)	(en m3/ha)	en %	(en m3/ha)	(en Millions m3)	(en Millions m3)	(en m3/ha)	en Millions m3	(en m3/ha)	(en m3/ha)	(en Millions m3)
Céréales d'automne	33 416	5 423	92%	5 878	196,4	688,8	7 830,9	535	6 083	1 748	153,7
Betterave à Sucre	6 575	5 952	91%	6 535	43,0						
Luzerne	26 123	10 354	94%	10 973	286,7						
Mais Ensilage	50	5 985	94%	6 369	0,3						
Agrumes	876	8 273	92%	8 964	7,9						
Oliviers	20 703	6 806	92%	7 399	153,2						
Maraichage	221	6 307	96%	6 539	1,4						

DISCUSSIONS

Les résultats constatés des fréquences respectives des précipitations annuelles en des années sèches, normales et humides de : 33% ; 35% et 32%, obtenus par des méthodes d'intervalles de confiance et d'indice IPS sont trouvés relativement comparables par rapport aux résultats antérieurs traitant la même thématique, couvrant soit partiellement ou soit totalement la même zone d'étude, selon Jouilil et *al.* (2013) sur la période de 1975 à 2009 et selon Krimissa et *al.* (2017) sur la période d'observations de 1982 à 2015.

Le constat de la tendance du régime pluviométrique en baisse, décelé par le test de Mann-Kendall et par le test de Sen's, se confirme par les travaux similaires sur large étendue de la zone du bassin hydraulique d'Oum Er Rbia par Jouilil et *al.* (2013) et sur le grand territoire du Maroc septentrional par Sebbar et *al.* (2011), y compris notre zone d'étude.

La précision de l'étude de tendance des précipitations par méthode de pondération avec moyenne mobile au filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, ayant identifié une période pluviométrique transitoire de 1980 à 1987 avec des alternances irrégulières d'années sèches, normales et déficitaires, est bien confirmée par Krimissa et *al.* (2017) sur l'intervalle-temps de 1982 à 2006, concernant la tendance des pluies dans la zone Est du bassin hydraulique Oum Er Rbia, pour de ratios comparatifs des années sèches par rapport aux années à pluviométrie normale.

Le taux de réduction de la pluviométrie constaté par notre étude de 36% est plus élevé par rapport à celui rapporté par Sebbar et *al.* (2011) de 8 à 15 % sur la même zone d'étude, qui s'explique par les décalages sur la période d'observations et aussi pour les étendues différentes de ses périodes identifiées d'avant-rupture de 1935 à 1977 (43 années) et en après-rupture de 1978-2004 (27 années) . Par contre en notre propre cas, la période d'observations de 1958 à 2018 s'est éclatée en deux périodes d'avant et d'après rupture de séries chronologiques des pluies de 1958 à 1978 (20 années) et de 1979 à 2018 (40 années).

A propos des ruptures chronologiques pluviométriques détectées qui sont centrées sur l'année de 1978, suite à nos tests d'homogénéité, elles se ne confirment pas avec celles de Krimissa et *al.* (2017) portant sur une période observée plus récente de 1983 à 2015 sur l'Est du bassin hydraulique Oum Er Rbia. Nos résultats sont comparables avec ceux de Sebbar et *al.* (2011) à propos de la rupture en régime des pluies sur la décennie des années 1980. Les mêmes tendances à la baisse de la pluviométrie ont été déjà rapportées au Nord-Ouest algérien entre fin des années 1960 et début des années 1970 (Taibi et *al.*, 2013 ; Ghenim et *al.*, 2010). Egalement les cas en Afrique Occidentale, les ruptures ont été a priori identifiées au haut bassin versant du Sénégal

(Faty et *al.*, 2017) et aux zones du Centre et du Sud de la Côte d'Ivoire (Fossou et *al.*, 2015 ; Ahoussi et *al.*, 2013).

Notre interpolation spatiale de la répartition pluviométrique dans la zone d'étude, avec ses quatre sous-zones homogènes, concorde effectivement avec la carte des précipitations annuelles du Maroc établie par El Ajhar et *al.* (2018) pour la période de 1960-2015, avec un semblable positionnement du périmètre de Tadla (zone d'étude) entre les isohyètes de 200 à 300 mm/an.

A propos des périodicités intra-annuelles des précipitations, nos constats de tendance de la diminution des pluies par mois entre Novembre et Juin, concordent avec ceux de Hanchane (2013) pour les régions continentales marocaines à climat semi-aride (y compris la zone d'étude) et précisément pour les deux mois de Mars et de Juin. En outre, des travaux de recherche analogues de Norrant et Douguédroit (2004) ont précédemment décelé de telle tendance aux mois d'Octobre, Novembre et Mars au Sud français sur le large bassin méditerranéen du fleuve de Rhône. A citer aussi des similitudes observées de la diminution progressive des pluies mensuelles au Nord du territoire algérien (Hebal et Remini, 2012).

Quant à notre seul constat de la tendance significative d'accroissement pluvieux au mois de Septembre au début de l'année agricole, il n'a été nulle part signalée sur le territoire marocain ou aux niveaux de pays méditerranéen de proximité selon de la bibliographique en la matière disponible et consultée.

Concernant les saisons de l'année, sachant que nos travaux ont montré une réduction significative des pluies aux trois trimestres: Décembre-Janvier-Février, Mars-Avril-Mai et Juin-Juillet-Août, le constat se confirme avec résultats de Driouech (2010) sur la globalité du territoire marocain pour uniquement la saison d'hivers et pour les quatre saisons prises individuellement d'une manière restreinte à l'extrême Nord marocain en région de Tanger et à en plaine du Saïs (région de Meknès-Fès). La même tendance a été relevée par Sebbar et *al.*, (2011) en zone du Centre du Maroc pour l'hivers et le printemps, mais à l'inverse avec une légère augmentation des pluies en saison d'automne. Les faits constatés sont identiquement relevés sur l'espace algérien pour le Centre et Nord-Ouest rapportés par Hebal et Remini (2012) et au Nord selon Touhami (2017).

Considérant la périodicité du semestre, dont nos travaux affichent le repli pluviométrique, est conforme à ce qui a été détecté pour l'hivers étendu (Octobre-Mars) suite à l'étude climatique de Driouech (2010) sur la globalité du territoire marocain.

Au pas annuel des précipitations qui est en cadence de la régression selon notre étude sur le périmètre de Tadla, a été aussi rapportée sur le territoire marocain presque similaire par Driouech (2010). Par ailleurs, cette tendance est qualifiée aux zones du Centre du Maroc par Sebbar et *al.*

(2011) d'une manière irrégulière, voir avec des contrastes en amplitude (augmentation ou diminution). Aussi, la tendance à la baisse des cumuls annuels des pluies est soulevée en de diverses zones marocaines semi-arides à caractère continental par Hanchane (2013) au Nord algérien par Hebal et Remini (2012) et par Taibi et al. (2013) au Centre-Nord algérien par (Touhami, 2017) et également en Afrique occidentale auprès de la vaste région agricole d'Abidjan-Agboville en Côte d'Ivoire par Ahoussi (2013).

Par ailleurs, l'approche menée de la régionalisation de tendance périodiques des précipitations par la méthode de l'ACP, ayant abouti à deux zones géographiques pluvieuses homogènes, trouve sa confirmation concernant Sebbar et al. (2011), qui ont identifié cinq zones climatiques au centre du Maroc en une tendance négative des précipitations de l'hiver et du printemps, où notre zone d'étude s'y intègre complètement. D'une manière analogue, pour la zone du bassin versant du Tensift au voisinage de la zone d'étude, comportant quatre sous-zones à contrastes pluvieux annuels plus marquants, rapportés par Salama (2011).

Aussi, il est à noter pour la région du Nord algérien un gradient de dessèchement pluviométrique en allant d'Est en Ouest (Hebal et Remini, 2012), mais dans le sens inversé par rapport à notre constat au présent travail de recherche, avec un gradient de baisse de la pluviométrie annuelle dans la direction Ouest-Est. En signalant que l'espace algérien se subdivise sur lui-même en six régions pluviométriques homogènes (Taibi et al., 2013). Comparativement, au sujet de la pluie mensuelle, l'espace du Sud-Est méditerranéen français comporte trois régions homogènes (Norrant et Douguédroit, 2004), contre deux sous-zones qu'on a identifiées sur notre zone d'étude.

A propos de la périodicité des pluies du semestre, les résultats de nos travaux se confirment avec ceux aboutis en région algérienne semi-aride du bassin versant de la Macta concernant la baisse pluviométrique graduelle des précipitations en se déplaçant du Nord vers le Sud (Chibane et al., 2015). D'une manière conforme, nos constats rejoignent les cas soulevés en régions du Centre et du Nord-Ouest algériens présentant eux aussi trois premières saisons de l'année agricole avec la baisse pluvieuse et des sous-délimitation en cinq sous-espaces géographiques homogènes pour la tendance pluviométrique saisonnière (Touhami, 2017).

Il y a une concordance dans les résultats trouvés par rapport aux données sur l'Afrique Occidentale à propos de la régionalisation cartographiée de la tendance pluviométrique par la méthode d'ACP. Ainsi, trois grandes régions ont été auparavant jalonnées pour les saisons sèches de l'année sur les territoires de divers pays de cette grande zone africaine (Khodja, 1998). Le cas modèle de la Côte d'Ivoire avec ses trois zones de la région d'Abidjan-Agboville qui se caractérisent par le déclin annuel progressif des précipitations (Ahoussi, 2013). Au niveau de ce

dernier pays, avec une cadence de pluie mensuelle vulnérable à la baisse sur l'étendue bassin versant du N'Zi, il est récemment identifié de même deux zones homogènes pluviométriques (Koudou, 2015).

Après la rupture chronologique thermique repérée en campagne 1994/1995 au périmètre du Tadla, qui marque le passage de la température annuelle moyenne de 18,7 à 19,7 °C en 2017/2018 en enregistrant une anomalie du réchauffement de 1 °C ; il y a coïncidence avec la même date et pour le même accroissement de la température à l'échelle mondiale (Lenssen et al., 2019).

L'évapo-transpiration de référence qui est l'indicateur adopté pour le rapprochement effectif au comportement du végétal en réaction avec ses exigences en eau (Doorebos et Pruitt, 1977; Doorebos et Kassam, 1979 ; Alien et al. 1998), ayant évolué dans le périmètre du Tadla après rupture chronologique en 1977/1978, avec un taux de progression de 12,5 % ; est trouvé plus proche du taux de 11,4% constaté en zone du Centre tunisien sous le même climat semi-aride (Hajri, 2006).

Le bilan hydrique (entre ETo et les précipitations efficaces) qui évolue en zone d'étude après la rupture chronologique de 1977/1978 pour sa valeur déficitaire de 805 à 1 093 mm/an, est comparable dans le même sens de l'évolution en région méditerranéenne de la Sardaigne en Italie durant la période de 1951 à 2010, où le déficit d'eau s'est aussi accentué de 899 à 2 544 mm/an (Pulina, 2012). En se référant à la classification bioclimatique avec ses six étages pour la zone méditerranéenne (E.M.) basée sur le bilan hydrique (Gammar et Hlaoui, 2012), le périmètre de Tadla qui fait contraste entre l'avant et l'après rupture de 7 à 10 mois en non satisfaction de point de vue hydrique, évolue alors dans une translation de la zone d'étude du 3^{ème} Etage E.M. Semi-aride (sous-étage supérieur) au 5^{ème} Etage E.M. Aride.

A l'issue des diagrammes ombro-thermiques de Gaussen obtenus après la rupture sur la tendance de la température moyenne en année de 1994/1995 et ayant montré que l'extension de la période sèche passait de 6 mois à 8 mois, implique selon la classification usuelle afférente (Gaussen et Bagnouls, 1957), que notre zone d'étude bascule actuellement du climat thermo-méditerranéen vers le climat xérothermo-méditerranéen, dans un sens d'accroissement de l'aridité du milieu agro-écologique.

L'indice d'aridité de De Martonne (I.M.) au périmètre de Tadla a régressé après la rupture tendancielle en 1987/1988 de 11,2 à 8,6 points. En se référant à la classification climatique selon cet indice (De Parcevaux et al, 1990), la zone d'étude qui a été répertoriée auparavant au-dessus de la limite inférieure de la classe bioclimatique semi-aride (I.M. : de 10 à 20 unités) se déplace vers la limite supérieure de la classe bioclimatique aride (I.M : de 5 à 10 unités).

Avant la rupture thermique de 1994/1995, le périmètre de Tadla avait un quotient d'Emberger de l'ordre de 28 unités et qui se positionne après rupture temporelle à la valeur 38 unités . Par conséquent et avec la référence à la classification bioclimatique tablée sur ce quotient (De Parcevaux et *al.*, 1990), le périmètre (zone d'étude) régresse depuis la limite supérieure vers le centre de la classe aride, sachant l'intervalle en Q.E pour cette classe est de 12 à 30 ; approuvant encore une accentuation du phénomène de l'aridité depuis plus de deux décennies.

L'efficience agronomique de l'utilisation d'eau (EUE) par les spéculations de nos essais culturaux en station expérimentale, relevée pour les céréales d'automne dans le périmètre de Tadla à des niveaux de 0,96 à 3,50 Kg/ m³ d'eau, s'avère plus améliorée par rapport aux données des enquêtes sur ce même périmètre de Bouaziz et Belabbes (2002), pour des valeurs de l'EUE de 0,70 à 1,80 Kg/ m³. Quant à la betterave à sucre, les EUE constatées respectivement pour les systèmes d'irrigation gravitaire, localisée et aspersion sont de 0,65 à 2,48 ; de 2,20 à 2,55 et de 1,80 à 2,06 Kg/m³ et qui sont comparables aux résultats des essais culturaux réalisées sur le même site en campagnes de 2011/2012 à 2013/2014 avec des EUE moyennes correspondantes de 1,16 à 1,69 ; de 2,28 à 3,26 et de 1,82 à 2,48 Kg/m³ (ORMVA du Tadla, 2019).

Pour la culture de la luzerne, son EUE trouvée en expérimentation sur le système d'irrigation gravitaire de 1,10 Kg/m³ d'eau, se compare aux alentours des données en la même zone par Bouzama et *al.* (2015) en une EUE de 1,44 à 1,46 Kg/m³. Au sujet de la culture du maïs pour l'ensilage, en tenant compte de teneurs en matière sèche sur les rendements en frais de 30 à 35 % selon les normes en vigueur (Ait Houssa et *al.*, 2008), l'EUE de nos essais culturaux qui varie entre 32,77 et 83,48 Kg/m³, s'avère plus importante par rapport aux résultats des expérimentations de Bouzama et *al.* (2013) dans la même zone en 2008/2009 et en 2009/2010 avec EUE déterminée sur matière sèche de la productivité culturale de 2,85 à 2,99 Kg/m³. L'explication de cet écart réside à la faiblesse des volumes d'eau d'irrigation utilisés dans nos expérimentations (de 1 052 à 1 056 m³/ha) contre les volumes d'eau afférents aux auteurs précités (de 5 350 à 6 190 m³/ha).

La valorisation économique de l'eau d'irrigation constatée dans notre étude est plus améliorée en cas d'adoption du système d'irrigation localisée par rapport au système d'irrigation gravitaire ; avec des données pour ce dernier système plus proches de celles rapportées par Lionboui (2018) pour la culture du maïs fourrager (1,3 Dhs/m³), pour les plantations des agrumes (3,5 Dhs/m³) et pour les vergers oliviers en irrigué (1,4 Dhs/m³).

A l'issue de nos projections de l'ETo au niveau du périmètre de Tadla, où la moyenne annuelle passerait de 3,6 à 4,6 mm/jour à l'horizon de l'an de 2050, soit à un écart journalier de 1

mm/jour, correspondant au taux d'accroissement de 27%, obtenu selon le Modèle MOSAICC (FAO et INRA-Maroc, 2015) ; il y a une convergence avec les projections du projet « Explore » à l'horizon de l'an de 2070 qui projette pour la zone modèle des bassins de Rhône-Méditerranée et de la Corse, à l'Ouest-méditerranéenne, une augmentation de l'ETo de l'ordre de 20% à l'horizon de 2046 à 2065 (MEDDE-France, 2012).

Les besoins en eau d'irrigation pour les cultures du périmètre de Tadla conduites sous le système d'irrigation gravitaire, qui sont selon nos projections à l'horizon 2050 de 8 356 à 11 283 m³/ha assolé, soit un écart supplémentaire exigé en eau de 2 927 m³/ha qui reste dans les grandeurs des projections pour la zone du bassin versant du Rhône au Sud de la France sur rive Nord-Méditerranéenne pour de tels besoins qui augmenteraient à l'horizon 2070-2100 en un écart moyen annuel dans la gamme de 730 à 2 560 m³/ha (Dayon, 2015).

Par ailleurs, les projections des besoins en eau pour l'irrigation des cultures du périmètre de Tadla en conduites sous système d'irrigation localisée à l'horizon 2050 et avec l'alternative d'avoir reconverti la totalité de la superficie actuelle en cette nouvelle technique d'irrigation en substitut à l'actuel mode moins efficient de l'irrigation gravitaire, en prédiction de volume moyen annuel de 7 831 m³/ha, soit une diminution relative de 6 % par rapport aux besoins initiaux de 2018. Notre cas est plus optimiste par rapport à la référence à l'échelle mondiale, où il est prétendu à l'horizon 2050 la réduction de 17 % des ressources en eau à allouer à l'irrigation en agriculture, qui serait à l'origine probable de la forte concurrence des autres secteurs économiques prépondérants, en premier lieu les activités industrielles et les productions énergiques, en étroite relation avec l'augmentation soutenue à long terme de la démographie humaine du globe terrestre (OCDE, 2012).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La caractérisation des changements climatiques en relation avec l'eau en agriculture en milieu à bioclimat semi-aride vulnérable à la raréfaction hydrique, a été appréhendée sur le modèle du périmètre de Tadla. Sachat que ce dernier espace, est un support d'excellence pour une agriculture potentielle irriguée en mode intensif, cependant il est assujettie à des contraintes récurrentes des disponibilités en eau pour l'irrigation.

En effet, ce périmètre de référence, situé en plein centre continental marocain, a fait l'objet d'un système intégré d'étude de la tendance agro-climatique se rapportant aux : variabilité des distributions des données enregistrées, analyses d'homogénéité chronologiques des séries des mesures, analyses multivariées de la pluviométrie, évolution des valeurs des indices climatiques usuels et aussi exploitation des cartographies spatio-temporelles des paramètres afférents au climat. Ceux-ci ont permis de cerner la démarche scientifique sur le facteur eau dans son aspect climatique, en se focalisant sur les indicateurs annuels et saisonniers de la pluviométrie, sur la température ambiante, sur l'évapo-transpiration de référence ainsi que sur les indices conventionnels pour le suivi de l'aridité d'un espace agro-écologique.

En l'occurrence et à travers l'exécution des analyses précitées, il a été concrétisé pratiquement la convenance et les inter-complémentarités des diverses méthodes adoptées. Il s'agit en effet des tests de rupture chronologique, non paramétriques et fiables (Test de Pettitt, test de Lee et Heghinian, test Buishand, segmentation d'Hubert). Aussi ont été impliquées les méthodes statistiques tendanciennes sur les séries temporelles (Test de Mann-Kendall couplé au test de Sen's), la méthode des intervalles de confiance sur l'évolution des pluies. A cet effet, Il a été question d'emploi des indices pluviométriques à usage universel, tel le cas pour l'Indice Standardisé des Précipitations (ISP) en ses deux versions, l'une de base et l'autre plus finalisée selon la méthode de la pondération pluviométrique en des moyennes mobiles avec le filtre passe-bas de Hannig d'ordre 2.

L'achèvement du processus méthodologique se trouve contraint d'être complété par l'étude de la saisonnalité intra-annuelle des pluies par la méthode de l'ACP. En vue de pousser davantage les analyses des résultats des méthodes sus-indiquées, il s'est aussi imposé d'ordre opportun de faire des comparaisons entre les situations de l'avant et en après-rupture des séries agro-climatiques, concernant les évolutions spatiale et dans le temps du phénomène de l'aridité,

moyennant l'indice de De Maritonne, l'indice d'Emberger et les Diagrammes Ombro-thermiques de Gaussen.

Les résultats aboutis ont montré qu'au niveau du périmètre de Tadla, il y a une catégorisation des pluviométries annuelles en des fréquences équitables entre les années déficitaires (33% des cas), les années normales (35%) et les années excédentaires (32%). Il est essentiellement retenu pour cette zone semi-aride modèle que les précipitations sont dans une perpétuelle tendance à la baisse. En effet, il est montré l'existence de deux périodes distinctes, séparées par l'année de clivage chronologique de 1978. Le taux de réduction pluvieux après cette rupture est évalué au taux moyen de de 36 %. Plus encore, la configuration géographique de la variabilité spatio-temporelle pluviométrique a mis en évidence un gradient d'accroissement des précipitations dans le sens Ouest-Est pour le périmètre de Tadla. En l'occurrence, après la rupture précitée, un front de dessèchement pluvieux est identifié et qui touche d'une manière uniforme le territoire régional observé, avec pour constat plausible le déplacement des isohyètes selon une ampleur déterminée de $\Delta=135$ mm/an.

Quant à la saisonnalité des précipitations, sa variabilité qui a été élucidée au périmètre de Tadla, a révélé que pour la majorité des moins de l'année, au nombre de 9 sur 12, affiche des fluctuations significatives pour les pluies mensuelles. Ce qui a été constaté dans le sens de la hausse pour l'unique mois de Septembre, alors que pour les autres huit mois, pris au singulier, de Novembre à Juin, le sens est inversé à la basse pluviométrique. Concernant, les trois mois restants d'Octobre (en mi-saison automnale) et de Juillet-août (en fin saison estivale), le niveau des précipitations persistent à l'état constant entre la fin des années cinquante du dernier siècle jusqu'à la fin de l'année de 2018. De point de vue spatio-temporelle, la saisonnalité des précipitations du périmètre étudié est spécifiée en deux groupes homogènes, dont le premier groupe est le représentant de sa partie Ouest, identifiable aux deux variables-mois de Septembre et de Juin, le deuxième groupe est la caractéristique de sa partie Est pour la large combinaison suivante en : des deux variables pluvieuses mensuelles de Décembre et d'Avril, de la variable trimestre « Mars-Avril-Mai » et aussi en intégrant des deux variables-semester en humide (Septembre-Février) et en sec (Mars-Août).

A l'instar des précipitations, des ruptures chronologiques ont été déterminées pour les autres paramètres agro-climatiques à savoir : la température minimale en 1989, la température maximale en 1997, la température moyenne en 1995, l'évapo-transpiration de référence en 1978 et l'indice d'aridité de De Maritonne en 1988. Ainsi, Il a été abouti d'une manière plus avancée à caractériser les manifestations des changements climatiques, à l'issue des ruptures

chronologiques sus-mentionnées, en indiquant essentiellement le réchauffement de l'air de 1°C. En conséquence, il est constaté une accentuation du déficit du bilan hydrique au sol au périmètre de Tadla, plus propice entre les mois de Mars à Août, en impactant alors la régression du cumul annuel de ce bilan de la valeur de - 805 à la valeur de - 1 093 mm/an. Il est, en effet, observé un allongement anormal de la période sèche annuelle de 43 jours supplémentaires et aussi l'augmentation relative de l'aridité du périmètre, sachant que l'indice de De Maritonne a évolué à la baisse de 11,2 à 8,6 unités et le Quotient d'Emberger est de même passé de 27,8 à 18,7 unités.

En conséquence, les relations entre les changements climatiques et le facteur eau sont effectivement argumentés par les résultats précités. Dans cette optique, les besoins en eau d'irrigation pour les principales cultures conduites sous l'actuel système d'irrigation gravitaire moins efficient et plus dominant au périmètre de Tadla, subiraient à long terme (à horizon de l'an 2050), si aucune mesure structurante n'est prise, une augmentation excessive pourrait probablement en volume exigé en eau de 8 356 à 11 283 m³ rapporté à l'hectare assolé, correspondant à un important écart vers la hausse au taux de 35%.

Il se profile alors la crise latente à satisfaire des exigences de plus en plus accrues en eau d'irrigation des cultures, ce qui se conjugue avec la tendance de la raréfaction de ressources en eaux mobilisables sur le milieu agricole, fortement tributaires à un régime pluviométrique régional en sa phase de dérèglement défavorable. La situation est sans doute susceptible d'empirer davantage avec le maintien du système d'irrigation classique gravitaire, plus gaspillant d'eau. Il serait donc opportun de concentrer ultérieurement les efforts pour achever à terme le projet lancé de la reconversion de l'ancien système d'irrigation classique par le système d'irrigation localisée, plus efficient et plus pratique dans son pilotage à l'échelle parcellaire. Le processus de cette reconversion engagée, qui est déjà lancé depuis quelques années dans le périmètre de Tadla, vu son économie effective éventuelle en eau d'irrigation, est considéré alors d'un rôle prometteur dans la rationalisation des besoins en eau d'irrigation pour les prochaines décennies. Ceci serait accessible malgré les revers des changements climatiques attendus, argumenté par la projection établie qui prétend une fois le projet entrepris serait mené jusqu'au bout, il y aurait une réduction d'environ 6% des besoins en eau d'irrigation des cultures prioritaires à l'horizon 2050, en partant de la situation actuelle retenue comme référence de départ.

Les résultats du présent travail de recherche, à caractère ambitieux, constituent alors une assise consistante et diversifiée de la caractérisation bioclimatique de la région semi-aride, qui serait

plus utile à l'appui aux études de conception de programmes éventuels de la résilience aux changements climatiques, qui prônent le développement durable et la préservation de la biodiversité écologique.

Il s'agit en outre d'une contribution aux réflexions sur les perspectives des utilisations plus rationnelles et efficaces des ressources en eau disponibles dans des espaces plus vulnérables aux pénuries des eaux surtout d'origine pluviale, dans le souci majeur d'exploiter durablement la diversité des cultures praticables couramment sur les sols des périmètres agricoles potentiels similaires, de vocation d'agriculture irriguée et intensive, mais sous les risques énormes à encourir par les changements climatiques, notamment pour l'aspect stratégique de l'eau.

En guise de la clôture du document de la présente étude, il est recommandé de mener ultérieurement des travaux de recherche de continuité des investigations et des analyses déjà entreprises, surtout au sujet de la variabilité des précipitations journalières extrêmes et leurs impacts éventuels sur les systèmes culturels plus axés sur les zones bioclimatiques vulnérables. Il serait aussi question d'entreprendre des activités scientifiques plus poussées sur les incidences actuelles et aussi à long terme du réchauffement atmosphérique sur les aspects physiologiques clés des végétaux, aussi bien pour les cultures usuellement pratiquées que pour les écosystèmes naturels, avec focalisation sur les facteurs de l'eau et de la nutrition minérale végétale.

