

THÈSE

en vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Bio Bio

Structure de Recherche : Laboratoire de Physiologie et Biotechnologie Végétales

Discipline : Biologie

Spécialité : Ecologie/Sciences de l'environnement

Présentée et Soutenue le : 13 / 05 / 2024

par :

El Houssaine OUHARBA

Evaluation de la Vulnérabilité Climatique et Agricole dans le Bassin Versant du Bouregreg (Maroc)

Devant le JURY :

Abdelkarim GUEDIRA	PES	Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V	Président
Ahmed EL ABOUDI	PES	Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V	Examineur/Rapporteur
Laila RHAZI	PES	Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V	Examineur/Rapporteur
Lahcen ZIDANE	PES	Faculté des Sciences de Kenitra, Université Ibn Tofail	Examineur/Rapporteur
Rachid MOUSSADEK	Dr	Institut Nationale de la Recherche Agronomique, et ICARDA-Rabat	Co-Directeur de thèse
Zine el Abidine TRIQUI	PES	Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohammed V	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2023 – 24

RESUME

Le régime hydrologique de l'ensemble des bassins est caractérisé par une très grande variabilité interannuelle marquée par l'alternance des séquences humides et sèches, intercalées par des années de forte hydraulité ou de sécheresse sévère. La plupart des bassins hydrauliques connaissent des déficits hydriques. Cette situation risque de se dégrader sous l'effet des changements climatiques et de l'aggravation des phénomènes extrêmes en particulier la réduction importante de la pluviométrie et des sécheresses généralisées. la menace de sécheresse plane toujours sur le pays à l'instar des périodes 1980-1985 , 1990-1995 , 1998-2002, 2011-2012 et (2015-2016, année de sécheresse sévère pendant les 30 années dernières) et 2019-2020, durant lesquelles la quasi-totalité des bassins versants ont été en situation de déficit hydrique amenant à la surexploitation des nappes phréatiques.

Le présent travail a pour objectif de décrire les conditions météorologiques et climatiques du bassin versant Bouregreg, afin de répondre à la problématique de la vulnérabilité en traitant l'effet des fluctuations climatiques sur les ressources hydriques, et la production agricole dans le bassin versant du Bouregreg. En utilisant la contribution hydro et agro-climatique, dans l'écosystème biophysique par l'établissement de la caractérisation climatologique, agronomique, Télédétection et la modélisation de la croissance végétale dans la zone d'étude.

Mots-clefs: Agro-climatologie, ressources en eau, changement climatique, bassin-versant, Maroc.

ABSTRACT

The hydrological regime of all the basins is characterized by very great interannual variability marked by the alternation of wet and dry sequences, interspersed by years of high hydraulicity or severe drought. Most hydraulic basins experience water deficits. This situation risks deteriorating under the effect of climate change and the worsening of extreme phenomena, in particular the significant reduction in rainfall and widespread droughts. The threat of drought still hangs over the country like the periods 1980-1985, 1990-1995, 1998-2002, 2011-2012 and (2015-2016, year of severe drought for the last 30 years) and 2019-2020, during which almost all watersheds were in a situation of water deficit leading to the overexploitation of groundwater. The objective of this work is to describe the meteorological and climatic conditions of the Bouregreg watershed, in order to respond to the problem of vulnerability by addressing the effect of climatic fluctuations on water resources, and agricultural production in the Bouregreg watershed. Using the hydro and agro-climatic contribution, in the biophysical ecosystem by establishing climatological, agronomic characterization, remote sensing and modeling of plant growth in the study area.

Keywords: Agro-climatology, Water resources, Climate change, Watershed, Morocco.

REMERCIEMENTS

Je remercie le Directeur du Laboratoire de Physiologie et Biotechnologie Végétale **Monsieur Aziz SMOUNI** de m'avoir accueilli dans sa structure de recherche.

Au terme de ce travail, il nous est particulièrement agréable d'exprimer ma reconnaissance et mes vifs remerciements au Directeur de thèse **Monsieur Zine-El-Abidine TRIQUI** Professeur au Département de Biologie, Laboratoire de Physiologie Végétale. FSR, Université Med V– Rabat, qui a accepté d'encadrer ce travail et de nous faire part de son soutien et expérience Scientifique et pédagogique, et Les résultats de ce travail doivent beaucoup aux exigences de sa rigueur scientifique, à ses orientations, conseils et critiques pertinentes. Qu'il en soit vivement remercié.

Et au Co-Directeur de thèse **Monsieur Rachid MOUSSADEK** Docteur-Ingénieur en sciences du Sol/Géomatique, à l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) et International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) à Rabat. D'avoir bien voulu co-encadrer cette thèse de doctorat. C'est pour nous l'opportunité de lui exprimer notre profonde reconnaissance et notre gratitude pour son esprit ouvert et ses conseils précieux et d'apprendre de son expérience.

Un grand merci A : **Monsieur Abdelkarim Guedira** Professeur au Département de Biologie, FSR- Université Med- V, Rabat, d'avoir accepté de Présider le jury de cette thèse.

Un grand merci aux Rapporteurs et Examineurs : **Monsieur Ahmed El Aboudi**, Professeur et chef de Département de Biologie. FSR, Université Med-V, Rabat.

Mme. Laila Rhazi, Professeur au Département de Biologie, FSR- Université Med- V, Rabat

Et **Monsieur Lahcen Zidane**, Professeur à FSK-Université Ibn Toufail, Kenitra.

D'avoir bien voulu examiner et juger le présent travail.

Un grand merci A:

M. Gil MAHE Directeur de recherche à Hydro-sciences Montpellier (IRD). Pour son aide et connaissances acquises dans la thèse par son appui et expertise.

M. El Ghezouali BEGGALI chef du domaine expérimental de Marchouch (Rommani) de l'INRA. Pour son accueil au sein du domaine expérimental et d'avoir accepté de me fournir les données météorologiques et rendements du blé disponibles.

M. Mohammed KHARRIM Docteur-Ingénieur Météorologue et Climatologue Chef du Centre provincial Météorologique de Tétouan à la DGM (MarocMétéo). D'avoir examiné la partie modèles des changements climatiques et leurs projections sur les rendements futurs, en apprenant de ses conseils et de son expérience en climatologie, modélisation et SIG.

Je **dédie ce travail** à feu mon père, à ma très chère mère, à mes sœurs et frères, à toute ma famille, à tous ceux qui m'ont aidé pour la réalisation de ce travail. Et à tous mes amis.

LISTE DES ABBREVIATIONS UTILISEES

°C	: Degré Celsius
ABHBC	: Agence du Bassin Hydraulique Bourereg Chaouia
ALADIN	: Modèle Climatique
AR	: Rapport Atmosphérique
ARPEGE	: Modèle de Circulation Atmosphérique
BM	: Bank Mondial (WB : World Bank en anglais)
CCNUCC	: Commission des Climatologues des Nations Unis sur les Changements
CERGEQ	: Centre de Recherche Géographique
CID	: Conseils d'Ingénierie et Développement
CIHEAM	: Centre Internationale des Hautes Etudes Agronomique Méditerranéenne
CNI	: Centre Nationale d'Impact
CNRF	: Centre Nationale de Recherche Forestière
CNRM-CM5	: Centre Nationale de Recherche Météorologique-Modèle de Circulation5
COP	: Conference Of Party (Congrès Mondial du Climat)
CR	: Circonscription Régionale
CRCM	: Modèle Climatique
CropSyst	: Modèle de Simulation de la Croissance Végétale
CRRA	: Centre Régionale de Recherche Agronomique
CT (CCA)	: Centre de Travaux (Centre du Conseil Agricole)
DH	: Département Hydraulique
DMN	: Direction de la Météorologie Nationale
DPA	: Direction Provinciale de l'Agriculture
DRA	: Direction Régionale de l'Agriculture
DREFNO	: Direction Régionale d'Etudes Forestières du Nord Ouest
DRPE	: Direction de la Recherche et Planification de l'Eau
ETP	: Evapo - Transpiration Potentiel
EXP	: Experimental
FAO	: Food and Agriculture Organization
GES	: Gaz à Effet de Serre
GICC	: Gestion d'Impact sur les Changements Climatiques

GIEC	: Groupement Intergouvernemental des Experts Climatologues (IPCC en Anglais)
GIRE	: Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GPS	: Global Position System
HadCM3	: Hadley Centre Model 3 (Service de Météorologie Britannique)
IAV	: Institut Agronomique et Vétérinaire
INDH	: Initiative Nationale Pour le Développement Humain
INRA	: Institut Nationale de Recherche Agronomique
IRES	: Institut Royale des Etudes Stratégiques
JRC	: Joint Research Centre (Commission Européenne de Recherche)
LANDSAT	: Satellite de Télédétection
MCG	: Modèle de Circulation Global
MDP	: Mécanisme pour le Développement Propre
MENA	: Middle East and North Afric
Mg/ha	: Million de Gramme par Hectare
Mm	: Millimètre
MODIS	: Satellite de Télédétection
NDVI	: Normalized Detection Vegetal Index
NPK	: Azote – Phosphate – Potassium
OMD	: Organisation Méditerranéenne de Développement
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
ONA	: Oscillation Nord Atlantique (NAO en Anglais)
PAN-LCD	: Plan d'Agriculture National et Lutte Contre la Désertification
PDAIRE	: Programme Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau
PMV	: Plan Maroc Vert
PNRC	: Plan National de Lutte Contre le Réchauffement Climatique
Qx/ha	: Quintaux par Hectare
RACMO	: Modèle Climatique
RCP	: Representative Concentration Pathway
Rdt moy.	: Rendement Moyen
RGPH	: Recensement Générale de la Population et des Habitations
SAU	: Surface Agricole Utile
SBV	: Sous Bassin Versant
SDSM	: Statistical Dowing Scaling Model

SEEE	: Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau et de l'Environnement
SIGMED	: Approche Spatialisée de l'impact des activités agricoles au Maghreb sur
SMBA	: Sidi Mohammed Ben Abdallah
SNDD	: Stratégie Nationale pour le Développement Durable
SRES	: Scénarios Climatiques de Réduction des Effet de Serre
SSP	: Scénarios d'Evolution Socio-Economique
T max	: Température Maximale
T min	: Température Minimale
T moy.	: Température Moyenne
UNDAF	: Plan des Nations Unis pour l'Aide au Développement
UNEP	: United Nations Environment Programme

LISTE DES ILLUSTRATIONS

➤ Figures

Figure 1: Carte des climats de Koppen-Geiger.	9
Figure 2: Anomalie des températures annuelles globales par rapport à la période 1961-1990 (GIEC, ...	10
Figure 3 : Tendances des cumuls annuels des précipitations en surface entre 1901 et 2005 (%par siècle) et 1979 et 2005(%par décade) (Trenberth et al., 2007).....	11
Figure 4: Répartition géographique de la proportion (%) des cumuls des précipitations.	13
Figure 5: Pluviométrie moyenne annuelle au Maroc entre 1940 et 1999 (Mahe et al., 2012).....	14
Figure 6: Climats du Maroc sur la période 1961-2005.....	14
Figure 7: Prévisions de changement climatique sur le Maroc (Gommes et al. 2009).....	16
Figure 8: Rejets de CO ₂ par la combustion d'hydrocarbures en 2006, par pays (International Energy	17
Figure 9: Émissions de CO ₂ dans quelques pays à développements contrastés. (International Energy.....	18
Figure 10: Représentation schématique des quatre grandes catégories des scénarios D'émission d'aérosols et de gaz à effet de serre du SRES. (CH2011, 2011).....	19
Figure 11: Scénarios RCPs en entrée et socio-économique en sortie	22
Figure 12: les RCPs comparés aux SRES (d'après S. Planton).....	23
Figure 13: Échelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S....	24
Figure 14: Les cinq SSP types, pour l'adaptation et pour l'atténuation (d'après Nigell et al. , 2011).....	24
Figure 15: Relation entre RCP et SSP, (d'après T.Kram)	25
Figure 16: Causes des crises alimentaires dans les pays en voie de développement (FAO).....	26
Figure 17: Rendement du blé au Maroc, comparativement à quelques pays Méditerranéens	27
Figure 18 : Schéma méthodologique d'analyse des images de NDVI de NOAA du bassin bouregreg.....	29
Figure 19 : Etapes d'analyse des images NDVI de MODIS.....	31
Figure 20 : Courbe d'évolution mensuelle interannuelle du NDVI	32
Figure 21 : Variation de la couverture végétale du bassin versant bouregreg en début de saison agricole.	33
Figure 22 : Courbe d'évolution du NDVI: moyenne annuelle de l'ensemble des pixels aux mois.....	35
Figure 23 : Variation de la couverture végétale du bassin bouregreg en milieu de saison agricole.....	36
Figure 24 : Carte générale d'occupation du sol à la première moitié janvier.....	36
Figure 25 ; Courbe d'évolution du NDVI: moyenne annuelle de l'ensemble des pixels aux mois.....	37
Figure 26 : Variation de la couverture végétale en fonction de la nature de l'occupation.....	38
Figure 27 : Résultat du test de rupture de petitt pour les séries de NDVI des quinze de mai à.....	39
Figure 28 : Variation de la couverture végétale dans le bassin versant bouregreg de mai à.....	41
Figure 29 : Carte générale d'occupation du sol en fin de saison agricole (MODIS 2000 à 2009).....	42
Figure 30 : Impacts du changement climatique sur le rendement du blé tendre, du blé dur pluvial et	44
Figure 31 : Pourcentage de réduction du rendement des principales cultures au Maroc).....	45
Figure 32 : Position géographique et principaux Oueds du bassin versant Bouregreg (Bounouira, 2007).	54
Figure 33 : Paysage représentatif de la topographie du Haut Pays (Plateau M'Rirt) (DREFNO, 2016)	54

Figure 34: Matorral à base de chêne vert très dégradé utilisé comme zone de parcours (SBV3).....	55
Figure 35: Importance et répartition de l'occupation des terres dans le bassin versant	56
Figure 36: Forêt de chêne liège d'El Harcha à recouvrement très	56
Figure 37: Peuplement de Thuya dégradé dans la région des Shouls (SBV5) (DREFNO, 2016)	57
Figure 38: Carte de localisation des forêts du Bassin Versant du Bouregreg.....	59
Figure 39: Carte des Isohyètes (DREFNO, 2016).....	65
Figure 40: Représentation graphique des précipitations mensuelles (Moy. Maxi et Mini) du bassin.....	68
Figure 41: Classification des Stations selon le Climagramme d'Emberger (CNRF, 2016).....	73
Figure 42: Courbe ombrothermique de la station de Tiddas	73
Figure 43: Courbe ombrothermique de la station d'Oulmès.	74
Figure 44: Courbe ombrothermique de la station de Sidi Ahsine	74
Figure 45: Courbe ombrothermique de la station de Moulay Bouazza.	74
Figure 46: Evolution des Séries des Débits dans le Bassin Versant du Bouregreg.....	81
Figure 47: Hydro-gramme des crues observées au niveau du barrage SMBA (DRPE, 2001).....	84
Figure 48: Localisation des zones couvertes et non couvertes par les études pédologiques	85
Figure 49: Vue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (d'après Google Earth)	86
Figure 50: Echelle de vulnérabilité appliquée aux 50 indicateurs de l'EVI.....	95
Figure 51: Répartition spatiale des précipitations moyenne annuelle sur le bassin versant Bouregreg.....	99
Figure 52: Vue de Jbel Mzourgane de point culminant le plus élevé du bassin.	100
Figure 53: Températures moyennes mensuelles à l'amont du bassin versant du Bouregreg.....	100
Figure 54: Températures minimales mensuelles à l'amont du bassin versant du Bouregreg.....	101
Figure 55: Températures maximales mensuelles à l'amont du bassin versant du Bouregreg.	101
Figure 56: Pluie annuelle de Khenifra pour la période (1969-70 à 2013-14).....	102
Figure 57: Pluie du mois de Janvier de Khenifra pour la période (1969-70 à 2013-14).....	102
Figure 58: Débits mensuels de Tarhat (région de khenifra) pour la période (1974/75 à 2010/2011)	103
Figure 59: Débits mensuels (Moyenne, Max et Min) de Tarhat pour la période (1974/75 à 2010/2011). .	103
Figure 60: Vue d'ensemble de la topographie et du paysage du Moyen Bouregreg.	104
Figure 61: Evolution Pluviométrique à Marchouch (INRA), de la période (1966 – 67 à 2007 – 2008).	104
Figure 62 : Evolution des Températures Moyennes Mensuelles (Tmoy, Tmax et Tmin)	105
Figure 63 : Diagramme <i>Ombrothermique</i> du Domaine Expérimental de Marchouch (INRA).....	105
Figure 64: Partie de la retenue du barrage SMBA où déverse directement l'Oued Bouregreg.....	106
Figure 65: Evolution des cumuls annuels de précipitations durant la période (1956- 2012).....	108
Figure 66: Ecart des précipitations annuelles par rapport à la normale.	108
Figure 67: Evolution de l'écart de la température moyenne annuelle à la normale (1961-2012).....	109
Figure 68: Evolution des températures minimales annuelles (1961-2012) (Rabat-Salé).....	110
Figure 69: Evolution des températures maximales annuelles (1961-2012) (Rabat-Salé).....	110
Figure 70 : Cumul annuel de la durée d'insolation pour la période 1961-2012.....	111
Figure 71 : Rose du vent annuelle pour la période 2009-2013.....	112
Figure 72 : Roses des vents par saison (2009-2013) à la région nord.....	113
Figure 73: Nombre de jours avec des vents forts et violents durant la période 1961-2012.....	114