Les finalités escomptées pour les études ultérieures recommandées, seraient dans la perspective de prodiguer des résiliences d'ordre pratique contre les méfaits du climat en phase de la profonde mutation. Les préoccupations majeures futures porteraient donc sur les éventualités nécessaires de la refonte du système de l'exploitation des spéculations stratégiques des productions végétales et sylvicoles sur les deux milieux pluvial et irrigué. Les attentes pour de ces travaux escomptés, seraient en vue de baliser les interventions de la pérennisation des périmètres agricoles potentiels, tels les cas vulnérables sur le territoire marocain et pour d'autres innumérables cas à l'au delà des frontières. Ce serait en réponse pour la sauvegarde urgente d'espaces agricoles, de biotopes naturels, de domaines agro-forestiers et d'aires pastorales, les plus fragiles aux agressions changements climatiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDOU A, THIERRY L et ABOU A. (2008). Signification et usage de l'indice pluviométrique au Sahel. *Revue Sécheresse* 19: 22735.
- ABIDINE O. M. M., EL ABOUDI. A., INEJIH. C. A., O. SOULE O. A. (2017). Télédétection et SIG en appui à la caractérisation du climat en Mauritanie: Cas du Parc National du Diawling (PND) et sa zone périphérique. Communication au 30^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, du 03 au 07/07/2017 sous le thème : climat, ville et environnement. Université de Sfax (FLSH). 2017. pp : 423-428.
- ABOUATALLAH A., SALGHI R., EL FADL A., AFFI N., GHNIZAR Y., ZARROUK A. and HAMMOUTI B. (2012). Impact assessment of dripper's distribution around the tree on soil moisture, roots and fruits growth of Citrus. *Der Pharma Chemica* 4, n° 5 (2012): 1969–1981.
- ADEME (Agence de la transition écologique) (2020). un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) français créé en 1991, site web : www.ademe.fr/
- AGBANOU T., ABDOULAYE D., SABI OROU BOGO G. A., PAEGELOW M. et TENTE B. (2018). Variabilité pluviométrique et son impact sur le couvert végétal dans le secteur Natitingou-Noukombé au Nord-Ouest du Bénin, *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie* 14, n°3 (2018), pp : 182 -191.
- AHOUSSE K. E., KOFFI Y.B., KOUASSI A. M., SORO G., SORO N. et BIÉMI J. (2013). Étude de la variabilité hydro-climatique et de ses conséquences sur les ressources en eau du Sud forestier et agricole de la Côte d'Ivoire: cas de la région d'Abidjan-Agboville. *Intern. J. Pure & Ap. Bio-science Research*. 1(6): 3050 (2013).
- AIT HOUSSA A., MOUTID S, BELBASRI M., HSAYNI M. et LOULTITI M. R. (2008). Productivité et rentabilité du maïs ensilage conduit en goutte à goutte aux sables de Larache. *Bulletin mensuel d'information et de liaison : Transfert de technologie en agriculture*, n°169, Octobre 2008, IAV Hassan II (Rabat).
- AIT HOUSSA A., DRISSI S., ASFERS A., OUBAKI L., HADDOUCHE Z., AMLAL F. et CHRAIBI H. (2020). Éléments d'aide au contrôle de gestion et au management de l'agrumiculture au Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* 8, n° 1 (2020).
- AIT YACINE Z. (1995). Irrigation d'appoint du blé (*Triticum aestivum*) : Gestion de l'eau et techniques culturales adaptées. DESA Faculté des Sciences- Université Chouaib Doukkali El Jadida 1995.
- AKOIGNONGBE A., ABDOULAYE D., VISSIN E. W. et BOKO M. (2014). Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oueme à l'exutoire de Bétérou (Bénin). *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie* 10, n° 2 (2014), pp 228-242.
- ALLEN R. G., PEREIRA L. S., RAES D. and SMITH M. (1998). Crop evapo-transpiration-Guidelines for computing crop water requirements- Ir. & drainage paper 56. FAO, Rome (Italy) 300, n° 9 (1998): D05-109.
- ASSANI A. A. (1999). Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). *Science et changements planétaires. Sécheresse* 10, no 4 (2000): 245–252.
- BALAH B. et AMARCHI H. (2016). Variabilité des séries pluviométriques du bassin versant de la Seybouse du Nord-Est algérien. *Rev. Sciences et de la Technologie* 383, n° 3473 (2016) : 1–12.
- BARONETTI A., GONZÁLEZHIDALGO J.C., VICENTESERRANO S.M., ACQUAOTTA F. et FRATIANNI S. (2019). Les épisodes de sécheresse sur la plaine du fleuve Po en Italie. Communication au 32^{ème} colloque Internationale de l'AIC sous thème : « Le changement climatique, la variabilité et les risques climatique » ; Thessaloniki-Grèce, 29 mai au 1 juin 2019 ; Département de Météorologie et de Climatologie-Collège de Géologie Université d'Aristote de Thessaloniki ; Grèce, pp : 157-162.
- BEDOU M., BOUKA B. C., ALLADOUM M., ADOUMI I. et BAOHOUTOUL L. (2014). Impact de la variabilité pluviométrique et de la sécheresse au Sud du Tchad : Effet du changement climatique. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, volume 23 (2014): 13–20.
- BEKKAR Y., KUPER M., HAMMANI A., DIONNET M., et EL IAMANI A. (2007). Reconversion vers système d'irrigation localisée au Maroc. *Revue Hommes, terre et eaux* 137 (2007): 7–20.
- BELGHITI M. (2008). Le programme national d'économie et de valorisation de l'eau en irrigation marocaine. Communication de l'Administration du Génie Rural au ministère de l'agriculture du Maroc, en journée mondiale de l'alimentation, organisée par la FAO à Rabat, date du 14/11/2008.
- BENHADJ I., DUCHEMIN B., MAISONGRANDE P., SIMONNEAUX V., KHABBA S. et CHEHBOUNI A. (2012). « Automatic un-mixing of MODIS multi-temporal data for inter-annual monitoring of land use at a regional scale (Tensift, Morocco) ». *International journal of remote sensing* 33, N° 5 (2012): 1325–1348.
- BERDAI H., KARROU M., CHATI M.T., BOUTFIRASS M. and BEKAOUI A. (2011). Irrigation water management in Morocco. Paper at the symposium on: "Improving water and land productivities in rainfed systems". Community Based Optimization of the Management of Scarce Water Resources in Agriculture in CWANA. Report, 2011, edited by ICARDA, Aleppo, (Syria), pp: 11-36.
- BERRADA A. (2009). Assessment of drip irrigation in Morocco with particular emphasis on the plain of Tadla research grant report. US Fulbright Scholar, November 2008 April 2009 Research Scientist/Manager

- Southwestern Colorado Res. Center Agr. Exper. Station & Department of Soil and Crop Sciences Colorado State University. *Technical bulletin (Colorado Agricultural Experiment Station: LTB); LTB091*, 2009.
- BODIAN A., DACOSTA H. et DEZETTER A. (2011). « Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique ». *PhysioGéo. Géographie physique et environnement*, N° volume 5 (2011) : 107–124.
- BOIS P. (1971). Une méthode de contrôle de séries chronologiques utilisées en climatologie et en hydrologie. Publication du Laboratoire de Meca. Flu. Univ. Grenoble I, mai 1971, 33p.
- BOUAZIZ A. et BELABBES K. (2002). Efficience productive d'eau en irrigué au Maroc. *H.T.E.*, 124 : 5772.
- BOUAZZAMA B. et BAHRI A. (2009). Détermination des coefficients culturaux de la variété d'orange « Maroc late » au périmètre irrigué Tadla ». Actes du Symposium International : « Agriculture durable en région méditerranéenne (AGDUMED) », pp : 14–16, 2009.
- BOUAZZAMA B., DIMITRI D., BOUAZIZ A., RUELLE P. and MAILHOL J.C. (2012). Effect of water stress on growth, water consumption and yield of silage maize under flood irrigation of Tadla (Morocco), 2012. *J. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2012, 16 (4), 468-477.
- BOUAZZAMA B., BOUAZIZ A., XANTHOULIS D. et BAHRI A. (2015). Effet du déficit hydrique sur la croissance, le rendement et l'efficience d'utilisation de l'eau chez la luzerne (*Medicago sativa* L.) au Tadla. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* 3, n° 2 (2015): 16–26.
- BOUNDI Ah. (1989). Contribution à la gestion optimale de l'irrigation localisée d'un verger d'agrumes établis dans la région du Souss (Maroc). Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Horticole. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II-Campus Agadir.
- BOUNDI Ah. (1995). Besoins en eau, économie eau d'irrigation et diversification variétale de la culture de l'oignon (*Allium cepa* L.) dans la région du Tadla. Mémoire de 3^{ème} cycle pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome (option : Horticulture). Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II-Campus Agadir.
- BOUTHIBA, A. et DEBAEKE P. (2019). Besoins en eau de différentes variétés de blé dur en conditions semi-arides. In *Symp. Intern. : « Agriculture durable en région méditer. (AGDUMED) », Rabat, Maroc*, 14–16, 2009.
- BOYER J.F. (1998). Khronostat statistical time series analyses software. Montpellier : UMR 5569 Hydro-sciences, IRD-Maison des sciences de l'eau.
- BRAUMER J. S. (1997). Nonparametric estimation of slope : Sen's method in environmental pollution, *Environnement sampling & monitoring primer*.
- B.R.G.M. (Bureau de Recherches Géologiques et Minières-Maroc), 1993. Étude du système multicouche de la plaine de Tadla. Description d'aquifères Maroc, Rapport R35-610 4S/Eau92, 129 p.
- BUISSHAND, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Hydrol.* (58): 11-27.
- BUISSHAND, T. A. (1984). Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *J. Hydrol.* (73) : 51-69.
- Centre Canadien de Cartographie et d'Observation de la Terre (CCCOT) (2020). Ministère canadien des ressources naturelles. Adresse ministériel : 5700, 4e Avenue Ouest Québec (Québec-Canada) G1H 6R1, adresse du CCCOT: 580, rue Booth, Ottawa, ON K1A 0G1, Canada. Site web: <http://www.rncan.gc.ca>.
- CHIBANE, B., BENTCHAKAL M., MEDJERAB A. et BENFARES B. (2015). Étude de la variabilité et de la structure de pluie annuelle dans une région semi-aride : cas du bassin versant de la Macta (Nord-Ouest algérien) ». *Larhyss Journal* PISSN 11123680/EISSN 26027828, no 23 (2015) : pp : 213–229.
- CISSE, M., SAMBOU S., DIEME Y., DIATTA C. et BOP M. (2014). Analyse des écoulements dans le bassin du fleuve Sénégal de 1960 à 2008. *Rev. Sc. eau/Journal of Water Science* 27, n° 2 (2014): 167–187.
- CISSÉ, A., EYMARD L., NDIONE J.A. et GAYE A.T. (2015). Analyse statistique des relations pluie-végétation au Ferlo (Sénégal) ». *XXVIII ème Col. Assoc. Internationale de Climatologie*, Liège (France) : 307–312, 2015.
- CISSE, S. (2016). « Etude de la variabilité intra saisonnière des précipitations au Sahel : impacts sur la végétation (cas du Ferlo au Sénégal) », 2016. Thèse de doctorat, spécialité : Climatologie, Université Pierre et Marie Curie (Sorbonne-Universités), Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal). 160 pages.
- CONSTANTIN (OPREA) D.M., MARINICĂ A.F., MARINICĂ I., ZAHARIA L., GRIGORE E., ONȚEL I., IOANATOROIMAC G. and TIȘCOVSCHI A.A. (2019): The thermal and pluvial features of the agricultural year 2018 in the southwestern Romania and the effects on the crops. Communication au 32^{ème} colloque Internationale de l'AIC sous thème : « Le changement climatique, la variabilité et les risques climatique » ; Thessaloniki-Grèce, 29 mai au 1 juin 2019 ; Département de Météorologie et de Climatologie-Collège de Géologie Université d'Aristote de Thessaloniki, Grèce, pp : 543-548
- DAGNELIE P. (1970). Théorie et méthodes statistiques. Volume 1 et 2. Editions Duculot. Gembloux (Belgique).
- DAGNELIE P. (2013). Statistiques théorique et appliquée. T 1et 2. Ed. Boeck Services. Bruxelles (Belgique).
- DAKI, Y. ZAHOUR G., LACHGAR R. et EL HADI H., (2016). Caractérisation de la sécheresse climatique du bassin versant d'Oum Er Rbia (Maroc) par indice standardisé des précipitation (SPI) ». *Eur. Sc. J.* 12, n° 14 (2016).
- DALLEL J., SAKKA M. et HENIA L (2011). Evolution de la biomasse végétale en Tunisie entre 1981 et 2010. Communication au 24^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, du 6 – 9 Septembre 2011 sous le thème : Climat montagnard et risques. Université de Ferrara (Rovereto-Italie) pp: 159-164

- DAYON G. (2015). Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies. Thèse de doctorat, Ecole doctorale et spécialité : SDU2E “: Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales, Université de Toulouse 3 Paul Sabatier, Toulouse (France). 223 p.
- DELANY, F. (1965). Mission hydrogéologique des régions à substratum schisteux (Côte d’Ivoire), Rapport de mission SODEMI Côte d’Ivoire.
- DE PARCEVAUX S., PAYEN D., BROCHET P., SAMIE CH., HALLAIRE M. et MERIAUX S., 1990. Dictionnaire encyclopédique d’Agro-météorologie. Edition Météo-France, INRA, 323 p.
- DIONNET M., KUPER M., GARIN P., HAMMANI A., ELIAMANI A., et SAAF M. (2006). Accompagner les acteurs dans le changement de leur système : Un jeu de rôles pour des projets collectifs d’irrigation au Tadla, Maroc. In *L’avenir de l’agriculture irriguée en Méditerranée : Nouveaux arrangements institutionnels pour une gestion de la demande en eau*, 2006. Actes du séminaire Wademed, Cahors, France, 67 novembre 2006. CIRAD, Montpellier, France.
- DOORENBOS, J. and PRUITT, W.O. (1977). Crop water requirements. Ir.& dr. No. 24, (rev.) FAO, Rome.
- DOORENBOS, J. and KASSAM, A. H. (1979): Yield response to water. FAO Ir& dr. No. 33, FAO, Rome (Italy).
- DOUKPOLO B. 2014. Changements climatiques et productions agricoles dans l’Ouest de la République Centrafricaine. Thèse de Doctorat en Géographie et Géosciences de l’Environnement (Agro climatologie et Développement), Université de Abomey-Calavi. <https://tel.archivesouvertes.fr/tel01053261>.
- DRIOUECH F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d’un changement climatique : descente d’échelle et incertitudes ». PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), spécialité : Sciences de l’Univers, de l’Environnement et de l’Espace, Université de Toulouse.
- EDWARDS D.C. and Mc KEE T.B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Climatology Report Number 97-2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- EL AJHAR L., EL KHACHINE D., EL BAKOURI A., EL KHARRIM K. et BELGHYTI D. (2018). Evolution de la pluviométrie de 1960 à 2015 au Maroc. *Int. J. of Res. Sc. and Manag.* 5(10) : Octobre, 2018, pp : 47-56.
- EL JIHAD M. D. et TAABNI M. (2017). L’eau au Maghreb : Quel « mix » hydrique face aux effets du changement climatique. Contribution au rapport : « Eau et climat en Afrique du Nord et au Moyen Orient », coordonné par Zeineddine NOUACEUR. Université de Rouen-Normandie et organisme Campus-France ; éditions-Transversal, Târgoviște (Roumanie), 2017, pages : 11-25.
- EL HAFID D., ZERROUQI Z. et AKDIM B. (2017). Etude des séquences de sécheresse dans le bassin d’Isly (Maroc oriental). *Larhyss Journal*, 31 (2017), pp: 83-94.
- EL HARI A., CHAIK M., LEKOUCH N., SEDKI A. and LAHROUNI A. « Water needs in citrus fruit in a dry region of Morocco ». *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)* 104, no 3/4 (2010): 91-99.
- EL KSABI R. et LAGHZALI M. (2011). Approches d’ingénierie et démarches de conception des projets collectifs de reconversion à l’irrigation localisée : Cas du périmètre du Tadla. Communication des ingénieurs de l’entreprise des études NOVEC, adresse : Immeuble NOVEC, Park Technopolis, 11 100, Sala El Jadida à Salé (Maroc). Exposé au Salon international de l’eau et de l’irrigation de la région Tadla-Azilal (SIEITA), dates du 19 au 22 octobre 2011, Beni Mellal (Maroc).
- EL KHOUDRI K. et DAMNATI B. (2015). Les changements climatiques dans le Tafilalet (Sud-Est marocain) : Analyse des tendances. Climate change on Tafilalet region. *Larhyss Journal*, 3 (2015), pp: 16-25.
- FAO (Food and Agriculture Organization Nations) (1998). *World reference base for soil resources*. Vol. 3. Food & Agriculture Org., 1998.
- FATY A., KANE A. et NDIAYE A.L. (2017). Influence de la manifestation climatique sur les régimes pluviométriques saisonniers dans le haut bassin versant du Sénégal. *Revue des sciences de l’eau / Journal of Water Science* 30, no 2 (2017) : 79-87.
- FEKI M. (2015). Variation et variabilité de la dynamique de la végétation au Nord de la Tunisie. 28^{ème} colloque de l’Association Internationale de Climatologie du 01 au 04/07/2015 sous le thème : modélisation & variabilités organisé par Laboratoire de Climatologie et Topo-Climatologie, Univ. Liège (Belgique). 2015. pp: 336-342
- FAO (Food and Agriculture Organization of United Nations) (2002). *World agriculture; towards 2015/2030*, report abstract, Rome, Italy, ISBN 92-5-204761-1.
- FAO et INRA du Maroc. (2015). *MOSAIC : Système de modèles pour évaluation des impacts du changement climatique sur l’agriculture au territoire marocain*, 26 pages. Website: www.changementclimatique.ma
- FERCHICHI, A. (2017). Evaluation des services de l’eau agricole et renforcement des interactions des acteurs de la gestion de l’eau : Cas d’un système à multi-niveaux de gestion (périmètre public irrigué de Zaouiet Jedidi, Cap Bon-Tunisie. Thèse de doctorat en sciences agronomiques ; spécialité: Génie Rural Eau et Forêt ; Institut National Agronomique de Tunisie, Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l’Agronomie et de l’Environnement (Tunisie). Page :81.
- FOSSOU, R. M. N., LASM T., SORO N., SORO T., SORO G., DE LASME O.Z., BAKA D., ONETIE O.Z. et OROU R. (2015). Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : Cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de Côte d’Ivoire. *Larhyss J.* n°21 (2015): 97-120.

- FRENKEN K. and GILLET V. (2012). Irrigation water requirement and water withdrawal by country, report of AQUASTAT, FAO, Rome, Italy.
- GAALOUL N. et LAIGNEL B. (2012). Variabilité et effets de changement climatique sur les ressources en eau souterraines en Tunisie : Une synthèse globale des résultats et recommandations. Actes du colloque international de Rouen sous thème : « Regards croisés Nord-Sud », Univ. de Rouen (France), 25–26 Septembre, 2012 ; pp : 71-72.
- GAMMAR A. M. et HLAOUI Z. (2012). Utilisation des indicateurs du déficit hydrique dans les synthèses bioclimatiques méditerranéennes. Communication au Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, du 05 au 08 Septembre 2012, sous thème : Les climats régionaux : Observation et modélisation. Université Joseph Fourier (Grenoble 1), Grenoble (France), 2012, pp : 321-326
- GAUSSEN H. ET BAGNOULS F. (1957) « Les climats biologiques et leur classification », *Annales de Géographie*, vol. 6, no 355, 1957 ; pp : 193-220.
- GAUTIER F, LUBESNIEL H., SABATIER R., MASSON J. M., PATUREL J.E. et SERVAT E. Variabilité du régime pluviométrique d'Afrique Ouest non sahélienne 1950-1989 ». *Hydr. Sc. J.* 43, n° 6 (1998): 921–935.
- GHENIM A. N. MEGNOUNIF A. SEDDINI A. et TERFOUS A. (2010). « Fluctuations hydro-pluviométriques du bassin-versant Oued Tafna-Beni Bahdel (Nord-Ouest algérien) ». *Rev. Sèch.* vol. 21, n°2, Avril-Juin 2010
- GIEC (I.P.C.C.) (2001). Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.G. Griggs, M. Noguer, P.J. vander Linden, X. Dai, K. Maskell, et C.A. Johnson (éds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York, NY, Etats-Unis, 881 pp.
- GIEC (I.P.C.C.) (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) n°4, 114 pages, 2007.
- GIEC (I.P.C.C.) (2013). Les changements climatiques, les éléments scientifiques. Publication du groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 5^{ème} rapport du GIEC, résumé pour décideurs. 2013. Website: <https://www.ipcc.ch>.
- GIEC (I.P.C.C.). 2014 : 2^{ème} partie du 5^{ème} rapport d'évaluation intitulée : « Changements climatiques en 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité ». Résumé pour décideurs. Website: <https://www.ipcc.ch>
- GIEC (I.P.C.C.). (2019). Climate Change and Land. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. 2019. Intergovernmental Panel on Climate Change. Electronic copies of this report are available from the IPCC. Website: <https://www.ipcc.ch>.
- GOOSSENS Ch. R. (1985). « Principal component analysis of Mediterranean rainfall ». *J. Clim.* 5, no 4 : 379–388
- GUERMAZI E., MILANO M. et REYNARD E (2018). Evolution des ressources en eau dans un bassin versant aride en Tunisie centrale. 31^{ème} Col. Assoc. Intern. Climatologie, du 02 au 03/07/2018 sous le thème: Echelles spatiales et temporelles fines. Université Nice, Sophia Antipolis. Nice (France). 2018 ; pp: 169-174.
- GUTTMAN N.B. (1994). On the sensitivity of sample L moments to sample size. *Journal of Climatology* 7: 1026–1029. Guttman NB. 1994. *Journal of Climatology* 7: 1026–1029.
- HABIBA K. NASR Z., KHALDI A., WOO S.Y., NOURI M. et REJEB M. N. (2012) « Efficience d'utilisation de l'eau et de l'azote par les plants de chêne-liège ». IOBC/wprs Bulletin 76 (2012): 35–42.
- HADJOUT N. et LARFI B. (2012). L'élaboration d'un bilan hydrogéologique de la nappe côtière de la plaine du Gharb, communication au colloque international de Rouen sous thème : « Regards croisés Nord-Sud », Université de Rouen, Septembre, 2012, page: 83.
- HAFIDI A., SALGHI R., ABOUATALLAH A., AYOUB M., AYOUB F. and AFFI N. (2017). Calibration of GFS model by using real time weather data for water requirement forecasting of citrus crop at the Moroccan Sous basin, s. d. 2017 *Int. Journal of Engineering Research and Application* (Part 2) Nov. 2017, pp.0111
- HAFIDI A. ABOUATALLAH A., AFFI N., CHAOUIKI A. and SALGHI R. Yobeen forecast software reliability assessment using measured data of the Sous upstream region. *App. J. Env. Eng. Sc.* 5, n° 1 (s. d.): 5–1. 2019.
- HAFIDI A., ABOUATALLAH, A., AFFI N. and SALGHI R. Calibration of GFS model by using real time weather data for water requirement forecasting of vegetables in Chtouka region. *Mor.J.Chem.* 8, n° 1 (s. d.): 8–1. 2020.
- HAIR J. F., BLACK W. C., BABIN B. J., ANDERSON R. E. and ATHAM R. L. (1998). *Multivariate data analysis*. Vol. 5. 3. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 1998.
- HAJRI J. (2006). Bilans hydriques agro-climatiques au Cap Bon (Tunisie) : Le cas des agrumes. pp 220-225. Communication au 29^{ème} Colloque international sous thème : « Les risques liés au temps et au climat ». Actes du colloque d'Épernay 6–9 septembre 2006, organisé par l'Université Denis Diderot Épernay (France).
- HAKMAOUI, A.; ZAKI N., BAYE Y. et Ouatmane A. (2013). Techniques de production du piment rouge (Niora) au périmètre du Tadla. Bulletin mensuel d'information et de liaison : Transfert de technologie en agriculture, n°198, Mars 2013, IAV Hassan II (Rabat).
- HAMMANI, A., KUPER, M., DEBBARH, A., BOUARFA, S., BADRAOUI, M., BELLOOUTI, A. (2004). Evolution de l'exploitation des eaux souterraines dans le périmètre irrigué du Tadla. *Revue HTE*, (536) : 10-43
- HAMMANI, A., KUPER M., BEKKAR Y. et ZAZ H. (2006) « Exploitation des eaux souterraines dans le périmètre irrigué de Tadla (Maroc) : Etat des lieux et éléments de méthodologie pour contribuer à une réflexion sur une

- gestion intégrée et durable des eaux souterraines et de surface ». *Deuxième atelier régional du projet Economies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb (SIRMA)*, 2006.
- HAMMANI A. et KUPER M. (2007). Caractérisation des pompages dans le Tadla, Maroc. *Troisième atelier régional du projet Economies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb SIRMA (SIRMA)*, 10–p, CIRAR, 2007.
- HANCHANE, M. (2013). Méthodologie de régionalisation spatio-temporelle pour une analyse des précipitations (1961-1992) : Application au Maroc atlantique, communication de la Faculté Polydisciplinaire de Taza de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah. Actes du Deuxième Colloque international « Eau & Climat : Regards croisés Nord/Sud », Fès (Maroc), 27-28 novembre 2013
- HARBOUZE, R., LE GRUSSE PH, BELABES K., RAKI M., BOUAZIZ A. et RUELLE P. (2008). Efficacités économiques comparées des systèmes de production dans différentes situations d'accès à la ressource en eau. Application dans le périmètre irrigué du Gharb, Maroc. *Econ. eau sys. Irrigués au Maghreb*, 16–p. Cirad, 2008.
- HATFIELD J. L., ASRAR G. and KANEMASU T. E. (1984). Intercepted photo-synthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote sensing of Environment* 14, no 1-3 (1984): 65-75.
- HEBAL A. et REMINI M. B. (2012). Study of spatiotemporal variability of rainfall in Northern Algeria. In: *Proceeding of the first symposium: « Water and climate in the Maghreb North / South Crossed views »*. University of Rouen, Rouen, France.
- HIRSCH, R.M. and SLACK, J.R. (1984): A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence, *Water Resources Research* (20): 727-732.
- HOLLING C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *An. Rev. of ecol. and syst.* 4, n° 1: 1–23.
- HOUGHTON, J. 2009. Global warming: the complete briefing. Chapter 3: The greenhouse gases. pp: 34-68. Cambridge university press, 2009.
- HSIAO, T. C., STEDUTO, P. and FERERES, E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science* 25: 209-231 (2017).
- HUBERT P, CARBONNEL JP et CHAUCHE A (1989). Segmentation des séries hydro-météorologiques : Application à des séries de précipitations et de débits en Afrique de l'ouest. *J. Hydrology* 110 : (3) 49-67.
- ICRA (Centre International pour la Recherche Agricole orientée vers le développement), ORMVA du Tadla et Institut National de la Recherche Agronomique-C.R.R.A. du Tadla (2003). Reconvertir un système d'irrigation: le pari difficile du périmètre irrigué du Tadla (Maroc). Série de documents de travail N° 114–2003 (Maroc) : pp 5474. Edition d'ICRA, Agropolis International, Avenue Agropolis, 34394 Montpellier CX05 – France.
- INIESTA F., TESTI L., ORGAZ F. and VILLALOBOS F. J. (2009). The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *Eur. J. Agron.* 30 n° 4 (2009): 258–265.
- JARLAN L., KHABBA S., ERRAKI S., LE PAGE M., HANICH L., FAKIR Y. (2015). MERLIN O., MANGIAROTTI S., GASCOIN S. and EZZAHAR J. Remote sensing of water resources in semiarid Mediterranean areas: The joint international laboratory TREMA. *International Journal of Remote Sensing* 36, n° 1920 (2015): 4879–4917.
- JOUILIL, I., BITAR K., SALAMA H., AMRAOUI A., MOKSSIT A. et TAHIRI M. (2013). Sécheresse météorologique au bassin hydraulique Oum Er Rbia durant les dernières décennies. *LARHYSS Journal*, ISSN 11123680/EISSN 26027828, no 12 (2013).
- KAYA, Ü, F. Ö. G., GÖKHAN Ç., ERHAN A., ŞERAFETTİN A. and KÖSEOĞLU O. (2017). Effect of deficit irrigation regimes on yield and fruit quality of olive trees (*cv. Memecik*) on the Aegean Coast of Turkey. *Irrigation and drainage* 66, n° 5 (2017): 820–827.
- KHARROU M. H., ERRAKI S., CHEHBOUNI A., DUCHEMIN B., SIMONNEAUX V., LEPAGE M., OUZINE L. et JARLAN L. (2011). Water use efficiency and yield of winter wheat under different irrigation regimes in a semi-arid region. *Agricultural Sciences in China* 2, n° 03 (2011): 273–282.
- KHODJA H., LUBESNIEL H., SABATIER R., MASSON J.M., SERVAT E. et PATUREL J.E. (1998). Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'Ouest. Recherche d'une rupture en moyenne. Une alternative intéressante : les tests de permutations. *Rev. stat. app.* 46, n° 1 (1998) : 95–110.
- KOBRY A et ELIAMANI A. (2004). L'irrigation localisée dans les périmètres de grande hydraulique : Atouts et contraintes dans le périmètre du Tadla au Maroc. In : Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée Rabat, du 19 au 23 avril 2004, Projet Inco-Wademed, Maroc.
- KENDALL, M. G. and STUART A. (1976). *The Advanced Theory of Statistics*. 3^d edition, Vol.3. Griffin and Company, London, 1976.
- KOUDOU A., KOUAME K. A., NIAMKE K. H., KOUAME K. F., SALEY M.B. et ADJA M. G. (2015). Contribution de l'analyse en composantes principales à la régionalisation des pluies du bassin versant du N'Zi, Centre de la Côte D'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol* 26 (2015) : 156–172.
- KRIMISA S., BOUCHAOUI L. et ABOURICHA S (2017). Apport des techniques statistiques à l'étude de la variabilité climatique : Exemple du bassin de Tadla-Azilal (Maroc) ». *Larhyss Journal*, no 30 (2017): 7–26.
- LAURENT G. (1995). Variabilité des précipitations annuelles en Ardèche : Analyse factorielle en composantes principales. *La Météorologie*, 1995.
- LEE A.F.S. and HEGHINIAN S.M. (1977). A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables A bayesian approach. *Technometrics* J. (19): 50-36.

- LENSSEN N. J. L., GAVIN A. S., HANSEN J. E., MENNE M.J., PERSIN A., RUEDY R. and ZYSS D. (2019). Improvements in the GISTEMP uncertainty model. *J. Geoph. Res.: Atmos.* 124, n° 12 (2019): 6307–6326.
- LIONBOUI H. (2018). Modélisation agro-économique dynamique pour la gestion durable des ressources en eau dans les zones arides et semi-arides. Thèse de doctorat. FST-Beni Mellal. Université Moulay Slimane. Béni Mellal (Maroc).
- LUBESNIEL H., MASSON J. M., PATUREL J. E. et SERVAT E. (1998). Variabilité climatique et statistiques : Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau*, (3) : 383-408.
- LUBESNIEL H., MASSON J. M., SERVAT E., PATUREL J. E., KOUAMÉ B. et BOYER J. F. (1994). Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique. ORSTOM, FRIEND AOC. Programme ICCARE, N° 3, 21p.
- MANN H. B. (1945). Nonparametric Tests against Trend, *J. Econometrical Soc.* 1945, n°13, 245-259.
- MARTIN-VERTEDOR A.I., RODRIGUEZ J.M.P., LOSADA M.H.P. and FERERES C.E.F. (2011). Interactive responses to water deficit and crop load in olive (*Olea europaea* L., cv. Morisca). II- Water use, fruit and oil yield. *Agricultural Water Management* 98(6): 950–958.
- McKEE T.B., DOESKEN N.J. and KLEIST J. (1993). The relationship of drought frequency and duration times scales. *American Meteorological Society. 8th conf. App. Climatology*, 1722 Jan., Anaheim, CA, pp: 179-184.
- McKEE T.B., DOESKEN N.J. and KLEIST J. (1995). Drought monitoring with multiple times scales. *American Meteorological Society 9th conference on Applied Climatology*, 1522 Janvier 1995, Dallas, TX, pp: 233-236.
- MEDEJERAB, A. et HENIA L. (2011). Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie Nord-Occidentale ». *Courrier du savoir* 11 (2011) : 71–79.
- Ministère Marocain de l'Agriculture. (2020). Portail au site web du ministère marocain de la pêche maritime, du développement rural et des eaux et forêts. Rubrique internet consultée : « Ressources Hydriques ». Website: <http://www.agriculture.gov.ma/>
- MEDDE-France (2012). Hydrologie de surface. Projet Explore 2070. Rapport de synthèse A1. Ministère français de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012. 93p.
- MJEJRA M., HENIA L. et DUBREUIL V. (2012). Apport de l'imagerie satellite à l'estimation de l'évapotranspiration réelle journalière dans le delta de la Mejerda en Tunisie ». Communication au 25^{ème} Colloque internationale de l'Association Internationale de Climatologie du 05 au 08 Septembre 2012 sous thème : « Les climats régionaux : observation et modélisation ». Université Joseph Fourier (Grenoble 1), Grenoble (France), 2012, pp : 541-546.
- MJEJRA M. et SAMALI H. (2019). Essai de cartographie du risque de stress hydrique dans la plaine deltaïque de l'Oued Majerda (Tunisie). Communication au 32^{ème} Colloque internationale de l'Association Internationale de Climatologie sous thème : « Le changement climatique, la variabilité et les risques climatique » ; Thessaloniki-Grèce, 29 mai au 1 juin 2019 ; Département de Météorologie et de Climatologie-Collège de Géologie Université d'Aristote de Thessaloniki ; Grèce ; pp : 229-233.
- MONIOD F. (1973). Étude hydrologique de l'Oum Er Rbia. Cahiers. O.R.S.T.O.M. séries. Hwhl., 10(2) 197.
- MOURADI M., BOUIZGAREN A., FARISSI M. and GHOULAM C. 2018. Assessment of deficit irrigation responses of moroccan alfalfa landraces grown under field conditions ». *Ir. & drainage* 67, n° 2 : 179–190.
- MRAD D. (2012) Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau cas du bassin versant Seybousse. Université Mohammed Chérif Messadia, Actes du colloque International de Rouen et sous le thème : « Regards croisés Nord-Sud », Université de Rouen, 25–26 Septembre, 2012 ; Rouen (France). Page: 122.
- MURARESCU O., MURATOREANU G., NOUACEUR N. and FRINCULEASA M. (2017). Agro-Meteorological Drought in Boian Plain (Romania). Case Study: Years 2008–2013. *Annals' Valahia' University of Targoviste Agriculture* 11, No 1 (2017): 62–65.
- NAJIB S., FADILI A., MEHDI K., SALOUI A., ILMEN R. et SEBBAR A. (2018). Evaluation de l'effet des variations climatiques sur l'aquifère de la Chaouia côtière (Maroc). Actes du 31^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, du 02 au 03/07/2018 sous le thème : Echelles spatiales et temporelles fines. Université Nice Sophia Antipolis. NICE. 2018. pp : 128-133.
- NORRANT C. et DOUGUEDROIT A. (2004). Tendances des précipitations mensuelles et quotidiennes dans le Sud-Est méditerranéen français (1950-1951/1999-2000) ». *Annales de l'AIC. Climatologie*, no Volume 1 (1 janvier 2004) : 4564. Website : <https://doi.org/10.4267/climatologie.987>.
- NICHOLSON, S. E. and PALAO I.M. (1993). A Re- evaluation of Rainfall Variability in the Sahel. Part I. Characteristics of Rainfall Fluctuations ». *International Journal of Climatology*, 01 Mai 1993.
- OCDE (2012) Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2020, résultats du Modèle IMAGE. Éditions de l'OCDE, 2012; pp: 12-13.
- OMARI, S., BORD J. P., BOUAZIZ A., LE GRUSSE Ph, POUSSIN J. C. et RUELLE P. (2008). Le SIG, un outil de gestion de l'eau dans un périmètre irrigué: cas du secteur S7 au Gharb, Maroc. Actes du quatrième atelier régional du projet Sirma sous thème : Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb, Mostaganem, Algérie, 2628 mai 2008. Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom. 11–p. Cirad, 2008.
- OMM (2001). Bilan des changements climatiques 2001. Rapport de synthèse de l'Organisation Météorologique Mondiale, 204 pages.