Figure 74 : Moyenne mensuelle de l'humidité maximale et minimale à la région de Rabat	115
Figure 75 : Evolution de l'humidité minimale et maximale durant la période 1961-2012.....	116
Figure 76 : Nombre annuel de jours des phénomènes météorologiques les plus importants	117
Figure 77 : Concentration de CO2 avec tous agents de forçage.....	120
Figure 78: Evolution des Séries Pluviométriques dans le Bassin Versant	121
Figure 79 : Pluies mensuelles de Tarhat pour la période passée (1950-2000) et Les périodes futurs.....	121
Figure 80: Grille des modèles climatiques régionaux (Points noirs).....	123
Figure 81: Tendence des pluies dans la zone d'étude.	123
Figure 82: Tendence des débits dans la zone d'étude.	124
Figure 83 : Températures Maximales et Minimales aux stations de Rabat-salé et Kasba-Tadla en été...	124
Figure 84 : Températures Maximales et Minimales aux stations de Rabat-salé et KasbaTadla en hiver..	124
Figure 85 : Températures maximales mensuelles de Tarhat pour la période passée (1950-2000) et les...	125
Figure 86 : Températures minimales mensuelles de Tarhat pour la période passée (1950-2000) et les...	126
Figure 87 :Tendence des températures dans la zone d'étude.....	127
Figure 88 :Tendence des températures maximales dans les sites d'étude en été et en hiver	127
Figure 89 :Tendence des températures minimales dans les sites d'étude en été et en hiver	128
Figure 90 :Localisation du bassin versant du Bouregreg	129
Figure 91 : Carte hypsométrique du bassin versant du Bouregreg.....	132
Figure 92 : Schéma méthodologique général	134
Figure 93 : Unités géomorphologiques du bassin versant du Bouregreg	135
Figure 94 : Structure géologique du bassin versant du Bouregreg.....	136
Figure 95 : Carte pédologique du bassin versant du Bouregreg.....	137
Figure 96 : Position des masses d'air au Maroc.	139
Figure 97 : Variation spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin du.....	140
Figure 98 : Principales végétations du Bassin Versant du Bouregreg (CERGEO).	141
Figure 99 : Calendrier culturel du bassin versant du Bouregreg (INRA, 2012)	142
Figure 100 : Pâturage sur jachère d'un troupeau d'ovin, caprins et bovin au printemps (Maaziz).....	143
Figure 101 : Situation géographique du bassin versant du Bouregreg (El Agbani et al. 1992).....	145
Figure 102 : Type de Station Climatologique Classique. (SEEE, 2007)	153
Figure 103 : Type de Station Météorologique Automatique (DMN, 2007)	153
Figure 104 : État du Blé <i>Tendre</i> de Marchouch en Mars (CRRRA, INRA Rabat, 2011).....	154
Figure 105 : État du Blé <i>Tendre</i> de Marchouch en Avril (CRRRA, INRA Rabat, 2011)	155
Figure 106 : Évolution de la pluviométrie à Marchouch,INRA Période(1966/67 à 2007/08)	161
Figure 107 : Variabilité décennale des pluies pendant le cycle de croissance du blé période (2003/2009)	162
Figure 108 : Moyennes mensuelles des températures de la période (2003 à 2008) à Marchouch,INRA. ..	163
Figure 109 : Conditions météorologique Typique durant le cycle de croissance du blé à Marchouch.....	163
Figure 110 : Diagramme Ombrothermique du Domaine Expérimental de Marchouch, INRA.	164
Figure 111 : Évolution des trois décades du mois Novembre au Domaine Expérimental	165
Figure 112 : Évolution des rendements, au Domaine Expérimental Marchouch, INRA.....	166
Figure 113 : Comparaison des fluctuations de rendements et de pluviométrie à Marchouch, INRA.	166

Figure 114 : Rendements en fonction de la date de semis à de Marchouch, INRA.....	167
Figure 115 : Comparaison entre rendement mesuré et simulé à Marchouch.....	170
Figure 116 : Relation entre les rendements mesurés et simulés à Marchouch.	170
Figure 117 : Courbe d'évolution interannuelle de la pluviométrie dans l'espace du Bassin Bouregreg. ...	178
Figure 118 : Régime pluviométrique de l'espace du bassin du Bouregreg (SIGMED, 2012).....	180
Figure 119 : Evolution interannuelle des precipitations mensuelles dans le bassin du Bouregreg.	181
Figure 120 : Fréquence des décades pluviométriques nulles.....	186
Figure 121 : Détection de périodes sèches dans les campagnes agricoles d'années sèches A Rabat.	186
Figure 122 : Production d'orge dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009 (SIGMED)	189
Figure 123 : Intensité des sécheresses pour la culture de l'orge de 1980 à 2009.....	190
Figure 124 : Production de blé dur dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009 (SIGMED) ...	191
Figure 125 : Intensité des sécheresses pour la culture de blé dur de 1980 à 2009.	191
Figure 126 : Production de blé tendre dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009 (SIGMED) .	192
Figure 127 : Intensité des sécheresses pour la culture de blé tendre de 1980 à 2009.....	192
Figure 128: Evolution des superficies cultivées pour les principales céréales à Khémisset.	193
Figure 129 : Evolution des superfies et des productions dans les provinces de Khemiss et Houribga ...	197
Figure 130 : Etapes de la dégradation des sols au Maroc : (Roose, 2010).....	197
Figure 131 : Graphique des classes de dégradation du sol (classification d'image de Landsat).	198
Figure 132 : Evolution de la dégradation des sols dans le bassin versant du Bouregreg (SIGMED)	199
Figure 133 : Espace agricole céréalier marqué par l'érosion en nappe	200
Figure 134 : Matorral servant de parcours pour le bovin (aval du bassin)	201
Figure 135 : Espace agricole sur pente forte marqué par des griffures importantes	201
Figure 136 : Ravine à l'intérieur d'une forêt dégradé au centre du bassin (zone de pâturage).....	202
Figure 137 : La photo de gauche présente en lignes horizontales les terrassettes	202
Figure 138 : Matorral avec apparition sur des versants de la roche mère.....	203
Figure 139 : Exemple d'espace hydromorphe où la végétation saisonnièrement asphyxiée a disparue....	203
Figure 140 : Erosion de berge, en bas à gauche l'effondrement d'une digue de protection.	204
Figure 141 : Culture de fève sur sol équilibré.	204
Figure 142 : Carte d'occupation du sol de l'aval du bassin versant Bouregreg en avril 2008 (SPOT 5)...	205
Figure 143 : Caractérisation de la qualité du sol.....	208
Figure 144 : Caractérisation de la qualité de la végétation (SIGMED).....	210
Figure 145 : Caractérisation de la qualité du climat (SIGMED, 2012)	211
Figure 146 : Caractérisation de la qualité anthropique (SIGMED, 2012)	212
Figure 147 : Carte du risque de dégradation des sols dans le bassin versant (SIGMED, 2012).....	213
Figure 148 : Schéma du concept de réduction d'échelle (d'après D. Viner)	215
Figure 149 : Courbe d'évaluation comparative des précipitations moyennes annuelles des MCR et.....	218
Figure 150 : Evolution interannuelle des précipitations simulées jusqu'en 2050 et 2100.	219
Figure 151 : Evolution des températures moyennes annuelles simulées jusqu'en 2050 et 2100.....	220
Figure 152 : Evolution de la végétation déterminée à partir des températures de surface	225

➤ Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCPs (Moss et al. Nature 2010)	22
Tableau 2 : Les séquences d'évolution temporelle de la végétation de 1982 à 2009.....	34
Tableau 3 : Dates de rupture des séries chronologiques au mois de janvier et février.....	35
Tableau 4 : Progression annuelle des rendements, en quintal par hectare (Qx/ha.an),.....	47
Tableau 5 : Renseignements généraux sur les forêts incluses dans le bassin versant (DREFNO, 2016)	57
Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles (°C) (CNRF, Rabat et documents d'études, 2016)	60
Tableau 7 : Températures maximales et minimales mensuelles par station (CNRF, Rabat).....	60
Tableau 8 : Indicateurs Thermiques (Debrach, 1953)	62
Tableau 9 : Régime Thermique (CNRF, Rabat et documents d'études).....	62
Tableau 10 : Précipitations moyennes annuelles (CNRF, Rabat et DRH, Rabat).....	63
Tableau 11 : Pluviométrie moyenne mensuelle (CNRF, Rabat et DRH, Rabat)	64
Tableau 12: Pluviométrie moyenne maximale mensuelle (CNRF, Rabat et DRH, Rabat).....	66
Tableau 13 : Pluviométrie moyenne minimale mensuelle (CNRF, Rabat et DRH, Rabat)	67
Tableau 14 : Intensité moyenne journalière (CNRF, Rabat)	69
Tableau 15 : Précipitation journalière maximale (CNRF, Rabat).....	69
Tableau 16 : Régime Pluviométrique Saisonnier (CNRF, Rabat et DRH, Rabat)	71
Tableau 17 : Bioclimat du Bassin versant (CNRF, Rabat et documents d'études)	72
Tableau 18 : Données générales sur les sous bassin versants.	76
Tableau 19 : Données sur les barrages collinaires situés à l'intérieur du bassin.....	77
Tableau 20 : Données générales sur les stations hydrométriques (DRPE, 2012).....	78
Tableau 21 : Coefficients de ruissellement des stations de mesures hydrométriques (DRPE, 2012)	78
Tableau 22 : Caractéristiques des nappes souterraines du bassin (DRPE, 2012).....	79
Tableau 23 : Débits moyens annuels (m3/s) observés aux stations hydrométriques (DRPE, 2012)	80
Tableau 24 : Débits saisonniers (DRPE, 2012)	81
Tableau 25 : Apports des précipitations dans le bassin versant Bouregreg.....	82
Tableau 26: Indicateurs de l'EVI et différentes subdivisions définies par ces indicateurs;	90
Tableau 27 : Ressources en eau par habitant (d'après J. Margat, <i>Plan bleu</i>).	98
Tableau 28 : Classification climatique selon l'indice de Martonne et Quotient d'Emberger à Rabat	107
Tableau 29 : Bioclimat du Bassin Versant (CNRF, Rabat et documents d'études)	118
Tableau 30 : Superficie des exploitations de la région de Rommani en (ha).....	146
Tableau 31 : Relief de la région de Rommani (CT Rommani, DPA Khemisset et DRA R/S)	147
Tableau 32 : Texture des sols de Rommani (INRA, 2012).....	147
Tableau 33 : Texture des sols du Domaine Expérimental de Marchouch.....	150
Tableau 34 : Superficie des principales productions agricoles de la région (Moyenne en ha)	151
Tableau 35 : Rendements réalisés pour les principales cultures de la région en (Qx/ha)	152
Tableau 36 : Calendrier phénologique des céréales de Marchouch (CRRRA, INRA, 2011)	154
Tableau 37 : Rendements et paramètres phénologiques simulés du blé.....	169
Tableau 38 : Rapport des récoltes simulé.	171
Tableau 39 : Comparaison entre les températures maximales actuelles de la campagne (2008-09)	172

Tableau 40 : Comparaison entre les températures minimales actuelles de la campagne (2008-09)	173
Tableau 41 : Comparaison entre les pluies actuelles de la campagne (2007-08), INRA.	173
Tableau 42 : Récapitulatives de l'évolution interannuelle de la pluviométrie de 1980 à 2006.	178
Tableau 43 : Récapitulatif de la régression linéaire entre la pluviométrie et la végétation (1982-2009) ...	185
Tableau 44 : Statistique récapitulatif de la classification des images de Landsat du bassin.	204
Tableau 45 : Paramètres de caractérisation de l'indice de la qualité de la végétation.....	209
Tableau 46 : Classe de dégradation des sols (Kosmas et al. 1999)	214
Tableau 47 : Caractéristique des MCR utilisés.	216
Tableau 48 : Statistiques de comparaison entre les données de précipitation des stations et les données.	217
Tableau 49 : Statistique de rupture des séries de température des MCR.....	219
Tableau 50 : Récapitulatif de l'évolution de l'indice de sécheresse de Martone (1980-2050 et 2100).	222
Tableau 51:Seuillage des températures de surface d'image MODIS en fonction des types d'occupation	224

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Synthèse Bibliographique	7
1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DE L'ECHELLE GLOBALE A L'ECHELLE REGIONALE.	8
1.1. Le changement climatique	8
1.2. Le système climatique en changement	8
1.2.1 Les signes du changement à l'échelle globale.....	8
1.2.2 Les signes du changement dans le bassin méditerranéen.	13
2. LES PREVISIONS DU CHANGEMENTS CLIMATIQUE AU MAROC.....	17
3. PROJECTIONS CLIMATIQUES FUTURS	16
3.1. Les émissions de gaz à effet de serre à la source du changement.....	17
climatique.....	17
3.2. Scénarios d'émission d'aérosols et de gaz à effet de serre (SRES).....	18
3.3. Les modèles et scénarios climatiques futurs	20
3.3.1. Les modèles climatiques globaux de basse résolution	20
3.4.2. Approche innovante.....	21
3.4.3. Nouvelles représentations climatiques de référence.....	22
3.4.4. Simulations des Climatologues	23
3.4.5. Représentation des évolutions sociales et économiques.....	24
3.4.6. Cohérence entre évolutions climatiques et socio-économiques	25
4. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	26
4.1. Impacts du changement climatique sur l'agriculture mondiale.....	26
4.2. Impact du changement climatique et dynamique saisonnière et	26
Pluri-annuelle sur l'agriculture marocaine	26
4.2.1. Impact du changement climatique à partir d'images de basse	26
résolution spatiale de la période 1980-2009	26
4.2.2. Données et techniques d'analyse de la couverture végétale	
27	
4.2.3. Techniques d'analyse de l'évolution de la végétation	27

4.2.4. Traitements des images de basse résolution spatiale	28
a- Les indices de végétation.....	28
4.2.5. L'analyse statistique de la dynamique spatio-temporelle de la.....	29
végétation.....	29
4.2.6. Détection et suivi des saisons culturales : analyse par maille.....	31
a- Début de la saison agricole : Septembre à Décembre	31
b- Milieu de la saison agricole : Janvier et Février	34
c- Période de maturité des céréales : Mars et Avril	37
d- Fin de la saison agricole : Mai-Juin-Juillet et Août	38
a. Incertitudes concernant les impacts du changement climatique	42
b. Impact du changement climatique sur la productivité des cultures	43
4.3. Les impacts sur l'eau	46
5. CHANGEMENT CLIMATIQUE : VULNERABILITE, ADAPTATION ET	
ATTENUATION.....	48
5.1. Approches pour l'évaluation de la vulnérabilité.....	48
6. L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE, UNE NECESSITE POUR	
LE MAROC.....	48
6.1. Les formes théoriques de l'adaptation	48
6.2. Stratégies d'adaptation au changement climatique.....	48
6.2.1. L'option génétique	48
6.2.2. L'option de transfert de technologie	49
6.2.3. L'option de biotechnologie	49
7. ATTENUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	50
8. APERÇU DE LA GOUVERNANCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE AU	
MAROC.....	50
9. CONCLUSION	52
CHAPITRE I : EVALUATION DE LA VULNERABILITE ENVIRONNEMENTALE ET	
HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG.	53
1. PRESENTATION DU BASSIN D'ETUDE « BASSIN VERSANT DU	
BOUREGREG ».....	53
1.1 Situation Géographique et Topographique	53

1.2	Cadre géologique	55
2.	VEGETATION.....	55
2.1.	Identification et description des principales occupations	55
3.	CLIMATOLOGIE.....	59
3.1.	Températures.....	59
3.1.1.	Températures Mensuelles	59
3.1.2.	Régime thermique.....	61
3.2.	Pluviométrie.....	62
3.2.1.	Précipitations annuelles.....	63
3.2.2.	Précipitations moyennes mensuelles.....	64
3.2.3.	Précipitations Journalières.....	68
3.2.4.	Régime pluviométrique saisonnier.....	70
3.2.5.	Quotient Pluviothermique d'Emberger.Q2	71
4.	AUTRES FACTEURS.....	74
4.1.	L'évaporation	74
4.2.	L'enneigement.....	75
4.3.	Les Gelées	75
4.4.	Les Vents.....	75
5.	HYDROLOGIE.....	75
5.1.	Le réseau hydrographique.....	76
	Date de mise en service	78
5.2.	Débits annuels moyens	79
5.3.	Débits mensuels	80
5.4.	Bilan hydrologique.....	82
5.5.	Caractéristiques des crues du Bassin Versant du Bouregreg	83
6.	RESSOURCES EN SOLS	85
6.1.	Approche méthodologique.....	85
6.2.	Envasement de la retenue du barrage.....	86
CHAPITRE II. EVALUATION DE LA VULNERABILITE ENVIRONNEMENTALE ET CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG.		87

1. NECESSITE ET UTILITE DE MESURER LA VULNERABILITE ENVIRONNEMENTALE ET CLIMATIQUE AU MAROC.....	87
1.1. Conception de l'indice de vulnérabilité environnementale (EVI)	88
1.1.1. Le choix de l'EVI.....	88
1.1.2 Composition et calcul de l'EVI.....	89
1.1.3 Atouts et faiblesses de l'EVI.....	95
2. CONCLUSION	96
CHAPITRE III : EVALUATION ET DYNAMIQUE CLIMATIQUE FUTUR DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG - APPROCHE MODELISATION –.....	97
INTRODUCTION.....	97
1. METHODOLOGIE APPLIQUEE	99
1.1. Zone d'étude	99
1.2. Données d'observation.....	99
1.2.1 Amont du bassin :.....	100
1.2.2. Centre du bassin :.....	104
1.2.3. Aval du bassin :.....	106
1.2.3.1. Description pluviométrique	107
1.2.3.2. L'insolation.....	111
1.2.3.3. Le Vent.....	111
1.2.3.4. Evolution intra-annuelle des vents forts et violents.....	114
1.2.3.5. Humidité	114
1.2.3.6. Phénomènes météorologiques fréquents.....	116
2. MODELISATION.....	119
2.1. Données du modèle MCG.....	119
2.1.1. Modèle HadCM3 (Scénarios SRES).....	119
2.1.2. Modèle CNRM-CM5 (Scénarios RCPs).....	119
2.1.2.1. Analyse statistiques des précipitations et des Températures maximales et minimales.....	120
2.1.2.2. Réduction d'échelle	120
3. RESULTATS ET DISCUSSION	121
4. CONCLUSION	128

CHAPITRE IV : EVALUATION DE LA VULNERABILITE AGRICOLE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG.	129
INTRODUCTION	129
1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET MOTIVATION SCIENTIFIQUE	129
1.1. Des activités agricoles et pastorales soumis à une baisse de la pluviosité.....	130
1.2. Activités agricoles – disponibilité de la ressource en eau –.....	130
1.3. Activités pastorales –dégradation du milieu physique.....	131
2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DE L'ETUDE	131
2.1. Problématique	131
2.2. Objectifs de l'étude	132
3. METHODOLOGIE GENERALE DE L'ETUDE.....	133
4. CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION ET DE L'OCCUPATION DU SOL.	134
4.1. Cadre physique du bassin versant du Bouregreg	135
4.1.1. Cadre géomorphologique (Beudet, 1969 ; Marghich, 2004).....	135
4.1.2. Cadre pédologique.....	135
4.1.3. Cadre hydro-climatique du bassin versant du Bouregreg	137
4.1.3.1. Cadre hydrologique	137
4.1.3.2. Un bassin soumis à un climat méditerranéen semi-aride	138
4.1.4. La couverture végétale du bassin versant du Bouregreg (Berkat etTazi, 2004; Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, 1992).....	140
5. IMPORTANCE DU CADRE PHYSIQUE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG DANS LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION.	141
6. CALENDRIER AGRICOLE AXE SUR LA CEREALICULTURE ET L'ELEVAGE EXTENSIF	141
7. CONCLUSION	143
Etude Expérimentale	144
PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE	145
1. PRESENTATION DE ROMMANI (REGION DE RABAT) –CENTRE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG-	145
1.1. Situation Géographique	145

1.2. Caractéristique topographique et pédologique.....	146
1.3. Caractéristiques climatiques	148
2. METHODE ET DONNEES UTILISEES	148
2.1. Description du milieu d'étude expérimental.....	149
2.1.1. Localisation géographique	149
2.1.2. Caractérisation générale	149
2.1.3. Le Climat.....	150
2.1.4. Le Sol	150
2.1.5. Occupation de terres	150
3. DONNEES UTILISEES	152
3.1. Données météorologiques disponibles.....	152
3.2. Données rendements en blé tendre disponibles	153
3.3. Suivi de la végétation.....	154
4. ANALYSE STATISTIQUE.....	155
4.1. Analyse statistique des données agro-météorologiques.....	155
4.1.1. Rôle des analyses statistiques.....	155
4.1.2. Périodes de référence.	156
4.1.3. Méthodes statistiques.	156
5. MODELISATION	158
5.1. Présentation du modèle	158
5.2. Production potentielle	159
5.3. Production limitée par manque d'eau et de nutriments.	159
5.4. Production réduite.....	159
5.5. Échelle temporelle et échelle spatiale	160
5.6. Limitations de CropSyst	161
6. RESULTATS ET DISCUSSION.	161
6.1. Analyse des composantes climatiques	161
6.1.1. Régime des Précipitations	161
6.1.2. Régime des Températures	163
6.1.3. Diagramme Ombrothermique	164
7. ANALYSE DE LA CROISSANCE ET PRODUCTION DU BLE.....	165

7.1. Caractérisation Agro-climatique	165
7.1.1. Dates de semis et déficit hydrique.....	165
7.1.2. Rendements mesurés	166
7.1.3. Simulation des rendements par le modèle CropSyst.....	168
7.1.3.1. Document fastgraph.....	168
7.1.3.2. Simulation des rendements et paramètres phénologiques	169
7.1.3.3. Comparaison entre rendements mesurés et simulés	170
8. LES RENDEMENTS FUTURS SELON LES MODELES DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	172
8.1. Climat dans le futur selon le scénario B2	172
8.1.1. Températures Maximales.	172
8.1.2. Températures Minimales.	173
8.1.3. Précipitations.	173
9. LES RENDEMENTS FUTURS SELON LE SCENARIO B2.	174
- LES FACTEURS CLIMATIQUES DE LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION....	175
1. Dynamique spatio-temporelle des précipitations de 1980 à 2009	175
1.1. Evolution interannuelle de la pluviométrie	175
1.2. Evolution saisonnière de la pluviométrie	177
1.3. Analyse de l'impact de la variabilité climatique sur le dynamisme de la végétation dans le bassin versant du Bouregreg.	183
1. 3.1. La corrélation variabilité climatique-production et masses Végétales.....	183
- LES FACTEURS ANTHROPIQUES DE LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION.	194
1. La carte d'occupation du sol	194
- LA DEGRADATION DES SOLS : UNE RESULTANTE DE LA COMBINAISON DES FACTEURS CLIMATIQUES ET ANTHROPIQUES	195
1. Sols fragiles.....	195
2. Un bassin marqué par d'importantes dégradations des sols de 1980 à 2009.....	199
3. L'aval du bassin versant du Bouregreg, un exemple des pressions anthropiques et climatiques.	205
RISQUES ET SCENARIOS FUTURS DE DEGRADATION DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG HORIZON 2050 ET 2100.....	206

INTRODUCTION	206
1. ANALYSE DU RISQUE DE DEGRADATION DES TERRES A MOYEN TERME	207
1.1. Une méthodologie SIG inspirée du projet MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use)	207
1.2. L'indice de la qualité du sol (IQS) :	207
1.3. L'Indice de la Qualité de la Végétation	208
1.4. L'Indice de la Qualité du Climat (IQC)	210
1.5. L'Indice de la Qualité Anthropique (IQA)	212
2. ANALYSE DES SCENARIOS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DU BASSIN ET IMPACT POTENTIEL SUR L'AGRICULTURE.....	214
2.1. Les modèles climatiques régionaux utilisés : ALADIN, CRCM, RACMO.....	214
3. COMPARAISON ENTRE LES DONNEES DES MODELES ET LES DONNEES.....	216
OBSERVEES.....	216
3.1. Evolution des précipitations et des températures jusqu'en 2050 et 2100	218
3.1.1. Une accentuation de la baisse des quantités pluviométriques Annuelles.....	218
3.1.2. Une augmentation continue des températures	220
4. EVOLUTION BIOCLIMATIQUE (2050-2100) DU BASSIN BOUREGREG.....	221
4.1. Changement interannuel futur du climat dans le bassin versant du Bourereg	221
4.2. Une agriculture pluviale amenée à disparaître.....	222
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	233
ANNEXES	241
LEXIQUE DES PRINCIPAUX TERMES UTILISE	251

Introduction générale

Le changement climatique est en marche et ses effets dans le demi-siècle à venir sont en partie inévitables (GIEC, 2007). La question du changement climatique et de ses conséquences s'est ainsi installée, en l'espace d'à peine deux décennies. L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a des conséquences sur le climat et le milieu naturel actuel. Le changement climatique est l'un des problèmes internationaux les plus importants dont les implications affectent fortement les moyens durables de subsistance, la sûreté de l'eau et de l'alimentation ainsi que la santé et la biodiversité. L'effet du changement climatique se fait ressentir à l'échelle mondiale : hausse des températures moyennes au niveau de l'atmosphère et de l'océan, fonte massive de la neige, et élévation du niveau moyen de mer (GIEC, 2007a). Une multitude de systèmes naturels, physiques et biologiques vont être affecté par des changements importants. Le réchauffement climatique est au centre des préoccupations internationales. Il a notamment été portée dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC), et des conférences internationales régulières s'y consacrent entièrement (entre autres les conférences des parties, les COP).

En conformité avec la Convention-cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC), le Maroc a élaboré la Communication Nationale Initiale (CNI) en 2001 et la Seconde Communication Nationale (SCN) en 2009, la 3^{ème} en 2016 et la 4^{ème} en 2020. Dans ces communications, des inventaires de projets d'adaptation et d'atténuation ont été réalisés. Malgré son importance, la vulnérabilité aux changements climatiques dans les deux premières communications nationales étaient restées souvent vagues et sans trop de précision aussi bien sur sa définition que sur les outils nécessaires pour son évaluation. La vulnérabilité, lorsqu'elle est citée, est formulée en des termes plutôt qualitatifs et génériques sans indication sur la manière dont elle sera prise en considération pour la réalisation des programmes d'adaptation et atténuation du changement au Maroc (Messouli et al., 2011). Ce dernier ne dispose pas d'une stratégie nationale pour lutter contre le changement climatique, mais dispose d'un nombre important de programmes, initiatives et projets nationaux en relation avec la lutte contre le réchauffement climatique: Stratégie nationale pour la protection de l'environnement, Charte Nationale de l'Environnement et Développement Durable, Plan National de lutte contre le Réchauffement Climatique, Portefeuille de projets MDP, Nouvelle stratégie énergétique, Nouvelle stratégie de l'eau, Plan de protection contre les inondations, Nouvelle stratégie agricole: Plan Maroc Vert, Halieutis: nouvelle stratégie de développement

du secteur de la pêche, Stratégie de développement des zones montagneuses, Initiative Nationale de Développement Humain, Lutte contre la pauvreté. En l'absence d'une stratégie d'adaptation pour faire face aux impacts du changement du climat, en particulier dans les régions fragiles du pays qui sont caractérisées par des sécheresses intenses et une désertification et où l'agriculture reste la principale source de revenus et d'emplois, la situation de crise pourrait s'aggraver encore plus et menacer le Maroc socialement et économiquement.

L'irrégularité des précipitations est une caractéristique séculaire de l'agriculture Marocaine. Mais, depuis deux décennies, les sécheresses sont devenues plus fréquentes et constituent, désormais, une donnée quasi structurelle de la production agricole. Cette tendance ne pourra que s'accroître avec la diminution des précipitations et l'élévation des températures (Lazarev, 2012). Cette instabilité climatique a conduit à une variation, en dents de scie, de la production et des prix agricoles et à un recours plus important aux importations de denrées alimentaires.

Au Maroc, Les premiers signes de changement climatique se manifestent déjà à travers à la fois l'évolution des températures et des précipitations. Une étude réalisée à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN, 2007) montre des tendances significatives à la baisse au niveau des précipitations et à la hausse au niveau des températures. L'analyse des données climatiques du Maroc durant le quart de siècle passé met en évidence une grande variabilité du climat du pays, avec des tendances au réchauffement et au déficit pluviométrique. Globalement, la température de l'air au Maroc, toutes saisons confondues, a augmenté en moyenne de +0,6 à +1,4 selon les régions, au cours des 40 dernières années. Cette augmentation a été surtout effective depuis les années 80 et 90, période pendant laquelle le réchauffement s'est accentué avec la fréquence des sécheresses. Le Maroc est particulièrement vulnérable au changement climatique car il souffre déjà de températures élevées, de précipitations moins prévisibles et de pressions écologiques considérables. Les sécheresses sévères et les inondations dévastatrices ont frappé plusieurs régions ces dernières années. Des pertes inestimables en vies humaines, et des dégâts considérables sur les infrastructures et les biens sont enregistrés et se chiffrent, à chaque fois, en plusieurs centaines de millions de Dirhams (Messouli et al., 2011).

De façon générale, le bassin versant du Bouregreg est soumis à un régime méditerranéen de type semi-aride. Les ressources en eau au Maroc se caractérisent par leur

rareté et leur irrégularité spatiale et temporelle. Le Centre d'études et de recherches démographiques (CERED, 1997) indique que le Maroc est déjà dans une situation de stress hydrique ($<1000 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{an}$) et qu'il approcherait la situation de pénurie ($<500 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{an}$) dans les années 2020. D'où l'importance pour le Maroc de l'usage rationnel de l'eau disponible, de son recyclage et du recours à des technologies économes en eau (notamment en agriculture irriguée). Dans le cas d'un pays à ressources hydrologiques modestes comme le Maroc, l'évaluation des impacts potentiels du changement climatique sur l'hydrologie et l'évaluation de la vulnérabilité de ce secteur est indispensable, d'autant plus que les précipitations constituant l'une des principales origines de la dynamique des ressources en eau, risquent de diminuer dans le futur (Driouech, 2010).

Le bassin versant du Bouregreg fait partie du grand bassin du Maroc. Il souffre déjà de l'impact de la variabilité climatique et sera certainement affecté par le changement climatique. Les conditions écologiques fragiles du bassin nécessitent une attention particulière pour la gestion des ressources en eau. La gestion intégrée des ressources en eau nécessite la connaissance de la situation actuelle et à venir des ressources existantes. Pour cette raison, nous avons choisi comme méthode d'approche une modélisation qui nous facilitera l'évaluation des problèmes spécifiques de l'eau dans un cadre global. Il intègre plusieurs dimensions : les besoins, l'approvisionnement, la quantité et la qualité de l'eau, les objectifs de développement socio-économique et les contraintes environnementales.

On peut distinguer une dizaine de grands impacts physiques directement ou indirectement induits par les évolutions climatiques. L'élévation des températures de l'air engendrera bien entendu un accroissement des températures moyennes de la surface de la mer, et plus indirectement une modification de la circulation des masses d'eau. La circulation des masses d'air de la basse atmosphère sera elle aussi soumise à changement (Tsimplis et al., 2008) et cela se traduira probablement par une intensification des vents. L'évolution des précipitations perturbera quant à elle les régimes hydrologiques moyens, principalement au travers d'une modification des volumes d'eau reçus, ce qui aura à son tour un effet sur les débits des cours d'eau ainsi que sur les zones de rétention d'eau (les lacs, par exemple). Un autre effet consistera, lorsque les précipitations tomberont de manière irrégulière et abrupte (pluie torrentielles), en une accentuation des problèmes d'inondation et d'érosion des sols.

Parallèlement, lorsque les précipitations se feront plus rares, les sécheresses se multiplieront, ce qui pose la question de l'avenir des régions qui sont déjà soumises à un stress hydrique et donc à des pénuries d'eau récurrentes. L'élévation attendue du niveau de la mer générera quant à elle des phénomènes de submersion des côtes basses (sableuse et rocheuses, zones humides...) mais aussi d'intrusion d'eau marine dans les aquifères, d'où des problèmes de salinisation des nappes phréatiques.

Le changement climatique va augmenter la probabilité des récoltes faibles ou nulles dans les zones de cultures pluviales, où l'irrigation n'est pas présente pour atténuer les conditions climatiques défavorables. Dans le cas des blés en culture pluviale, l'impact du changement climatique serait relativement faible jusqu'à l'horizon 2030, puis sévère au-delà (Gommes et al. 2009). Le changement climatique aura des répercussions négatives sur l'aptitude des terres à être cultivées. Les terres les plus vulnérables perdront leur vocation à être cultivées en raison du changement climatique (Mereu et al. 2009 ; Motroni et al. 2009).

Les très rares études qui existent sur la vulnérabilité au Maroc restent générales. Il est donc nécessaire de les intégrer et de les focaliser, afin de préciser les menaces sur l'environnement, les établissements humains et les systèmes socio-économiques et de préconiser les mesures d'adaptation qui s'imposent. C'est dans ce sens que le présent travail a été réalisé. L'objectif de cette thèse est d'évaluer la vulnérabilité afin d'identifier les impacts et les menaces actuelles et d'identifier les stratégies, les politiques et les actions destinées à faire face à la variabilité et aux changements climatiques ainsi qu'à réduire les impacts et la vulnérabilité futur de ces changements. La totalité des études sur la vulnérabilité des régions face à l'évolution mondiale du climat indique que l'Afrique est le continent qui subira le plus les conséquences du changement climatique prévus : modification profonde des écosystèmes, dégradation des sols et désertifications accrues, extension de la zone de stress hydrique, baisse de la production agricole et menace pour la sécurité alimentaire, multiplication des maladies, etc.