- OMM (2012). Guide d'utilisation de l'indice normalisé de précipitations. Rapport N°1090 de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), page :1. Edition OMM-Genève (Suisse).
- OMM (2020). Climat. Site web de l'Organisation Météorologique Mondiale : <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate>.
- O.R.M.V.A du Tadla. (1996). Stratégie et plan d'action de l'amélioration de l'application de l'eau à la parcelle dans le périmètre de Tadla. Rapport de l'établissement ORMVA du Tadla; siège à Fkih Ben Salah (Maroc).
- ORMVA du Tadla (2007). Bilan annuel de réalisations en équipement en irrigation localisée au périmètre du Tadla.
- ORMVA du Tadla (2012). Analyses de faisabilité technicoéconomique et financière de la reconversion collective à l'irrigation localisée dans la zone des Béni Moussa ORMVA du Tadla; siège à Fkih Ben Salah (Maroc).
- ORMVA du Tadla, 2015. Bilans annuels des essais culturaux en station des expérimentations hydroagricoles (SEHA) au périmètre du Tadla, pour la période de 2011-2014. Siège à Fkih Ben Salah (Maroc).
- ORMVA du Tadla (2018). Monographie de zone d'action de l'ORMVA du Tadla; Fkih Ben Salah (Maroc).
- ORMVA du Tadla (2019). Bilan des activités de la Station des Expérimentations Hydro-Agricoles d'Ouled Ganou (SHAOG) pour la période de 2003-2018. ORMVA du Tadla ; Fkih Ben Salah (Maroc).
- ORMVA du Tadla (2020 a). Recueil de la base de données agro-météorologique du périmètre du Tadla pour période de 1958-2020. ORMVA du Tadla ; siège Fkih Ben Salah (Maroc).
- ORMVA du Tadla (2020 b): Bilans des irrigations au périmètre du Tadla ;1979-2020. ORMVA du Tadla (Maroc).
- ORMVA du Tadla. (2020 c). Informations sur établissement ORMVA du Tadla (Fkih Ben Salah ; Maroc). Rubriques internet consultées : « Monographie », « Développement Agricole », « Gestion des Réseaux » et « Aménagement des Réseaux ». Site du web : <https://ormvatadla.ma/>
- OUATTAB M., HAMMOUDY W., DAHMAN A., ILMEN R., SALOUI A., HSAINE M. et SEBBAR A. (2019). « Evolution des températures observées et projections futures en région Casablanca-Settat (Maroc) ». Communication au 32^{ème} colloque internationale de l'AIC sous thème: « Le changement climatique, la variabilité et les risques climatique » ; Thessaloniki-Grèce, 29 mai au 1 juin 2019; Département de Météorologie et de Climatologie. Collège de Géologie Univ. d'Aristote de Thessaloniki; Grèce ; pp : 33-38.
- OUBICHA M. (2019). Cartographie des cultures à l'aide des images satellitaires dans le périmètre irrigué du Tadla. Rapport de projet pour examen d'aptitude professionnelle d'accès au grade Technicien 2^{ème} grade, exercice 2019. ORMVA du Tadla. Fkih Ben Salah (Maroc).
- OUSTOU B. (2015). Etude perspective de l'impact de la reconversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation localisé sur les ressources en eau souterraines au périmètre irrigué de Tadla. Projet de fin d'études, présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Génie Rural, option : Irrigation, Gestion de l'Eau et Environnement ; 2015. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II-Rabat (Maroc) ; pp : 74-76.
- OUZEMOU J.E., EL HARTI A., LHISSOU R., EL MOUJAHID A., BOUCH N., EL OUAZZANI R., BACHAOUI E. and EL GHMARI A. (2018). Crop type mapping from pan-sharpened Landsat 8 NDVI data: A case of a highly fragmented and intensive agricultural system. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol.11 (2018): 94-103.
- OVIDIU M., MURĂTOREANU G, NOUACEUR Z. and FRÎNCULEASA M. (2017). Agro-Meteorological Drought in Boian Plain (Romania). Case Study: Years 2008–2013. *Annals "Valahia" University of Targoviste Agriculture* 11, n° 1 (2017): 62–65.
- PATUREL J.E, SERVAT E., LUBES N.H. et DELATTRE M. O. (1997). Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique d'Ouest et Centrale non sahélienne ». *Comptes-rendus d'Académie des SciencesSéries IIA Earth and Planetary Science* 325, n° 10 (01/11/1997) ; (7): 79-82.Website : [https://doi.org/10.1016/S12518050\(97\)827565](https://doi.org/10.1016/S12518050(97)827565).
- PETTITT A. N. (1979). A nonparametric approach to the change-point problem, *Appl. Stat.*, v 28, N°2, 126135.
- PHOCAIDES A. Manuel des techniques d'irrigation sous pression. FAO, 2008. FAO, Rome (Italie).
- PLANTON S (2013). Annex III: Glossary of IPCC. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- PULINA M. A. (2012). Sécheresses et déficience hydrique des sols dans des zones agricoles de la Sardaigne durant la période 1951-2010. Colloque de l'AIC, 05 au 08 Septembre 2012 sous thème : Les climats régionaux : observation et modélisation. Université Joseph Fourier (Grenoble 1) Grenoble, 2012.
- RAKOTOMALALA R. (2008). Tests de normalité–Techniques empiriques et tests statistiques. Université Lumière Lyon 2, Version 2 (2008) pp : 14-16.
- RAMDI A. et EL KHALFI S. (2019). Diagnostic et évaluation de l'offre et la demande en eau d'irrigation dans le secteur pilote du périmètre irrigué du Tadla. Rapport du projet de Fin d'Etudes pour obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Rural, 2019. IAV Hassan II-Rabat (Maroc) ; pp : 68-71.
- REZIG M., SAHLI A. et LUC J. P. (2005). Impact de la distribution de l'eau sur la variabilité spatiale de la croissance et du rendement du Piment irriguée par système gravitaire. Colloque WATMED 2 en date du 14 au 17 Novembre 2005 à Marrakech (Maroc).
- RODRIGUES G. C., PAREDES P., GONÇALVES J. M., ALVES I. and PEREIRA L.S. (2013). Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns. *Agr. water manag.* (126): 85–96.

- ROERINK, G. J., JACOBS C. and HAMMANI A. (2009). Assessment of groundwater extraction in the Tadra irrigated perimeter (Morocco) using the SSEBI remote sensing algorithm. 2009. Project Aquastress relating to the European Union. Web site: www.aquastress.net/index.php
- RONCHAIL J., MORCEL C., COHEN M. et LABAT D. (2012). Précipitations et rendements des oliviers dans la province de Jaén (Andalousie), période de 1955-2009. Colloque de l'AIC05 au 08/09/2012 sous thème : Les climats régionaux : observation et modélisation. Université Joseph Fourier (Grenoble 1) Grenoble, 2012.
- Royaume du Maroc (2019). Programme prioritaire pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation. Rapport de la Commission Technique Interministérielle, représentante du Ministère de l'Intérieur, du Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du développement Rural, des Eaux et des Forêts, du Ministère de l'Economie et des Finances, du Ministère de l'Équipement, du Transport, de la Logistique et de l'Eau, du Ministère de l'Énergie, des Mines et du Développement Durable et de l'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable ; pp : 23-35. Rabat (Maroc).
- SALAMA, H. 2011. « Régionalisation pluviométrique du bassin Tensift (Maroc) ». *Larhyss Journal PISSN 11123680/EISSN 26027828*, n° 9 (2011).
- SARR B. (2006). Les changements climatiques et la vulnérabilité des ressources en eau et de l'agriculture, Centre Régional AGRHYMET, DFR, Niamey. Communication scientifique, 22 pages.
- SEBBAR A., BADRI W., FOUGRACH H., HSAINE M. et SALOUI A. (2011). Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Sciences et changements planétaires / Séch.* 22, N° 3: 139-148.
- SEBBAR, A., HSAINE M., FOUGRACH H. et BADRI W. (2012). Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc ». 25^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Grenoble sous thème : « *Climats régionaux : observation et modélisation* », 2012, pp : 709-714.
- SEBBAR, A., HSAINE M., FOUGRACH H. et BADRI W. (2013). Carte des précipitations annuelles au Maroc (1935/2006). 26^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Cotonou, Bénin sous thème : « *Climat, agriculture, ressources en eau : D'hier à demain* », 2013, pp : 37-43.
- SEN, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on *Kendall's Tau*. *Journal of the American Statistical Association*. (63):1379-1389.
- SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., OUEDRAOGO M., BOYER J. F., LUBESNIEL H., FRITSCH J.M., MASSON J.M. et MARIEU B. (1998). « Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale », *IAHS Publication*, vol. (252) : 323-337.
- SHEPARD D. (1968). A two dimensional interpolation function for regularly spaced data. In, 23d National Conference of the Association for Computing Machinery, Princeton, NJ, ACM, pp: 517-524.
- SHONGWE V. D., MAGONGO B.N., MASARIRAMBI M. T., ABSALOM M. and MANYATSI A. M. (2010). Effects of irrigation moisture regimes on yield and quality of paprika (*Capsicum annum L.*). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 35, n° 1314 (2010): 717-722.
- SIKAOUI L., BOUIZGAREN A., KARROU K., BOULAL H., BOULOUHA B., KARAMA K., NANGIA V. and OWEIS T. (2014). Effect of deficit irrigation on vegetative growth and fruit yield parameters of young olive trees (*Olea europaea L.*) in semi-arid area of Morocco. Paper presented at the 7th International Conference on Water Resources in the Mediterranean Basin, 10-12 October, Marrakech, Morocco.
- SKIREDJ A., BEKRAOUI A. et EL ALAOUI M. (2001). Avertissement à l'irrigation pour la culture de Pomme de Terre dans le périmètre du Loukkos (Maroc). *Rev. Marocaine Sc. Agr. et Vét.* 21, n° 3 (2001): 169-176.
- SPECTY, R. et ISBERIE C. (1996). L'avertissement à l'irrigation à l'épreuve de la pratique agricole. *La Météorologie*, 8^{ème} série N° 16 Décembre 1996.
- SPF (2020). Le Service Public Fédéral de Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement SPF SPSCAE, Gouv. belge. 2020. Site web: <https://www.climat.be/frbe/servicefederal/>
- SOUDI B. (1994). Qualité des sols et des eaux : situation actuelle et méthodes de suivi de paramètres de qualité. Rapport n° 15 du Projet MRT, ORMVAT. Maroc.
- STOUR L. et AGOUMI A. (2008). Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Hydroécologie appliquée* 16 (2008): 215-232.
- TAIBI S., MEDDI M., SOUAG D. et MAHE G. (2013). Évolution et régionalisation des précipitations au Nord de l'Algérie (1936-2009). *Climate and land surface changes in hydrology, IAHS Publ.* 359 (2013):191-197.
- TANOUTI O. (2017). La gestion intégrée des ressources en eau à l'épreuve du bassin versant: cas du bassin du Tensift au Maroc. PhD Thesis, Université Nanterre de Paris, Paris (France) 10, 2017. Page: 247.
- THIEME M.L., LEHNER B., ABELL R. and MATTHEWS J. (2010): Exposure of Africa's freshwater biodiversity to a changing climate. *Conservation Letters*, 3(5), 324331.
- TOPAK R., SÜHERI S. and ACAR B. (2011). Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris L.*) yield, quality and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey. *Irr. Science* 29, n° 1: 79-89.
- TOUHAMI M. (2017). Régionalisation et variabilité pluviométrique dans le Nord Centre-Ouest algérien (Approche statistique). 2017. Mémoire pour obtention du diplôme de Master en Sciences de la Nature et de la Vie, Filière : Biologie, Spécialité : Eau et bioclimatologie Université Djilali Bounaama-Khemis Miliana, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la terre, Département de Biologie.

- TRAMBLAY Y., GACHON P., STHILAIRE A. et CHAUMONT D. (2005). Variabilité et extrêmes de température et de précipitation entre 1941 et 2000 : le cas du golfe du fleuve Saint-Laurent. Rapport de recherche R805. INRS, Centre Eau, Terre et Environnement, 2005.
- TRAORE V., NDIAYE M. L., MBOW C., GIOVANI M., SARR J., BEYE A. and DIAW A. (2017). Khronostat Model as Statistical Analysis Tools in Low Casamance River Basin, Senegal. 2017 (01/01/2017): 10-22.
- TUCKER, C.J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation', *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- VAN HALSEMA, G. E. and VINCENT, L. (2012). Efficiency and productivity terms for water management: A matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural Water Management* 108: 9 - 15 (2012).
- VERMEIREN, L. et JOBLING G. A. (1983). L'irrigation localisée. *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*, n° 36 (1983). FAO, Rome (Italie).
- WIGLEY T. M. L., LOUGH J. M. and JONES P. D. (1984). Spatial patterns of precipitation in England and Wales and a revised, homogeneous England and Wales precipitation series. *J. of Clim.* 4, n° 1 (1984): 1-25.
- WITTLING, C. S. et MOLLE B. (2017). Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation. PhD Thesis, IRSTEA, Université de Montpellier en collaboration avec l'institution UMR GEAU, adresse : 361, rue JF Breton BP 5095 – 34196, Montpellier Cedex 5 2017.
- WU, H., HAYES, M.J., WILHITE, D.A and SVOBODA, M.D. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal of Climatology*, (25): 505-520.
- YAMAUCHI H. (1984). Impact on groundwater resources of conversion from furrow to drip irrigation. *JAWRA J. American Water Resources Association* 20, n° 4 (1984): 557–563.
- YAO F. Z., REYNARD E., FALLOT J.M., OUATTARA I., KOUAKOU E. et SAVANE I. (2018). Analyse de la variabilité climatique dans le bassin versant agricole du Bandama-Blanc, Nord de la Côte d'Ivoire. Actes du 31^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, du 02 au 03/07/2018 sous le thème : « Echelles spatiales et temporelles fines ». Université Nice-Sophia Antipolis ; Nice ; 2018 ; pp : 399-407.
- YAPIA.F., OGAY.M.S., N'GNESSANBIV. H., KPAN O.J.G. et BIEMI. J. (2018). Caractérisation des séquences de sécheresse dans la région de la Marahouéa partir des indices SPI et SPEI. Actes du 31^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, du 02 au 03/07/2018, sous le thème : « Echelles spatiales et temporelles fines », Université Nice-Sophia Antipolis, NICE. 2018, pp : 158-162.
- YERGEAU E. et POIRIER M. (2013). SPSS à l'Université de Sherbrooke : Régression logistique. Site francophone d'information sur SPSS. Accès au site web : <http://spss.espaceweb.usherbrooke.ca/pages/stat>
- ZAIRI A., BEN NOUNA B., RUELLE P., NASR Z., OUESLATI T. et AJMI T. (2000). Irrigation et effet du déficit hydrique sur les productions: cas du Blé et de la Pomme de Terre ». *Actes du séminaire : « Economie de l'eau en irrigation », Hammamet–Tunisie : 1416 Novembre 2000*, 2000, 93–113.
- ZITOUNI (2016). Apport de la télédétection dans l'évaluation de la variation des surfaces d'eau, du sol et du couvert végétal dans la Plaine du Tadla entre 1984 et 2015. Mémoire de stage de fin d'études pour l'obtention du diplôme du Master. Faculté des Sc.et Tech.de Marrakech (FSTM) Université Cadi Ayad (Maroc).
- ZAMRANE Z., LAFTOUHI N.E., JARLAN L., LAIGNEL B. et MASSEI N. (2012). Caractérisation des relations précipitations/NDVI sur le Tensift : Variabilité inter et intra-annuelle et lien avec la dynamique atmosphérique et océanique à grande échelle. Communication au colloque international de Rouen sous thème : « Regards croisés Nord-Sud », 25–26 Septembre ; 2012. Université de Rouen (France) ; p 146.
- ZHENG J., HUANG G., WANG J., HUANG Q., PEREIRA L.S., XU X. and LIU H. (2013). Effects of water deficits on growth, yield and water productivity of drip irrigated onion (*Allium cepa* L.) in an arid region of Northwest China. *Irrigation Science* 31, n° 5 (2013): 995–1008.

ANNEXES

**METHODES D'ETUDE DE VARIABILITES PLUVIOMETRIQUES
ET DU PHENOMENE DE SECHERESSE**

A-Méthodes d'étude des variabilités des précipitations et des sécheresses

1-Méthode de l'intervalle de confiance

2-Méthode par indice pluviométrique de l'écart à la normale

3-Méthode par indice des précipitations standardisé (indice de Nicholson)

4-Méthode du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2

5-Méthodes d'étude de tendances sur séries temporelles agro-météorologiques

5-1-Test de Mann-Kendall

5-2-Méthode de Sen's

5-3-Tests d'homogénéité sur séries temporelles (Tests: *Pettitt; Lee et Heghinian; Buishand; segmentation de Hubert*)

6-Méthodes d'étude de tendances par les analyses multivariées des variances

B-Méthodologie d'étude de variabilité thermique et évapo-transpiration de référence

1-Paramètres étudiés thermique et de la demande climatique en évaporation

2-Tests de variabilité thermique et de la demande climatique en évaporation

3-Etude de relation entre la température et l'évapo-transpiration de référence

4-Evaluation du bilan hydrique au sol dans un espace agro-écologique

C-Méthode d'étude de l'évolution de l'aridité en zone semi-aride (*Diagrammes de Gaussen ; Indice de De Maritonne ; Quotient d'Emberger*)

D-Techniques de la cartographie spatio-temporelle des tendances agro-climatiques

E-Procédés d'étude d'impact des changements climatiques sur les besoins en eau d'irrigation des cultures en fonction du système d'irrigation

1-Expérimentations agricoles

2-Enquêtes agricoles chez des agriculteurs

3-Evaluation des besoins nets et bruts en eau irrigation par culture et par système d'irrigation

3-1-Détermination des efficacités des systèmes usuels d'irrigation

3-2-Evaluation de performance agronomique des cultures en fonction de l'eau

3-3-Modalités des projections à long-terme des besoins en eau des cultures

F-Méthodes adoptées pour les traitements statistiques et numériques des données

A-Méthodes d'étude des variabilités des précipitations et des sécheresses

1-Méthode d'intervalle de confiance

Cette méthode se fonde sur l'identification d'une année normale qui coïncide avec la pondération arithmétique pluviométrique annuelle de la série pluviométrique. Ce qui permet d'affirmer ou non qu'une année est en sécheresse ou avec des précipitations excédentaires (McKee et al., 1993). A ce propos, on détermine l'intervalle de confiance sur des données pluviométriques par l'équation suivante (Dagnelie, 2013.) :

$$I_c = \left[\bar{x} - t_\alpha * \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) ; \bar{x} + t_\alpha * \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \right] \quad (1)$$

Avec : \bar{x} : Moyenne estimée ; t_α : Valeur de la loi normale ; $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$: Erreur type ; σ : Ecart type de l'échantillon et n : Taille de l'échantillon.

En effet, une valeur de pluviométrie annuelle en dessous de la limite inférieure de l'intervalle de confiance est climatiquement sèche. A l'opposé, un dépassement de la limite supérieure, l'année se qualifie d'humide. Un état pluviométrique normal se déclare en situation entre les deux bornes (inférieure et supérieure) de cet intervalle de confiance. La classification usuelle est en fonction des alternatives pluviométriques, donnée au Tableau A (McKee et al., 1995).

2- Indice pluviométrique d'écart à la normale (ou Indice de déficit pluviométrique)

Ce paramètre, indiqué par l'*indice de déficit pluviométrique*, permet de situer une pluviométrie dans une longue série de mesures en utilisant l'écart proportionnel à la moyenne, qu'on référence par les abréviations (En) et (IDP) ; il est exprimé par la formule suivante (Jouilil et al., 2013) :

$$\text{IDP (en \%)} = (P_i - P_m) / P_m \times 100 \quad (2)$$

Avec : P_i : précipitation annuelle observée (en mm). P_m : moyenne annuelle des précipitations (en mm).

On note qu'une année est qualifiée d'humide si l'indice IDP est positif ou de sèche lorsqu'il est négatif. Un IDP nul, l'année s'identifie alors à la normale.

3-Indice de précipitations standardisé (ou indice pluviométrique de Nicholson)

La tendance d'évolution des précipitations pourrait se spécifier par l'*indice des précipitations standardisé*, référencé par IPS (McKee et al., 1993; 1995) ou noté par l'*indice pluviométrique de Nicholson*, indiqué par I_i (Nicholson et Palao, 1993). Cet indice est adopté officiellement en 2009 par l'Organisation de Météorologie Mondiale (OMM), pour être recommandé en tout lieu comme instrument fiable de mesure du phénomène de la sécheresse météorologique (OMM, 2012). Cet indice est déterminé sur la variable centrée réduite des précipitations annuelles (Delany, 1965) et calculé par l'équation suivante (Servat et al., 1998) :

$$\text{IPS (ou } I_i) = (X_i - \bar{X}) / S \quad (3)$$

Avec : I_i : Indice pluviométrique (ou IPS);
 X_i : Hauteur de pluie de l'année i (en mm);
 \bar{X} : Hauteur de pluie moyenne sur la période d'étude (en mm);
 S : Écart type de la hauteur de pluie sur la période d'étude.

En fonction de la valeur de l'indice IPS, l'année est qualifiée en état de pluviométrie sèche, normale ou humide. Les gammes repères de variation de l'IPS sont rapportées dans le Tableau 40 (Guttman, 1994; Edwards et McKee, 1997; Wu et *al.*, 2005; Abdou et *al.*, 2008). Ainsi, une année sèche est caractérisée par un IPS de moins de (-0,5), en année normale l'IPS se situe entre (-0,5) et 0,5 et en année pluvieuse l'IPS dépasse la valeur de 0,5.

Au raisonnement sur la globalité d'une zone spécifiée, dominée par un nombre de stations de mesures pluviométriques, on calcule alors l'IPS (ou I_{si}) par la moyenne des cumuls pluviométriques annuels centrés et réduits des enregistrements disponibles sur les stations de mesures pour une saison donnée, en appliquant la formule ci-dessous (Abdou et *al.*, 2008) :

$$I_{si} = \frac{\sum_{j=1}^{N_j} \frac{(P_j^i - \bar{P}_j)}{\sigma_j}}{N_j} \quad (4)$$

On cite: P_j^i : la pluie de l'année i à la station j ;
 \bar{P}_j : la pluie moyenne interannuelle de la station j ;
 σ_j : l'écart type de la série de la station j ; et
 N_j : le nombre des stations de l'année i .

Tableau A : Classification de séries pluviométriques périodiques en fonction d'intensité de sécheresse ou d'excédent de précipitations et par indice IPS.

Classes de séries pluviométriques	Sous classes de séries pluviométriques	Indicateurs pour classification de séries pluviométriques	
		Méthode d'intervalle de confiance (Auteurs : McKee et <i>al.</i> , 1993 ; 1995)	Méthode indice IPS (Auteurs : Guttman, 1994; Edwards et McKee, 1997; Abdou , 2008)
Sèches (déficits pluviométrique)	Extrêmement sèche	$P_i < P_m - 2\sigma$	$IPS < -0,5$
	Sévèrement sèche	$P_m - 2\sigma \leq P_i < P_m - \sigma$	
	Modérément sèche	$P_m - \sigma \leq P_i < L_i$	
Normale	Normale	$L_i \leq P_i \leq L_s$	$-0,5 \leq IPS \leq 0,5$
Humides (excédents pluviométriques)	Modérément humide	$L_s < P_i \leq P_m + \sigma$	$0,5 < IPS$
	Sévèrement humide	$P_m + \sigma < P_i \leq P_m + 2\sigma$	
	Extrêmement humide	$P_i > P_m + 2\sigma$	

Abréviations : P_m : Pluviométrie moyenne ; P_i : Pluviométrie de l'année i ; σ : Écart-type ; L_i : Limite inférieure de l'intervalle de confiance ; L_s : Limite supérieure de l'intervalle de confiance.

Dans le présent travail de recherche, les calculs de l'IPS pour la zone d'étude sont à effectuer à partir des données de la période d'observations de 1958-2018, collectées sur un réseau régional de stations de mesures pluviométriques, indiquées dans le Tableau 39.

4- Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 (moyennes mobiles pondérées)

Dans un objectif d'éliminer les variations saisonnières dans une série chronologique donnée, on fait usage à la méthode du *filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2* ; dont le calcul de la moyenne mobile pondérée se fait par l'équation suivante (Assani, 1999) :

$$X'(t) = 0,06X_{(t2)} + 0,25X_{(t1)} + 0,38X_{(t)} + 0,25X_{(t+1)} + 0,06X_{(t+2)} \quad (5)$$

[Pour $3 \leq t \leq (n2)$]

Avec définition des paramètres comme suit :

$X'_{(t)}$: Total pluviométrique pondéré au rang t de la série.
 $X_{(t2)}$; $X_{(t1)}$; $X_{(t+2)}$ et $X_{(t+1)}$: Totaux pluviométriques principaux observés aux rangs correspondant des termes de la série.

Les totaux pluviométriques pondérés pour les 2 premiers termes [$X_{(1)}$, $X_{(2)}$] et 2 derniers termes de la série [$X_{(n1)}$, $X_{(n)}$] sont calculés par les formules suivantes (n étant la taille de la série) :

$$\begin{aligned} X'_{(1)} &= 0,54X_{(1)} + 0,46X_{(2)} \\ X'_{(2)} &= 0,25X_{(1)} + 0,5X_{(2)} + 0,25X_{(3)} \\ X'_{(n1)} &= 0,25X_{(n2)} + 0,5X_{(n1)} + 0,25X_{(n)} \\ X'_{(n)} &= 0,54X_{(n)} + 0,46X_{(n1)} \end{aligned}$$

En vue de spécifier clairement les périodes à pluviométries déficitaires de celles excédentaires, on effectue la transformation des pondérations précédentes, une fois réalisées en des variables centrées et réduites, on applique l'équation ci-après :

$$Y'_t = (X'_{(t)} - \bar{X}') / \sigma \quad (6)$$

Dont : \bar{X}' est la moyenne de la nouvelle série transformée à valeurs pondérées et σ est l'écart type correspondant.

Cette méthode est qualifiée par son efficacité, tout en assurant une nette visualisation de caractérisation de séries pluviométriques (Assani, 1999).

5-Méthodes d'étude de tendances sur séries temporelles d'indicateurs agro-météorologiques

5-1-Test de Mann-Kendall

Le test non-paramétrique sur rang de Mann-Kendall, permet de déterminer si la corrélation entre le temps et la variable d'étude est significative. Ceci conduit à étudier la présence ou l'absence de tendance dans une série chronologique donnée. On cherche donc à évaluer la stationnarité d'un échantillon de valeurs indépendantes pour une variable aléatoire ou d'une série chronologique $X_t = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Cette méthode définit sa normale standard multi-variable U_{MK} comme suit (Mann, 1945 ; Kendall et Stuart, 1976) :

$$U_{MK} = \frac{S}{\sqrt{Var(S)}} \quad (7)$$

Où

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(x_j - x_i) \quad (8)$$

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & , si \ x > 0 \\ 0 & , si \ x = 0 \\ -1 & , si \ x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (10)$$

Où S désigne la relation entre le nombre de paires d'observations, et n est le nombre total d'échantillons, t_i est le nombre de valeurs dans le $p^{ième}$ groupe et q le nombre de rang *ex aequo*.

Une série temporelle a une tendance claire, définie au niveau de signification du test à 5%. Dans ce test, l'hypothèse nulle H_0 « absence de tendance » est acceptée si la p-value est supérieur à 5%. La variable ou série chronologique étudiée ne présente pas de tendance, si la p-value est inférieur à 5%, alors il y a présence de tendance. Le sens de la tendance est défini par le signe du coefficient statistique de Mann-Kendall " U_{MK} ", si U positif, la tendance est à la hausse, mais si U est négatif, alors la tendance est en baisse.

5-2-Méthode de Sen's

La méthode de Sen's permet d'estimer la pente d'une série chronologique climatique de données régulièrement espacés, ceci une fois la tendance a été détectée par le test précédent de Mann-Kendall. Cette méthode consiste à calculer les pentes de toutes les données de la série selon l'équation suivante : $P_{ij} = (X_j - X_i) / (j-i)$ avec P_{ij} : la pente calculée entre les points de données i et j ($j > i$), X_j : la donnée de mesures à la date j et X_i celle à la date i, avec $i = (1, 2, 3, 4, \dots, n)$ et $j = (i+1, \dots, n)$. L'estimateur de la pente de Sen's est donné par la pente médiane (PM), selon l'équation suivante (Sen, 1968 ; Hirsch et Slack, 1984 ; Braumer, 1997):

La méthode de Sen's permet d'estimer la pente d'une série chronologique climatique de données régulièrement espacés, ceci une fois la tendance a été détectée par le test précédent de Mann-Kendall. Cette méthode consiste à calculer les pentes de toutes les données de la série selon l'équation suivante :

$$P_{ij} = (X_j - X_i) / (j-i) \quad (11)$$

Avec P_{ij} : la pente calculée entre les points de données i et j ($j > i$),

X_j : la donnée de mesures à la date j et X_i celle à la date i , avec $i = (1, 2, 3, 4, \dots, n)$ et $j = (i+1, \dots, n)$.