Le présent manuscrit s'articule autour de trois parties : la première partie est consacrée à une synthèse bibliographique sur le changement climatique, ses signes globaux et locaux, ses modèles et scénarios, ses impacts sur l'environnement et les activités humaines, les approches d'évaluation de la vulnérabilité, les stratégies d'adaptation et les mesures d'atténuation des effets de ce changement. Dans la 2ème partie (Chap.I et II) nous présentons une étude sur l'évaluation de la vulnérabilité environnementale et hydrique du bassin versant du Bouregreg afin d'identifier l'importance et la localisation des menaces à court et long terme, de comprendre la vulnérabilité sous-jacente et les capacités d'adaptation, et de guider et appuyer

les interventions appropriées. Dans la 3ème partie (Chap. III etIV) nous nous intéressons à l'évaluation de la vulnérabilité agricole au bassin versant du Bouregreg, face aux changements climatiques sous différents scénarios socio-économique et climatique pour l'horizon 2100. Tout en présentant et analysant des stratégies alternatives et d'adaptation, de développement et de gestion de l'eau. Enfin, la conclusion générale synthétise les principaux résultats de cette thèse, et ouvrira sur quelques perspectives susceptibles de permettre un enrichissement de nos connaissances sur les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique au Maroc.

Synthèse Bibliographique

1. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DE L'ECHELLE GLOBALE A L'ECHELLE REGIONALE.

Le changement climatique est l'un des problèmes internationaux les plus importants dont les implications affectent fortement les moyens durables de subsistance, la sûreté de l'eau et de l'alimentation ainsi que la santé et la biodiversité.

Tout au long de son histoire, le climat a subi plusieurs changements, et ce, de façon naturelle (GIEC, 2007a). Au Maroc, les sécheresses sévères et les inondations dévastatrices ont frappé plusieurs régions ces dernières années. Des pertes inestimables en vies humaines, et des dégâts considérables sur les infrastructures et les biens sont enregistrés et se chiffrent, à chaque fois, en plusieurs centaines de millions de Dirhams (Messouli et al., 2011).

1.1. Le changement climatique

La question du changement climatique est devenue à la fin du XX^{ème} siècle un enjeu de politique internationale. Sous l'impulsion des rapports des experts internationaux, les gouvernements ont pris conscience, au cours des années 1980, de la réalité du phénomène de réchauffement de la planète et surtout de la responsabilité des actions humaines dans les dérèglements observés. Les états ont finalement reconnu la nécessité d'agir dans le cadre d'un « partenariat mondial ».

C'est la vie sur Terre qui est menacée ?

La vie humaine n'est pas épargnée puisque le réchauffement climatique cause des problèmes d'accès à l'eau, induit des déplacements importants de population (on parle de « réfugiés climatiques »), menace notre sécurité alimentaire et augmente le risque de conflits. La dernière catégorie de risques tient à l'existence de phénomènes irréversibles et donc, en premier lieu, à l'élévation du niveau de la mer.

Est-il suffisant de chercher à contenir la hausse des températures en deçà de 2 degrés, comme le prévoit l'Accord de Paris ? En sommes-nous encore capables ?

1.2. Le système climatique en changement

1.2.1 Les signes du changement à l'échelle globale

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a des conséquences sur le climat et le milieu naturel actuel. Les principaux signes observés sont :

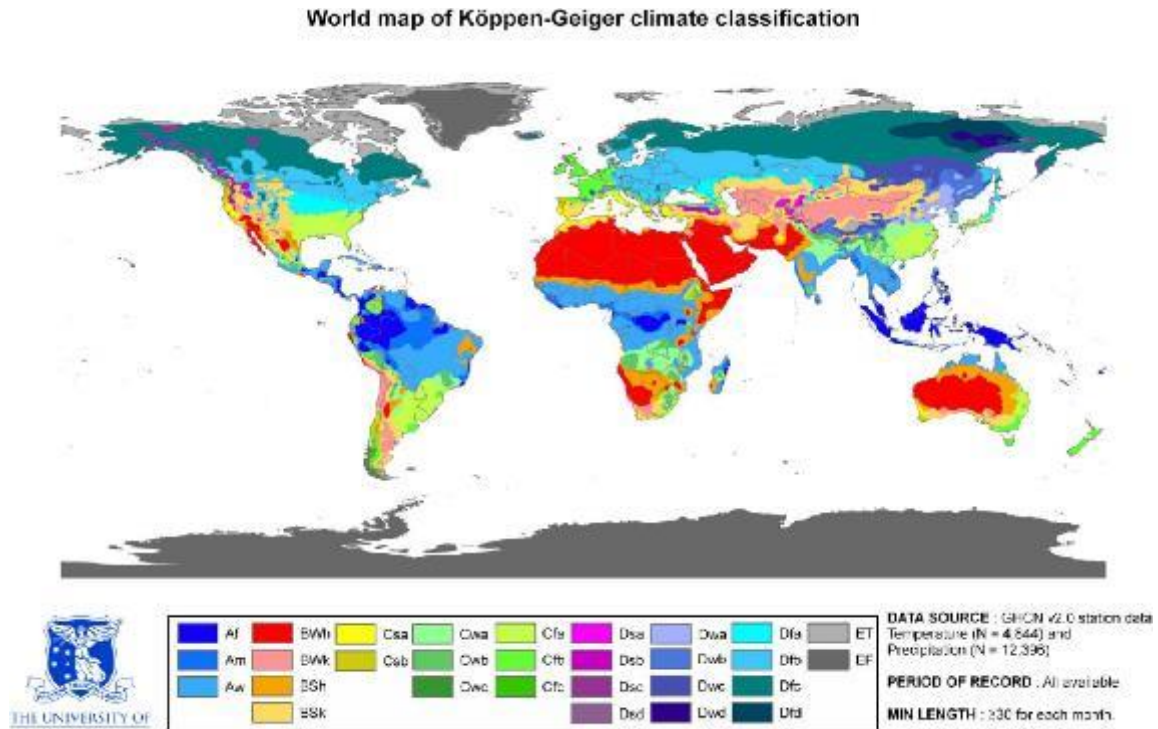


Figure 1: Carte des climats de Köppen-Geiger. Cercle bleu: Zone méditerranéenne (Af:climat équatorial, Aw : climat de savane avec hiver sec, As : climat de savane avec été sec, Am : climat de mousson, BS: climat de steppe (semi-aride), BW: climat désertique, Cf: climat tempéré chaud sans saison sèche, Cw : climat tempéré chaud avec hiver sec, Cs: climat tempéré chaud avec été sec, Df: climat continental froid sans saison sèche, Dw: climat continental froid avec hiver sec, Ds: climat continental froid avec été sec, ET: climat de toundra, EF: climat d'inlandsis, EM: climat subpolaire océanique. a: été chaud, b: été tempéré, c : été court et frais, d: hiver très froid, h: hiver sec et chaud, k: hiver sec et froid) (Peel et al., 2007).

❖ Les températures

Si l'on parle de réchauffement global pour désigner le phénomène de changement climatique, c'est parce que la température est la variable sur laquelle les changements les plus marqués apparaissent. L'estimation de l'ampleur de ce réchauffement est réalisée en utilisant des bases de données de température de surface, à la fois au-dessus des terres et des océans (Hansen et al., 1999). Les quantifications du réchauffement peuvent légèrement différer suivant la base de données utilisée, mais les conclusions restent identiques : la terre se réchauffe à un rythme anormalement élevé depuis le début du siècle dernier (Figure 2).

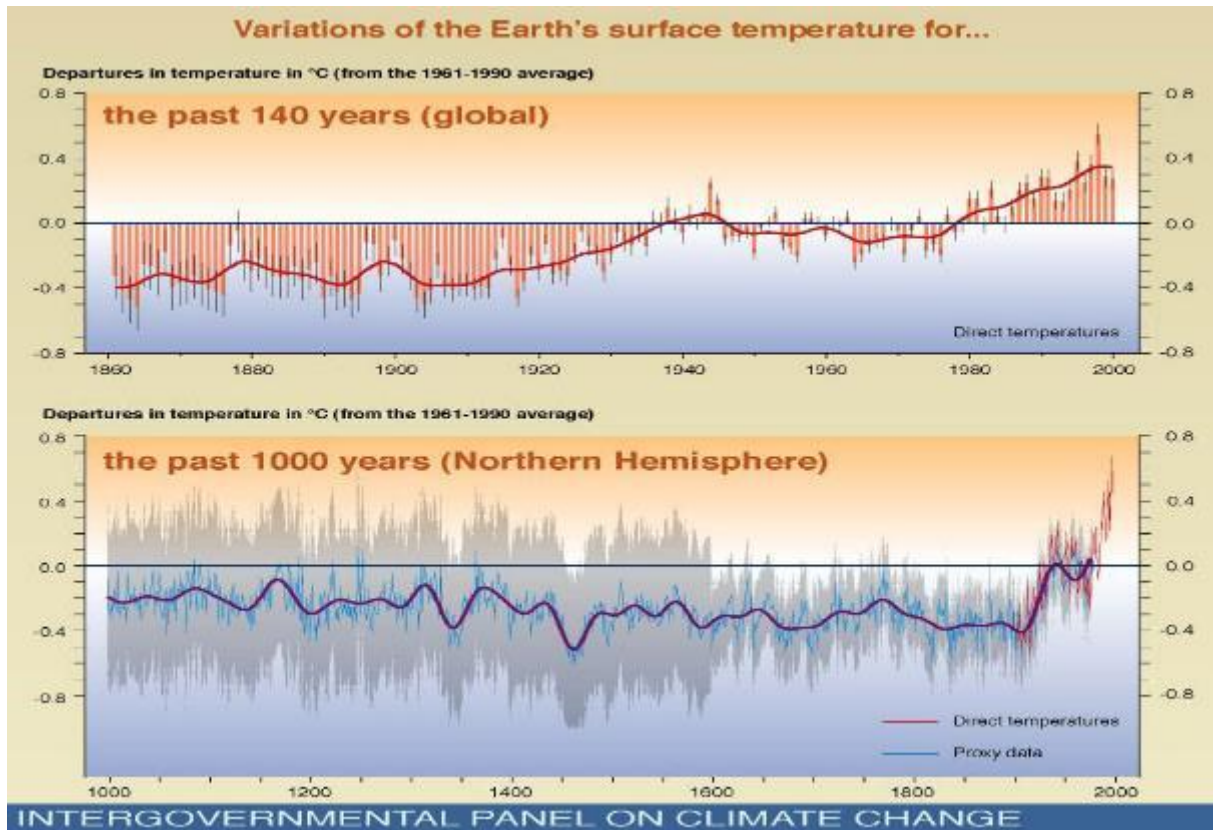


Figure 2: Anomalie des températures annuelles globales par rapport à la période 1961-1990 (GIEC, 2000).

❖ Précipitations

Le changement climatique devrait en toute logique affecter les précipitations. De manière extrêmement simplifiée, on s'attend à une augmentation des précipitations globales dans un monde plus chaud, du fait d'une augmentation de l'évaporation de l'eau de mer. Au dessus des terres émergées, on observe effectivement à l'échelle globale une légère augmentation des précipitations au cours du siècle dernier, mais cette tendance n'est pas répartie uniformément au niveau du globe.

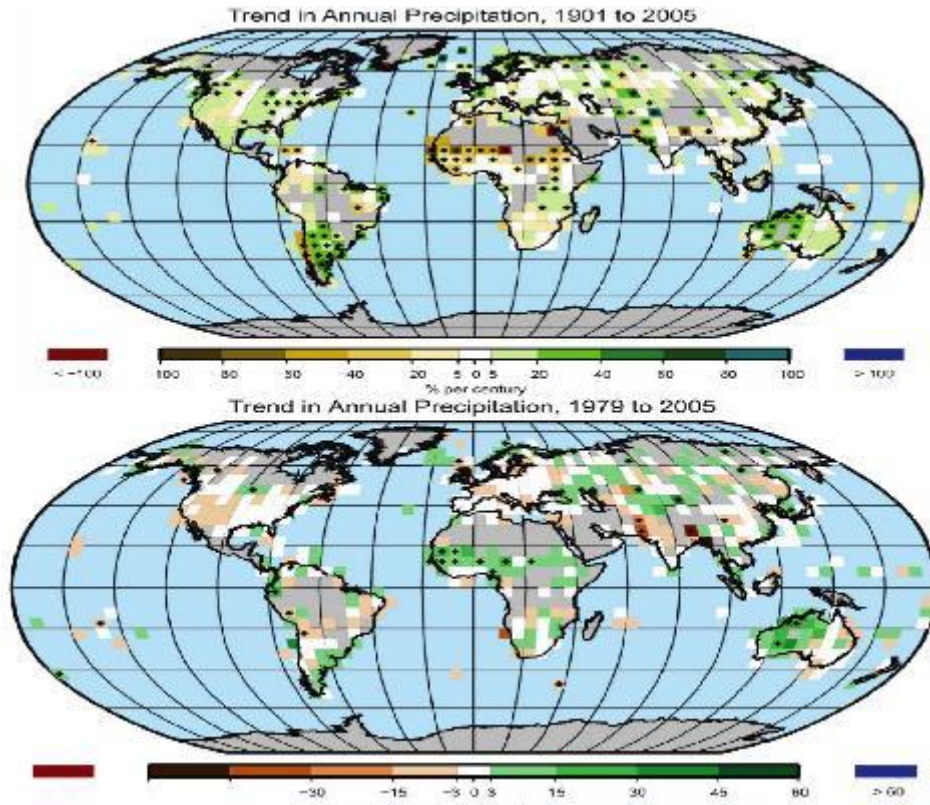


Figure 3 : Tendances des cumuls annuels des précipitations en surface entre 1901 et 2005 (%par siècle) et 1979 et 2005(%par décade). Les données utilisées sont issues du GHCN (Global Historical Climatology Network) du NCDC (National Climatic Data Center). Le pourcentage est basé sur les moyennes de la période 1961-1990. Les zones avec insuffisance de données sont en gris. Les tendances significatives à 5% sont indiquées par des signes +noirs et gras (Trenberth et al., 2007).

❖ **Neige et glace**

Les observations par satellite indiquent une diminution de l'ordre de 10% de la couverture neigeuse mondiale depuis 1960, sauf dans certaines régions côtières où les précipitations ont localement augmenté. Une diminution de l'ordre de 2 semaines de la durée d'englacement des rivières et des lacs aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord, a été observée sur le terrain. Par contre, on n'observe pas de tendance annuelle claire en ce qui concerne la banquise en Antarctique, bien que sa superficie décroisse en été et que son épaisseur moyenne diminue (GIEC, 2000).

❖ **Les océans**

Il est difficile de mettre en évidence des tendances à grande échelle en termes de variation du niveau moyen des océans. Les marégraphes du monde entier montrent cependant une augmentation de l'ordre de 1 à 2 mm/an au cours du 20ème siècle, que l'on peut corrélérer aux pertes de masse des surfaces glaciaires et aux phénomènes de dilatation thermique de l'eau. L'analyse des circulations océaniques indique par ailleurs une augmentation des fréquences d'occurrence et des intensités des phénomènes oscillatoires comme El Nino ou l'ONA (GIEC, 2000).

❖ **L'Oscillation Nord Atlantique (NAO)**

La NAO a ses principaux centres d'action dans l'Atlantique nord. Cette téléconnexion se compose d'un dipôle nord-sud des anomalies SLP (Pression en Surface de la Mer), avec un centre sur le Groenland et l'autre sur le centre de l'Atlantique nord. La phase positive de la NAO est décrite par un anticyclone des Açores anormalement fort (SLP positive et anomalies importantes dans le centre de l'Atlantique nord) et une dépression d'Islande anormalement accentuée (SLP négatif et des anomalies importantes au nord). La phase négative est caractérisée par l'affaiblissement à la fois de l'anticyclone des Açores et de dépression d'Islande (van Loon et Rogers, 1978, CPC, 2002). La NAO présente une variabilité interannuelle importante et sa phase positive ou négative peut persister durant plusieurs années.

1.2.2 Les signes du changement dans le bassin méditerranéen.

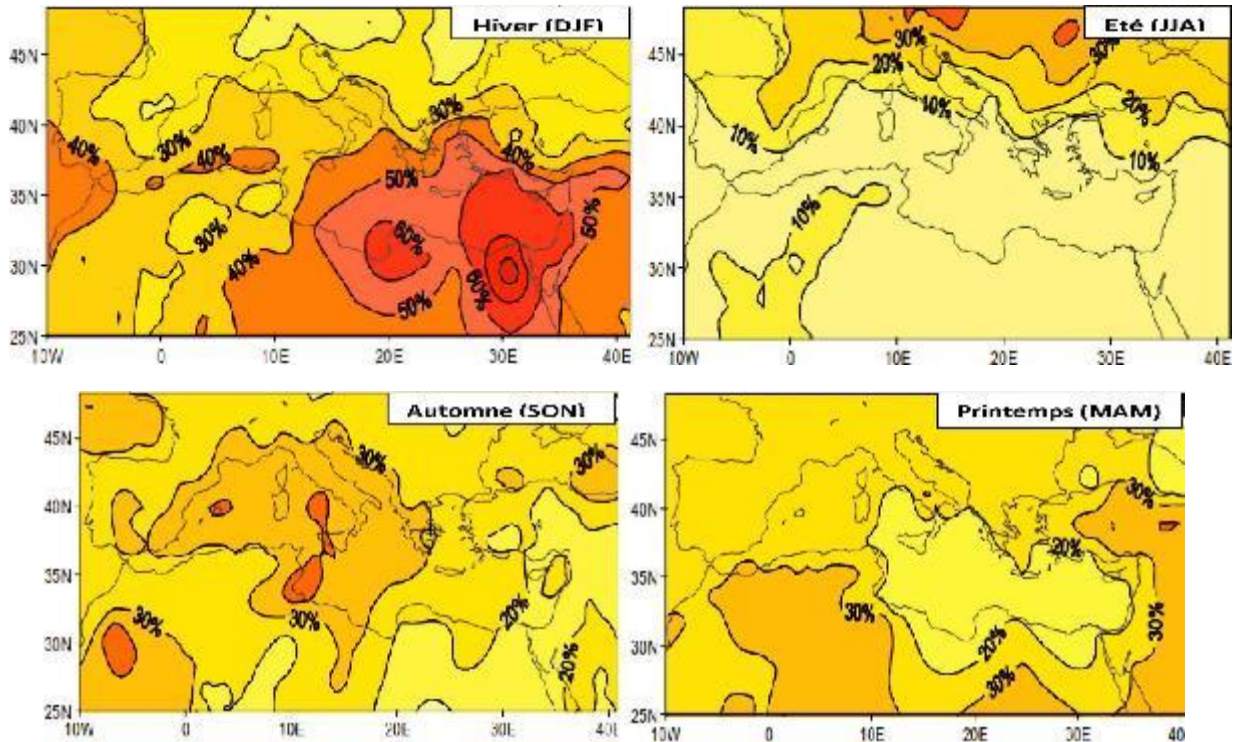


Figure 4 : Répartition géographique de la proportion (%) des cumuls des précipitations.

Les conclusions publiées récemment par le Groupe de Travail 1 du GIEC en 2007 dans son 4e rapport apportent des certitudes nouvelles sur les changements climatiques ultérieurs à l'échelle globale en fonction des différents scénarios marqueurs de l'évolution des concentrations des gaz à effet de serre.

1.2.3 Les signes du changement au Maroc

Une étude réalisée à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN, 2007) sur les derniers 4 ans montrent des tendances significatives à la baisse au niveau des précipitations et à la hausse au niveau des températures. L'analyse des données climatiques du Maroc durant le quart de siècle passé met en évidence une grande variabilité du climat du pays, avec des tendances au réchauffement et au déficit pluviométrique. Globalement, la température de l'air au Maroc, toutes saisons confondues, a augmenté en moyenne de +0,6 à +1,4 selon les régions, au cours des 40 dernières années. Cette augmentation a été surtout effective depuis les années 80 et 90 (période pendant laquelle le réchauffement s'est accentué avec la fréquence des sécheresses). Le Maroc est particulièrement vulnérable au changement

climatique car il souffre déjà de températures élevées, de précipitations moins prévisibles et de pressions écologiques considérables.

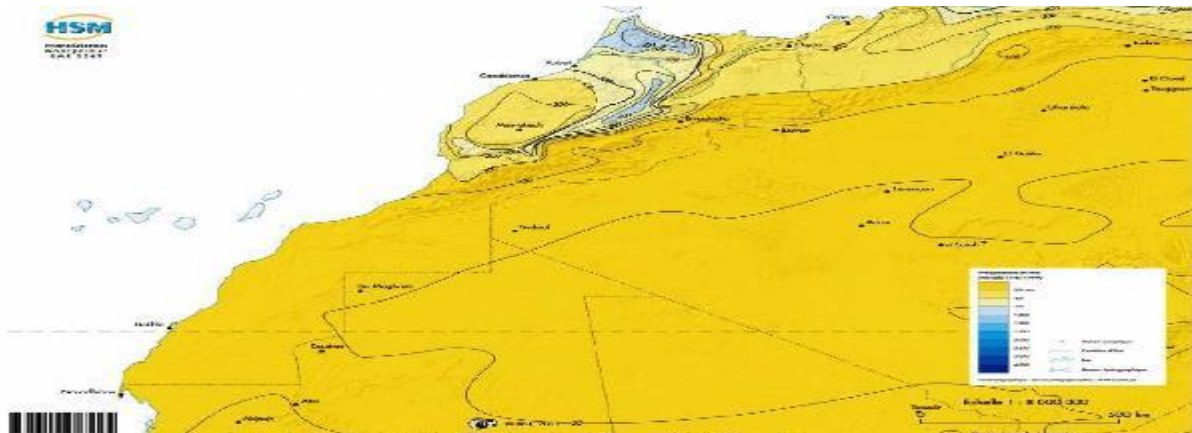


Figure 5 : Pluviométrie moyenne annuelle au Maroc entre 1940 et 1999 (Mahe et al., 2012)



Figure 6 : Climats du Maroc sur la période 1961-2005, l'indice utilisé est celui de Martonne (DMN, http://www.marocmeteo.ma/?q=fr/climat_maroc)

2. LES PREVISIONS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE AU MAROC

D'après des projections futures réalisées pour le Maroc, on s'attend à une augmentation des températures, à une diminution des précipitations et une augmentation de leur variabilité. En effet, la température moyenne pourrait augmenter de 1.1 à 1.6 °C d'ici à 2030, de 2.3 à 2.9

°C en 2050, et de 3.2 à 4.1 °C en 2080. Au niveau de l'ensemble du pays, les précipitations pourraient diminuer de 14% en 2030, de 13 à 30% en 2050, et de 21 à 36% en 2080.

Dans ces études, le changement climatique futur est analysé à partir de modèles atmosphériques qui transforment des hypothèses d'émissions de gaz à effet de serre (notamment, le CO₂) en projections de pluviométrie et de température. Les hypothèses d'émission de gaz se basent sur des représentations de ce que pourrait être le monde jusque l'an 2100, selon deux scénarios A2 et B2.

Scénario A2

Il s'agit d'un scénario pessimiste qui décrit un monde où la population mondiale est en rapide augmentation, avec une croissance économique forte qui repose sur des technologies polluantes dans un monde devenu plus protectionniste avec des inégalités croissantes entre le Nord et le Sud. Recours persistant aux énergies fossiles, croissance économique inégale selon les régions.

❖ Scénario B2

Il s'agit d'un scénario optimiste qui décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales, dans un sens de viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2. Il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse.

Par rapport à la période 1961-1990, prise comme référence, la baisse de la pluviométrie va concerner tout le pays et s'accélérer à l'horizon 2080 (Gommes et al. 2009) (Figure 7).

De la même manière que pour les précipitations, les augmentations de températures affecteront tout le pays. Dans le cas du scénario A2, le réchauffement avoisinera 3°C d'ici 2080 pour les six zones agro-écologiques du Maroc et atteindra 5°C dans les zones "Défavorable Orientale" et "Montagneuse".

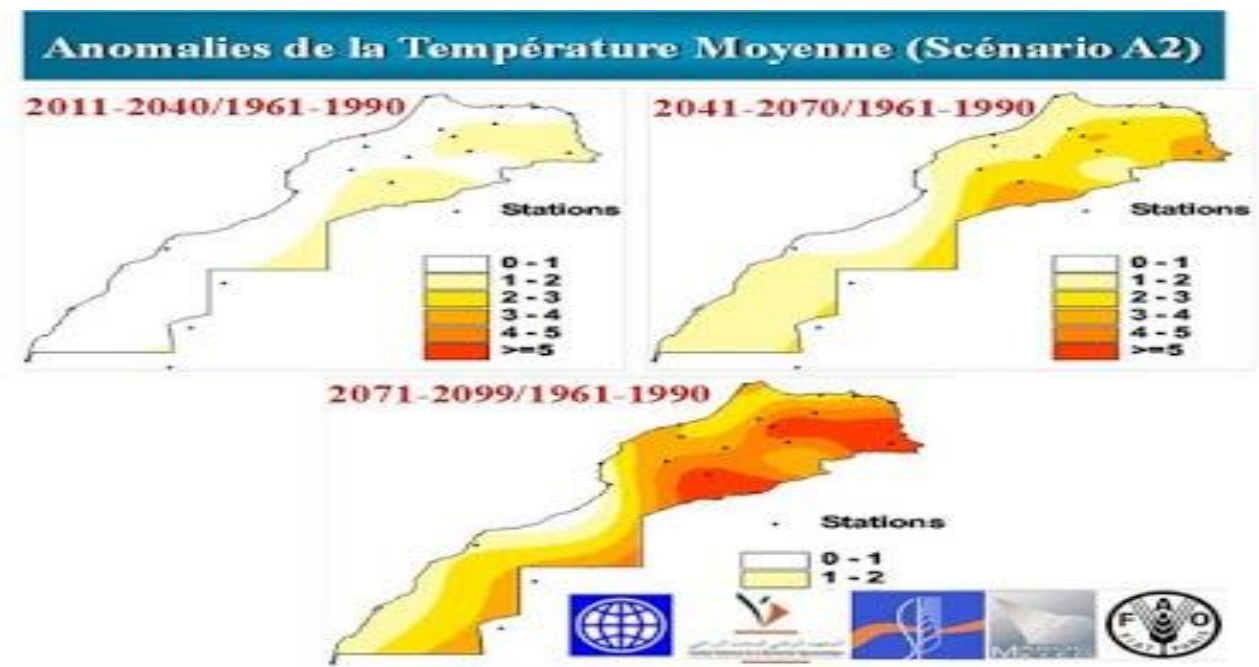
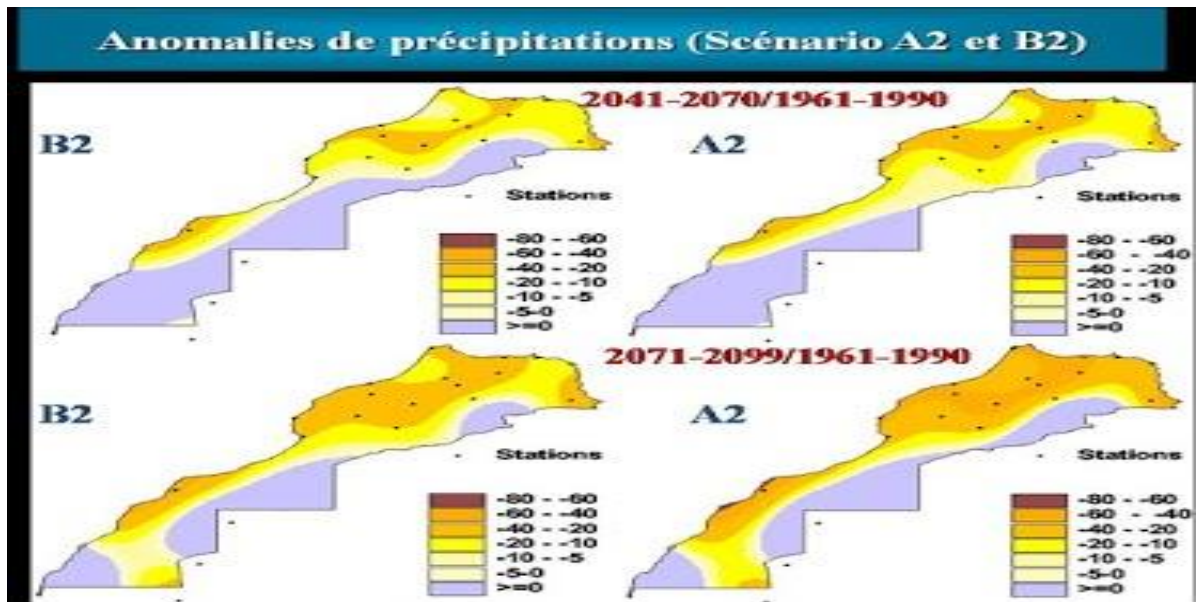


Figure 7 : Prévisions de changement climatique sur le Maroc (Gommes et al. 2009).

3. PROJECTIONS CLIMATIQUES FUTURS

Les changements climatiques futurs dépendront de deux facteurs : les émissions de gaz à effet de serre (qui renvoient directement aux trajectoires de développement) et la réponse du

système climatique à ces émissions. Afin d'élaborer des projections climatiques, les scientifiques mettent au point des scénarios d'émissions futures et des modèles climatiques. Les premiers relèvent majoritairement du domaine des sciences économiques, sociales et technologiques, et les seconds des sciences physiques et biologiques.

3.1. Les émissions de gaz à effet de serre à la source du changement climatique

Dans le monde, les émissions les plus faibles sont en Afrique (3.0% des émissions totales), en Amérique latine (3.5%), au Moyen Orient (4.8%) et au Pacifique (7.4%). Toutefois c'est en Asie, que l'accélération des émissions de CO₂ est la plus forte alors que dans les pays d'Europe du nord les émissions tendent à se stabiliser ou à diminuer comme en Allemagne ou en Pologne (Figure 8).

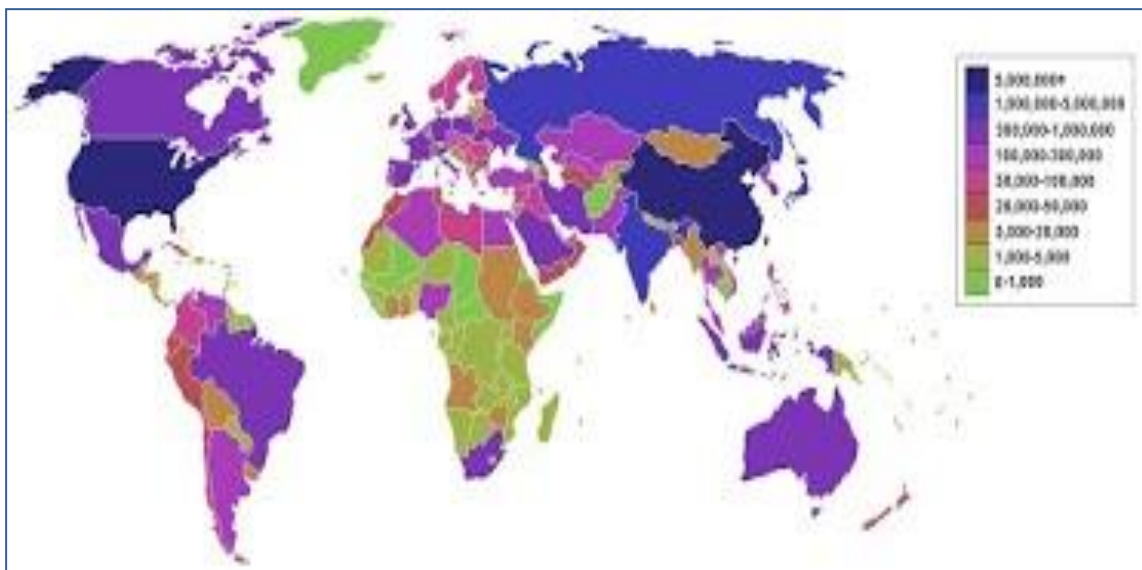


Figure 8 : Rejets de CO₂ par la combustion d'hydrocarbures en 2006, par pays
(En milliers de tonnes, les valeurs élevées sont en bleu) (International Energy Agency, 2009)

<http://www.iea.org/co2highlights/CO2highlights.pdf>

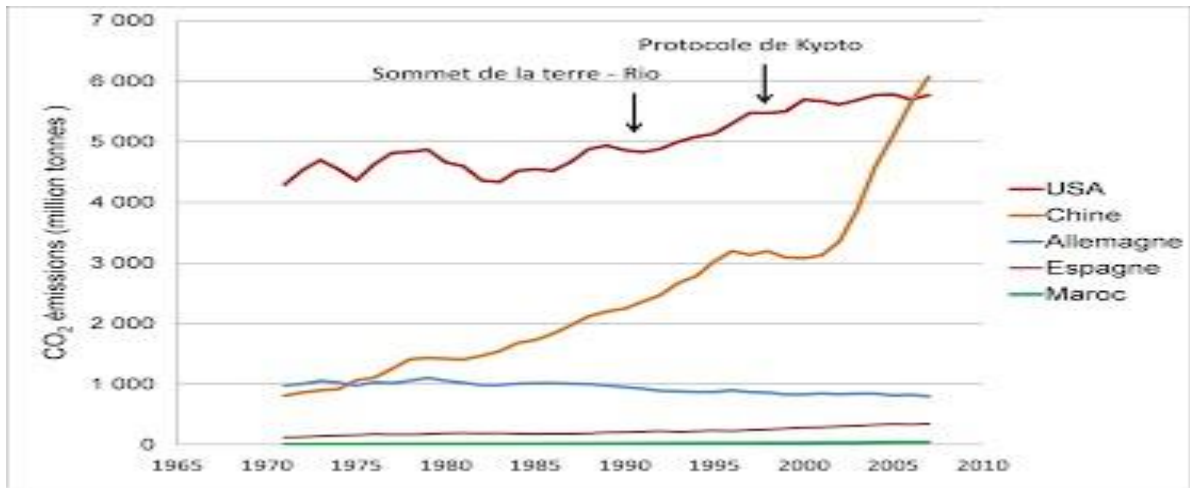
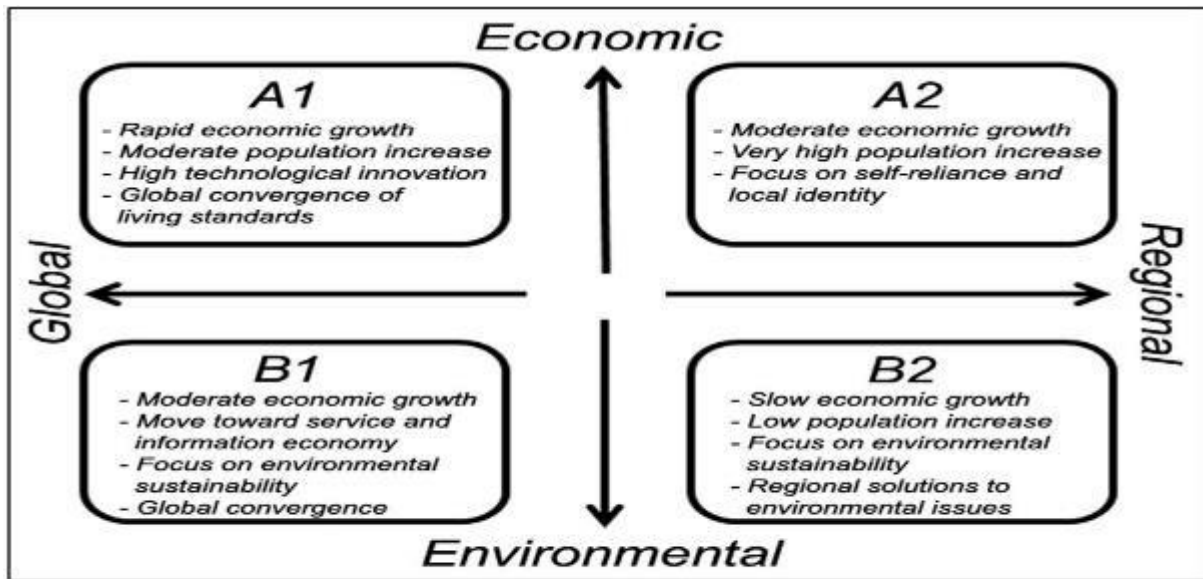


Figure 9 : Émissions de CO₂ dans quelques pays à développements contrastés.
(International Energy Agency, 2009).