L'estimateur de la pente de Sen's est donné par la pente médiane (PM), selon l'équation suivante (Sen, 1968 ; Hirsch et Slack, 1984 ; Braumer, 1997):

$$PM = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(P_{\frac{N}{2}} + P_{\frac{N}{2}+1} \right) & \text{Si } N \text{ est pair} \\ P_{\frac{N+1}{2}} & \text{Si } N \text{ est impair} \end{cases} \quad (\text{Avec } N : \text{ nombre de pentes calculées}) \quad (12)$$

Un intervalle de confiance est alors déterminé, dont les bornes sont : la pente inférieure ($P_{inf.}$) et la pente supérieure ($P_{sup.}$), qui sont calculées en se référant à la pente médiane (PM) sachant que $P_{inf} = M_1$ et $P_{sup} = M_2 + 1$. On définit les termes M_1 et M_2 de la sorte :

$$\begin{cases} M_1 = \frac{N-C}{2} \\ M_2 = \frac{N+C}{2} \end{cases} \quad (13)$$

Avec N : nombre de pentes calculées ; C : la portée des rangs à l'intervalle de confiance donné et qui s'exprime par :

$$C = Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \times \sqrt{\text{Var}(S)} \quad (14)$$

Où la variable centrée réduite $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ est lue sur Table de Gauss et la variance de Mann-Kendall

$\text{Var}(S)$ est déterminée par l'équation ci-dessus (formule 13).

5-3-Tests d'homogénéité sur séries temporelles

a-Test de Pettitt

Le test de Pettitt est une version modifiée du test de Mann-Wilhtney. Ce test permet de vérifier la stationnarité de la série, dans notre cas pluviométrique, laquelle est à subdiviser en deux groupes de données de tailles respectives m et n et dont les valeurs sont regroupées et classées par ordre croissant, suivi du calcul de la somme de rangs d'éléments en chaque groupe ; une étude statistique est lancée à partir de ces deux sommes déterminées, avec le test d'hypothèse nulle d'appartenance des deux groupes à la même population. L'absence de rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle H_0 ; le test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques (X_i) où $i=1$ à t et $t+1$ à N ; appartiennent à la même population. Ce test est appuyé par le calcul de sa variable $U_{t, N}$ définie par la formule suivante (Pettitt, 1979 ; Lubes et *al.*, 1994 ; Lubes-Niels et *al.*, 1998):

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (15)$$

Avec $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$; $X = (X_i - X_j)$, on a $\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$; 0 si $X = 0$ et (-1) si $X < 0$.

Soit K_n est la variable définie par maximum en valeur absolue de $U_{t,N}$, pour t variant de 1 à $N-1$. Si k désigne la valeur de K_n prise sur la série étudiée ; sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur k est donnée approximativement par la probabilité $(K_n > k)$, estimée par la valeur calculée de $2 \exp(-6k^2 / (N^3 + N^2))$. Pour un risque de 1^{ère} espèce α donné (moins de 5%), si la probabilité $(K_n > k)$ est inférieure à α , l'hypothèse nulle H_0 est alors rejetée (Pettitt, 1979).

b-Méthode bayésienne de Lee et Heghinian

La méthode bayésienne de Lee & Heghinian (Lee et Heghinian, 1977) propose une approche paramétrique. Elle nécessite une distribution normale des valeurs de la série. L'absence de rupture dans la série constitue l'hypothèse nulle. Le modèle de base de procédure est le suivant:

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & \dots \dots & i=1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & & i=\tau+1, \dots, N \end{cases} \quad (16)$$

Avec : ε_i sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance σ^2 . Les variables, μ , δ , τ , σ sont des paramètres inconnus ; τ et δ représentent respectivement les éventualités de position de la rupture dans le temps et l'amplitude d'un changement sur la moyenne. La méthode confère une distribution de probabilité au moment τ au niveau de la série, en admettant qu'*a priori* un changement indéterminé dans le temps a certainement eu lieu. Lorsque la distribution est unimodale, la date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible.

c-Statistique U de Buishand

La procédure en question fait référence aux mêmes concepts et hypothèses considérés par la méthode de Lee et Heghinian, citée ci-dessus ; tout en admettant aussi la normalité de données de la série étudiée, notamment *a priori* de la position du point éventuel de rupture t , la statistique de Buishand est définie ainsi par (Buishand, 1982) :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{S_k}{D_x} \right)^2}{N(N+1)} \quad (17)$$

Avec

$$S_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \quad (18)$$

Pour $k = 1, \dots, N$; \bar{X} est la moyenne de la série et D_x désigne l'écart-type correspondant.

Au rejet de l'hypothèse nulle, aucune date de la rupture n'est donnée par ce test. La variable S_k / σ présentée ci-dessus, a une caractéristique de distribution normale d'une moyenne nulle et de variance $[k(N-k)\sigma^2] / N$; $k=0, \dots, N$; avec l'hypothèse nulle d'homogénéité pour toute la série (X_i) . En vue de visualiser les analyses d'homogénéité, opérées sur une série climatique étudiée, on associe une ellipse spécifique de contrôle du niveau de signification du test à savoir : l'« Ellipse de Bois » (Bois, 1971), qui affiche clairement les seuils de confiance au cours de l'évolution dans le temps pour les termes S_k (Buishand, 1984).

d-Segmentation de Hubert

La segmentation d'Hubert consiste à fractionner la série chronologique en m segments ($m > 1$) avec une moyenne calculée sur tout le segment qui soit significativement différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode s'approprie la recherche de multiples changements de la moyenne. Cette segmentation est définie ainsi : toute série X_i , $i=i_1, i_2, \dots, i_N$ avec $i_1 \geq 1$ et $i_2 \leq N$ où $(i_1 < i_2)$, qui constitue un segment de la série initiale des (X_i) , $i = 1, \dots, N$; toute partition de la série initiale, en m segments, est une segmentation d'ordre m de cette série. A partir d'une segmentation particulière d'ordre m , pratiquée sur la série initiale, on définit le rang du dernier élément d'un segment donné par i_k , $k=1, 2, \dots, m$; ayant la longueur $N_k = i_k - i_{k-1}$ et sa moyenne est \bar{X}_k . Pour détecter la rupture éventuelle sur série, on développe un écart quadratique D_m qu'on exprime par la formule suivante (Hubert et al., 1989):

$$D_m = \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{i=i_{k-1}+1}^{i_k} (X_i - \bar{X}_k)^2 \quad (19)$$

Le fractionnement retenu pour un ordre m de la segmentation est avec le minimum d'écart quadratique D_m ; la condition nécessaire mais non suffisante à dégager la segmentation optimale. A cet effet, les moyennes de deux segments contigus doivent confirmer leur inégalité d'une manière significative, ce qui est à opérer donc par le test de Scheffé (Dagnélie, 1970 ; 2013).

6-Analyses multivariées des variances pour les variables climatiques

Dans un objectif de caractériser les tendances périodiques de précipitations en intra-annuel, il a été considéré les subdivisions temporelles usuelles suivantes : mois, trimestre et semestre en comparaison avec la période annuelle. A ce propos, en première phase on réalise des tests statistiques tendanciels de Mann-Kendall qui sont poursuivis par des tests régressifs de Sen's (tests précités plus haut) ; en deuxième phase, on procède par une approche de configuration spatio-temporelle de saisonnalité du régime pluviométrique en faisant recours à la méthode *d'analyse en composantes principales* (ACP) (Wigley et al., 1984 ; Goossens, 1985 ; Trambly et al., 2005).

C'est une méthode reconnue originale et qui avait approuvée sa performance en cas des études portant sur la variabilité climatique en de divers travaux de recherche (Norrant et Douguédroit, 2004 ; Driouech, 2010 ; Salama 2011 ; Sebbar et al., 2011 ; Hanchane, 2013 ; Ahoussi, 2013 ; Hebal et Remini, 2012 ; Touhami, 2017).

En effet, la méthode de l'ACP consiste en un procédé statistique multivarié dit d'interdépendance et qui vise les trois principaux objectifs suivants :

- Comprendre la structure d'un ensemble de variables de distributions ;
- Concevoir et raffiner les instruments de mesure adoptés tels pour les tests psychométriques et pour les questionnaires d'enquêtes ; et
- Condenser l'information relative au grand nombre de variables, en un ensemble restreint en nouvelles dimensions composites. Ceci est avec la perte minimale d'informations.

La réalisation de l'ACP s'accomplit donc selon une hiérarchie en **cinq étapes** clés suivantes (Hair et al. 1998 ; Yergeau et Poirier, 2013) :

• **Etape 1 : Déterminer l'approche selon le type du problème traité**

Deux approches sont adoptées :

- i) *Approche exploratoire* : Lorsqu'on ne dispose pas *a priori* théorique sur la structure sous-jacente de données et on compte en outre identifier la structure globale avec un nombre plus réduit de variables affectées de quelques facteurs.
- ii) *Approche confirmatoire* : Une fois d'avance on est renseigné, théoriquement, sur le cas traité et on tente, par ailleurs, à confirmer la structure factorielle déjà connue pour mener les analyses approfondies.

- **Etape 2 : Préparation de l'analyse**

Les éléments préparatoires pour entreprendre notre ACP sont les suivants :

- Nombre de variables* : Il faut avoir un minimum de variables facilitant les analyses ultérieures.
- Type de variables* : Il est recommandé d'avoir de préférence des variables continues.
- Taille de l'échantillon* : On préconise des échantillons relativement grands, afin d'assurer une puissance statistique minimale requise.

- **Etape 3 : Respect des postulats**

L'ACP est validée dans son exécution en tenant compte des aspects fondamentaux suivants :

- Corrélations inter-variables* : On tâche d'avoir des corrélations minimales entre variables. A cet effet, on élabore une matrice avec les coefficients de corrélation de variables analysées.
- Mesure d'adéquation d'échantillonnage* : qui se fait par l'indice « Kaiser-Meyer-Olkin » (K.M.O.) qui mesure la qualité des corrélations inter-variables. Indice KMO est définie dans la gamme de 0 à 1 ; selon la grille d'interprétation suivante :

- 0,80 et plus : Excellent
- 0,70 et plus : Bien
- 0,60 et plus : Médiocre
- 0,50 et plus : Très médiocre
- Moins de 0,50 : Inacceptable

-*Test de sphéricité de Bartlett* : Ce test est d'hypothèse nulle (H_0) de la matrice de corrélation d'identité de valeurs des corrélations égales à zéro ; en conséquence, son rejet est à une signification acceptable ($p\text{-value} < 0,05$), ainsi les variables analysées sont indépendantes les unes entre-elles.

- **Etape 4 : Choix de la méthode d'extraction**

-*Méthodes d'extraction* : Deux alternatives.

*L'analyse de facteurs communs ou analyse factorielle (Principal axis factoring) est basée sur la variance commune partagée par les variables analysées et a pour objectif de découvrir la structure latente ou les construits sous-jacents aux variables.

*L'analyse en composantes principales ou ACP (*Principal component analysis*) est basée sur la variance spécifique de variables et permet d'extraire le minimum de facteurs, expliquant la plus grande partie possible de la variance spécifique. C'est habituellement la méthode privilégiée.

-Nombre de facteurs à extraire :

Deux critères de base pour déterminer le nombre de facteurs à extraire :

* La « Valeur propre initiale » est le critère le plus largement utilisé ; plus elle est élevée, plus le facteur explique une portion significative de la variance totale. Par convention, tout facteur avec une valeur propre initiale supérieure à 1 est considéré comme facteur significatif.

* Le « *coude de Cattell* » : critère plus sévère pour déterminer nombre de facteurs ; on ne retient que les facteurs avant changement abrupt de pente du graphique de tendance. Les points qui suivent ce changement, qui est appelé la « *rupture du coude* », semblent former une ligne droite horizontale. L'information ajoutée par les facteurs représentés au-delà de ladite rupture du coude est en effet peu pertinente.

• **Etape 5 : Interprétation des facteurs**

L'interprétation des facteurs ou des composantes consiste à déterminer la combinaison de variables la plus cohérente entre les facteurs significatifs. D'où, on suggère les quatre sous-étapes suivantes:

-Sous-étape 1 : Examen de la matrice des composantes (sans rotation)

Cette matrice contient les poids de variables pour chaque facteur. Ces poids sont en fait la corrélation entre la variable et le facteur et servent à interpréter le rôle de chaque variable dans la définition de chaque facteur. En cas de difficulté d'exploitation de cette forme de matrice, on fait recours à une rotation des facteurs, en vue de simplifier la matrice corrélationnelle entre les facteurs et les variables.

-Sous-étape 2 : Examen de la matrice des composantes après rotation

La rotation de facteurs consiste à faire pivoter virtuellement les axes des facteurs autour du point d'origine dans le but de redistribuer plus équitablement la variance à expliquer. La rotation peut être « *orthogonale* », lorsque les facteurs correspondent à des dimensions indépendantes les unes des autres ou encore la rotation à adopter est « *oblique* » lorsque les facteurs susceptibles ne peuvent être corrélés entre-eux.

-Sous-étape 3 : Identification du poids le plus élevé pour chaque variable

La prochaine étape est de prendre chaque variable en commençant par la première et d'identifier sur la ligne le poids le plus élevé (en valeur absolue). En pratique, pour des échantillons de moins de 100 individus, il est estimé pour valeur absolue de 0,30 , soit le poids minimum qu'une variable peut avoir pour être considérée significative.

Une variable qui a des poids significatifs sur plusieurs facteurs mérite probablement d'être exclue de la matrice. Ceci implique que l'analyse en composantes principales devra être exécutée de nouveau sans ces variables.

-Sous-étape 4 : Étiqueter les facteurs

Une fois que les poids ont été bien identifiés dans la matrice, la structure de facteurs est établie à partir de variables qui ont un poids significatif à l'intérieur de la colonne de chacun de ceux-ci. Le but ultime de l'ACP est de construire des échelles qui permettront de mesurer des construits latents. Ces échelles sont obtenues en additionnant les résultats des participants à toutes les variables qui constituent chaque facteur.

B-Méthodologie d'étude de variabilité thermique et évapo-transpiration de référence

1-Paramètres agro-climatiques étudiés

Il s'agit d'étudier les tendances des paramètres clé en vue de déceler judicieusement les changements climatiques et leurs caractérisations en étroite relation avec les activités agricoles en productions végétales, notamment les niveaux de températures (maximale, minimale et moyenne) et l'évapo-transpiration de référence (ET_o), sachant que ce dernier paramètre renseignant directement sur les états de base des exigence en eau par les plantes qui sont disposées en développement et croissance à l'air libre (Doorenbos et Pruitt, 1977 ; Lenssen et *al.*, 2019).

2-Tests de variabilité thermique et de la demande climatique en évaporation

A l'instar d'étude de variabilité pluviométrique, les tests escomptés ont été procédés sur les séries thermiques et d'évapo-transpiration de référence pour le périmètre du Tadla, qui sont indiqués ci-dessous.

2-1-Test de tendance sur les séries périodiques

On fait recours à ce sujet au test usuel pour sa fiabilité, le test de Mann-Kendall (Kendall et Stuart, 1976), avec la description détaillée plus haut sur cette annexe.

2-2--Tests d'homogénéité sur les séries chronologiques

Il est d'usage aux méthodes les plus fréquemment citées en bibliographie pour leurs pertinences et qui sont couramment employées d'une manière confrontée, afin de repérer les ruptures conjointement dans les séries chronologiques et à savoir les méthodes suivantes :

- *Test de rupture de Pettitt* (Pettitt, 1979).
- *Test de rupture de Lee et Heghinian* (Lee et Heghinian, 1977).
- *Test de rupture de Buishand* (Buishand, 1984).
- *Segmentation de Hubert* (Hubert et al., 1989).

Les définitions des formules mathématiques de ces tests ainsi que leurs modalités statistiques de leurs applications sont relatées plus haut sur cette annexe.

2-3-Etude de relation entre la température et l'évapo-transpiration

En quête de la recherche de liens éventuels entre les différents paramètres mis en jeu, des tests corrélatifs sont à réaliser et qui sont à relayer par la suite par des courbes des régressions correspondantes.

2-4- Evaluation du bilan hydrique au sol dans un espace agro-écologique

Le bilan hydrique de base de la zone est déterminé en fonction de l'évapo-transpiration de référence (ET_o) ou cultural et des précipitations au milieu (Doorenbos et Pruitt, 1977 ; Pulina, 2012). Ce bilan est alors établi pour la zone d'étude en des évaluations mensuelles et annuelles ; lesquelles sont à déterminer conjointement pour les deux situations en avant et en après rupture éventuelle de la chronologie des séries des mesures de l'ET_o.

C-Méthode d'étude d'évolution de l'aridité d'une zone déterminée

Le phénomène d'aridité est plus impactant sur le développement du couvert végétal d'un espace donné, en relation surtout avec les disponibilités en eau. Il est en effet appréhendé par les méthodes pratiques suivantes (De Parcevaux et al., 1990) :

-Méthode par Diagrammes de Gaussen :

Le Diagramme de Gaussen consiste à coupler la température (T) avec les précipitations (P) pour chaque mois en un site, selon la relation de $2 \times T = P$. Une fois $P < 2T$, le mois est désigné au niveau sec et vis-versa avec $P > 2T$ le mois est dit humide. L'importance de l'aridité du milieu est conséquent est approchée en fonction de l'étendue de la durée de la période sèche concernant les mois secs de l'année.

-Méthode par Indice de De Maritonne :

Il est aussi employé pour évaluer l'aridité, l'*Indice d'aridité de De Maritonne (I.M.)* qui se calcule par le rapport entre la température et les précipitations, selon deux approches, une annuelle et l'autre mensuelle. Les formules de cet indice sont :

-Indice annuel d'aridité de De Maritonne I.M.(a) :

$$I. M. (a) = \frac{P}{(T + 10)} \quad (20)$$

Avec : P : Pluviomètre de l'année en mm ;
T : Température moyenne annuelle en °C

- Indice mensuel d'aridité de De Maritonne I.M.(m):

$$I. M. (m) = \frac{12 \times P}{(T + 10)} \quad (21)$$

Avec : P : Pluviomètre du mois en mm ;
T : Température moyenne mensuelle en °C

-Méthode par le Quotient d'Emberger

L'aspect d'aridité du milieu est de même mesuré par le Quotient d'Emberger (Q.E.), lequel intègre dans son équation en plus de la pluviométrie de l'année, les températures extrêmes. La formule de ce quotient est la suivante .:

$$Q. E. = \frac{P}{2 \left[\left(\frac{M + m}{2} \right) (M - m) \right]} \quad (22)$$

Avec : P : Pluviomètre annuelle en mm
M = moyenne des maxima du mois le plus chaud
m = moyenne des minima du mois le plus froid

D-Techniques de la cartographie spatio-temporelle des tendances agro-climatiques

Dans de la spatialisation évolutive dans le temps en zone d'étude les tendances agro-climatiques, des cartes thématiques sont à élaborer par paramètre climatique pertinent. Ceux-ci iront de pair pour l'étude des deux situations comparatives d'avant et en après rupture chronologique éventuelle pour chaque paramètre climatique étudié.

Les termes de références de ces cartes sont définis ainsi :

-Paramètres agro-climatiques étudiés : Pluviométrie, températures (minimale, maximale, moyenne), évapo-transpiration de référence, valeur de l'indice d'aridité de De Maritonne.

-Technique cartographique adoptée : Par procédé du SIG en utilisant la méthode de la « Pondération Inverse à la Distance » (I.D.W.: Inverse Distance Weighted) en vue d'accomplir les interpolations spatiales exigées (Shepard ; 1968).

E-Procédés d'étude d'impact des changements climatiques sur les besoins en eau d'irrigation des cultures en fonction du système d'irrigation

1- Enquêtes agricoles chez les agriculteurs

En relation avec le travail de recherche envisagé des enquêtes sur terrain ont été accomplies dans la zone d'étude et ayant les thématiques suivantes :

-1^{ère} Enquête agro-économique comparative entre avant et après le projet de reconversion collective en système d'irrigation localisée. La réalisation de cette enquête s'est déroulée au fur et à mesure des activités agricoles des agriculteurs enquêtés durant les trois campagnes : 2015/2016 à 2017/2018.

-2^{ème} Enquête technico-économique de caractérisation des systèmes d'irrigation classique et efficaces en exploitation agricole de la reconversion individuelle. La période de réalisation est l'année 2019 en s'intéressant aux deux campagnes agricoles antérieures de : 2016/2017 et 2017/2018.

Il est à signaler que la première enquête est afférente à l'observatoire du suivi technique et économique, dédié à la nouvelle zone du projet de la reconversion à l'irrigation localisée, qui est piloté par des cadres de l'ORMVA du Tadla avec appui d'une assistance technique privée associée à ce projet. Quant à la seconde enquête, nous l'avons entrepris avec la contribution des entités du terrain de proximité relevant de l'ORMVA du Tadla. Les canevas des questionnaires des enquêtes sont rapportés en Annexes.

Il est à noter par ailleurs que les aspects pertinents visés par ces enquêtes sont définies ainsi :

- Productivités des cultures ;
- Efficacités agronomique d'utilisation de l'eau d'irrigation ;
- Valeurs des productions agricoles ;
- Marges nettes d'exploitation des cultures ;
- Valeurs ajoutées des spéculations agricoles ;

- Valorisation agro-économique de l'eau d'irrigation par culture ;
- Occupations du sol par les cultures dans le périmètre ;
- Evolution du niveau d'intensification culturelle au périmètre par système d'irrigation.

2-Expérimentations agricoles sur terrain

Dans le souci de disposer en données récentes du terrain et spécifiques au périmètre de Tadla en relation avec les objectifs de notre étude, il est objet de faire le suivi de près des essais culturaux sur différents thèmes. Ces essais ont été menés durant les campagnes de 2014/2015 et de 2017/2018 au niveau de la station expérimentale SEHA Ouled Gnaou, relevant de l'ORMVA du Tadla. Sachant que cette station, se situe au plein périmètre irrigué de Tadla, a été créée au début des années 50 et elle constitue une référence nationale marocaine pour les expérimentations agricoles appliquées.

Les cultures envisagées dans nos essais culturaux sont choisies les plus pratiquées au périmètre de Tadla et qui concernent : céréales d'automne, betterave à sucre, luzerne, maïs d'ensilage et maraichage. Les protocoles expérimentaux détaillés de ces essais culturaux sont portés par thèmes étudiés aux annexes ultérieures.

3-Evaluations des besoins nets et bruts en eau d'irrigation par culture et par système d'irrigation.

Des canevas d'irrigation détaillés par culture envisagée sont à établir et qui constituent la base des calculs des besoins nets et bruts en eau d'irrigation, ceci en exploitant les données afférentes aux expérimentations et des enquêtes réalisées.

3-1- Détermination des efficacités des systèmes usuels d'irrigation

Les systèmes d'irrigation mis en jeu aux expérimentations ou concernés par les enquêtes agricoles font objets d'évaluation de leur efficacité, à déterminer par le rapport entre les besoins nets avec les besoins bruts en eau d'irrigation par culture donnée (Hsiao et *al.*, 2007 ; Wittling et Molle, 2017).

3-2-Evaluations de performance agronomique des cultures en fonction de l'eau d'irrigation

Les aptitudes d'usage de l'eau d'irrigation pour les principales cultures du périmètre de Tadla selon le système d'irrigation, sont évaluées par *l'efficacité agronomiques d'utilisation de l'eau* (E.U.E.) (Bouaziz et Belabbes, 2002 ; Van Halsema et Vincent, 2012).

F-Projections des projections à long-terme des besoins en eau des cultures.

Les projections des besoins en eau des cultures à long-terme se font en utilisant le simulateur MOSAICC afférent à l'organisme marocain de recherche agronomique l'INRA, consulté en ligne sur son propre site web. Ceci a eu lieu en se fixant en chaque requête réalisée un scénario parmi les trois scénarii mis à disposition par le système. Le scénario sélectionné est à composer selon les différentes combinaisons possibles en quatre modèles de traitements et d'analyses des données (FAO et INRA-Maroc, 2015). Les paramètres étudiés dans ces simulations pour la zone d'étude sont : la température, les précipitations et l'évapo-transpiration de référence.

Il est retenu la trentaine d'années futures afin d'évaluer avec précision les impacts effectifs des changements climatiques (GIEC, 2013), pour mener donc nos projections à l'horizon 2050 à propos des exigences en volumes d'eau d'irrigation des cultures principalement praticables au périmètre irrigué de Tadla.

Par la suite, il est objet de déterminer le volume prévisionnel global en eau exigée pour la zone d'étude entière. Aussi, il est à quantifier le volume d'eau nécessaire attendu à l'hectare assolé en cultures. En dernier lieu, le pouvoir prétendu de la couverture des besoins en eau des cultures est à approcher en fonction des disponibilités hydriques susceptible d'être accordées par les barrages hydrauliques desservant la zone irriguée du périmètre de Tadla.

G-Les traitements statistiques et numériques des données

En guise d'application des méthodes statistiques précitées afin d'exploiter des données afférentes à la zone d'étude, il est question de faire des traitements statistiques numériques à l'aide de logiciels spécifiques, notamment les suivants : « SPSS », « R » et « Excel » et spécialement avec le logiciel « *Khronostat* » pour effectuer les analyses de tendance des séries chronologiques, périodiques ou temporelles (Boyer, 1998 ; Traoré et *al.*, 2017). La base de données soumis aux traitements numériques informatiques escomptés, portent sur différents paramètres et indices agro-climatiques (précipitations annuelles et saisonnières, températures, ETo, indices de sécheresse, indices d'aridité, ...) à l'issue des enregistrements au périmètre de Tadla sur la durée de 60 ans (1958-2018).

Annexe 2

Formulaire d'enquête

**Enquête agro-économique comparative entre avant et après projet
de reconversion collective en système d'irrigation localisée.**

Période de réalisation: 2015/2016 à 2017/2018

Nom et prénom	Code client	N° Parcelle	N° Bloc	AUEA	Adresse	Téléphone

1. Superficie totale de l'exploitation : ha
 Partie dans la zone de reconversion : ha Nbre parcelles :
 Partie hors zone de reconversion : ha Nbre parcelles :

2. Composition de la famille ?

* Nombre de personnes totales : ; Nombre d'adultes : ; jeunes (> 7 ans):.....

* Nombre de ceux qui participent au travail :

3. Propriété et exploitation

- SAU en propriété directement exploitée :ha
- SAU prise en location :ha Prix de location en Dh/ha :
- SAU prise en association : Type de contrat :

4. Propriété en indivision (frères/sœurs) ? **OUI NON** Nbre héritiers :

5. Exploitation en commun ? **OUI NON**

Si OUI, pourra t-il avoir les procurations des cohéritiers ? **OUI NON**

Système de cultures : SAU Totale :ha, répartition par culture

Campagne agricole 2017/18

N°	Culture (indiquer celles en dérobée)	Superficie (ha)	Rendement moyen sur 3ans (préciser en q/ha ou t/ha)	Prix moyen de vente en DH/ql ou tonne (préciser)	Mode et période de vente
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

6. Montant de la facture de l'eau d'irrigation/ Campagne :

	1er trim.	2ème trim.	1er trim.	1er trim.	TOTAL
Campagne 16/17					
Campagne 17/18					

Voir CGR

Pompage de la nappe (Estimation):(Montant)

7. Qui prend les décisions dans l'exploitation ?

- Lui-même
- Quelqu'un d'autre : (à préciser)

8. A-t-il déjà assisté à des activités du projet de reconversion : **OUI NON**

Si OUI lesquelles :

- Essais de démonstration
- Autres : (à préciser)

9. Compte-t-il développer son élevage ? **OUI NON**

Si OUI comment ?

- Augmentation de la taille du cheptel : (indiquer les effectifs supplémentaires qu'il compte acquérir)
Achat de génisses améliorées :
Achat d'antennes :
- Augmentation de la sole fourragère : (indiquer les effectifs supplémentaires qu'il compte acquérir)

Culture fourragère	Superficie en ha
Luzerne	
Maïs ensilage	

10. A-t-il des besoins d'activités d'appui et d'encadrement ? **OUI NON**

Si oui, les spécifier :

Formations	Thèmes
Encadrement (visites de techniciens)	Type de technique
Visites de parcelles de démonstration : Oui / Non	
Autres :	

11. Fiches technico-économiques des cultures

Culture 1 :

SYSTEME D'IRRIGATION¹ : **SUPERFICIE :**

ORIGINE DE L'EAU :

OPERATIONS Culturales	Mois	Mode	FOURNITURES				MATERIEL					MAIN D'ŒUVRE					
			Nature	U	Qté	Coût Dh/U	Mont En DH	Nature	U	Nb fois	Coût DH/U	Mont En DH	Fam. Nb jrs	Sal. Nb jrs	Coût DH/ j	Mont. en DH	
Labours		Méc															
Désinf du sol																	
Semis et Recouvrement			Sem sélec														
			Sem loc														
Fertilisation																	
Fumier																	
Engrais Chim																	
Binage, sarcl																	
Désherbage		chim															
Traitement Phyto																	
Irrigation			Gasoil														
			Butane														
Moisson																	
Battage																	
Bottelage																	
Récolte																	
Sechage																	
Transport																	

(A RAPPORTER A L'HA)

IRRIGATION

IRRIGATION	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jt	Aôut	Sept
Nombre												
Durée(en heure)												
Ecartement entre rampe (cm)												

Annexe 3

Liste des agriculteurs enquêtés

Enquête agro-économique comparative entre avant et après projet
de reconversion collective en système d'irrigation localisée.

Période de réalisation : 2015/2016 à 2017/2018

N° Parcelle	N° du Bloc	Association d'Usagers d'Eau Agricole (AUEA)	SAU totale en exploitation par agriculteur (Ha)	Superficie équipée en irrigation localisée (Ha)
1	62	AL OMRANIA	3,45	0,6
2	43	ITTIHAD	5,2	0,9
3	43	ITTIHAD	5,2	1,11
4	1	ITTIHAD	2,15	1,24
5	30	ITTIHAD	1,434	1,24
6	43	ITTIHAD	5,18	1,68
7	62	AL OMRANIA	12,77	1,9
8	1	ITTIHAD	3,05	2,1
9	5	ITTIHAD	3,85	2,18
10	14	ITTIHAD	5,22	2,44
11	47	ITTIHAD	5,51	2,52
12	53	AL OMRANIA	2,76	0,6
13	49	ITTIHAD	3,05	0,9
14	14	ITTIHAD	5,26	3,3
15	62	AL OMRANIA	2,8	2,8
16	43	ITTIHAD	5,18	3,6
17	37	ITTIHAD	3,7	1,1
18	29	ITTIHAD	23,8	5,07
19	57- A	AL OMRANIA	4,42	0,6
20	21	ITTIHAD	4,8	0,71
21	15	ITTIHAD	5,26	5,18
22	14	ITTIHAD	12,3	5,2
23	29	ITTIHAD	7,22	5,2
24	35	ITTIHAD	3,3	5,2
25	4	ITTIHAD	5,2	3,94
26	42	ITTIHAD	5,22	1,11
27	31	ITTIHAD	5,51	2,52
28	32	ITTIHAD	5,6	1,68
29	83	AL OMRANIA	5,63	0,6
30	57	AL OMRANIA	6,71	1,48
31	69	AL OMRANIA	11,06	6,94
32	62	AL OMRANIA	7,29	2,18
33	3	ITTIHAD	5,63	5,63
34	57	AL OMRANIA	12,77	6,71
35	57- A	AL OMRANIA	16,48	6,95
36	81	AL OMRANIA	7,22	4,8
37	14	ITTIHAD	5,2	4,1
38	58	AL OMRANIA	5,26	1
39	57- A	AL OMRANIA	7,29	5,18

Annexe 4

Formulaire d'enquête

Enquête agricole de caractérisation de l'irrigation efficiente en comparaison avec irrigation classique dans le périmètre irrigué du Tadla

Période de réalisation: Année 2019

Date :

I/-Identification de l'exploitation agricole :

- Nom de l'exploitant :Mle : CDA : ADA :
- SAU :
- Statut juridique de la terre :
- Mode de faire valoir :
 - * Direct :
 - * Indirect : Association :
 - Location : Prix de location :

II/-Caractéristiques de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation agricole :

Désignation	Avant- projet irrigation efficiente	Après-projet irrigation efficiente
Système d'irrigation adopté :		
-Type (Gravitaire,...)		
- Année d'installation		
- Coût du système d'irrigation (Dh/ha)		
- Superficie irriguée (Ha)		
- Efficience irrigation (%)		
Approvisionnement en eau souterraine :		
- Nombre de puits ou forages		
- Profondeur des puits ou forages (m)		
- Equipement du point d'eau (Dh)		
Volume eau irrigation consommée (m3/ campagne) :		
- Origine réseau		
- Origine nappe souterraine d'eau		

III/-Spécificités du système d'irrigation efficiente:

- **Système d'irrigation installé :**
- **Durée d'irrigation /jour** (Heures): Maximum : ; Minimum.....
- **Dose apportée par jour** (m3/ha):

IV/-Occupations du sol :

A/-Avant-projet de l'irrigation efficiente :

Cultures	Zone réseau		Zone Bour		Total	
	Campagne n-2	Campagne n-1(*)	n-2	n-1	n-2	n-1
+Betterave						
+Céréales						
+Maraîchage						
-						
-						
+Agrumes						
+Olivier						
+Fourrages						
.....						

NB : () Campagne précédant l'installation du système d'irrigation efficiente.*

B/-Après -projet d'irrigation efficiente :

Cultures	Zone réseau		Zone Bour		Total	
	Campagne 2016/17	Campagne 2017/18	2016/17	2017/18	2016/17	2017/18
+Betterave +Céréales +Maraîchage - - +Agrumes +Olivier +Cultures fourragères						

V/-Opérations culturales :

+ Culture :.....

Poste n°1 : Travaux du sol

Opérations	Avant-projet de l'irrigation efficiente (campagne n-1)			Après projet de l'irrigation efficiente (campagne 2017/18)		
	Type outil utilisé	Nbre Passage	Coût (Dh/Ha)	Type outil utilisé	Nbre. Passage	Coût (Dh/Ha)
+ Labour profond + Labour moyen + Cover-cropage + Confection seguias + Confection billions +						
Mains d'œuvre	Nbre (U JTH)	Prix unit (Dh/U)	Coût total (Dh/ha)	Nbre (U JTH)	Prix unit (Dh/U)	Coût total (Dh/ha)

Poste n°2 : Semis

+ Avant-projet de l'irrigation efficiente (Campagne n-1) :

	Qté utilisé (U/Ha)	Prix unitaire (Dh/ql)	Mode de semis	Mains d'œuvre		Coût total opération
				Nbre(U JTH)	Prix unit (Dh / U)	
Semences						
Plants						

+ Après projet de l'irrigation efficiente (Campagne 2017/18) :

	Qté utilisé (U/Ha)	Prix unitaire (Dh/ql)	Mode de Semis	Mains d'œuvre		Coût total opération
				Nbre (U JTH)	Prix unit (Dh / U)	
Semences						
Plants						

Poste n°3 : Fertilisation

Désignation	Avant-projet de l'irrigation efficiente (campagne n-1)				Après projet de l'irrigation efficiente (campagne 2017/18)			
	Type de fertilisant	Quantité (Kg/Ha)	Mode épandage	Coût (Dh/Ha)	Type de fertilisant	Quantité (Kg/Ha)	Mode Fertigation	Coût (Dh/Ha)
- Fumure organique								
- Fumure minérale								
Mains d'œuvre	Nbre (U JTH)		Prix unit (Dh/U)	Coût total (Dh/ha)	Nbre (U JTH)		Prix unit (Dh/U)	Coût total (Dh/ha)

Poste n°4 : Protection phytosanitaire

Avant-projet de l'irrigation efficiente (campagne n-1)					Après projet de l'irrigation efficiente (campagne 2017/18)				
Parasite ou adventice traité	Matériel utilisé	Pesticide Utilisé	Quantité Pesticide utilisée (Dh/u)	Coût (Dh/Ha)	Parasite ou adventice traité	Matériel utilisé	Pesticide utilisé	Quantité Pesticide utilisée (Dh/u)	Coût (Dh/Ha)
Mains d'œuvre		Nbre (U JTH)		Prix unit (Dh/U)	Coût total (Dh/ha)	Nbre (U JTH)		Prix unit (Dh/U)	Coût total (Dh/ha)

Poste n° 5 : Conduite de l'irrigation

	Avant-projet de l'irrigation efficiente (campagne n-1)					Après projet de l'irrigation efficiente (campagne 2017/18)						
	Stade cultural	Durée irrigation (heures)	Debit (m ³ /h)	M.O		Coût carburant (Dh/irrig.)	Stade cultural	Durée irrigation (heures)	Debit (m ³ /h) U JTH	M.O		Coût carburant (Dh/irrig.)
				U JTH	Prix U					U JTH	Prix U	
1 ^{ère} irrigation Réseau Pompage												
2 ^{ème} irrigation Réseau Pompage												
3 ^{ème} irrigation Réseau Pompage												
4 ^{ème} irrigation Réseau Pompage												
Autres irrigation.												
Fréquence irrigation efficiente												

Poste n° 6 : Entretien de la culture

	Avant-projet de l'irrigation efficiente (campagne n-1)				Après projet de l'irrigation efficiente (campagne 2017/18)			
	Nombre	Stade Cultural	M.O		Nombre	Stade cultural	M.O	
			U JTH	Prix Unit.			U JTH	Prix Unit.
- Binage								
-Sarclage								
- Taille								
-								
-								

Poste n° 7 : Récolte et commercialisation

	Avant-projet de l'irrigation efficiente (campagne n-1)					Après projet de l'irrigation efficiente (campagne 2017/18)						
	Période de récolte « mois »	Coût récolte mécan.	Qté produite (T/ha Qx/ha)	Prix unitaire vente (Dh/u produit)	M.O		Période de récolte « mois »	Coût récolte mécan.	Qté produite (T/ha Qx/ha)	Prix unitaire vente (Dh/u produit)	M.O	
					NbreU JTH	Prix Unit.					NbreU JTH	Prix Unit.
Production												
S/produits												
Travaux post-récolte												

Appréciations technico-économique de l'agriculteur enquêté sur la conduite du système d'irrigation adopté:

Propositions de l'agriculteur enquêté en vue de surmonter ses contraintes éventuelles et d'améliorer l'utilisation du système d'irrigation adopté:

Visions de l'agriculteur en matière d'extension et de mesures de réadaptation possible de son système d'irrigation :

Annexe 5

Liste des agriculteurs enquêtés

**Enquête agricole de caractérisation de l'irrigation efficiente
en comparaison avec irrigation classique dans le périmètre irrigué du Tadla**

Période de réalisation : Année 2019

N° Exploitation	CDA	Superficie totale exploitation	Cultures							Système irrigation	
			Blé	Betterave	Luzerne	Agrumes		Maraichage			
		(ha)				Clémentinier	Oranger	Melon	Oignon	Gravitaire	Localisée
1	521	18					+			+	
2	536	40	+		+				+	+	
3	508	5	+		+			+		+	
4	537	59				+	+			+	
5	524	18					+			+	
6	524	6					+			+	
7	512	6		+							+
8	521	63					+			+	
9	523	233				+	+				+
10	524	22		+				+	+	+	+
11	523	5					+			+	

Annexe 6

Tests de caractérisation des distributions des données pluviométriques : Normalité par le test de Chapiro-Wilk, égalité des variances par le test de Fisher et par le test de Levene (Périmètre du Tadla ; période de 1958 à 2018).

Stations	p-value de test normalité (Test de Chapiro-Wilk)		p-value de test homogénéité (avant/ après rupture)		Stations	p-value de test normalité (Test de Chapiro-Wilk)		p-value de test homogénéité (avant/ après rupture)	
	Avant rupture	Après rupture	Test de Levene (alpha=0,05)	Test de Fisher (alpha=0,05)		Avant rupture	Après rupture	Test de Levene (alpha=0,05)	Test de Fisher (alpha=0,05)
501	0,936	0,177	0,203	53%	523	0,114	0,853	0,743	71%
503	0,999	0,170	0,966	83%	525	0,569	0,455	0,393	65%
AS	0,993	0,260	0,663	29%	526	0,859	0,844	0,906	79%
504	0,998	0,132	0,964	57%	527	0,866	0,554	0,817	74%
505	0,998	0,867	0,949	59%	528	0,239	0,397	0,692	94%
507	0,727	0,486	0,679	83%	529	0,277	0,076	0,417	99%
508	0,980	0,509	0,567	28%	530	0,4772	0,0918	0,971	95%
510	0,977	0,556	0,900	63%	531	0,5806	0,4855	0,354	59%
511	0,982	0,153	0,639	90%	532	0,6166	0,5303	0,875	72%
512	0,950	0,450	0,502	48%	533	0,8854	0,8683	0,128	77%
520	0,644	0,517	0,481	61%	534	0,5166	0,4083	0,512	79%
521	0,114	0,853	0,544	71%	535	0,8030	0,3581	0,731	65%
OG	0,068	0,196	0,555	88%	536	0,6486	0,8778	0,618	100%
					538	0,9549	0,9106	0,531	79%

Annexe 7

RESULTATS DES TESTS STATISTIQUES PRELIMINAIRES AUX TESTS DE TENDANCES ET D'HOMOGENEITE SUR LES DISTRIBUTIONS DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES PERIODIQUES AU PERIMETRE DU TADLA EN PERIODE D'OBSERVATIONS DE 1958 A 2018.

Tableau A : Test *Chapiro-Wilk* de la normalité sur les séries pluviométriques périodiques par stations de mesures au périmètre de Tadla (Période observations de 1958 à 2018)

Stations Variables	CDA 501		CDA 503		CDA 504		CDA 505		CDA 507		CDA 508		CDA 510		CDA 511		CDA 512	
	Sta.	Sig.																
Septembre	0,686	4,85E-10	0,653	1,94E-10	0,667	2,12E-10	0,734	4,17E-09	0,654	1,27E-10	0,632	5,37E-11	0,690	5,77E-10	0,660	1,61E-10	0,704	1,05E-09
Octobre	0,837	1,27E-06	0,870	1,68E-05	0,866	9,60E-06	0,885	3,94E-05	0,864	7,97E-06	0,890	5,57E-05	0,898	1,12E-04	0,872	1,40E-05	0,892	6,59E-05
Novembre	0,932	2,39E-03	0,862	9,63E-06	0,918	6,43E-04	0,921	8,38E-04	0,918	6,67E-04	0,918	6,45E-04	0,926	1,32E-03	0,914	4,27E-04	0,911	3,47E-04
Décembre	0,769	2,45E-08	0,760	2,31E-08	0,771	2,71E-08	0,761	1,65E-08	0,737	4,99E-09	0,776	3,48E-08	0,759	1,49E-08	0,770	2,54E-08	0,746	7,67E-09
Janvier	0,889	5,52E-05	0,846	3,24E-06	0,853	3,62E-06	0,849	2,79E-06	0,856	4,73E-06	0,847	2,54E-06	0,845	2,14E-06	0,866	9,18E-06	0,857	4,96E-06
Février	0,880	2,59E-05	0,891	8,42E-05	0,888	4,78E-05	0,861	6,55E-06	0,868	1,08E-05	0,862	6,94E-06	0,856	4,53E-06	0,880	2,63E-05	0,826	6,56E-07
Mars	0,906	2,10E-04	0,877	2,76E-05	0,879	2,39E-05	0,854	4,05E-06	0,866	9,51E-06	0,841	1,71E-06	0,864	8,36E-06	0,894	7,82E-05	0,860	6,00E-06
Avril	0,802	1,55E-07	0,819	6,00E-07	0,807	2,04E-07	0,814	2,99E-07	0,827	6,91E-07	0,811	2,51E-07	0,814	3,09E-07	0,788	7,00E-08	0,827	6,65E-07
Mai	0,831	8,80E-07	0,785	8,32E-08	0,796	1,06E-07	0,761	1,62E-08	0,755	1,22E-08	0,773	2,97E-08	0,761	1,63E-08	0,816	3,51E-07	0,723	2,55E-09
Juin	0,540	2,00E-12	0,612	4,04E-11	0,601	1,67E-11	0,587	1,00E-11	0,586	9,75E-12	0,616	2,92E-11	0,619	3,22E-11	0,615	2,75E-11	0,577	7,09E-12
Juillet	0,348	7,41E-15	0,298	3,76E-15	0,324	3,99E-15	0,336	5,36E-15	0,338	5,65E-15	0,333	5,05E-15	0,360	1,01E-14	0,310	2,82E-15	0,350	7,72E-15
Août	0,585	9,44E-12	0,558	6,00E-12	0,597	1,41E-11	0,495	4,72E-13	0,413	4,20E-14	0,491	4,16E-13	0,525	1,22E-12	0,572	5,96E-12	0,467	1,99E-13
SON	0,969	0,13 (NS)	0,936	4,24E-03	0,957	3,30E-02	0,954	2,44E-02	0,949	1,36E-02	0,952	1,84E-02	0,952	1,88E-02	0,960	4,69E-02	0,962	5,70E-02
DJF	0,976	0,28 (NS)	0,963	0,07 (NS)	0,957	3,20E-02	0,950	1,55E-02	0,949	1,46E-02	0,952	2,00E-02	0,950	1,63E-02	0,968	0,12 (NS)	0,953	2,09E-02
MAM	0,949	1,37E-02	0,923	1,22E-03	0,919	7,24E-04	0,900	1,34E-04	0,889	5,21E-05	0,898	1,12E-04	0,907	2,41E-04	0,924	1,08E-03	0,899	1,25E-04
JJA	0,589	1,06E-11	0,538	3,12E-12	0,550	2,80E-12	0,595	1,31E-11	0,676	3,18E-10	0,548	2,57E-12	0,669	2,30E-10	0,569	5,22E-12	0,600	1,62E-11
SemH	0,986	0,74 (NS)	0,970	0,16 (NS)	0,968	0,12 (NS)	0,976	0,29 (NS)	0,986	0,73 (NS)	0,969	0,13 (NS)	0,984	0,63 (NS)	0,982	0,51 (NS)	0,972	0,19 (NS)
SemS	0,963	0,07 (NS)	0,950	1,91E-02	0,948	1,32E-02	0,943	7,15E-03	0,911	3,33E-04	0,933	2,64E-03	0,939	4,65E-03	0,955	2,68E-02	0,934	2,83E-03
Annuel	0,982	0,53 (NS)	0,980	0,41 (NS)	0,984	0,62 (NS)	0,987	0,76 (NS)	0,983	0,56 (NS)	0,985	0,69 (NS)	0,984	0,59 (NS)	0,984	0,62 (NS)	0,984	0,62 (NS)

Stations Variables	AhI Souss	CDA 520		CDA 521		CDA 523		CDA 525		CDA 526		CDA 527		CDA 528		CDA 529		
	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.		
Septembre	0,693	6,64E-10	0,720	2,18E-09	0,708	1,27E-09	0,772	2,88E-08	0,763	1,84E-08	0,731	3,73E-09	0,685	4,62E-10	0,683	4,32E-10	0,712	1,55E-09
Octobre	0,885	3,92E-05	0,905	1,97E-04	0,895	8,60E-05	0,882	3,20E-05	0,845	2,20E-06	0,850	3,06E-06	0,791	8,32E-08	0,831	8,90E-07	0,723	2,57E-09
Novembre	0,920	7,65E-04	0,935	3,23E-03	0,930	2,01E-03	0,941	6,17E-03	0,957	3,31E-02	0,935	3,41E-03	0,919	6,72E-04	0,926	1,31E-03	0,924	1,16E-03
Décembre	0,768	2,38E-08	0,760	1,51E-08	0,796	1,10E-07	0,830	8,33E-07	0,868	1,09E-05	0,787	6,46E-08	0,791	8,30E-08	0,785	5,98E-08	0,808	2,15E-07
Janvier	0,839	1,49E-06	0,838	1,37E-06	0,891	6,37E-05	0,892	6,98E-05	0,899	1,20E-04	0,883	3,36E-05	0,870	1,22E-05	0,854	4,11E-06	0,886	4,20E-05
Février	0,872	1,41E-05	0,871	1,35E-05	0,886	4,14E-05	0,919	6,96E-04	0,920	7,61E-04	0,904	1,83E-04	0,904	1,84E-04	0,898	1,10E-04	0,890	5,87E-05
Mars	0,883	3,34E-05	0,888	5,02E-05	0,899	1,16E-04	0,873	1,55E-05	0,889	5,22E-05	0,873	1,51E-05	0,830	8,33E-07	0,881	2,76E-05	0,866	9,58E-06
Avril	0,848	2,61E-06	0,809	2,27E-07	0,855	4,15E-06	0,854	3,99E-06	0,850	2,97E-06	0,856	4,27E-06	0,837	1,26E-06	0,827	6,90E-07	0,847	2,55E-06
Mai	0,812	2,78E-07	0,793	9,27E-08	0,800	1,34E-07	0,820	4,42E-07	0,794	9,64E-08	0,825	5,85E-07	0,776	3,65E-08	0,766	2,10E-08	0,807	2,06E-07
Juin	0,582	8,27E-12	0,612	2,46E-11	0,662	1,78E-10	0,574	6,25E-12	0,537	1,79E-12	0,580	7,70E-12	0,560	3,95E-12	0,443	9,82E-14	0,584	8,93E-12
Juillet	0,299	2,14E-15	0,328	4,43E-15	0,393	2,41E-14	0,291	1,75E-15	0,358	9,40E-15	0,332	4,89E-15	0,309	2,73E-15	0,295	1,92E-15	0,296	2,00E-15
Août	0,496	4,82E-13	0,420	5,14E-14	0,487	3,71E-13	0,473	2,35E-13	0,429	6,61E-14	0,509	7,18E-13	0,506	6,61E-13	0,456	1,42E-13	0,449	1,17E-13
SON	0,954	2,43E-02	0,971	0,16 (NS)	0,974	0,23 (NS)	0,981	0,45 (NS)	0,974	0,22 (NS)	0,975	0,26 (NS)	0,961	5,25E-02	0,962	0,06 (NS)	0,964	0,07 (NS)
DJF	0,958	3,56E-02	0,962	0,06 (NS)	0,977	0,30 (NS)	0,979	0,40 (NS)	0,971	0,16 (NS)	0,957	3,32E-02	0,957	3,42E-02	0,955	2,67E-02	0,977	3,07E-01
MAM	0,945	8,68E-03	0,929	1,80E-03	0,931	2,09E-03	0,947	1,10E-02	0,956	3,07E-02	0,946	1,02E-02	0,947	1,16E-02	0,919	7,00E-04	0,946	9,70E-03
JJA	0,633	5,57E-11	0,553	3,09E-12	0,617	2,98E-11	0,517	9,28E-13	0,587	1,01E-11	0,639	7,03E-11	0,656	1,40E-10	0,565	4,63E-12	0,596	1,36E-11
SemH	0,976	0,28 (NS)	0,978	0,33 (NS)	0,982	0,54 (NS)	0,975	0,26 (NS)	0,976	0,30 (NS)	0,969	0,14 (NS)	0,980	0,41 (NS)	0,975	0,25 (NS)	0,954	2,36E-02
SemS	0,960	4,91E-02	0,954	2,47E-02	0,946	9,95E-03	0,959	4,09E-02	0,974	0,22 (NS)	0,958	3,67E-02	0,961	5,13E-02	0,941	5,89E-03	0,964	7,23E-02
Annuel	0,983	0,58 (NS)	0,984	0,62 (NS)	0,987	0,76 (NS)	0,977	0,32 (NS)	0,984	0,61 (NS)	0,983	0,58 (NS)	0,985	0,69 (NS)	0,981	0,49 (NS)	0,957	3,53E-02

Stations Variables	CDA 530		CDA 531		CDA 532		CDA 533		CDA 534		CDA 535		CDA 536		CDA 538		Ouled Gnaou	
	Sta.	Sig. Sta.	Sig.															
Septembre	0,719	2,12E-09	0,712	1,50E-09	0,716	1,84E-09	0,651	1,15E-10	0,621	3,52E-11	0,645	8,75E-11	0,690	5,69E-10	0,734	4,32E-09	0,757	1,32E-08
Octobre	0,833	1,00E-06	0,819	4,19E-07	0,834	1,09E-06	0,855	4,31E-06	0,834	1,09E-06	0,826	6,22E-07	0,870	1,23E-05	0,884	3,69E-05	0,878	2,32E-05
Novembre	0,942	6,34E-03	0,931	2,09E-03	0,923	1,00E-03	0,899	1,21E-04	0,901	1,46E-04	0,943	7,19E-03	0,931	2,12E-03	0,910	3,12E-04	0,935	3,13E-03
Décembre	0,796	1,09E-07	0,765	2,03E-08	0,755	1,20E-08	0,778	3,90E-08	0,777	3,77E-08	0,809	2,33E-07	0,804	1,70E-07	0,746	7,79E-09	0,823	5,36E-07
Janvier	0,868	1,11E-05	0,846	2,34E-06	0,858	5,33E-06	0,854	4,13E-06	0,861	6,37E-06	0,856	4,46E-06	0,856	4,69E-06	0,860	5,88E-06	0,888	5,02E-05
Février	0,876	1,92E-05	0,888	4,79E-05	0,884	3,50E-05	0,837	1,31E-06	0,858	5,17E-06	0,891	6,48E-05	0,863	7,76E-06	0,839	1,50E-06	0,913	4,13E-04
Mars	0,898	1,09E-04	0,884	3,50E-05	0,871	1,35E-05	0,849	2,85E-06	0,874	1,68E-05	0,884	3,57E-05	0,887	4,60E-05	0,871	1,36E-05	0,877	2,13E-05
Avril	0,829	7,85E-07	0,847	2,53E-06	0,842	1,74E-06	0,799	1,27E-07	0,799	1,27E-07	0,847	2,49E-06	0,843	1,92E-06	0,815	3,22E-07	0,865	8,93E-06
Mai	0,801	1,41E-07	0,745	7,35E-09	0,753	1,07E-08	0,792	8,56E-08	0,777	3,83E-08	0,831	9,02E-07	0,794	9,72E-08	0,757	1,34E-08	0,856	4,44E-06
Juin	0,582	8,36E-12	0,634	5,65E-11	0,653	1,21E-10	0,456	1,45E-13	0,472	2,34E-13	0,528	1,33E-12	0,552	2,92E-12	0,550	2,80E-12	0,616	2,85E-11
Juillet	0,310	2,82E-15	0,401	3,01E-14	0,389	2,18E-14	0,319	3,49E-15	0,330	4,65E-15	0,385	1,93E-14	0,336	5,40E-15	0,391	2,26E-14	0,314	3,07E-15
Août	0,433	7,40E-14	0,478	2,74E-13	0,428	6,36E-14	0,420	5,14E-14	0,421	5,26E-14	0,429	6,60E-14	0,437	8,20E-14	0,451	1,24E-13	0,506	6,58E-13
SON	0,981	0,48 (NS)	0,970	0,15 (NS)	0,961	5,41E-02	0,918	6,52E-04	0,893	7,45E-05	0,941	6,01E-03	0,979	0,40 (NS)	0,955	2,78E-02	0,967	0,10 (NS)
DJF	0,956	3,06E-02	0,962	0,06 (NS)	0,961	0,06 (NS)	0,968	0,11 (NS)	0,966	0,09 (NS)	0,965	0,08 (NS)	0,96					

Tableau B : Test Kolmogorov-Smirnov de la normalité sur séries pluviométriques périodiques par stations de mesures au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1958 à 2018)

Stations Variables	CDA 501		CDA 503		CDA 504		505		CDA 507		CDA 508		CDA 510		CDA 511		CDA 512	
	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.
septembre	0,257	1,02E-10	0,267	3,12E-11	0,268	1,18E-11	0,242	2,15E-09	0,272	4,25E-12	0,277	1,47E-12	0,259	6,54E-11	0,272	5,06E-12	0,255	1,71E-10
octobre	0,178	5,81E-05	0,159	9,11E-04	0,161	5,26E-04	0,154	1,23E-03	0,171	1,61E-04	0,147	2,43E-03	0,143	3,72E-03	0,160	6,07E-04	0,150	1,89E-03
novembre	0,100	0,2 (NS)	0,139	6,76E-03	0,111	0,06 (NS)	0,114	5,15E-02	0,139	5,56E-03	0,116	4,41E-02	0,123	2,50E-02	0,147	2,48E-03	0,142	4,35E-03
décembre	0,140	5,22E-03	0,150	2,27E-03	0,150	1,75E-03	0,185	2,43E-05	0,180	4,46E-05	0,152	1,48E-03	0,160	6,20E-04	0,159	6,68E-04	0,165	3,19E-04
janvier	0,146	2,65E-03	0,175	1,31E-04	0,169	1,91E-04	0,163	4,04E-04	0,175	8,65E-05	0,166	2,92E-04	0,169	1,89E-04	0,163	4,32E-04	0,165	3,17E-04
février	0,144	3,27E-03	0,136	9,70E-03	0,143	3,77E-03	0,149	2,02E-03	0,148	2,17E-03	0,153	1,34E-03	0,156	9,56E-04	0,146	2,73E-03	0,182	3,71E-05
mars	0,134	9,13E-03	0,152	1,86E-03	0,142	4,24E-03	0,163	3,98E-04	0,160	6,15E-04	0,164	3,85E-04	0,160	6,21E-04	0,141	4,50E-03	0,164	3,68E-04
avril	0,204	1,55E-06	0,196	8,03E-06	0,201	2,15E-06	0,201	2,17E-06	0,194	6,55E-06	0,210	5,56E-07	0,209	6,89E-07	0,210	5,32E-07	0,201	2,28E-06
mai	0,193	7,08E-06	0,214	4,93E-07	0,214	2,88E-07	0,224	5,17E-08	0,230	1,83E-08	0,219	1,33E-07	0,226	3,86E-08	0,199	2,92E-06	0,246	9,32E-10
juin	0,344	7,99E-20	0,295	7,96E-14	0,299	9,12E-15	0,304	3,24E-15	0,313	3,36E-16	0,304	2,69E-15	0,292	4,98E-14	0,296	2,24E-14	0,305	2,29E-15
juillet	0,379	2,52E-24	0,394	1,87E-25	0,385	4,63E-25	0,429	1,75E-31	0,450	7,57E-35	0,424	1,06E-30	0,424	8,99E-31	0,393	3,18E-26	0,407	3,94E-28
août	0,378	4,23E-24	0,358	8,86E-21	0,347	4,05E-20	0,385	4,77E-25	0,425	7,79E-31	0,409	1,74E-28	0,418	8,09E-30	0,371	2,89E-23	0,432	6,06E-32
SON	0,095	0,2 (NS)	0,101	0,2 (NS)	0,115	4,82E-02	0,111	0,07 (NS)	0,100	0,2 (NS)	0,104	0,17 (NS)	0,140	5,06E-03	0,088	0,2 (NS)	0,101	0,2 (NS)
DJF	0,093	0,2 (NS)	0,090	0,2 (NS)	0,110	0,07 (NS)	0,109	0,07 (NS)	0,118	3,83E-02	0,101	0,2 (NS)	0,119	3,32E-02	0,103	0,18 (NS)	0,118	3,77E-02
MAM	0,088	0,2 (NS)	0,107	0,10 (NS)	0,109	0,07 (NS)	0,111	0,06 (NS)	0,117	3,97E-02	0,121	2,89E-02	0,106	9,36E-02	0,109	0,07 (NS)	0,110	0,07 (NS)
JJA	0,291	6,71E-14	0,297	5,23E-14	0,292	5,31E-14	0,291	7,34E-14	0,267	1,38E-11	0,300	7,61E-15	0,266	1,67E-11	0,288	1,36E-13	0,289	1,12E-13
Sh	0,085	0,2 (NS)	0,098	0,2 (NS)	0,086	0,2 (NS)	0,068	0,2 (NS)	0,076	0,2 (NS)	0,131	1,17E-02	0,082	0,2 (NS)	0,055	0,2 (NS)	0,082	0,2 (NS)
Ss	0,086	0,2 (NS)	0,097	0,2 (NS)	0,135	8,51E-03	0,079	0,2 (NS)	0,096	0,2 (NS)	0,097	0,2 (NS)	0,083	0,2 (NS)	0,096	0,2 (NS)	0,089	0,2 (NS)
Annuel	0,080	0,2 (NS)	0,085	0,2 (NS)	0,073	0,2 (NS)	0,066	0,2 (NS)	0,090	0,2 (NS)	0,080	0,2 (NS)	0,088	0,2 (NS)	0,082	0,2 (NS)	0,081	0,2 (NS)