3.2. Scénarios d'émission d'aérosols et de gaz à effet de serre (SRES)

Le scénario climatique est considéré comme une description plausible du climat futur, et ce, sur la base d'une ou de plusieurs projections climatiques. Les scénarios sont typiquement établis afin de déterminer les conséquences potentielles du changement climatique d'origine humaine et constitue une information pouvant être utilisée lors d'étude d'impact comme intrant dans un modèle bioclimatique (GIEC, 2007a).



IPCC SRES storylines are oriented along two axes: 1) economic vs. environmental priorities, and 2) global vs. regional development. The four scenarios each describe divergent, yet plausible futures.

Figure 10 : Représentation schématique des quatre grandes catégories des scénarios D'émission d'aérosols et de gaz à effet de serre du SRES. Selon leur Association aux facteurs économiques ou environnementaux, globaux ou Adaptée de (CH2011, 2011).

Scénario A1 : Caractérisé par une croissance économique très rapide, un pic de la population mondiale au milieu du siècle, suivi d'une chute et l'introduction rapide de nouvelles technologies efficaces. Il existe trois sous-groupes différents dans le canevas A1 qui correspond à des changements alternatifs de technologie énergétique : utilisation intense des combustibles fossiles (A1F1), des combustibles non fossiles (A1T) et équilibre entre les deux types de sources (A1B).

Scénario A2 : Il s'agit d'un scénario pessimiste qui décrit un monde où la population est en rapide augmentation, avec une croissance économique forte qui repose sur des technologies polluantes dans un monde devenu plus protectionniste avec des inégalités croissantes entre le Nord et le Sud. Recours persistant aux énergies fossiles, croissance économique inégale selon les régions.

Scénario B1 : Un monde convergent, dont la croissance démographique est la même que celle du canevas A1. Les structures économiques changent rapidement pour s'orienter vers une économie de services et d'information, des technologies propres et présentant un bon

rapport ressources-efficacité sont introduites et l'accent est mis sur la durabilité sociale et environnementale.

Scénario B2 : Il s'agit d'un scénario optimiste qui décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales, dans un sens de viabilité économique, sociale et Environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un Rythme plus faible que dans A2.

Il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution Technologique est moins rapide et plus diverse. Dans nos travaux de recherche, nous avons opté pour les scénarios A2 et B2, ces deux scénarios sont les plus proches de la trajectoire de l'évolution de la société marocaine Et des changements associés aux indicateurs climatiques (Gommes et al., 2008) Ils sont largement utilisés à l'heure actuelle dans les travaux de modélisation réalisés Avec les modèles couplés les plus complets.

3.3. Les modèles et scénarios climatiques futurs

3.3.1. Les modèles climatiques globaux de basse résolution

Les modèles climatiques globaux de basse résolution utilisés jusqu'à maintenant par le GIEC n'intègrent pas l'information à l'échelle fine sur la topographie, les végétations et le sol. En fait, les modèles d'étude d'impact de changements climatiques sur les secteurs socio-économique comme l'agriculture, les ressources en eau et santé, nécessitent des changements climatiques à haute résolution qui intègrent le détail de l'information à l'échelle locale (Hewitson et Carne, 2006). Le meilleur outil permettant l'étude de l'évolution du climat sous forçage anthropique est les modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère (MCGOA) (Somot et al., 2008).

3.3.2. Scénarios du changement climatique à haute résolution au Maroc

Le développement des scénarios climatiques futurs à haute résolution pour le Maroc en utilisant la technique statistique de réduction d'échelle SDSM (Statistical DownScaling Model) (Wilbey et al., 2002) et Had CM3, modèle M3 du Centre Hadley du Service Météorologique Britannique (Gommes et al., 2008). Les scénarios du changement climatiques à basse résolution provenant des modèles de circulation générale atmosphérique montrent une augmentation des températures et une diminution des précipitations pour les périodes 2011-2040, 2041-2070, et 2071-2099.

3.4. Les nouveaux scénarios RCPs et SSP utilisées par le GIEC

Dans la perspective de l'élaboration du 5e rapport d'évaluation du GIEC, un groupe international d'experts a défini quatre scénarios de référence, qualifiés de profils représentatifs d'évolution des concentrations (RCP, pour Representative Concentration Pathways) de gaz à effet de serre (GES), d'ozone et de précurseurs des aérosols pour le XXIe siècle et au-delà. Ces scénarios, peuvent correspondre à des efforts plus ou moins grands de réduction des émissions de GES au niveau mondial. Pour chacun de ces quatre « profils représentatifs », les climatologues déduisent les conditions climatiques et les impacts du changement climatique associés. En parallèle, les sociologues et les économistes travaillent sur des scénarios présentant diverses caractéristiques de développements socio-économiques et diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation. Cinq familles de scénarios, nommés SSP (pour Shared Socioeconomic Pathways), ont ainsi été définies. Une telle approche permet un travail en parallèle et en cohérence des climatologues et des économistes.

3.4.1. Nécessité de définir des nouveaux scénarios

Il est aujourd'hui aussi envisagé d'avoir des évolutions des émissions globales de gaz à effet de serre qui diminueraient après une phase de croissance au XXIe siècle ce qui oblige certains scénarios à être prolongés au-delà de 2100. Le GIEC a décidé de définir des nouveaux scénarios pour mieux prendre en compte ce nouveau contexte et permettre aux économistes et aux climatologues de ne plus travailler de manière séquentielle mais parallèle.

3.4.2. Approche innovante

La démarche suivie pour la définition des scénarios pour le 5e rapport procède donc d'une nature différente au précédent. Au-delà de la conception de nouveaux scénarios, c'est un véritable virage méthodologique qu'opère la communauté scientifique.

À partir de ces profils de référence, les équipes travaillent simultanément et en parallèle : les climatologues produisent des projections climatiques utilisant les RCP comme entrée, tandis que les sociologues et les économistes élaborent des scénarios débouchant, en sortie, sur des émissions de gaz à effet de serre cohérents avec les RCPs (Figure 11).

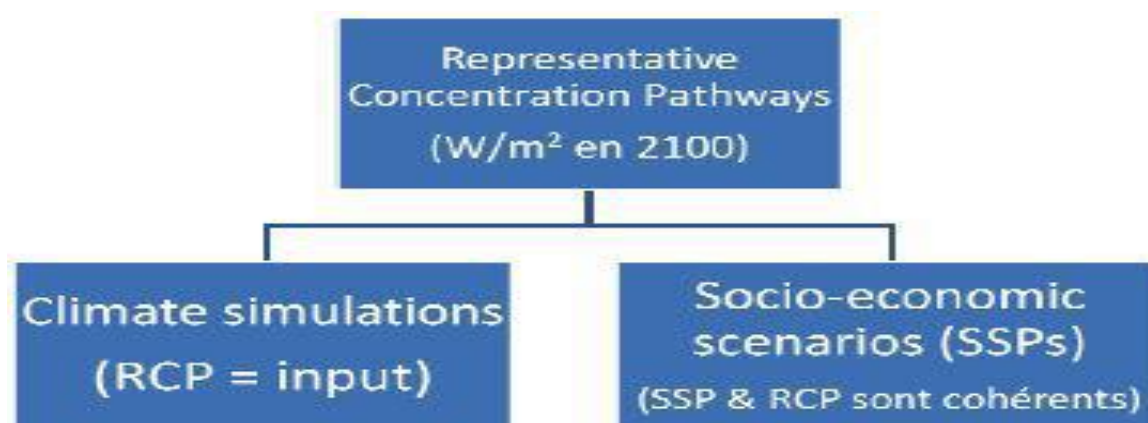


Figure 11 : Scénarios RCPs en entrée et socio-économique en sortie avec des émissions de gaz à effet de serre.

3.4.3. Nouvelles représentations climatiques de référence

Au nombre de quatre (Tableau 1), pour éviter un scénario médian «fourre-tout », les profils d'évolution d'émissions de gaz à effet de serre ont été sélectionnés par les scientifiques sur la base de plusieurs centaines de scénarios publiés. Ils ont été décrits par Moss et al. (Nature, 2010). Les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP : representative concentration pathway) sont des scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006- 2300.

Tableau 1: Caractéristiques principales des RCPs (Moss et al. Nature 2010)

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	>8,5Wm ⁻² en 2100	>1370 eq-CO ₂ en 2100	croissante
RCP 6.0	~6Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	~4,5Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à ~3Wm ⁻² avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCP (Moss et al, Nature 2010)

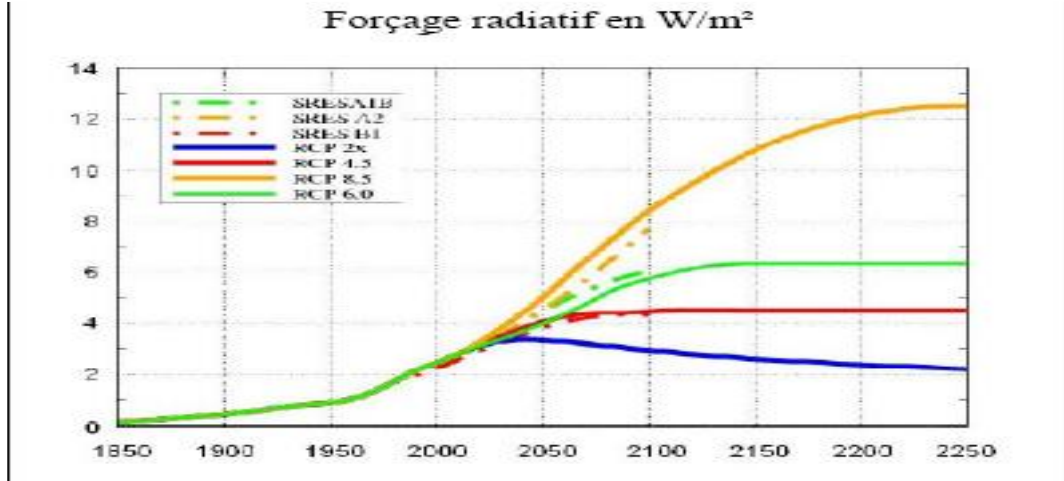


Figure 12 : les RCPs comparés aux SRES (d'après S. Planton)

3.4.4. Simulations des Climatologues

Les modèles utilisés par les scientifiques pour les simulations associées aux RCPs, ont également été affinés. Les profils RCPs sont décrits jusqu'en 2300, alors que les scénarios SRES des précédents travaux du GIEC s'arrêtaient en 2100. Pour des simulations à un niveau régional, on recourt à une méthode de « descente d'échelle » (Figure 13) utilisant le développement de modèles régionaux, avec des résolutions de 10 à 50 km qui prennent en compte plus finement la topographie. Ces modèles sont eux-mêmes relayés par des modèles d'impact ou d'adaptation locaux, d'une résolution horizontale de l'ordre du kilomètre.

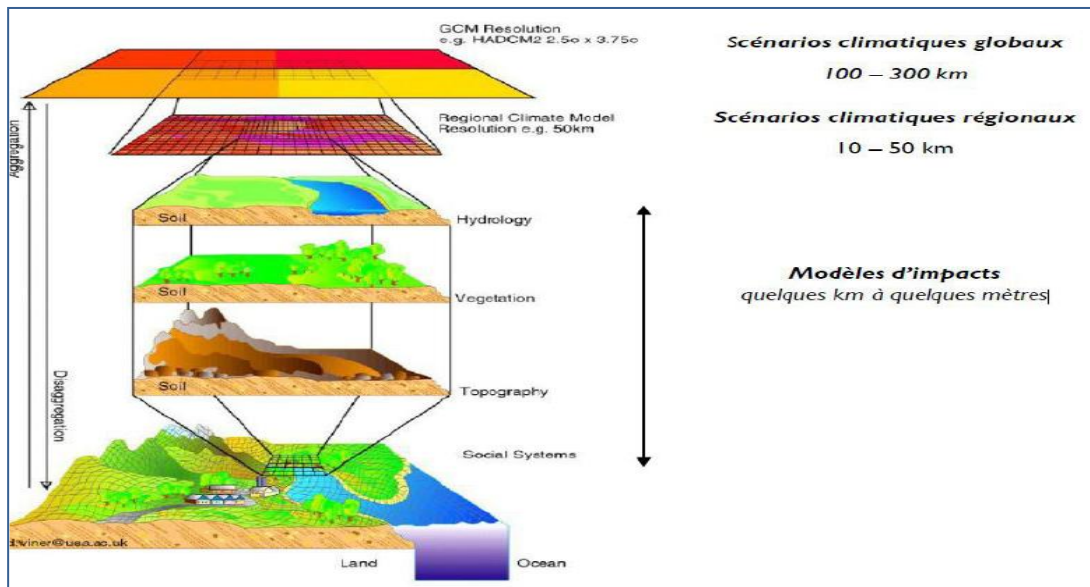


Figure 13 : Échelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S. Planton).

La contribution de la communauté scientifique française des climatologues aux projections analysées dans le 5^e rapport

Deux modèles sont développés et utilisés par la communauté scientifique française :
– CNRM-CM5 (Météo-France et CERFACS) ;
– IPSL-CM5 (Institut Pierre Simon Laplace).

Pour le rapport GIEC AR5, les simulations climatiques globales sont réalisées dans le cadre d'un projet CMIP5 coordonné au niveau international (*Coupled Model Intercomparison Project*, phase 5).

Un programme complémentaire, nommé Cordex (*Coordinated Regional Downscaling Experiment*), définit le cadre général pour la régionalisation des simulations climatiques et l'inter-comparaison des résultats à petite échelle sur des domaines limités.