Stations Variables	Ahl Souss		CDA 520		CDA 521		CDA 523		CDA 525		CDA 526		CDA 527		CDA 528		CDA 529	
	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.
septembre	0,256	1,30E-10	0,242	2,15E-09	0,250	4,02E-10	0,238	3,98E-09	0,244	1,45E-09	0,239	3,50E-09	0,266	1,85E-11	0,266	1,59E-11	0,259	7,16E-11
octobre	0,149	2,05E-03	0,146	2,88E-03	0,138	6,07E-03	0,147	2,45E-03	0,187	1,68E-05	0,168	2,16E-04	0,197	3,91E-06	0,182	3,61E-05	0,214	2,68E-07
novembre	0,141	4,55E-03	0,106	9,20E-02	0,137	6,56E-03	0,095	0,2 (NS)	0,130	1,28E-02	0,118	3,72E-02	0,106	0,09 (NS)	0,098	0,2 (NS)	0,120	3,19E-02
décembre	0,161	5,00E-04	0,146	2,78E-03	0,143	3,73E-03	0,126	1,94E-02	0,120	3,12E-02	0,140	5,12E-03	0,147	2,57E-03	0,164	3,85E-04	0,132	1,15E-02
janvier	0,180	4,94E-05	0,174	1,04E-04	0,147	2,55E-03	0,148	2,17E-03	0,135	7,97E-03	0,152	1,51E-03	0,162	4,53E-04	0,192	9,26E-06	0,153	1,25E-03
février	0,147	2,53E-03	0,152	1,51E-03	0,144	3,27E-03	0,114	4,94E-02	0,122	2,72E-02	0,155	1,07E-03	0,119	3,48E-02	0,132	1,07E-02	0,149	1,92E-03
mars	0,137	6,87E-03	0,150	1,75E-03	0,142	4,05E-03	0,150	1,82E-03	0,141	4,85E-03	0,151	1,60E-03	0,167	2,50E-04	0,145	3,11E-03	0,154	1,12E-03
avril	0,178	6,15E-05	0,200	2,72E-06	0,175	8,60E-05	0,184	2,68E-05	0,187	1,79E-05	0,202	1,92E-06	0,184	2,85E-05	0,195	5,59E-06	0,178	5,79E-05
mai	0,223	5,98E-08	0,208	7,25E-07	0,203	1,63E-06	0,204	1,55E-06	0,208	7,81E-07	0,192	8,76E-06	0,220	1,03E-07	0,231	1,58E-08	0,203	1,70E-06
juin	0,304	3,32E-15	0,320	6,06E-17	0,317	1,28E-16	0,309	9,73E-16	0,320	5,24E-17	0,306	1,99E-15	0,314	2,82E-16	0,350	1,79E-20	0,308	9,97E-16
juillet	0,392	4,48E-26	0,404	1,04E-27	0,399	4,99E-27	0,403	1,27E-27	0,388	1,73E-25	0,403	1,13E-27	0,408	2,26E-28	0,437	9,65E-33	0,449	1,48E-34
août	0,402	1,85E-27	0,357	1,87E-21	0,336	7,93E-19	0,336	8,86E-19	0,352	9,86E-21	0,364	2,41E-22	0,333	1,88E-18	0,423	1,41E-30	0,347	3,69E-20
SON	0,118	3,66E-02	0,061	0,2 (NS)	0,076	0,2 (NS)	0,081	0,2 (NS)	0,082	0,2 (NS)	0,065	0,2 (NS)	0,098	0,2 (NS)	0,105	0,10 (NS)	0,102	0,19 (NS)
DJF	0,109	0,07 (NS)	0,088	0,2 (NS)	0,070	0,2 (NS)	0,086	0,2 (NS)	0,089	0,2 (NS)	0,136	7,71E-03	0,144	3,47E-03	0,124	2,28E-02	0,089	0,2 (NS)
MAM	0,090	0,2 (NS)	0,104	0,17 (NS)	0,109	0,07 (NS)	0,092	0,2 (NS)	0,089	0,2 (NS)	0,089	0,2 (NS)	0,104	0,17 (NS)	0,103	0,18 (NS)	0,093	0,2 (NS)
JJA	0,268	1,17E-11	0,304	2,67E-15	0,279	9,12E-13	0,310	7,66E-16	0,319	7,35E-17	0,277	1,73E-12	0,272	4,86E-12	0,310	6,93E-16	0,296	2,08E-14
Sh	0,069	0,2 (NS)	0,096	0,2 (NS)	0,068	0,2 (NS)	0,076	0,2 (NS)	0,094	0,2 (NS)	0,082	0,2 (NS)	0,061	0,2 (NS)	0,070	0,2 (NS)	0,074	0,2 (NS)
Ss	0,101	0,2 (NS)	0,086	0,2 (NS)	0,096	0,2 (NS)	0,096	0,2 (NS)	0,058	0,2 (NS)	0,076	0,2 (NS)	0,080	0,2 (NS)	0,096	0,2 (NS)	0,072	0,2 (NS)
Annuel	0,081	0,2 (NS)	0,078	0,2 (NS)	0,065	0,2 (NS)	0,082	0,2 (NS)	0,085	0,2 (NS)	0,047	0,2 (NS)	0,074	0,2 (NS)	0,055	0,2 (NS)	0,104	1,73E-01

Stations Variables	CDA 530		CDA 531		CDA 532		CDA 533		CDA 534		CDA 535		CDA 536		CDA 538		Ouled Gnaou	
	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.	Sta.	Sig.
septembre	0,278	1,18E-12	0,277	1,59E-12	0,291	6,97E-14	0,277	1,58E-12	0,284	3,48E-13	0,288	1,34E-13	0,263	2,91E-11	0,243	1,71E-09	0,232	1,40E-08
octobre	0,185	2,34E-05	0,193	7,42E-06	0,182	3,85E-05	0,174	1,10E-04	0,180	4,80E-05	0,185	2,44E-05	0,163	4,18E-04	0,156	9,73E-04	0,157	8,13E-04
novembre	0,123	2,40E-02	0,125	2,15E-02	0,126	1,86E-02	0,130	1,34E-02	0,153	1,37E-03	0,125	2,06E-02	0,131	1,20E-02	0,162	4,80E-04	0,113	0,06 (NS)
décembre	0,143	3,86E-03	0,169	1,95E-04	0,170	1,74E-04	0,158	7,35E-04	0,162	4,52E-04	0,139	5,63E-03	0,145	3,22E-03	0,182	3,69E-05	0,129	1,49E-02
janvier	0,162	4,58E-04	0,171	1,50E-04	0,169	1,87E-04	0,171	1,53E-04	0,168	2,32E-04	0,168	2,32E-04	0,166	2,73E-04	0,180	4,46E-05	0,150	1,91E-03
février	0,147	2,49E-03	0,129	1,48E-02	0,136	7,55E-03	0,166	2,97E-04	0,153	1,24E-03	0,127	1,67E-02	0,139	5,67E-03	0,162	4,67E-04	0,123	2,50E-02
mars	0,144	3,51E-03	0,154	1,18E-03	0,157	7,96E-04	0,173	1,14E-04	0,156	8,99E-04	0,151	1,57E-03	0,145	3,20E-03	0,160	5,72E-04	0,149	2,03E-03
avril	0,192	8,51E-06	0,187	1,91E-05	0,197	3,95E-06	0,209	6,11E-07	0,222	8,09E-08	0,205	1,20E-06	0,198	3,77E-06	0,218	1,44E-07	0,192	8,37E-06
mai	0,208	7,58E-07	0,239	3,71E-09	0,228	2,63E-08	0,221	9,16E-08	0,222	8,11E-08	0,199	3,13E-06	0,216	2,25E-07	0,233	1,14E-08	0,171	1,49E-04
juin	0,306	1,69E-15	0,288	1,33E-13	0,280	8,88E-13	0,344	8,11E-20	0,376	8,26E-24	0,319	6,52E-17	0,316	1,39E-16	0,313	3,33E-16	0,293	4,29E-14
juillet	0,420	4,44E-30	0,417	9,82E-30	0,415	2,37E-29	0,462	1,11E-36	0,430	1,05E-31	0,397	8,90E-27	0,418	9,24E-30	0,400	3,50E-27	0,394	2,61E-26
août	0,378	4,04E-24	0,339	3,40E-19	0,356	3,09E-21	0,415	2,35E-29	0,411	1,04E-28	0,363	3,16E-22	0,383	9,42E-25	0,406	5,52E-28	0,325	1,34E-17
SON	0,060	0,2 (NS)	0,085	0,2 (NS)	0,106	0,09 (NS)	0,116	4,20E-02	0,156	9,02E-04	0,104	0,17 (NS)	0,064	0,2 (NS)	0,082	0,2 (NS)	0,072	0,2 (NS)
DJF	0,115	4,67E-02	0,113	5,38E-02	0,122	2,57E-02	0,096	0,2 (NS)	0,096	0,2 (NS)	0,083	0,2 (NS)	0,089	0,2 (NS)	0,112	0,06 (NS)	0,091	0,2 (NS)
MAM	0,095	0,2 (NS)	0,135	8,35E-03	0,123	2,35E-02	0,112	5,88E-02	0,116	4,38E-02	0,098	0,2 (NS)	0,103	0,19 (NS)	0,112	0,06 (NS)	0,103	0,19 (NS)
JJA	0,296	2,03E-14	0,254	2,07E-10	0,251													

Tableau C : Tests de la colinéarité sur séries pluviométriques périodiques par stations agro-climatiques au périmètre du Tadla (Période d'observation de 1958 à 2018)

Stations	CDA 501		CDA 503		CDA 504		CDA 505		CDA 507		CDA 508		CDA 510		CDA 511		CDA 512	
	Tolé.	VIF																
septembre	0,674	1,483	0,697	1,435	0,842	1,188	0,742	1,347	0,796	1,256	0,866	1,155	0,847	1,180	0,881	1,135	0,833	1,200
octobre	0,634	1,577	0,663	1,508	0,863	1,158	0,659	1,517	0,824	1,213	0,878	1,139	0,769	1,300	0,872	1,146	0,855	1,169
novembre	2,7E-07	3,8E+05	8,3E+05	2,6E-07	0,823	1,215	0,479	2,089	0,804	1,243	0,828	1,208	0,856	1,168	0,792	1,262	0,825	1,212
décembre	0,380	2,631	0,437	2,289	0,844	1,184	0,376	2,658	0,864	1,157	0,887	1,128	0,817	1,224	0,798	1,254	0,835	1,198
janvier	0,384	2,604	0,483	2,071	0,855	1,170	2,1E-08	1,1E+07	0,805	1,242	0,824	1,213	0,736	1,359	0,807	1,238	0,804	1,244
février	0,295	3,385	0,294	3,406	0,791	1,265	0,434	2,303	0,832	1,201	0,826	1,210	0,791	1,264	0,777	1,287	0,799	1,252
mars	0,492	2,034	0,327	3,061	0,383	2,614	1,9E-08	1,4E+07	1,5E-07	1,9E+06	5,5E-08	5,3E+06	6,7E-08	4,4E+06	0,362	2,759	1,2E-07	2,2E+06
avril	0,321	3,116	1,3E+06	1,9E-07	3,3E-07	8,2E+05	0,321	3,113	0,372	2,686	0,362	2,759	0,381	2,622	1,5E-07	1,8E+06	0,383	2,608
mai	0,456	2,191	0,317	3,153	0,327	3,056	0,474	2,108	0,384	2,601	0,423	2,366	0,426	2,347	0,269	3,724	0,401	2,495
juin	0,512	1,953	0,760	1,316	0,722	1,385	0,777	1,288	0,906	1,103	0,885	1,130	0,696	1,437	0,633	1,580	0,740	1,351
juillet	0,000	Ind.	0,643	1,555	0,635	1,575	0,564	1,773	0,494	2,025	0,462	2,163	0,551	1,814	0,666	1,502	0,515	1,940
août	0,309	3,240	0,660	1,515	0,623	1,606	0,710	1,408	0,574	1,742	0,535	1,869	0,633	1,580	0,575	1,739	0,635	1,576
SON	2,7E-07	5,9E+05	2,6E+06	1,2E-07	5,2E-07	1,9E+06	2,0E-07	4,9E+06	3,4E-07	3,0E+06	2,9E-07	3,5E+06	2,4E-07	4,2E+06	7,4E-07	1,4E+06	2,7E-07	3,7E+06
DJF	2,7E-07	1,3E+06	8,6E+06	1,2E-07	2,0E-07	4,9E+06	4,9E-08	1,4E+07	2,9E-07	3,5E+06	9,2E-08	1,1E+07	5,6E-08	1,8E+07	3,7E-07	2,7E+06	8,9E-08	1,1E+07
MAM	0,000	Ind.	8,7E+06	1,1E-07	3,1E-07	3,0E+06	7,1E-08	1,3E+07	1,9E-07	5,2E+06	1,3E-07	7,2E+06	1,4E-07	6,7E+06	1,3E-07	7,3E+06	1,2E-07	7,4E+06
JJA	0,214	4,667	6,2E+06	1,6E-07	4,3E-07	2,3E+06	1,8E-07	5,6E+06	3,9E-07	2,6E+06	3,1E-07	3,2E+06	4,9E-07	2,0E+06	1,6E-07	6,3E+06	5,1E-07	2,0E+06
SemH	0,000	Ind.	0,153	6,540	0,167	5,977	0,208	4,814	0,220	4,546	0,220	4,536	0,221	4,525	0,145	6,911	0,205	4,873
SemS	2,7E-07	2,2E+06	0,157	6,361	1,8E-07	5,6E+06	0,187	5,346	3,1E-07	3,2E+06	4,3E-08	2,3E+07	5,3E-08	1,9E+07	3,3E-07	3,1E+06	7,1E-08	1,4E+07
Annuel	0,025	3,9E+01	0,035	28,461	0,023	43,632	0,017	58,699	0,027	37,393	0,018	55,889	0,029	34,764	0,009	117,184	0,051	19,765

Stations	Ahi Souss		CDA 520		CDA 521		CDA 523		CDA 525		CDA 526		CDA 527		CDA 528		CDA 529	
	Tolé.	VIF	Tolé.	VIF	Tolé.	VIF	Tolé.	VIF	Tolé.	VIF	Tolé.	VIF	Tolé.	VIF	Tolé.	VIF	Tolé.	VIF
septembre	0,786	1,273	0,747	1,339	0,739	1,353	0,847	1,180	0,826	1,210	0,840	1,190	0,798	1,254	0,860	1,163	0,920	1,087
octobre	0,607	1,647	0,901	1,110	0,751	1,331	0,769	1,300	0,866	1,154	0,928	1,077	0,828	1,207	0,890	1,123	0,838	1,193
novembre	1,9E-08	9,9E+06	0,756	1,322	0,843	1,187	0,856	1,168	0,903	1,107	0,883	1,132	0,839	1,192	0,916	1,091	0,858	1,166
décembre	0,418	2,392	0,824	1,213	0,844	1,185	0,817	1,224	0,800	1,250	0,855	1,170	0,892	1,122	0,886	1,128	0,820	1,219
janvier	0,418	2,390	0,829	1,206	0,823	1,215	0,736	1,359	0,789	1,267	0,784	1,275	0,863	1,159	0,812	1,232	0,817	1,223
février	0,352	2,843	0,705	1,419	0,763	1,311	0,791	1,264	0,791	1,264	0,764	1,308	0,745	1,343	0,854	1,171	0,793	1,262
mars	0,364	2,744	0,412	2,427	0,354	2,826	6,7E-08	4,4E+06	2,0E-09	1,5E+08	2,3E-07	1,2E+06	9,6E-08	3,7E+06	8,5E-08	3,3E+06	5,0E-08	5,3E+06
avril	6,3E-08	4,4E+06	9,0E-08	3,1E+06	5,9E-08	4,5E+06	0,381	2,622	0,367	2,722	0,378	2,645	0,378	2,643	0,331	3,021	0,341	2,931
mai	0,362	2,762	0,288	3,471	0,379	2,639	0,426	2,347	0,506	1,978	0,469	2,134	0,702	1,424	0,494	2,023	0,497	2,013
juin	0,816	1,226	0,756	1,323	0,779	1,284	0,696	1,437	0,610	1,639	0,676	1,478	0,772	1,296	0,744	1,344	0,611	1,636
juillet	0,659	1,517	0,522	1,917	0,519	1,927	0,551	1,814	0,461	2,168	0,428	2,337	0,439	2,278	0,500	2,002	0,477	2,096
août	0,534	1,871	0,500	1,998	0,530	1,887	0,633	1,580	0,454	2,201	0,457	2,191	0,497	2,013	0,573	1,746	0,493	2,029
SON	4,0E-08	7,1E+06	4,2E-07	2,4E+06	2,2E-07	4,6E+06	2,4E-07	4,2E+06	1,5E-08	6,8E+07	2,9E-07	3,4E+06	1,5E-07	6,6E+06	4,4E-08	2,3E+07	9,8E-08	1,0E+07
DJF	3,1E-08	3,3E+07	1,2E-07	8,6E+06	1,4E-07	7,3E+06	5,6E-08	1,8E+07	5,9E-09	1,7E+08	1,4E-07	6,9E+06	2,4E-07	4,1E+06	5,2E-08	1,9E+07	1,0E-07	9,6E+06
MAM	9,1E-08	1,1E+07	1,1E-07	8,3E+06	6,5E-08	1,4E+07	1,4E-07	6,7E+06	8,8E-10	1,1E+09	6,6E-08	1,4E+07	4,8E-08	2,0E+07	3,1E-08	3,2E+07	7,7E-08	1,2E+07
JJA	7,7E-07	1,3E+06	1,6E-07	6,2E+06	1,8E-07	5,5E+06	4,9E-07	2,0E+06	5,7E-09	1,8E+08	2,6E-07	3,9E+06	0,000	Ind.	1,1E-07	9,4E+06	2,5E-07	4,0E+06
SemH	0,194	5,168	0,174	5,751	0,173	5,787	0,221	4,525	0,226	4,426	0,214	4,670	0,298	3,357	0,227	4,404	0,213	4,687
SemS	0,158	6,348	8,1E-08	1,2E+07	5,2E-08	1,9E+07	5,3E-08	1,9E+07	5,3E-09	1,9E+08	2,2E-07	4,5E+06	2,0E-07	4,9E+06	3,9E-08	2,6E+07	3,8E-08	2,6E+07
Annuel	0,014	72,270	0,031	32,324	0,050	20,171	0,016	64,025	0,076	13,206	0,012	82,893	0,025	40,656	0,020	48,978	0,034	29,043

Stations	CDA 530		CDA 531		CDA 532		CDA 533		CDA 534		CDA 535		CDA 536		CDA 538		Ouled Gnaou	
	Tolé.	VIF	Tolé.	VIF														
septembre	0,877	1,140	0,785	1,274	0,821	1,219	0,555	1,802	0,672	1,489	0,418	2,395	0,547	1,830	0,877	1,141	0,811	1,233
octobre	0,892	1,121	0,798	1,254	0,787	1,270	0,585	1,709	0,705	1,419	0,505	1,981	0,636	1,572	0,903	1,107	0,924	1,083
novembre	0,866	1,155	0,859	1,164	0,846	1,181	9,1E-08	5,7E+06	0,849	1,178	0,000	Ind.	1,9E-07	3,0E+06	0,824	1,214	0,897	1,115
décembre	0,796	1,256	0,792	1,262	0,760	1,315	0,756	1,323	0,830	1,205	0,880	1,136	0,852	1,173	0,765	1,307	0,847	1,181
janvier	0,824	1,213	0,846	1,182	0,832	1,202	0,892	1,122	0,808	1,237	0,809	1,237	0,821	1,219	0,784	1,276	0,801	1,248
février	0,793	1,261	0,757	1,322	0,756	1,323	0,826	1,211	0,817	1,224	0,835	1,197	0,836	1,196	0,832	1,203	0,789	1,268
mars	0,371	2,695	3,1E-07	8,6E+05	0,353	2,836	3,2E-08	9,5E+06	1,8E-07	1,8E+06	0,319	3,136	3,5E-07	8,3E+05	4,9E-07	5,8E+05	0,472	2,121
avril	1,4E-07	2,0E+06	0,338	2,955	2,5E-07	1,0E+06	0,342	2,926	0,305	3,279	1,1E-07	2,5E+06	0,341	2,931	0,366	2,731	0,383	2,614
mai	0,336	2,977	0,422	2,371	0,327	3,056	0,623	1,605	0,507	1,971	0,408	2,453	0,494	2,026	0,385	2,598	0,472	2,120
juin	0,720	1,389	0,617	1,620	0,598	1,672	0,630	1,587	0,532	1,878	0,578	1,729	0,654	1,529	0,750	1,334	0,659	1,518
juillet	0,497	2,011	0,584	1,712	0,484	2,066	0,692	1,445	0,539	1,854	0,499	2,002	0,510	1,963	0,573	1,745	0,589	1,697
août	0,503	1,990	0,571	1,751	0,470	2,128	0,792	1,263	0,676	1,479	0,546	1,831	0,534	1,872	0,628	1,593	0,538	1,858
SON	7,4E-07	1,4E+06	3,0E-07	3,3E+06	2,9E-07	3,5E+06	0,434	2,305	8,6E-08	1,2E+07	0,344	2,908	0,492	2,033	5,6E-07	1,8E+06	0,530	1,885
DJF	1,7E-07	5,8E+06	4,7E-07	2,1E+06	1,9E-07	5,3E+06	3,2E-08	3,1E+07	2,3E-07	4,3E+06	6,8E-08	1,5E+07	2,7E-07	3,7E+06	3,1E-07	3,2E+06	1,000	1,000
MAM	1,3E-07	7,3E+06	1,3E-07	7,4E+06	1,2E-07	7,9E+06	5,9E-08	1,6E+07	1,0E-07	9,7E+06	9,2E-08	1,1E+07	1,1E-07	8,8E+06	1,9E-07	4,8E+06	0,461	2,171
JJA	1,0E-06	9,5E+05	1,7E-06	5,8E+05	1,2E-06	8,6E+05	2,2E-07	4,5E+06	4,5E-07	2,2E+06	7,3E-07	1,4E+06	8,4E-07	1,2E+06	1,8E-06	5,5E+05	0,965	1,036
SemH	0,175	5,719	0,201	4,984	0,159	6,276	0,246	4,062	0,236	4,235	0,191	5,242	0,227	4,399	0,209	4,781	0,239	4,189
SemS	2,9E-07	3,4E+06	3,3E-07	3,1E+06	1,9E-07	5,2E+06	6,7E-08	1,5E+07	1,5E-07	6,7E+06	2,4E-08	4,1E+07	1,6E-07	6,2E+06	3,9E-07	2,5E+06	0,542	1

Annexe 8

RESULTATS DES TESTS PRELIMINAIRES SUR LES DONNEES DES VARIABLES PLUVIOMETRIQUES PERIODIQUES AVANT REALISATION DE L'ACP DES DONNEES AU PERIMETRE DU TADLA EN PERIODE D'OBSERVATIONS DE 1958 A 2018.

Des tests préliminaires usuels précédant l'ACP ont été effectués sur les moyennes annuelles des distributions des variables périodiques pour les précipitations au périmètre du Tadla et ont concerné les vérifications des conditions de la normalité, de la colinéarité, de l'indépendance des variables et de l'homogénéité de variances sont présentés. Les résultats de ces tests avec leurs analyses sont portés ci-après.

a) Test de la normalité avant ACP sur les variables pluviométriques périodiques

Les résultats des tests de la normalité sont restitués au tableau suivant.

Tableau A : Résultats du test de la normalité sur les données moyennes en variables pluviométriques périodiques au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1958 à 2018)

Variables (Sens's)	Test "Kolmogorov-Smirnov"			Test "Shapiro-Wilk"		
	Statistiques			Statistiques		
	du test	ddl	Sig.	du test	ddl	Statistiques
Septembre	0,263	27	4,65E-05	0,779	27	6,16E-05
Décembre	0,493	27	2,99E-19	0,491	27	1,38E-08
Avril	0,090	27	0,20 (NS)	0,977	27	0,78 (NS)
Juin	0,535	27	7,80E-23	0,299	27	2,55E-10
MAM	0,115	27	0,20 (NS)	0,941	27	0,13 (NS)
SemH	0,342	27	7,89E-09	0,742	27	1,55E-05
SemS	0,104	27	0,20 (NS)	0,974	27	0,72 (NS)

NB: ddl : Degré de liberté; Sig. : Signification du test; a: Correction de signification de Lilliefors

Il est retenu des tests de la normalité (« *test de Chapiro-Wilk* » et « *test de Kolmogorov-Smirnov* »), que cette condition est vérifiée à 75% des cas pour les variables mensuelles, elle est non satisfaite pour la seule variable trimestrielle Mars-Avril-Mai (MAM), mais elle est respectée à 50% pour les variables semestrielles (Tableau A).

b) Test de la colinéarité avant ACP sur les variables pluviométriques périodiques

Les résultats du test de la colinéarité par variable périodique des précipitations sont indiqués au tableau ci-dessous.

Tableau B : Résultats des tests de la colinéarité sur les données moyennes en variables pluviométriques périodiques au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1958 à 2018).

Variables	Statistiques de colinéarité	
	Tolérance	VIF (*)
Septembre	0,600	1,666
Décembre	0,545	1,834
Avril	0,223	4,490
Juin	0,851	1,175
MAM	0,190	5,264
SemH	0,390	2,565
SemS	0,311	3,219

NB: VIF: "Variance Inflation Factors" : Indice d'inverse de la tolérance

Il est approuvé que les tests de la colinéarité s'avèrent favorables pour toutes les variables étudiées (Tableau B), sachant que le VIP (*Variance Inflation Factor*), n'a pas dépassé le seuil maximum de 10 (Rakotomalala, 2008).

c) Test d'indépendances avant ACP entre les variables pluviométriques périodiques

Les résultats du test de l'indépendance entre les variables qui seraient traitées ultérieurement par la méthode de l'ACP sont récapitulés sur la matrice du tableau du bas.

Tableau C : Résultats des tests d'indépendances entre les variables sur les données moyennes en variables pluviométriques périodiques au périmètre de Tadla (Période d'observations de 1958 à 2018)

Variables	Tests du khi-carré entre couple de variables						
	Septembre	Décembre	Avril	Juin	MAM	SemH	SemS
Septembre	1,000						
Décembre	0,994	1,000					
Avril	0,133	0,011*	1,000				
Juin	0,006**	1,000	0,682	1,000			
MAM	0,099	0,391	0,045*	0,044*	1,000		
SemH	0,984	8,05E-07 ***	0,001***	1,000	0,171	1,000	
SemS	0,010**	0,955	0,040*	0,421	0,113	0,191	1,000

NB: Signification du test : (*) : Significatif; (**): Très significatif et (***) : Très hautement significatif

Les tests de l'indépendance sont satisfaits sur 33 % des combinaisons en couples des variables en question (Tableau C).

d) Tests d'égalité des variables avant l'ACP entre les variables pluviométriques périodiques

Les résultats des tests d'égalité des variances en fonction des variables périodiques des précipitations sont indiqués au tableau ci-dessous.

Tableau D : Résultats des tests d'égalité de variances sur les variables pour analyse avant l'ACP.

Couple de variables	Sep.*Déc		Sep.*Avr.		Sep.*Jui.		Sep.*MAM.		Sep.*Sem.H		Sep.*Sem.S		Dec.*Avr.	
	Basé sur moyenne	Basé sur médiane												
Statistique de Levene	85,445	29,134	140,382	38,296	21,358	14,660	164,872	44,227	112,620	27,398	161,932	43,489	10,714	0,546
Degré de liberté ddl1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Degré de liberté ddl2	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
p-value	1,46E-12	1,70E-06	2,16E-16	9,69E-08	2,55E-05	3,48E-04	9,41E-18	1,79E-08	1,28E-14	3,02E-06	1,34E-17	2,19E-08	0,002	0,463
Niveau signification	THS	HS	NS											

Couple de variables	Dec.*Jui.		Dec.*MAM		Dec.*Sem.H		Dec.*Sem.S		Avr.*Jui.		Avr.*MAM.		Avr.*SemH	
	Basé sur moyenne	Basé sur médiane												
Statistique de Levene	1,194	0,138	25,307	2,945	0,447	0,615	23,117	2,537	5,144	0,531	11,829	10,623	36,458	5,247
Degré de liberté ddl1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Degré de liberté ddl2	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
p-value	0,279	0,712	6,19E-06	0,092	0,507	0,437	1,34E-05	0,117	0,028	0,470	0,001	0,002	1,68E-07	0,026
Niveau signification	NS	NS	THS	NS	NS	NS	THS	NS	S	NS	THS	HS	THS	S

Couple de variables	Avr.*SemS		Jui.*MAM		Jui.*SemH		Jui.*SemS		MAM.*SemH		MAM.*SemS		SemH.*SemS	
	Basé sur moyenne	Basé sur médiane												
Statistique de Levene	8,517	7,726	7,708	1,307	1,861	0,000	7,339	1,190	286,880	14,462	0,919	0,706	234,228	13,077
Degré de liberté ddl1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Degré de liberté ddl2	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52	52
p-value	0,005	0,008	0,008	0,258	0,178	0,995	0,009	0,280	8,16E-23	3,77E-04	0,342	0,404	6,69E-21	0,001
Niveau signification	HS	HS	HS	NS	NS	NS	HS	NS	THS	THS	NS	NS	THS	THS

En effet, les tests de Levene d'homogénéité des variances pour les variables périodiques des précipitations sur la base de la moyenne, sont validés au taux de 81%, sachant que pour 17 de cas de combinaisons des distributions sont significatifs sur le total de 21 de combinaisons possibles entre les différentes variables. Pour des tests de confirmation sur la base de la médiane, ils ne sont satisfaits que pour le taux de 57 %, vu que 12 cas valides sur le total de 21 combinaisons de variables (Tableau D).

Annexe 9

Descriptifs des essais culturaux réalisés au périmètre de Tadla

Fiche 1: Essai cultural des céréales d'automne

- Objectifs d'expérimentation** : Essais de comportement variétal céréalière.
- Campagne agricole** : 2016/2017.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station d'expérimentations hydro-agricoles Ouled Gnaou-SEHA (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations** :
- *Source d'eau* : Barrage Bin El Ouidane.
 - *Système d'irrigation* : Gravitaire
 - Méthode de gestion des irrigations par calcul d'ETM journalier par recours à l'ETo déterminé sur place et à des coefficients culturaux selon formule : $ETM = K_c \times ETo$.
 - Coefficient culturaux employés par stades culturaux à savoir : Initial à $K_c = 0,45$; développement à $K_c = 0,75$; mi-saison à $K_c = 1,05$; maturité à $K_c = 0,45$.
 - Besoins nets en eau d'irrigation : 445 mm
 - Volume d'eau d'irrigation : 6 720 m³/ha fractionné en 7 irrigations
- Matériel végétal** : 22 variétés hybrides de Blé Tendre.
- Date de semis** : 25/11/2016 ; *date de récolte* : 15/06/2017.
- Durée du cycle productif** : 202 jours.
- Protocole expérimental** : Dispositif en bloc aléatoire complet avec 4 répétitions pour 22 objets de 22 variétés céréalières. La parcelle élémentaire est de 15 m².

Fiche 1 Bis : Essai cultural des céréales d'automne

- Objectifs d'expérimentation** : Essais de comportement variétal céréalière.
- Campagne agricole** : 2017/2018.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station SEHA-Ouled Gnaou (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations** :
- *Source d'eau* : Barrage Bin El Ouidane.
 - *Système d'irrigation* : Gravitaire
 - Méthode de gestion des irrigations par calcul d'ETM journalier par recours à l'ETo déterminé sur place et des coefficients culturaux selon formule : $ETM = K_c \times ETo$.
 - Coefficient culturaux employés par stades culturaux à savoir : Initial à $K_c = 0,45$; développement à $K_c = 0,75$; mi-saison à $K_c = 1,05$; maturité à $K_c = 0,45$.
 - Besoins nets en eau d'irrigation: 129,8 mm
 - Volume d'eau d'irrigation apporté: 1 920 m³/ha réparti en 2 irrigations
- Matériel végétal** : 17 variétés hybrides de Blés Dur et Tendre.
- Date de semis** : 22/11/2016 ; *date de récolte* : 15/06/2017.
- Durée du cycle productif** : 206 jours.
- Protocole expérimental** : Dispositif en bloc aléatoire complet avec 4 répétitions pour 17 objets en 17 variétés céréalières. Une parcelle élémentaire est de 15 m².

Annexe 9 (suite 1)

Fiche 2: Essai cultural N°1 de de la betterave à sucre

- Objectifs de l'expérimentation** : Comparaison des trois techniques d'irrigation en localisée, aspersion et gravitaire.
- Campagne agricole** : 2014/2015.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station des expérimentations hydro-agricoles d'Ouled Gnaou (SEHA-OG).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités de l'opération d'irrigation :**
- *Source d'eau* : Barrage Bin El Ouidane.
 - *Système d'irrigation* : 3 systèmes au test expérimental.
 - Méthode gestion irrigations par calcul d'ETM journalier ($ETM = K_c \times ETo$).
 - Les K_c sont : Initial à $K_c = 0,45$; développement à $K_c = 0,80$; mi-saison à $K_c = 1,10$; maturité à $K_c = 0,65$.
 - Besoins nets en eau d'irrigation : 575,83 mm
 - Volume d'eau d'irrigation apporté : 8 950 m³/ha.
- Matériel végétal** : Betterave monogerme.
- Date installation de la culture** : 20 Septembre 2014 ; *date de récolte* : 20 Juillet 2015.
- Durée du cycle productif** : 213 jours.
- Protocole expérimental** : Superficie totale d'essai de 3 500 m², répartie en 3 sous parcelles affectées aux 3 systèmes d'irrigation en comparaison. Nombre de 4 placettes de 20 m²/sous-parcelle, réservées aux observations expérimentales.

Fiche 3: Essai cultural N°2 de de la Betterave à sucre

- Objectifs d'expérimentation** : Détermination des besoins en eau d'irrigation et comparaison de 2 systèmes d'irrigation (Localisée et Aspersion).
- Campagne agricole** : 2015/2016.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station d'expérimentations hydro-agricoles Ouled Gnaou (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations :**
- *Source d'eau* : Barrage Bin El Ouidane.
 - *Système d'irrigation* : 3 systèmes au test expérimental.
 - Méthode gestion irrigations par calcul d'ETM journalier ($ETM = K_c \times ETo$).
 - Les K_c sont : Initial à $K_c = 0,45$; développement à $K_c = 0,80$; mi-saison à $K_c = 1,10$; maturité à $K_c = 0,65$.
 - Besoins nets en eau d'irrigation : 514,34 mm
 - Volume d'eau d'irrigation apporté : 8 640 m³/ha.
- Matériel végétal** : Betterave monogerme
- Date de semis** : 23/11/2015 ; *date de récolte* : 25/06/2016.
- Durée du cycle productif** : 216 jours.
- Protocole expérimental** : Dispositif en bloc aléatoire complet en 4 répétitions à 2 objets (2 systèmes d'irrigation : localisée et aspersion) ; parcelle élémentaire : 750 m².

Annexe 9 (suite 2)

Fiche 4: Essai cultural N°3 de de la betterave à sucre

- Objectifs d'expérimentation** : Impacts de réduction d'eau à la culture de betterave à sucre sous système d'irrigation localisée (1^{ère} version).
- Campagne agricole** : 2016/2017.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station SEHA-Ouled Gnaou (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations :**
- *Source d'eau* : Barrage Bin El Ouidane.
 - *Système d'irrigation* : 3 systèmes soumis au test expérimental.
 - Méthode de gestion des irrigations par calcul ETM journalier ($ETM = K_c \times ETo$).
 - Les K_c sont ainsi: Initial à $K_c = 0,45$: développement à $K_c = 0,80$; mi-saison à $K_c = 1,10$; maturité à $K_c = 0,65$.
 - Besoins nets en eau d'irrigation : 535,18 mm
 - Volume d'eau d'irrigation apporté: localisée: 4170 m³/ha; aspersion: 5957 m³/ha.
- Matériel végétal** : Betterave monogérme
- Date de semis** : 20/11/2016 ; *date de récolte*: 21/07/2017.
- Durée du cycle productif** : 243 jours.
- Protocole expérimental** : Dispositif en bloc aléatoire complet en 4 répétitions à 4 objets en régimes hydriques : 100% ETM, 90% ETM, 80% ETM et 70 % ETM, réduction appliquée sur tout cycle cultural. La parcelle élémentaire de 750 m².

Fiche 5 : Essai cultural N°4 de de la Betterave à sucre

- Objectifs d'expérimentation** : Impacts de réduction d'eau en culture de betterave à sucre sous système d'irrigation localisée (2^{ème} version).
- Campagne agricole** : 2017/2018.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station SEHA-Ouled Gnaou (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations :**
- *Source d'eau* : Barrage Bin El Ouidane.
 - *Système d'irrigation* : Gravitaire.
 - Méthode de gestion des irrigations en raisonnant selon l'ETM in situ à travers le suivi de l'humidité du sol par la sonde capacitive et se fixant des coefficients culturaux (K_c) à affecter à l' ETo déterminé aussi sur place selon la formule : $ETM = K_c \times ETo$.
 - Les K_c sont : Initial à $K_c = 0,45$: développement à $K_c = 0,80$; mi-saison à $K_c = 1,10$; maturité à $K_c = 0,65$.
 - Besoins nets en eau d'irrigation : 288,10 mm
 - Volume d'eau d'irrigation apporté : 3 026 à 4 124 m³/ha selon régime hydrique.
- Matériel végétal** : Betterave monogérme
- Date de semis** : 20/11/2017 ; *date de récolte* : 07/07/2017.
- Durée du cycle productif** : 230 jours.
- Protocole expérimental** : Dispositif en bloc aléatoire complet avec 4 répétitions pour 4 objets en 4 traitements en régimes hydriques : 100% ETM, 90% ETM, 80% ETM et 70 % ETM ; réduction d'eau du début tubérisation à fin cycle cultural. La parcelle élémentaire de 750 m².

Annexe 9 (suite 3)

Fiche 6 : Essai cultural de la luzerne

- Objectifs d'expérimentation** : Essais de comportement de nouvelles variétés.
- Campagne agricole** : 2016/2017.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station SEHA-Ouled Gnaou (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations :**
- *Source d'eau* : Barrage Bin El Ouidane.
 - *Système d'irrigation* : Gravitaire
 - Méthode gestion irrigations par calcul ETM journalier ($ETM = K_c \times ET_0$).
 - Coefficient culturaux employés par stades culturaux à savoir : (formule : $ETM=K_c \times ET_0$):
 $K_c= 0,45$ pour tout le cycle.
 - Besoins nets en eau d'irrigation : 791.67 mm
 - Volume d'eau d'irrigation apporté: 7 680 m³ en 8 irrigations.
- Matériel végétal** : 4 variétés en essais
- Date d'installation des luzernières** : 17/05/2015 (Age : 16 mois).
- Durée du cycle productif** : Culture pérenne.
- Protocole expérimental :**
Dispositif en bloc aléatoire complet avec 4 répétitions pour 4 objets en 4 variétés testées.

Annexe 9 (suite 4)

Fiche 7 : Essai cultural N°1 du maïs ensilage-grain

- Objectifs d'expérimentation** : Tests de productivité du Maïs ensilage sous irrigation localisée au périmètre du Tadla.
- Campagne agricole** : 2016/2017
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station SEHA-Ouled Gnaou (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations :**
- **Source d'eau** : Barrage Bin El Ouidane.
 - **Système d'irrigation** : Localisée
 - Méthode gestion irrigations par calcul d'ETM journalier ($ETM = K_c \times ETo$).
 - Coefficient culturaux employés par stades culturaux à savoir : Initial à $K_c = 0,50$; développement à $K_c = 0,80$; mi-saison à $K_c = 1,20$; maturité à $K_c = 0,55$.
 - Besoins nets en eau de la culture : 458,44
 - Volume d'eau d'irrigation apporté : 3 170 à 5 460 m³/ha selon régime hydrique testé.
- Matériel végétal** : Hybride maisicole.
- Date installation de la culture** : 18/04/2017 ; *date de récolte* : 19/07/2017.
- Durée du cycle productif** : 93 jours.
- Protocole expérimental :**
Dispositif en bloc aléatoire complet avec 4 répétitions avec quatre objets en 4 traitements en régimes hydriques : 120% ETM, 100% ETM, 75% ETM et 50 % ETM, la réduction d'eau est appliquée à tout le cycle cultural.

Fiche 8 : Essai cultural N°2 du Maïs ensilage-grain

- Objectifs d'expérimentation** : Essais de comportement de nouvelles variétés.
- Campagne agricole** : 2016/2017.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station SEHA-Ouled Gnaou (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations :**
- **Source d'eau** : Barrage Bin El Ouidane.
 - **Système d'irrigation** : Gravitaire
 - Méthode gestion irrigations par calcul d'ETM journalier ($ETM = K_c \times ETo$).
 - Coefficient culturaux employés par stades culturaux à savoir : Initial à $K_c = 0,50$; développement à $K_c = 0,80$; mi-saison à $K_c = 1,20$; maturité à $K_c = 0,55$.
 - Besoins nets en eau d'irrigation : 811,06 mm
 - Volume eau d'irrigation apporté : 10 560 m³ par 11 irrigations (précoces) ; 11 520 m³ par 12 irrigations (tardives).
- Matériel végétal** : Hybride maisicole.
- Date de semis** : 17 Avril 2017 ; *dates de récolte* : 25/08/2017 (précoces) ; 11/08/2017 (tardives).
- Durée du cycle productif** : 131 jours (précoces) à 148 jours (tardives).
- Protocole expérimental :**
Dispositif en bloc aléatoire complet avec 4 répétitions pour 7 objets correspondant aux 7 variétés testées.

Annexe 9 (suite 5)

Fiche 9 : Essai cultural N°1 du maraichage (Pomme de Terre).

- Objectifs d'expérimentation** : Essais d'inscription au catalogue officiel des variétés agricoles
- Campagne agricole** : 2014/2015.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station SEHA-Ouled Gnaou (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations :**
- **Source d'eau** : Barrage Bin El Ouidane.
 - **Système d'irrigation** : Gravitaire
 - Méthode gestion des irrigations par calcul d'ETM journalier ($ETM = K_c \times ET_o$).
 - Coefficient culturaux employés par stades culturaux (formule : $ETM=K_c \times ET_o$): Initial à $K_c = 0,50$; développement / mi-saison à $K_c = 1,15$; maturité à $K_c = 0,75$.
 - Besoins nets en eau d'irrigation : 388,34 mm
 - Volume d'eau d'irrigation apporté : 6 720 m³/ha en 7 irrigations.
 - **Matériel végétal** : Sélections génétiques hybrides.
- Date installation de la culture** : 25/02/2015 ; **Date récolte** : 10/06/2015.
- Durée du cycle productif** : 106 jours.
- Protocole expérimental :**
Dispositif en bloc aléatoire complet avec 4 répétitions pour 22 objets correspondant à 22 variétés testées.

Fiche 10 : Essai cultural N°2 du maraichage (Pomme de Terre).

- Objectifs d'expérimentation** : Essais d'inscription au catalogue officiel de variétés agricoles
- Campagne agricole** : 2016/2017.
- Coordinateur des partenaires** : ORMVA du Tadla.
- Lieu de l'essai** : Station SEHA-Ouled Gnaou (ORMVA du Tadla).
- Type du sol de culture** : Argilo-limoneux.
- Modalités des irrigations :**
- **Source d'eau** : Barrage Bin El Ouidane.
 - **Système d'irrigation** : Gravitaire
 - Méthode gestion irrigations par calcul d'ETM journalier (formule : $ETM = K_c \times ET_o$).
 - Coefficient culturaux employés par stades de développement de la culture : Initial à $K_c = 0,45$; développement à $K_c = 0,80$; mi-saison à $K_c = 1,10$; mâturité à $K_c = 0,65$.
 - Coefficient culturaux employés par stades culturaux (formule : $ETM=K_c \times ET_o$): Initial à $K_c = 0,50$; développement / mi-saison à $K_c = 1,15$; maturité à $K_c = 0,75$.
 - Besoins nets en eau d'irrigation : 560,48 mm
 - Volume d'eau d'irrigation apporté : 7 680 m³ réparti en 8 irrigations.
 - **Matériel végétal** : Sélection génétique hybride.
- Date installation de la culture** : 24/02/2018 ; **Date récolte** : 20/06/2018.
- Durée du cycle productif** : 117 jours.
- Protocole expérimental :**
Dispositif en bloc aléatoire complet avec 4 répétitions pour 35 objets correspondant à 35 variétés testées.

Annexe 10

Indications Canevas de calculs des besoins eau pour les principales cultures du périmètre du Tadla

Culture : CEREALES D'AUTOMNE (BLES)

Système d'irrigation : GRAVITAIRE / Campagne : 2016-2017

Mois	C1	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural décadaie (Kc)	EIM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
			mm/ jour	mm/ década		mm/ jour	mm/ década		
			NOVEMBRE	3		1,15	5,75		
DECEMBRE	1	1,24	12,40	0,45	0,56	5,58	19,60	0,00	
	2	0,99	9,90	0,45	0,45	4,46	26,00	0,00	
	3	1,08	11,88	0,45	0,49	5,35	0,00	5,35	
JANVIER	1	1,24	12,40	0,45	0,56	5,58	0,00	5,58	
	2	1,87	18,70	0,63	1,18	11,78	22,90	0,00	
	3	1,45	14,50	0,75	1,09	10,88	21,00	0,00	
FEVRIER	1	1,77	17,70	0,75	1,33	13,28	0,00	13,28	
	2	1,87	18,70	0,75	1,40	14,03	24,90	0,00	
	3	1,47	14,70	0,75	1,10	11,03	37,30	0,00	
MARS	1	2,89	28,90	0,75	2,17	21,68	0,00	21,68	
	2	3,14	31,40	0,75	2,36	23,55	0,00	23,55	
	3	3,41	34,10	1,05	3,58	35,81	6,20	29,61	
AVRIL	1	4,34	43,40	1,05	4,56	45,57	0,00	45,57	
	2	4,89	48,90	1,05	5,13	51,35	0,00	51,35	
	3	4,18	41,80	1,05	4,39	43,89	30,40	0,00	
MAI	1	5,24	52,40	1,05	5,50	55,02	0,00	55,02	
	2	6,04	60,40	1,05	6,34	63,42	0,00	63,42	
	3	5,48	54,80	1,05	5,75	57,54	0,00	57,54	
JUN	1	6,08	60,80	1,05	6,38	63,84	0,00	63,84	
	2	6,46	32,30	0,45	2,91	14,54	5,00	9,54	
Total		-	1 063,23	-	-	560,72	239,90	445,30	

Système d'irrigation : IRRIGATION LOCALISEE / Campagne : 2016-2017

Mois	C-L	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural décadaie (Kc)	EIM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
			mm/ jour	mm/ década		mm/ jour	mm/ década		
			NOVEMBRE	3		1,15	5,75		
DECEMBRE	1	1,24	12,40	0,60	0,74	7,44	19,60	0,00	
	2	0,99	9,90	0,60	0,59	5,94	26,00	0,00	
	3	1,08	11,88	0,60	0,65	7,13	0,00	7,13	
JANVIER	1	1,24	12,40	0,80	0,99	9,92	0,00	9,92	
	2	1,87	18,70	0,80	1,18	11,78	22,90	0,00	
	3	1,45	14,50	0,80	1,16	11,60	21,00	0,00	
FEVRIER	1	1,77	17,70	0,80	1,42	14,16	0,00	14,16	
	2	1,87	18,70	1,10	2,06	20,57	24,90	0,00	
	3	1,47	14,70	1,10	1,62	16,17	37,30	0,00	
MARS	1	2,89	28,90	1,10	3,18	31,79	0,00	31,79	
	2	3,14	31,40	1,10	3,45	34,54	0,00	34,54	
	3	3,41	34,10	0,90	3,07	30,69	6,20	24,49	
AVRIL	1	4,34	43,40	0,90	3,91	39,06	0,00	39,06	
	2	4,89	48,90	0,90	4,40	44,01	0,00	44,01	
	3	4,18	41,80	0,90	3,76	37,62	30,40	7,22	
MAI	1	5,24	52,40	0,60	3,14	31,44	0,00	31,44	
	2	6,04	60,40	0,60	3,62	36,24	0,00	36,24	
	3	5,48	54,80	0,60	3,29	32,88	0,00	32,88	
JUN	1	6,08	60,80	0,40	2,43	24,32	0,00	24,32	
	2	6,46	32,30	0,40	2,58	12,92	5,00	7,92	
Total		-	1 063,23	-	-	462,52	239,90	391,72	

Annexe 10 (suite 1)

Canevas de calculs des besoins eau pour les principales cultures du périmètre du Tadla

Culture : BETTERAVE A SUCRE

Système d'irrigation : GRAVITAIRE / Campagne : 2014-2015

Système d'irrigation : GRAVITAIRE / Campagne : 2015-2016

Mois	B3	Décade	Evapo-transpiration de référence (ET ₀)		Coefficient cultural décadaie (K _c)	ETM		Pluie totale (mm)	Besoins nets en eau d'irrigation (mm)
			mm/jour	mm/décade		mm/jour	mm/décade		
DECEMBRE		1	1,19	11,90	0,45	0,54	5,36	0,00	3,86
JANVIER		1	1,17	11,66	0,45	0,53	5,25	0,00	5,25
		2	1,24	12,44	0,80	0,99	9,95	17,30	0,00
		3	1,25	13,77	0,80	1,00	11,02	10,40	0,62
FEVRIER		1	1,54	15,36	1,10	1,69	16,90	7,80	9,10
		2	1,74	17,36	1,10	1,91	19,10	7,20	11,90
		3	2,12	16,94	1,10	2,33	18,63	1,20	17,43
MARS		1	3,06	30,64	1,10	3,37	33,70	0,00	33,70
		2	2,41	24,13	1,10	2,65	26,54	7,80	18,74
		3	2,74	30,11	1,10	3,01	33,12	58,70	0,00
AVRIL		1	3,46	34,64	1,10	3,81	38,10	3,20	34,90
		2	3,91	39,13	1,10	4,30	43,04	0,00	43,04
		3	4,01	40,07	1,10	4,41	44,08	0,00	44,08
MAI		1	4,89	48,95	1,10	5,38	53,84	0,00	53,84
		2	5,03	50,29	1,10	5,53	55,32	0,00	55,32
		3	4,27	46,98	1,10	4,70	51,68	16,50	35,18
JUN		1	5,39	53,92	1,10	5,93	59,31	2,50	56,81
		2	5,31	53,07	1,10	5,84	58,38	0,40	57,98
		3	6,10	60,98	1,10	6,71	67,08	0,00	67,08
JULLET		1	6,00	60,00	0,45	2,70	27,00	0,00	27,00
Total			-	672,34	-	-	677,40	133,00	575,83

Mois	B2-GR	Décade	Evapo-transpiration de référence (ET ₀)		Coefficient cultural d'cadaire (K _c)	ETM		Pluie totale (mm)	Besoins nets en eau d'irrigation (mm)
			mm/jour	mm/décade		mm/jour	mm/décade		
NOVEMBRE		3	1,40	2,80	0,80	1,12	2,24	0,00	0,76
DECEMBRE		1	1,32	13,24	1,10	1,45	14,56	0,00	14,56
		2	1,18	11,80	1,10	1,30	12,98	0,00	12,98
		3	1,27	13,92	1,10	1,40	15,31	0,00	15,31
JANVIER		1	1,26	12,60	1,15	1,45	14,49	10,50	3,99
		2	1,45	14,52	1,15	1,67	16,70	0,00	16,70
		3	1,68	18,53	1,15	1,93	21,31	0,00	21,31
FEVRIER		1	1,89	18,92	1,15	2,17	21,76	0,00	21,76
		2	1,88	18,85	1,20	2,26	22,62	19,00	3,62
		3	2,11	18,95	1,20	2,53	22,74	18,00	4,74
MARS		1	2,62	26,17	1,20	3,14	31,40	0,50	30,90
		2	3,09	30,87	1,20	3,71	37,04	0,00	37,04
		3	2,80	30,76	1,20	3,36	36,91	53,70	0,00
AVRIL		1	3,16	31,56	1,20	3,79	37,87	10,30	27,57
		2	3,95	39,50	1,20	4,74	47,40	0,00	47,40
		3	4,49	44,89	1,20	5,39	53,87	0,00	53,87
MAI		1	3,24	32,41	1,20	3,89	38,89	22,30	16,59
		2	4,10	40,95	1,20	4,92	49,14	10,00	39,14
		3	5,75	63,26	1,20	6,90	75,91	0,00	75,91
JUN		1	5,85	58,48	1,20	7,02	70,18	0,00	70,18
Total			-	542,98	-	-	643,33	144,30	514,34

Annexe 10 (suite 2)

Canevas de calculs des besoins eau pour les principales cultures du périmètre du Tadla

Culture : BETTERAVE A SUCRE

Système d'irrigation : LOCALISEE / Campagne : 2014-2015

Mois _{B3}	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural décadaire (Kc)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
		mm/jour	mm/décade		mm/jour	mm/décade		
DECEMBRE	1	1,19	11,90	0,25	0,30	2,98	0,00	3,86
JANVIER	1	1,17	11,66	0,27	0,32	3,15	0,00	3,15
	2	1,24	12,44	0,27	0,33	3,36	17,30	0,00
	3	1,25	13,77	0,27	0,34	3,72	10,40	0,00
FEVRIER	1	1,54	15,36	0,52	0,80	7,99	7,80	0,19
	2	1,74	17,36	0,64	1,11	11,11	7,20	3,91
	3	2,12	16,94	0,64	1,36	10,84	1,20	9,64
MARS	1	3,06	30,64	0,66	2,01	20,13	0,00	20,13
	2	2,41	24,13	0,72	1,73	17,37	7,80	9,57
	3	2,74	30,11	0,74	2,04	22,43	58,70	0,00
AVRIL	1	3,46	34,64	1,10	3,81	38,10	3,20	34,90
	2	3,91	39,13	1,10	4,30	43,04	0,00	43,04
	3	4,01	40,07	1,10	4,41	44,08	0,00	44,08
MAI	1	4,89	48,95	1,10	5,38	53,84	0,00	53,84
	2	5,03	50,29	1,10	5,53	55,32	0,00	55,32
	3	4,27	46,98	1,10	4,70	51,68	16,50	35,18
JUN	1	5,39	53,92	1,10	5,93	59,31	2,50	56,81
	2	5,31	53,07	0,80	4,25	42,46	0,40	42,06
	3	6,10	60,98	0,63	3,84	38,42	0,00	38,42
JUILLET	1	6,00	60,00	0,63	3,77	37,72	0,00	37,72
Total		-	672,34	-	-	567,05	133,00	491,82

Système d'irrigation : LOCALISEE / Campagne : 2015-2016

Mois _{GR}	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural d'cadaire (Kc)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
		mm/jour	mm/décade		mm/jour	mm/décade		
NOVEMBRE	3	1,40	2,80	0,80	1,12	2,24	0,00	0,76
DECEMBRE	1	1,32	13,24	0,80	1,06	10,59	0,00	3,58
	2	1,18	11,80	1,10	1,30	12,98	0,00	3,19
	3	1,27	13,92	1,10	1,40	15,31	0,00	3,76
JANVIER	1	1,26	12,60	1,10	1,39	13,86	10,50	0,00
	2	1,45	14,52	1,10	1,60	15,97	0,00	8,27
	3	1,68	18,53	1,10	1,85	20,38	0,00	11,86
FEVRIER	1	1,89	18,92	1,10	2,08	20,81	0,00	12,27
	2	1,88	18,85	1,10	2,07	20,74	19,00	9,00
	3	2,11	18,95	1,10	2,32	20,85	18,00	0,00
MARS	1	2,62	26,17	1,10	2,88	28,79	0,50	20,24
	2	3,09	30,87	1,10	3,40	33,96	0,00	27,47
	3	2,80	30,76	1,10	3,08	33,84	53,70	33,84
AVRIL	1	3,16	31,56	1,10	3,48	34,71	10,30	34,71
	2	3,95	39,50	1,10	4,35	43,45	0,00	43,45
	3	4,49	44,89	1,10	4,94	49,38	0,00	49,38
MAI	1	3,24	32,41	1,10	3,56	35,65	22,30	35,65
	2	4,10	40,95	1,10	4,51	45,05	10,00	35,05
	3	5,75	63,26	1,10	6,32	69,58	0,00	69,58
JUN	1	5,85	58,48	1,10	6,43	64,32	0,00	64,32
Total		-	542,98	-	-	592,46	144,30	466,38

Annexe 10 (suite 3)

Canevas de calculs des besoins eau pour les principales cultures du périmètre du Tadla :
Culture : LUZERNE

Système d'irrigation : GRAVITAIRE / Campagne : 2016-2017

Mois	L-GR	Décade	Evapo-transpiration de référence (ET ₀)		Coefficient cultural décadaie (K _c)	ETM		Pluie totale	Besoins nets en eau d'irrigation
			mm/ jour	mm/ década		mm/ jour	mm/ década		
SEPTEMBRE	1	4,82	48,20	0,60	2,89	28,92	0,00	28,92	
	2	4,08	40,80	0,60	2,45	24,48	0,00	24,48	
	3	3,81	38,10	0,50	1,91	19,05	0,00	19,05	
OCTOBRE	1	3,65	36,50	0,45	1,64	16,43	0,00	16,43	
	2	2,69	26,90	0,45	1,21	12,11	31,00	0,00	
	3	2,67	26,70	0,45	1,20	12,02	0,00	12,02	
NOVEMBRE	1	1,89	18,90	0,45	0,85	8,51	18,30	0,00	
	2	1,64	16,40	0,45	0,74	7,38	0,00	7,38	
	3	1,15	11,50	0,45	0,52	5,18	46,60	0,00	
DECEMBRE	1	1,24	12,40	0,45	0,56	5,58	19,60	0,00	
	2	0,99	9,90	0,45	0,45	4,46	26,00	0,00	
	3	1,08	11,88	0,45	0,49	5,35	0,00	5,35	
JANVIER	1	1,24	12,40	0,45	0,56	5,58	0,00	5,58	
	2	1,87	18,70	0,45	1,37	13,65	22,90	0,00	
	3	1,45	14,50	0,45	0,65	6,53	21,00	0,00	
FEVRIER	1	1,77	17,70	0,45	0,80	7,97	0,00	7,97	
	2	1,87	18,70	0,45	0,84	8,42	24,90	0,00	
	3	1,47	14,70	0,55	0,81	8,09	37,30	0,00	
MARS	1	2,89	28,90	0,75	2,17	21,68	0,00	21,68	
	2	3,14	31,40	0,75	2,36	23,55	0,00	23,55	
	3	3,41	34,10	0,75	2,56	25,58	6,20	19,38	
AVRIL	1	4,34	43,40	0,85	3,69	36,89	0,00	36,89	
	2	4,89	48,90	0,85	4,16	41,57	0,00	41,57	
	3	4,18	41,80	0,85	3,55	35,53	30,40	5,13	
MAI	1	5,24	52,40	0,85	4,45	44,54	0,00	44,54	
	2	6,04	60,40	0,85	5,13	51,34	0,00	51,34	
	3	5,48	54,80	0,85	4,66	46,58	0,00	46,58	
JUIN	1	6,08	60,80	0,85	5,17	51,68	0,00	51,68	
	2	6,46	64,60	0,85	5,49	54,91	0,00	54,91	
	3	6,46	64,60	0,85	5,49	54,91	0,00	54,91	
JUILLET	1	6,11	61,10	0,80	4,89	48,88	0,00	48,88	
	2	6,87	68,70	0,80	5,50	54,96	0,00	54,96	
	3	6,10	61,00	0,80	4,88	48,80	0,00	48,80	
AOÛT	1	5,93	59,30	0,80	4,74	47,44	0,00	47,44	
	2	6,15	61,50	0,80	4,92	49,20	0,00	49,20	
	3	6,12	61,20	0,80	4,90	48,96	0,00	48,96	
Total		-	1 321,48	-	-	959,19	289,20	845,09	

Système d'irrigation : IRRIGATION LOCALISEE / Campagne : 2016-2017

Mois	L-L	Décade	Evapo-transpiration de référence (ET ₀)		Coefficient cultural décadaie (K _c)	ETM		Pluie totale	Besoins nets en eau d'irrigation
			mm/ jour	mm/ década		mm/ jour	mm/ década		
SEPTEMBRE	1	4,82	48,20	0,65	3,13	31,33	0,00	28,92	
	2	4,08	40,80	0,65	2,65	26,52	0,00	26,52	
	3	3,81	38,10	0,65	2,48	24,77	0,00	24,77	
OCTOBRE	1	3,65	36,50	0,60	2,19	21,90	0,00	21,90	
	2	2,69	26,90	0,60	1,61	16,14	31,00	0,00	
	3	2,67	26,70	0,60	1,60	16,02	0,00	16,02	
NOVEMBRE	1	1,89	18,90	0,60	1,13	11,34	18,30	0,00	
	2	1,64	16,40	0,60	0,98	9,84	0,00	9,84	
	3	1,15	11,50	0,60	0,69	6,90	46,60	0,00	
DECEMBRE	1	1,24	12,40	0,50	0,62	6,20	19,60	0,00	
	2	0,99	9,90	0,50	0,50	4,95	26,00	0,00	
	3	1,08	11,88	0,50	0,54	5,94	0,00	5,94	
JANVIER	1	1,24	12,40	0,40	0,50	4,96	0,00	4,96	
	2	1,87	18,70	0,40	1,37	13,65	22,90	0,00	
	3	1,45	14,50	0,40	0,58	5,80	21,00	0,00	
FEVRIER	1	1,77	17,70	0,55	0,97	9,74	0,00	9,74	
	2	1,87	18,70	0,55	1,03	10,29	24,90	0,00	
	3	1,47	14,70	0,55	0,81	8,09	37,30	0,00	
MARS	1	2,89	28,90	0,70	2,02	20,23	0,00	20,23	
	2	3,14	31,40	0,70	2,20	21,98	0,00	21,98	
	3	3,41	34,10	0,70	2,39	23,87	6,20	17,67	
AVRIL	1	4,34	43,40	0,70	3,04	30,38	0,00	30,38	
	2	4,89	48,90	0,70	3,42	34,23	0,00	34,23	
	3	4,18	41,80	0,70	2,93	29,26	30,40	0,00	
MAI	1	5,24	52,40	0,75	3,93	39,30	0,00	39,30	
	2	6,04	60,40	0,75	4,53	45,30	0,00	45,30	
	3	5,48	54,80	0,75	4,11	41,10	0,00	41,10	
JUIN	1	6,08	60,80	0,75	4,56	45,60	0,00	45,60	
	2	6,46	64,60	0,75	4,85	48,45	5,00	19,23	
	3	6,46	64,60	0,75	4,85	48,45	0,00	48,45	
JUILLET	1	6,11	61,10	0,75	4,58	45,83	0,00	45,83	
	2	6,87	68,70	0,75	5,15	51,53	0,00	51,53	
	3	6,10	61,00	0,75	4,58	45,75	0,00	45,75	
AOÛT	1	5,93	59,30	0,75	4,45	44,48	0,00	44,48	
	2	6,15	61,50	0,75	4,61	46,13	0,00	46,13	
	3	6,12	61,20	0,75	4,59	45,90	0,00	45,90	
Total		-	1 321,48	-	-	917,89	289,20	791,67	