3.4.5. Représentation des évolutions sociales et économiques

Les scénarios SSP seront utilisés pour évaluer des politiques sur le changement climatique. Pour cela, il est important que ces scénarios socio-économiques soient décrits précisément et couvrent une large gamme de futurs possibles pour nos sociétés, en se répartissant selon deux axes :

- Un axe représente le défi en matière d'adaptation des sociétés au changement climatique
- Un autre axe représente le défi en matière d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Suite à un atelier organisé à Boulder (Colorado) en novembre 2011, les scientifiques ont défini cinq familles de scénarios-types (Figure 14) :

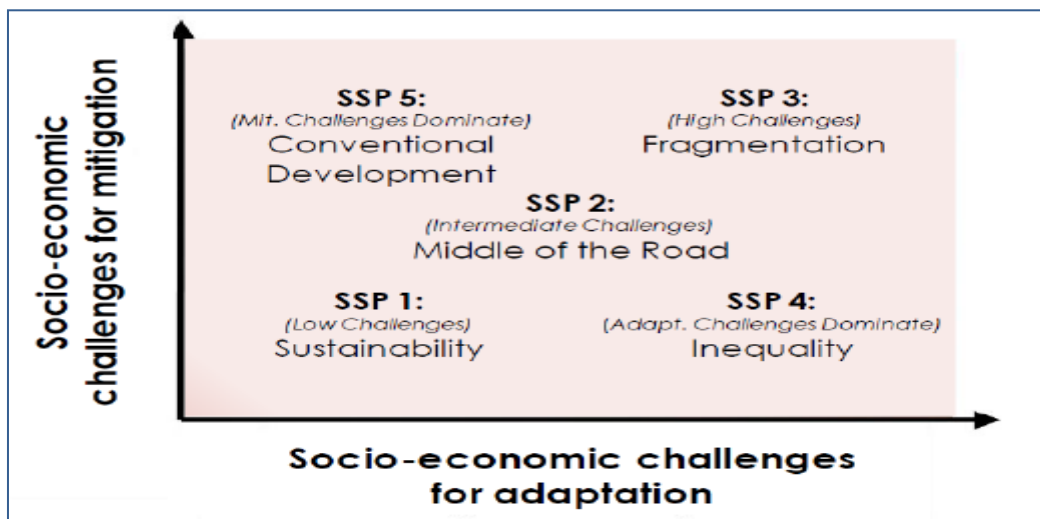


Figure 14 : Les cinq SSP types, répartition selon le défi socio-économique pour l'adaptation et pour l'atténuation (d'après Nigell et al. , 2011)

3.4.6. Cohérence entre évolutions climatiques et socio-économiques

En fonction des différents paramètres descriptifs des scénarios socio-économiques (démographie, urbanisation, croissance, ...) certaines familles de scénarios SSP sont compatibles avec une partie des profils d'émission (RCP). Par exemple (Figure 15), les familles SSP3 et SSP5 ne sont pas compatibles avec les profils d'émissions des RCP 2.6. Autrement dit, le monde décrit selon les paramètres définissant les familles SSP3 et SSP5 ne permet pas de limiter les émissions de gaz à effet de serre à un bas niveau.

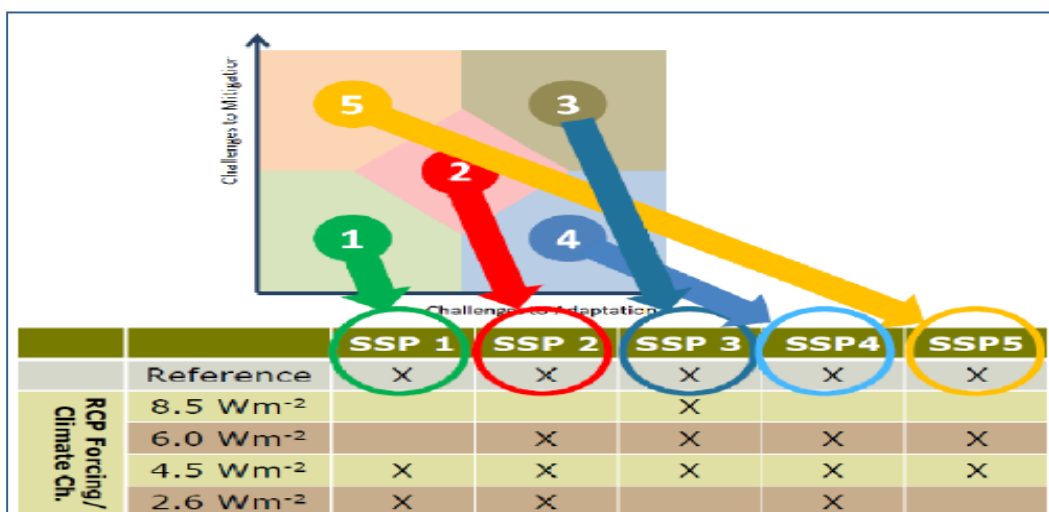


Figure 15 : Relation entre RCP et SSP, (d'après T.Kram)

4. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique aura notamment des effets sur : l'agriculture (diminution des rendements) et la pêche (réduction de collecte), l'attractivité touristique (vague de chaleur, raréfaction de l'eau), les zones côtières et les infrastructures (expositions importantes à l'action des vagues tempêtes côtières et autres événements météorologiques extrêmes, hausse du niveau de la mer), la santé humaine (vague de chaleur), le secteur énergétique (alimentation en eau des centrales, hydro-électricité et consommation accrue) (Plan Bleu, 2008a).

4.1. Impacts du changement climatique sur l'agriculture mondiale

L'agriculture est le secteur le plus dépendant du climat et le plus exposé aux changements climatiques. Plus de 80% de la variabilité de la production agricole est due aux conditions climatiques dans le monde. La sécheresse, qui sera l'expression la plus fréquente des changements climatiques, est responsable de la majorité des crises alimentaires dans le monde (Figure 16).

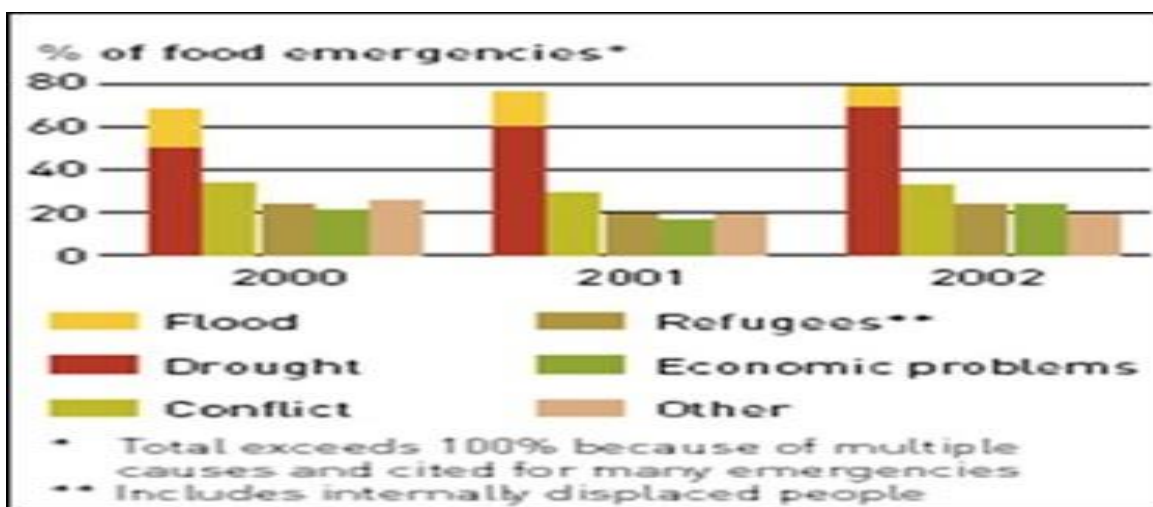


Figure 16 : Causes des crises alimentaires dans les pays en voie de développement (FAO)

4.2. Impact du changement climatique et dynamique saisonnière et

Pluri-annuelle sur l'agriculture marocaine

4.2.1. Impact du changement climatique à partir d'images de basse résolution spatiale de la période 1980-2009

Au Maroc, comme dans la plupart des pays arides en voie de développement, une année pluvieuse signifie une bonne récolte, une meilleure sécurité alimentaire et une croissance économique. En raison de la faible pluviométrie, les rendements céréaliers sont faibles et surtout très volatiles, comparativement à un pays voisin comme l'Espagne (Figure 17).

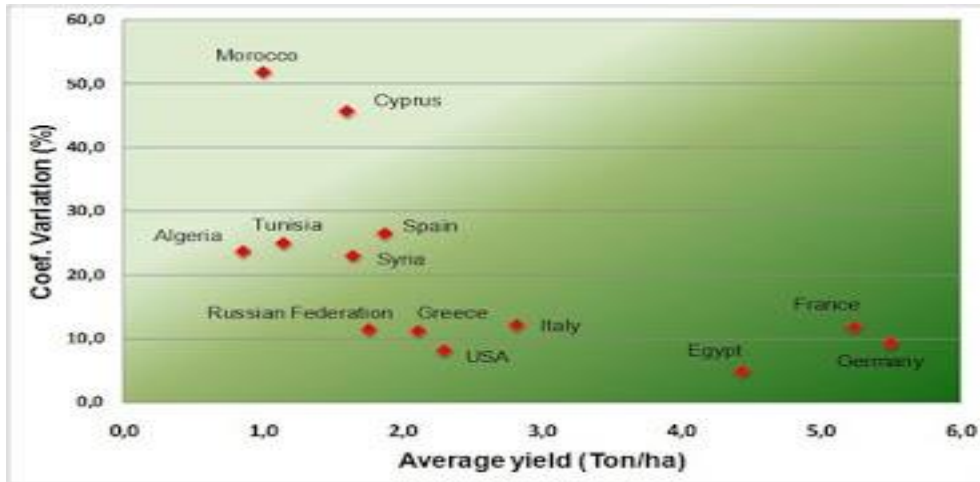


Figure 17 : Rendement du blé au Maroc, comparativement à quelques pays Méditerranéens ou développés (Badraoui, Balaghi et Dahan, 2009)

Ce chapitre vise à analyser l'évolution de cette végétation afin de comprendre sa dynamique de 1980 à 2009. Des données d'indice de végétation sont essentiellement analysées pour mettre en relief la variation spatio-temporelle du couvert végétal. Les images de moyenne résolution que sont les images MODIS sont utilisées pour analyser le détail de cette dynamique de 2000 à 2009.

4.2.2. Données et techniques d'analyse de la couverture végétale

Les images de basse résolution spatiale utilisées pour cette étude sont des images d'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et des images de température de surface. Ces images sont fournies par les capteurs AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de NOAA et Terra de MODIS. Les images de basse résolution présentent l'intérêt de permettre d'analyser à un rythme temporel fin, la dynamique saisonnière et interannuelle de la couverture végétale ou l'évolution des conditions climatiques ou hydriques de développement de la végétation. Les images de NOAA utilisées pour cette étude sont des images de 8 km de résolution spatiale et de 15 jours de résolution temporelle.

4.2.3. Techniques d'analyse de l'évolution de la végétation

L'analyse de la dynamique de la végétation comprend une analyse globale et une analyse localisée. L'analyse globale utilise la basse résolution pour cerner la dynamique d'ensemble de la végétation. Quant à l'analyse localisée, elle vise à comprendre les dynamiques de l'occupation et de l'utilisation des sols. Ainsi sont utilisées des images de

haute résolution spatiale (Landsat et SPOT 5) mais aussi des statistiques agricoles et des données de climat. Le couplage de ces données climatiques avec les données de télédétection basses résolutions (NOAA et MODIS) permettra de mettre en évidence les effets des variations climatiques sur les types de milieu. Les images MODIS a été faite à partir de méthodes statistiques sur les valeurs des pixels (le NDVI). L'indice de végétation (NDVI) se fonde sur le principe de la différence de réflectance des plantes vertes entre le proche infrarouge et le rouge, son rapport est :

L'indice de végétation NDVI est le rapport :

PIR / R (1) où PIR = la bande du proche infrarouge

R = la bande du rouge

La normalisation de ce rapport où $NDVI = PIR - R / PIR + R$ (2)

Le **NDVI** évolue entre **-1 et 1**. le **VCI** (Vegetation Condition Index) a été créé pour améliorer la composante météorologique de l'analyse de la dynamique végétale (Kogan, 2003). Ainsi, l'indice VCI est complémentaire du NDVI. Le VCI est indépendant des conditions écologiques sous-jacentes mais dépend uniquement des conditions météorologiques. (Ramesh et al., 2003). Le VCI s'exprime par la formule : $NDVI_j - NDVI_{min}$.

4.2.4. Traitements des images de basse résolution spatiale

a- Les indices de végétation.

Avant leur analyse, les données images téléchargée ont été l'objet d'un prétraitement ou de certaines modifications. Pour les images de NOAA, il est question de les compiler selon les mois et les années, Exemple par mois : janvier 1982, janvier 1983, ... , janvier 2006. Pour les images de MODIS, plusieurs étapes ont été observées afin de les harmoniser avec les Images de NOAA. En premier, il a été question d'harmoniser les résolutions spatiales des images en passant de pixels de 250 m à celui de 8 km, soit une multiplication par 32. Celle manipulation vise uniquement à compléter la série des données NOAA de la période 2006 à 2009. L'analyse des images NOAA est :

$$VCI_j = \left(\frac{NDVI_{max} + NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right) * 100$$

Où NDV_{max} et NDV_{min} sont calculés à partir de l'enregistrement à long terme (en l'occurrence 27 ans) pour les 15 jours d'un mois et j est l'indice des 15 jours en cours. Les conditions ou l'état de santé de la végétation calculé à travers le VCI s'exprime en %. Les valeurs inférieures à 50% indiquent différent degré de sévérité de la sécheresse. Les valeurs de VCI proches de 0 marquent une période très sèche.

4.2.5. L'analyse statistique de la dynamique spatio-temporelle de la végétation

Le traitement statistique de la variabilité temporelle des données NDVI de NOAA s'est fait en deux volets. Le premier a consisté à déterminer s'il y avait une tendance dans chaque série chronologique constituée par chacun des pixels d'une image. Et le deuxième volet a consisté à savoir s'il existait une rupture dans les séries temporelles. Un seul test de tendance a été utilisé pour ces analyses, celui de Mann-Kendall prenant en compte la saisonnalité d'une chronique temporelle.

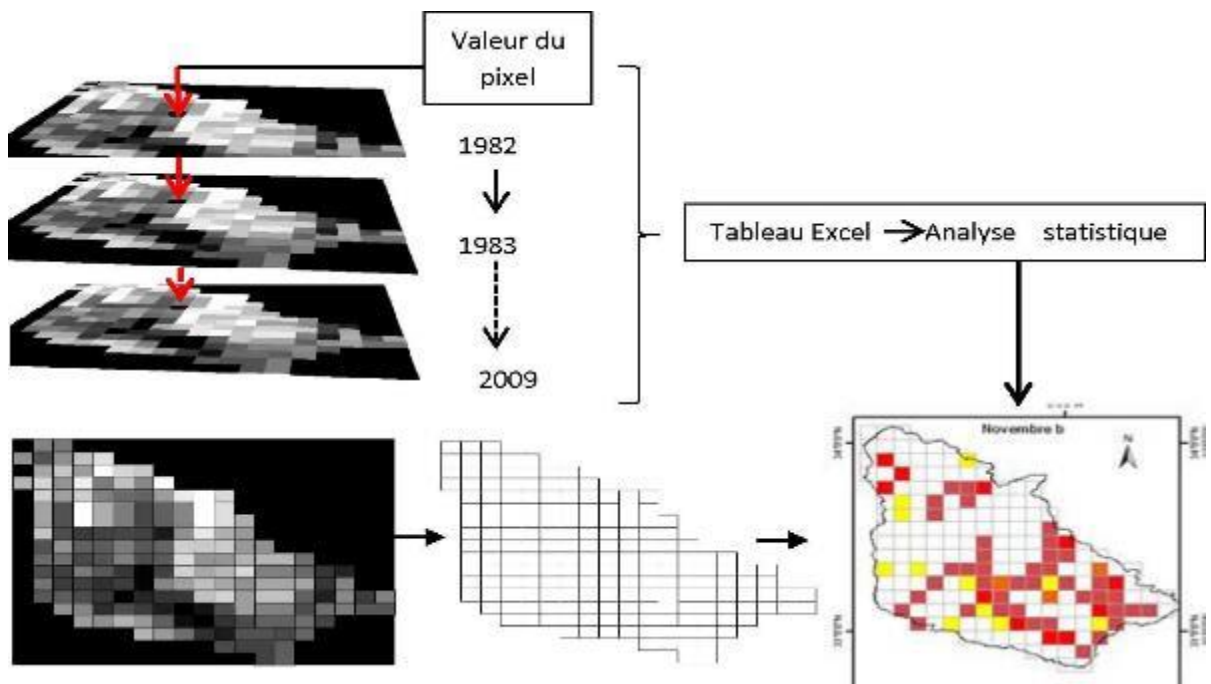
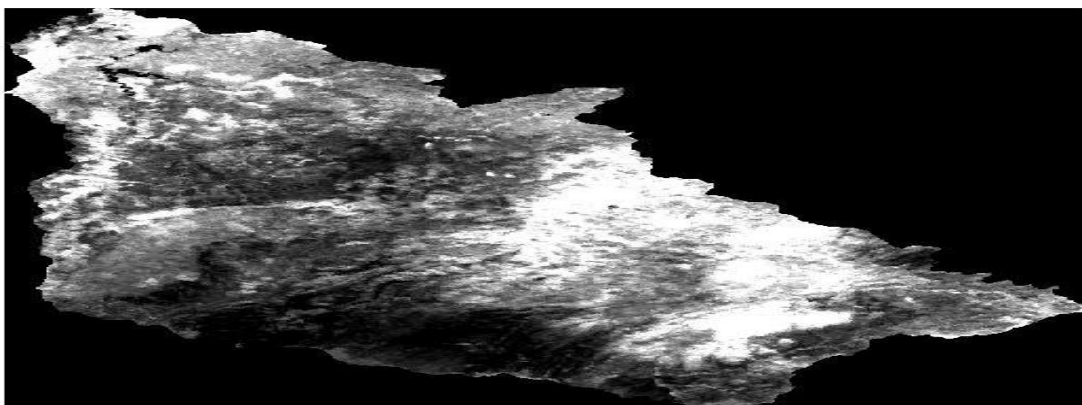
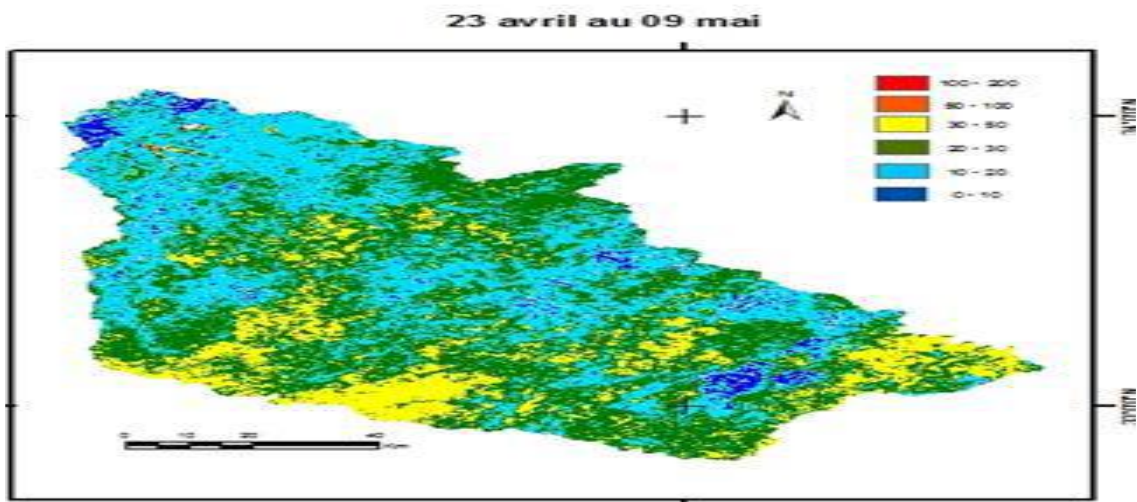