Annexe 10 (suite 4)

Canevas de calculs des besoins eau pour les principales cultures du périmètre du Tadla :
Culture : MAIS ENSILAGE

Système d'irrigation : GRAVITAIRE / Campagne : 2014-2015

Mois M-GR	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural décadaie (Kc)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
		mm/ jour	mm/ década		mm/ jour	mm/ década		
MARS	2	2,41	19,28	0,50	1,21	9,64	7,80	1,84
	3	2,74	27,40	0,80	2,19	21,92	58,70	0,00
AVRIL	1	3,46	34,60	1,20	4,15	41,52	3,20	38,32
	2	3,91	39,10	1,20	4,69	46,92	0,00	46,92
	3	4,01	40,10	1,20	4,81	48,12	0,00	48,12
MAI	1	4,89	48,90	1,20	5,87	58,68	0,00	58,68
	2	5,03	50,30	1,20	6,04	60,36	0,00	60,36
	3	4,27	42,70	1,20	5,12	51,24	16,50	34,74
JUN	1	5,39	53,90	1,20	6,47	64,68	2,50	62,18
	2	5,31	26,55	1,20	6,37	31,86	0,40	31,46
	3	6,10	61,00	1,20	7,32	73,20	0,00	73,20
JUILLET	1	6,00	30,00	1,20	7,20	36,00	0,00	36,00
Total		-	473,83	-	-	544,14	89,10	491,82

Système d'irrigation : IRRIGATION LOCALISEE / Campagne : 2016-2017

Mois M-L	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural décadaie (Kc)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
		mm/ jour	mm/ década		mm/ jour	mm/ década		
MARS	2	3,14	25,12	0,50	1,57	12,56	7,80	8,59
	3	3,41	34,10	0,50	1,71	17,05	58,70	0,00
AVRIL	1	4,34	43,40	0,80	3,47	34,72	3,20	31,52
	2	4,89	48,90	0,80	3,91	39,12	0,00	39,12
	3	4,18	41,80	0,80	3,34	33,44	0,00	33,44
MAI	1	5,24	52,40	1,20	6,29	62,88	0,00	62,88
	2	6,04	60,40	1,20	7,25	72,48	0,00	72,48
	3	5,48	54,80	1,20	6,58	65,76	16,50	49,26
JUN	1	6,08	60,80	1,20	7,30	72,96	2,50	70,46
	2	6,46	32,30	1,20	7,75	38,76	0,40	38,36
	3	6,46	64,60	0,55	3,55	35,53	0,00	35,53
JUILLET	1	6,11	30,55	0,55	3,36	16,80	0,00	16,80
Total		-	549,17	-	-	502,06	89,10	458,44

Annexe 10 (suite 5)

Canevas de calculs des besoins eau pour les principales cultures du périmètre du Tadla :

Culture : AGRUMES (Verger d'oranger)

Système d'irrigation : GRAVITAIRE / Campagne : 2017-2018

Système d'irrigation : IRRIGATION LOCALISEE / Campagne : 2017-2018

Mois	Ag-GR	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural décadaie (Kc)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
			mm/ jour	mm/ décade		mm/ jour	mm/ décade		
SEPTEMBRE	1	5,21	52,10	0,75	3,91	39,08	0,00	39,08	
	2	4,51	45,10	0,75	3,38	33,83	0,00	33,83	
	3	3,78	37,80	0,75	2,84	28,35	0,00	28,35	
OCTOBRE	1	4,16	41,60	0,74	3,08	30,78	0,00	30,78	
	2	3,43	34,30	0,74	2,54	25,38	0,00	25,38	
	3	3,08	30,80	0,74	2,28	22,79	0,00	22,79	
NOVEMBRE	1	2,30	23,00	0,70	1,61	16,10	0,00	16,10	
	2	1,72	17,20	0,70	1,20	12,04	0,00	12,04	
	3	1,60	16,00	0,70	1,12	11,20	36,00	0,00	
DECEMBRE	1	1,16	11,60	0,70	0,81	8,12	6,00	2,12	
	2	0,98	9,80	0,70	0,69	6,86	35,60	0,00	
	3	1,34	14,74	0,70	0,94	10,32	0,00	10,32	
JANVIER	1	1,26	12,60	0,70	0,88	8,82	37,00	0,00	
	2	2,00	20,00	0,70	1,46	14,60	8,50	6,10	
	3	1,42	14,20	0,70	0,99	9,94	11,50	0,00	
FEVRIER	1	1,26	12,60	0,70	0,88	8,82	49,80	0,00	
	2	2,00	20,00	0,70	1,40	14,00	0,00	14,00	
	3	1,82	18,20	0,70	1,27	12,74	8,10	4,64	
MARS	1	2,86	28,60	0,70	2,00	20,02	44,70	0,00	
	2	2,41	24,10	0,70	1,69	16,87	30,30	0,00	
	3	3,39	33,90	0,70	2,37	23,73	0,50	23,23	
AVRIL	1	2,98	29,80	0,72	2,15	21,46	6,20	15,26	
	2	3,58	35,80	0,72	2,58	25,78	27,60	0,00	
	3	3,20	32,00	0,72	2,30	23,04	36,20	0,00	
MAI	1	3,31	33,10	0,73	2,42	24,16	9,80	14,36	
	2	4,33	43,30	0,73	3,16	31,61	26,20	5,41	
	3	4,52	45,20	0,73	3,30	33,00	4,60	28,40	
JUIN	1	5,10	51,00	0,75	3,83	38,25	0,00	38,25	
	2	5,69	56,90	0,75	4,27	42,53	0,00	42,53	
	3	5,51	55,10	0,75	4,13	41,33	0,00	41,33	
JUILLET	1	5,58	55,80	0,75	4,19	41,85	0,00	41,85	
	2	5,75	57,50	0,75	4,31	43,13	0,00	43,13	
	3	6,47	64,70	0,75	4,85	48,53	0,00	48,53	
AOUT	1	6,23	62,30	0,75	4,67	46,73	0,00	46,73	
	2	5,69	56,90	0,75	4,27	42,68	0,00	42,68	
	3	6,01	60,10	0,75	4,51	45,08	0,00	45,08	
Total		-	1 229,29	-	-	902,31	378,60	701,07	

Mois	Ag-LL	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural décadaie (Kc)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
			mm/ jour	mm/ décade		mm/ jour	mm/ décade		
SEPTEMBRE	1	5,21	52,10	0,70	3,65	36,47	0,00	36,47	
	2	4,51	45,10	0,70	3,16	31,57	0,00	31,57	
	3	3,78	37,80	0,70	2,65	26,46	0,00	26,46	
OCTOBRE	1	4,16	41,60	0,70	2,91	29,12	0,00	29,12	
	2	3,43	34,30	0,70	2,40	24,01	0,00	24,01	
	3	3,08	30,80	0,70	2,16	21,56	0,00	21,56	
NOVEMBRE	1	2,30	23,00	0,65	1,50	14,95	0,00	14,95	
	2	1,72	17,20	0,65	1,12	11,18	0,00	11,18	
	3	1,60	16,00	0,65	1,04	10,40	36,00	0,00	
DECEMBRE	1	1,16	11,60	0,65	0,75	7,54	6,00	1,54	
	2	0,98	9,80	0,65	0,64	6,37	35,60	0,00	
	3	1,34	14,74	0,65	0,87	9,58	0,00	9,58	
JANVIER	1	1,26	12,60	0,65	0,82	8,19	37,00	0,00	
	2	2,00	20,00	0,65	1,46	14,60	8,50	6,10	
	3	1,42	14,20	0,65	0,92	9,23	11,50	0,00	
FEVRIER	1	1,26	12,60	0,65	0,82	8,19	49,80	0,00	
	2	2,00	20,00	0,65	1,30	13,00	0,00	13,00	
	3	1,82	18,20	0,65	1,18	11,83	8,10	3,73	
MARS	1	2,86	28,60	0,65	1,86	18,59	44,70	0,00	
	2	2,41	24,10	0,65	1,57	15,67	30,30	0,00	
	3	3,39	33,90	0,65	2,20	22,04	0,50	21,54	
AVRIL	1	2,98	29,80	0,65	1,94	19,37	6,20	13,17	
	2	3,58	35,80	0,65	2,33	23,27	27,60	0,00	
	3	3,20	32,00	0,65	2,08	20,80	36,20	0,00	
MAI	1	3,31	33,10	0,70	2,32	23,17	9,80	13,37	
	2	4,33	43,30	0,70	3,03	30,31	26,20	4,11	
	3	4,52	45,20	0,70	3,16	31,64	4,60	27,04	
JUIN	1	5,10	51,00	0,70	3,57	35,70	0,00	35,70	
	2	5,69	56,90	0,70	3,98	39,92	0,00	39,92	
	3	5,51	55,10	0,70	3,86	38,57	0,00	38,57	
JUILLET	1	5,58	55,80	0,70	3,91	39,06	0,00	39,06	
	2	5,75	57,50	0,70	4,03	40,25	0,00	40,25	
	3	6,47	64,70	0,70	4,53	45,29	0,00	45,29	
AOUT	1	6,23	62,30	0,70	4,36	43,61	0,00	43,61	
	2	5,69	56,90	0,70	3,98	39,83	0,00	39,83	
	3	6,01	60,10	0,70	4,21	42,07	0,00	42,07	
Total		-	1 229,29	-	-	843,40	378,60	652,79	

Annexe 10 (suite 6)

**: Canevas de calculs des besoins eau pour les principales cultures du périmètre du Tadla :
Culture : OLIVIER (Verger oléicole semi-intensif)**

Système d'irrigation : GRAVITAIRE / Campagne : 2017-2018

Mois	O-GR	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural décadaie (K _c)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
			mm/ jour	mm/ década		mm/ jour	mm/ década		
SEPTEMBRE	1	5,21	52,10	0,55	2,87	28,66	0,00	28,66	
	2	4,51	45,10	0,55	2,48	24,81	0,00	24,81	
	3	3,78	37,80	0,55	2,08	20,79	0,00	20,79	
OCTOBRE	1	4,16	41,60	0,50	2,08	20,80	0,00	20,80	
	2	3,43	34,30	0,50	1,72	17,15	0,00	17,15	
	3	3,08	30,80	0,50	1,54	15,40	0,00	15,40	
NOVEMBRE	1	2,30	23,00	0,45	1,04	10,35	0,00	10,35	
	2	1,72	17,20	0,45	0,77	7,74	0,00	7,74	
	3	1,60	16,00	0,45	0,72	7,20	36,00	0,00	
DECEMBRE	1	1,16	11,60	0,45	0,52	5,22	6,00	0,00	
	2	0,98	9,80	0,45	0,44	4,41	35,60	0,00	
	3	1,34	14,74	0,45	0,60	6,63	0,00	6,63	
JANVIER	1	1,26	12,60	0,45	0,57	5,67	37,00	0,00	
	2	2,00	20,00	0,45	1,46	14,60	8,50	6,10	
	3	1,42	14,20	0,45	0,64	6,39	11,50	0,00	
FEVRIER	1	1,26	12,60	0,50	0,63	6,30	49,80	0,00	
	2	2,00	20,00	0,50	1,00	10,00	0,00	10,00	
	3	1,82	18,20	0,50	0,91	9,10	8,10	1,00	
MARS	1	2,86	28,60	0,50	1,43	14,30	44,70	0,00	
	2	2,41	24,10	0,50	1,21	12,05	30,30	0,00	
	3	3,39	33,90	0,50	1,70	16,95	0,50	16,45	
AVRIL	1	2,98	29,80	0,55	1,64	16,39	6,20	10,19	
	2	3,58	35,80	0,55	1,97	19,69	27,60	0,00	
	3	3,20	32,00	0,55	1,76	17,60	36,20	0,00	
MAI	1	3,31	33,10	0,55	1,82	18,21	9,80	8,41	
	2	4,33	43,30	0,55	2,38	23,82	26,20	0,00	
	3	4,52	45,20	0,55	2,49	24,86	4,60	20,26	
JUN	1	5,10	51,00	0,55	2,81	28,05	0,00	28,05	
	2	5,69	56,90	0,55	3,13	31,63	0,00	31,63	
	3	5,51	55,10	0,55	3,03	30,31	0,00	30,31	
JUILLET	1	5,58	55,80	0,55	3,07	30,69	0,00	30,69	
	2	5,75	57,50	0,55	3,16	31,63	0,00	31,63	
	3	6,47	64,70	0,55	3,56	35,59	0,00	35,59	
AOÛT	1	6,23	62,30	0,60	3,74	37,38	0,00	37,38	
	2	5,69	56,90	0,60	3,41	34,14	0,00	34,14	
	3	6,01	60,10	0,60	3,61	36,06	0,00	36,06	
Total		-	1 229,29	-	-	664,56	378,60	504,21	

Système d'irrigation : IRRIGATION LOCALISEE / Campagne : 2017-2018

Mois	O-L	Décade	Evapo-transpiration de référence (ETo)		Coefficient cultural décadaie (K _c)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
			mm/ jour	mm/ década		mm/ jour	mm/ década		
SEPTEMBRE	1	5,21	52,10	0,50	2,61	26,05	0,00	26,05	
	2	4,51	45,10	0,50	2,26	22,55	0,00	22,55	
	3	3,78	37,80	0,50	1,89	18,90	0,00	18,90	
OCTOBRE	1	4,16	41,60	0,50	2,08	20,80	0,00	20,80	
	2	3,43	34,30	0,50	1,72	17,15	0,00	17,15	
	3	3,08	30,80	0,50	1,54	15,40	0,00	15,40	
NOVEMBRE	1	2,30	23,00	0,50	1,15	11,50	0,00	11,50	
	2	1,72	17,20	0,50	0,86	8,60	0,00	8,60	
	3	1,60	16,00	0,50	0,80	8,00	36,00	0,00	
DECEMBRE	1	1,16	11,60	0,50	0,58	5,80	6,00	0,00	
	2	0,98	9,80	0,50	0,49	4,90	35,60	0,00	
	3	1,34	14,74	0,50	0,67	7,37	0,00	7,37	
JANVIER	1	1,26	12,60	0,50	0,63	6,30	37,00	0,00	
	2	2,00	20,00	0,50	1,46	14,60	8,50	6,10	
	3	1,42	14,20	0,50	0,71	7,10	11,50	0,00	
FEVRIER	1	1,26	12,60	0,40	0,50	5,04	49,80	0,00	
	2	2,00	20,00	0,40	0,80	8,00	0,00	8,00	
	3	1,82	18,20	0,40	0,73	7,28	8,10	0,00	
MARS	1	2,86	28,60	0,45	1,29	12,87	44,70	0,00	
	2	2,41	24,10	0,45	1,08	10,85	30,30	0,00	
	3	3,39	33,90	0,45	1,53	15,26	0,50	14,76	
AVRIL	1	2,98	29,80	0,45	1,34	13,41	6,20	7,21	
	2	3,58	35,80	0,45	1,61	16,11	27,60	0,00	
	3	3,20	32,00	0,45	1,44	14,40	36,20	0,00	
MAI	1	3,31	33,10	0,50	1,66	16,55	9,80	6,75	
	2	4,33	43,30	0,50	2,17	21,65	26,20	0,00	
	3	4,52	45,20	0,50	2,26	22,60	4,60	18,00	
JUN	1	5,10	51,00	0,55	2,81	28,05	0,00	28,05	
	2	5,69	56,90	0,55	3,13	31,63	0,00	31,63	
	3	5,51	55,10	0,55	3,03	30,31	0,00	30,31	
JUILLET	1	5,58	55,80	0,55	3,07	30,69	0,00	30,69	
	2	5,75	57,50	0,55	3,16	31,63	0,00	31,63	
	3	6,47	64,70	0,55	3,56	35,59	0,00	35,59	
AOÛT	1	6,23	62,30	0,55	3,43	34,27	0,00	34,27	
	2	5,69	56,90	0,55	3,13	31,30	0,00	31,30	
	3	6,01	60,10	0,55	3,31	33,06	0,00	33,06	
Total		-	1 229,29	-	-	629,55	378,60	479,65	

Annexe 10 (suite 7)

Canevas de calculs des besoins eau pour les principales cultures du périmètre du Tadla :
Culture : MARAICHAGE (Pomme de Terre)

Système d'irrigation : GRAVITAIRE / Campagne : 2016-2017

Mois GR	Période Décade	Evapo-transpiration de référence (ET ₀)		Coefficient cultural décadaire (K _c)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
		mm/ jour	mm/ décade		mm/ jour	mm/ décade		
FEVRIER	3	1,47	8,82	0,50	0,74	4,41	37,30	0,00
MARS	1	2,89	23,12	0,80	2,31	18,50	0,00	18,50
	2	3,14	25,12	0,80	2,51	20,10	0,00	30,14
	3	3,41	34,10	1,20	4,09	40,92	6,20	34,72
AVRIL	1	4,34	43,40	1,20	5,21	52,08	0,00	52,08
	2	4,89	48,90	1,20	5,87	58,68	0,00	58,68
	3	4,18	41,80	1,20	5,02	50,16	30,40	19,76
MAI	1	5,24	52,40	1,20	6,29	62,88	0,00	62,88
	2	6,04	60,40	1,20	7,25	72,48	0,00	72,48
	3	5,48	54,80	1,20	6,58	65,76	0,00	65,76
JUN	1	6,08	60,80	1,20	7,30	72,96	0,00	72,96
	2	6,46	64,60	1,20	7,75	77,52	5,00	72,52
Total		-	518,26	-	-	596,44	289,20	560,48

Système d'irrigation : IRRIGATION LOCALISEE / Campagne : 2016-2017

Mois L	Période Décade	Evapo-transpiration de référence (ET ₀)		Coefficient cultural décadaire (K _c)	ETM		Pluie totale mm	Besoins nets en eau d'irrigation mm
		mm/ jour	mm/ décade		mm/ jour	mm/ décade		
FEVRIER	3	1,47	8,82	0,50	0,74	4,41	37,30	0,00
MARS	1	2,89	23,12	0,80	2,31	18,50	0,00	18,50
	2	3,14	25,12	0,80	2,51	20,10	0,00	20,10
	3	3,41	34,10	0,80	2,73	27,28	6,20	21,08
AVRIL	1	4,34	43,40	1,20	5,21	52,08	0,00	52,08
	2	4,89	48,90	1,20	5,87	58,68	0,00	58,68
	3	4,18	41,80	1,20	5,02	50,16	30,40	19,76
MAI	1	5,24	52,40	1,20	6,29	62,88	0,00	62,88
	2	6,04	60,40	1,20	7,25	72,48	0,00	72,48
	3	5,48	54,80	1,20	6,58	65,76	0,00	65,76
JUN	1	6,08	60,80	1,20	7,30	72,96	0,00	72,96
	2	6,46	64,60	0,55	3,55	35,53	5,00	30,53
Total		-	518,26	-	-	540,81	289,20	494,80

Annexe 11

Evaluations comparatives des besoins en eau entre situation de référence actuelle et la situation projetée à l'horizon 2050 pour le périmètre du Tadla
Cultures : Betterave à sucre ; cultures fourragères (Luzerne)

Culture :Betterave à sucre

BS Mois	Situation actuelle Année de référence: 2018					Situation projetée Année à l'horizon: 2050					Ecart en total besoins nets eau irrigation [(2)]	
	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	Volume (mm)	%
NOVEMBRE	14,00	0,16	2,24	0,00	2,24	17,92	0,16	2,87	0,00	2,87	0,63	28,00%
DECEMBRE	38,96	1,10	42,86	0,00	42,86	49,87	1,10	54,86	0,00	54,86	12,00	28,00%
JANVIER	45,65	1,15	52,50	10,50	42,00	58,43	1,15	67,20	10,19	57,00	15,01	35,73%
FEVRIER	56,72	1,18	67,12	37,00	30,12	72,60	1,18	85,91	35,92	49,99	19,87	65,98%
MARS	87,80	1,20	105,36	54,20	51,16	112,38	1,20	134,86	52,62	82,24	31,08	60,75%
AVRIL	115,95	1,20	139,14	10,30	128,84	148,42	1,20	178,10	10,00	168,10	39,26	30,47%
MAI	136,62	1,20	163,94	32,30	131,64	174,87	1,20	209,85	31,36	178,49	46,85	35,58%
JUIN	58,48	1,20	70,18	0,00	70,18	74,85	1,20	89,83	0,00	89,83	19,65	28,00%
JUILLET												
AOUT												
Total	554,18		144,30		499,03	709,35			140,10	683,37	184,34	36,94%

Culture : Luzerne

Luzerne

Lz Mois	Situation actuelle Année de référence: 2018					Situation projetée Année à l'horizon: 2050					Ecart en total besoins nets eau irrigation [(2)]	
	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	Volume (mm)	%
SEPTEMBRE	127,10	0,57	72,45	0,00	72,45	161,97	0,57	92,33	0,00	92,33	19,88	27,44%
OCTOBRE	92,77	0,44	40,55	31,00	9,55	118,22	0,44	51,67	29,86	21,81	12,26	128,45%
NOVEMBRE	46,80	0,45	21,06	64,90	0,00	59,64	0,45	26,84	62,52	0,00	0,00	
DECEMBRE	34,18	0,45	15,38	45,60	0,00	43,56	0,45	19,60	43,93	0,00	0,00	
JANVIER	45,60	0,56	25,76	43,90	0,00	58,11	0,56	32,82	42,29	0,00	0,00	
FEVRIER	51,10	0,48	24,47	62,20	0,00	65,12	0,48	31,18	59,92	0,00	0,00	
MARS	94,40	0,75	70,80	6,20	64,60	120,30	0,75	90,23	5,97	84,25	19,65	30,42%
AVRIL	134,10	0,85	113,99	30,40	83,59	170,89	0,85	145,26	29,29	115,97	32,39	38,75%
MAI	167,60	0,85	142,46	0,00	142,46	213,59	0,85	181,55	0,00	181,55	39,09	27,44%
JUIN	157,70	0,85	134,05	5,00	129,05	200,97	0,85	170,82	4,82	166,01	36,96	28,64%
JUILLET	196,90	0,78	152,64	0,00	152,64	250,93	0,78	194,52	0,00	194,52	41,88	27,44%
AOUT	182,00	0,80	145,60	0,00	145,60	231,94	0,80	185,55	0,00	185,55	39,95	27,44%
Total	1 330,25		289,20		799,93	1 695,25			278,60	1 041,99	242,07	30,26%

Annexe II (suite I)

Evaluations comparatives des besoins en eau entre situation de référence actuelle et la situation projetée à l'horizon 2050 pour le périmètre du Tadla
Cultures : Céréales d'automne (blés) ; maïs ensilage ; maraichage (Pomme de Terre)

Culture: Céréales d'automne (Blés)

CA	Situation actuelle					Situation projetée					Ecart en total besoins nets eau irrigation [(2) / (1)]	
	Année de référence: 2018					Année à l'horizon: 2050					Volume (mm)	%
	Mois	ETo (mm)	Coefficient cultural (Kc)	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets eau irrigation (mm) (1)	ETo (mm)	Coefficient cultural (Kc)	ETM (mm)	Pluie (mm)		
nov.	46,80	0,06	2,59	46,60	0,00	59,44	0,06	3,29	44,81	0,00	0,00	
déc.	34,18	0,45	15,38	45,60	0,00	43,41	0,45	19,53	43,85	0,00	0,00	
janv.	45,60	0,62	28,24	43,90	0,00	57,91	0,62	35,86	42,21	0,00	0,00	
févr.	51,10	0,75	38,33	62,20	0,00	64,90	0,75	48,67	59,81	0,00	0,00	
mars	94,40	0,86	81,03	6,20	74,83	119,89	0,86	102,91	5,96	96,95	22,12	29,56%
avr.	134,10	1,05	140,81	30,40	110,41	170,31	1,05	178,82	29,23	149,59	39,19	35,49%
mai	167,60	1,05	175,98	0,00	175,98	212,85	1,05	223,49	0,00	223,49	47,51	27,00%
juin	93,10	0,84	78,38	5,00	73,38	118,24	0,84	99,54	4,81	94,73	21,35	29,10%
Total	666,88	-	560,72	239,90	434,59	846,94	-	712,11	230,67	564,76	130,17	29,95%

Culture : Maïs ensilage

Maïs

M	Situation actuelle					Situation projetée					Ecart en total besoins nets eau irrigation [(2) / (1)]	
	Année de référence: 2018					Année à l'horizon: 2050					Volume (mm)	%
	Mois	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)		
MARS	46,68	0,68	31,56	66,50	0,00	59,75	0,68	40,40	64,56	0,00	0,00	
AVRIL	113,80	1,20	136,56	3,20	133,36	145,66	1,20	174,80	3,11	171,69	38,33	28,74%
MAI	141,90	1,20	170,28	16,50	153,78	181,63	1,20	217,96	16,02	201,94	48,16	31,32%
JUIN	141,45	1,20	169,74	2,90	166,84	181,06	1,20	217,27	2,82	214,45	47,61	28,54%
JUILLET	60,00	0,60	36,00	0,00	36,00	76,80	0,60	46,08	0,00	46,08	10,08	28,00%
Total	503,83	-	89,10	489,98	644,90	644,90	-	86,50	634,16	144,18	29%	

Culture : Pomme de Terre

Pdt

pd	Situation actuelle					Situation projetée					Ecart en total besoins nets eau irrigation [(2) / (1)]	
	Année de référence: 2018					Année à l'horizon: 2050					Volume (mm)	%
	Mois	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)		
FEVRIER	8,82	0,50	4,41	37,30	0,00	11,24	0,50	5,62	35,87	0,00	0,00	
MARS	82,34	0,97	79,51	6,20	73,31	104,93	0,97	101,33	5,96	95,37	22,06	30,08%
AVRIL	134,10	1,20	160,92	30,40	130,52	170,89	1,20	205,07	29,23	175,84	45,32	34,73%
MAI	167,60	1,20	201,12	0,00	201,12	213,59	1,20	256,30	0,00	256,30	55,18	27,44%
JUIN	125,40	1,20	150,48	5,00	145,48	159,81	1,20	191,77	4,81	186,96	41,48	28,51%
JUILLET	196,90	1,20	236,28	0,00	236,28	250,93	1,20	301,11	0,00	301,11	64,83	27,44%
Total	715,16	-	78,90	786,71	911,39	911,39	-	75,87	1 015,59	228,88	29,09%	

Annexe II (suite 2)

Evaluations comparatives des besoins en eau entre situation de référence actuelle et la situation projetée à l'horizon 2050 pour le périmètre du Tadla
Cultures : Vergers d'arboriculture fruitière (Agrumes ; Olivier)

Culture: Agrumes		Agrumes											
Ag	Mois	Situation actuelle Année de référence: 2018					Situation projetée Année à l'horizon: 2050					Ecart en total besoins nets eau irrigation ((2)	
		ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	Volume (mm)	%
	SEPTEMBRE	135,00	0,75	101,25	0,00	101,25	174,78	0,75	131,08	0,00	131,08	29,83	29,46%
	OCTOBRE	109,78	0,72	78,96	0,00	78,96	142,12	0,72	102,22	0,00	102,22	23,26	29,46%
	NOVEMBRE	56,20	0,70	39,34	36,00	3,34	72,76	0,70	50,93	34,98	15,95	12,61	3,5 fois
	DECEMBRE	36,14	0,70	25,30	41,60	0,00	46,79	0,70	32,75	40,43	0,00	0,00	
	JANVIER	46,80	0,71	33,36	57,00	0,00	60,59	0,71	43,19	55,39	0,00	0,00	
	FEVRIER	50,80	0,70	35,56	57,90	0,00	65,77	0,70	46,04	56,27	0,00	0,00	
	MARS	86,60	0,70	60,62	75,50	0,00	112,11	0,70	78,48	73,37	5,11	5,11	
	AVRIL	97,60	0,72	70,27	70,00	0,27	126,36	0,72	90,98	68,02	22,95	22,68	8,3 fois
	MAI	121,60	0,73	88,77	40,60	48,17	157,43	0,73	114,92	39,45	75,47	27,30	56,68%
	JUIN	134,55	0,75	100,91	0,00	100,91	174,19	0,75	130,64	0,00	130,64	29,73	29,46%
	JUILLET	184,47	0,72	133,50	0,00	133,50	238,82	0,72	172,83	0,00	172,83	39,33	29,46%
	AOUT	179,30	0,75	134,48	0,00	134,48	232,13	0,75	174,10	0,00	174,10	39,62	29,46%
	Total	1 238,84		902,31	378,60	600,88	1 603,84		1 168,16	367,91	830,36	229,48	38,19%

Culture : Olivier		Olivier											
Ol	Mois	Situation actuelle Année de référence: 2018					Situation projetée Année à l'horizon: 2050					Ecart en total besoins nets eau irrigation ((2)	
		ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	ETo (mm)	Coefficient	ETM (mm)	Pluie (mm)	Besoins nets	Volume (mm)	%
	SEPTEMBRE	135,00	0,55	74,25	0,00	74,25	174,78	0,55	96,13	0,00	96,13	21,88	29,46%
	OCTOBRE	109,78	0,49	53,35	0,00	53,35	142,12	0,49	69,07	0,00	69,07	15,72	29,46%
	NOVEMBRE	56,20	0,45	25,29	36,00	0,00	72,76	0,45	32,74	34,98	0,00	0,00	
	DECEMBRE	36,14	0,45	16,26	41,60	0,00	46,79	0,45	21,05	40,43	0,00	0,00	
	JANVIER	46,80	0,57	26,66	57,00	0,00	60,59	0,57	34,51	55,39	0,00	0,00	
	FEVRIER	50,80	0,50	25,40	57,90	0,00	65,77	0,50	32,88	56,27	0,00	0,00	
	MARS	86,60	0,50	43,30	75,50	0,00	112,11	0,50	56,06	73,37	0,00	0,00	
	AVRIL	97,60	0,55	53,68	70,00	0,00	126,36	0,55	69,50	68,02	1,47	1,47	
	MAI	121,60	0,55	66,88	40,60	26,28	157,43	0,55	86,58	39,45	47,13	20,85	79,34%
	JUIN	134,55	0,55	74,00	0,00	74,00	174,19	0,55	95,81	0,00	95,81	21,80	29,46%
	JUILLET	184,47	0,53	97,90	0,00	97,90	238,82	0,53	126,74	0,00	126,74	28,84	29,46%
	AOUT	179,30	0,60	107,58	0,00	107,58	232,13	0,60	139,28	0,00	139,28	31,70	29,46%
	Total	1 238,84		378,60		433,36	1 603,84		367,91		575,62	142,26	32,83%