Figure 18 : Schéma méthodologique d'analyse des images de NDVI de NOAA du bassin du Bouregreg (Source: Sigmed)

L'analyse de la dynamique spatio-temporelle de la végétation à travers l'étude statistique des images de NDVI de MODIS est comparée à l'étude faite avec les images NOAA afin de tirer les enseignements sur la dynamique générale du couvert, mais également sur la dynamique spécifique selon la nature de la couverture végétale (espace forestier ou espace de culture). Pour cela, une connaissance de la nature de l'occupation du sol est nécessaire, d'où l'utilisation des images de haute résolution spatiale (LANDSAT) et d'une carte de la végétation établie par le CERGEO (Centre d'Etudes et de Recherches Géographiques) de l'Université Mohammed V de Rabat. La même procédure d'analyse est appliquée aux images de VCI de MODIS, images qui croisées permet d'extraire la dynamique des conditions hydrique dans le bassin.



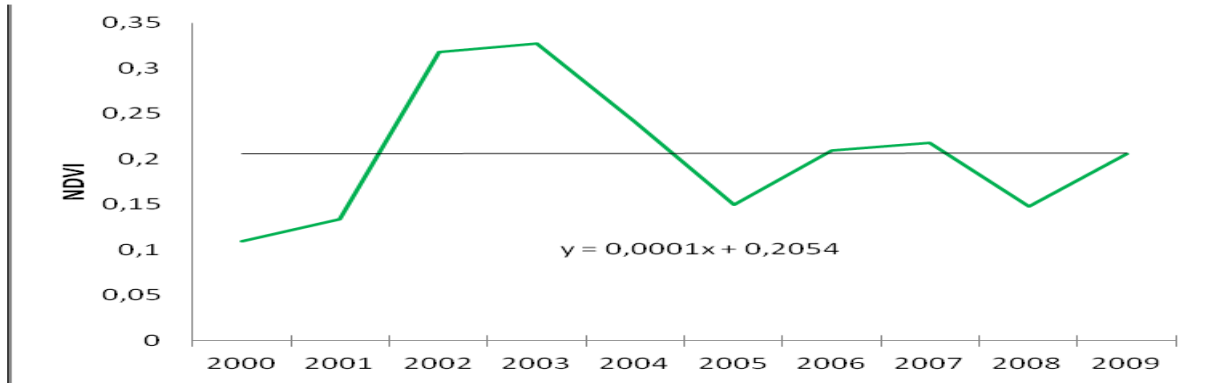


Figure 19 : Etapes d'analyse des images NDVI de MODIS : l'image (a) représente le coefficient de Variation inter-annuel du NDVI pour les dates du 23 avril au 10 mai de la période de 2000 à 2009; l'image (b) indique trait rouge un transect tracé sur une zone d'intérêt repérée sur la figure (a) (zone à forte variation du NDVI); la figure (c) exprime en graphique l'évolution interannuelle des valeurs du NDVI pour ce transect.

4.2.6. Détection et suivi des saisons culturales : analyse par maille

a- Début de la saison agricole : Septembre à Décembre

L'activité végétale est presque la même au mois de septembre qu'au d'octobre. La moyenne de l'indice de végétation ne varie pas. Il en est de même du minimum de cet indice. Ainsi, cette moyenne indique une faiblesse générale de la couverture végétale (0,21 d'indice de NDVI). Au mois de novembre et de décembre est observée une augmentation de la moyenne de l'activité végétale. L'indice de végétation est ainsi de 0,24 à la première quinzaine de novembre contre 3,12 à la deuxième quinzaine de décembre, traduisant une couverture générale du bassin par de la végétation. Les minima de végétation des séries chronologiques de chaque quinzaine sont observés, pour le mois de septembre, en 1987, pour le mois d'octobre en 1988 (première quinzaine) et 2000 (deuxième quinzaine), pour le mois de novembre en 1992, pour le mois de décembre en 2001 et 1985 (première et deuxième quinzaine). Le constat qui se dégage est que les dates correspondant aux minima d'activité végétale des séries d'indice de végétation varient d'une quinzaine à l'autre.

L'analyse temporelle de l'activité végétale de 1982 à 2009 indique des pentes positives pour chaque quinzaine de cette période. Cependant, ces pentes restent extrêmement faibles (Figure 20).



Figure 20 : Courbe d'évolution mensuelle interannuelle du NDVI
(moyenne annuelle de l'ensemble des pixels): (a) correspond à la première moitié d'un mois donné et (b) correspond à la deuxième moitié de ce mois.

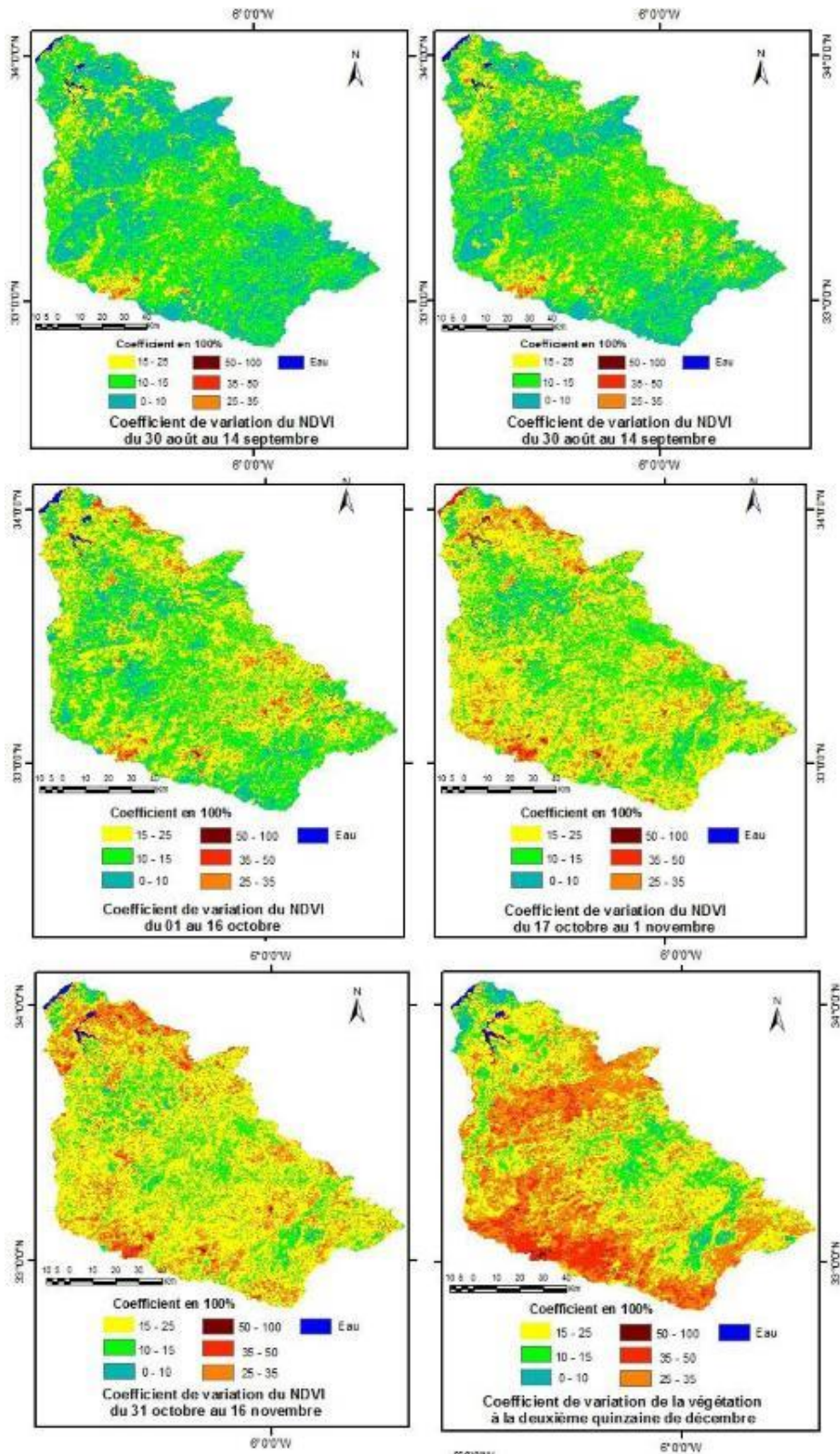


Figure 21 : Variation de la couverture végétale du bassin du Bouregreg en début de saison agricole (MODIS 2000-2009)

b- Milieu de la saison agricole : Janvier et Février

Les mois de janvier et février correspondent à la période optimale de croissance de la végétation cultivée. Les dynamiques temporelles de l'activité végétale sur la période 1982-2009 présentent les mêmes articulations pour cette période. L'évolution temporelle de la végétation est, en effet, caractérisée par trois séquences : une séquence positive de 1982 à 1990, une séquence négative de 1990 à 1995 et une deuxième séquence positive de 1995 à 2009 (Figure 158 et Tableau 45). Les pentes des courbes d'évolution de cette végétation de 1982 à 2009 restent sensiblement positives dans l'ensemble. L'évolution de la végétation pendant la séquence de 1982-1990 par rapport au début de la série (1982) est globalement importante sur cette période. En janvier, cette progression est de 48% à la première quinzaine et de 41% à la deuxième quinzaine. Au mois de février, la séquence correspond à une hausse de 37% de l'activité végétale à la première quinzaine et de 9% à la deuxième quinzaine. La période 1990-1995 est marquée par une relative stabilité à la première quinzaine de janvier (hausse de seulement 1%). Par contre, à la deuxième quinzaine la séquence 1990-1995 est marquée par une baisse notable de l'évolution temporelle de la végétation. Cette dynamique est la même au mois de février. Ainsi, la baisse est de 12% à la deuxième quinzaine de janvier, de 11% à la première quinzaine de février et de 15% à la deuxième quinzaine de février. Les hausses de l'activité végétale caractérisant la séquence 1995-2009 sont de 9% à la première moitié de janvier, de 19% à la seconde moitié, de 21% pour la première quinzaine de février et de 25% pour la deuxième quinzaine. Au niveau statistique, les mois de janvier et de février présentent au cours de la série 1982-2009, des coefficients de variation temporelle interannuelle de l'activité végétale assez semblables.

Tableau 2 : Les séquences d'évolution temporelle de la végétation de 1982 à 2009 pour les mois de janvier et de février.

Pourcentage d'évolution de la Végétation	Janvier a	Janvier b	Février a	Février b
Séquence 1 (1982-90)	47,86	40,81	37,20	9,49
Séquence 2 (1990-1995)	1,25	-11,71	-10,76	-15,49
Séquence 3 (1995-2009)	8,76	18,65	20,81	25,08

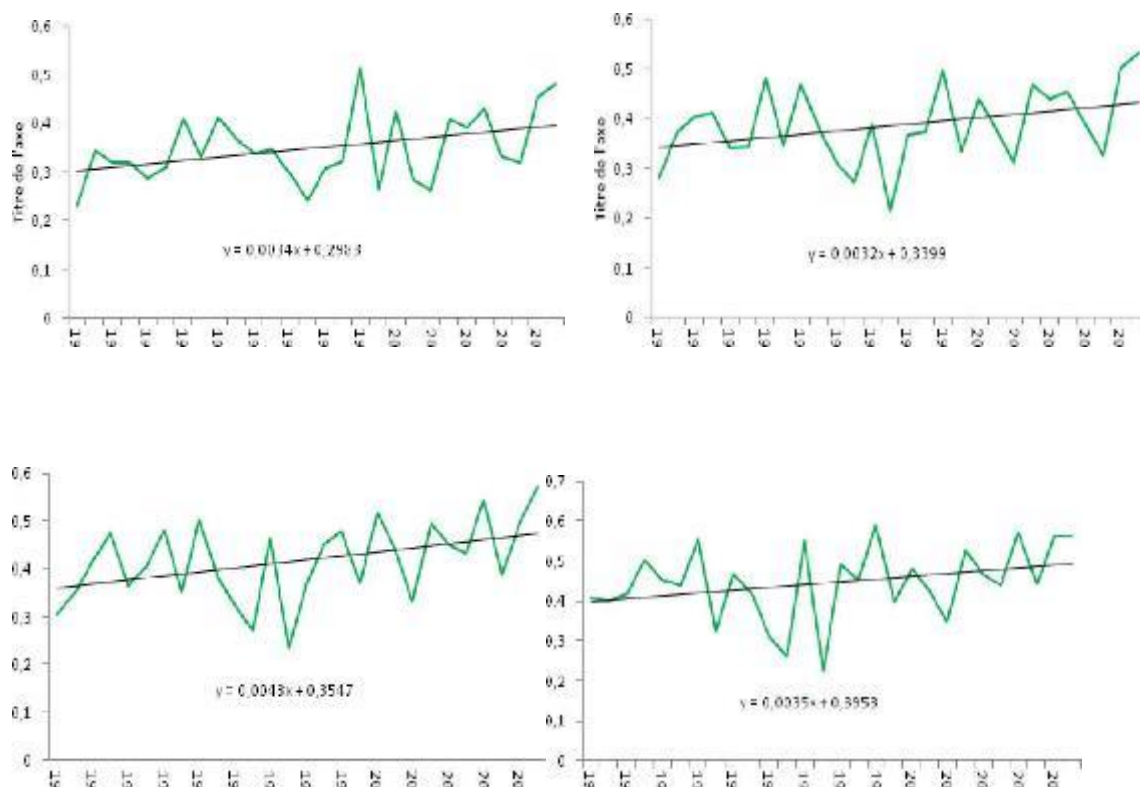


Figure 22 : Courbe d'évolution du NDVI: moyenne annuelle de l'ensemble des pixels aux mois de janvier et février (Source : Sigmed)

Tableau 3 : Dates de rupture des séries chronologiques au mois de janvier et février

	Années de rupture	
	Amont	Aval
Janvier a	2002	1997
Janvier b	1996 ; 1997 ; 2002	1997 ; 1999
Février a	1996 ; 1997 ; 2002	1997 ; 1999
Février b	1995-2002	1995 ; 1996 ; 2002

L'analyse de l'évolution spatio-temporelle de la végétation du bassin à partir des images MODIS confirme l'observation selon laquelle les plus fortes tendances positives de l'activité végétale sont le fait des espaces forestiers. En effet, les espaces de fortes tendances positives d'évolution temporelle de 1982 à 2009 correspondent, au niveau des images MODIS (Figures 23 et 24), aux espaces aux plus faibles coefficients de variation de la végétation (inférieur à

15% de coefficient de variation). A la première quinzaine de février, ces espaces à faible variation de la végétation sont plus renforcés dans les forêts des plateaux amont et dans les espaces agricoles et forestiers en aval du bassin. Ce qui se vérifie par la forte activité végétale observée entre 1982 et 2009 dans ces zones. L'espace agricole au centre du bassin (où l'activité végétale varie très peu de 1982 à 2009) se caractérise par des coefficients de variation spatio-temporelle modérés à forte (entre 25 et 35% de coefficient de variation). Les plus forts coefficients de variation de la végétation sont observés au niveau de la bande Sud-ouest-Sud-est (Ezzhiliga-Boukhrisse) et correspondent souvent à des dynamiques temporelles positives importantes.

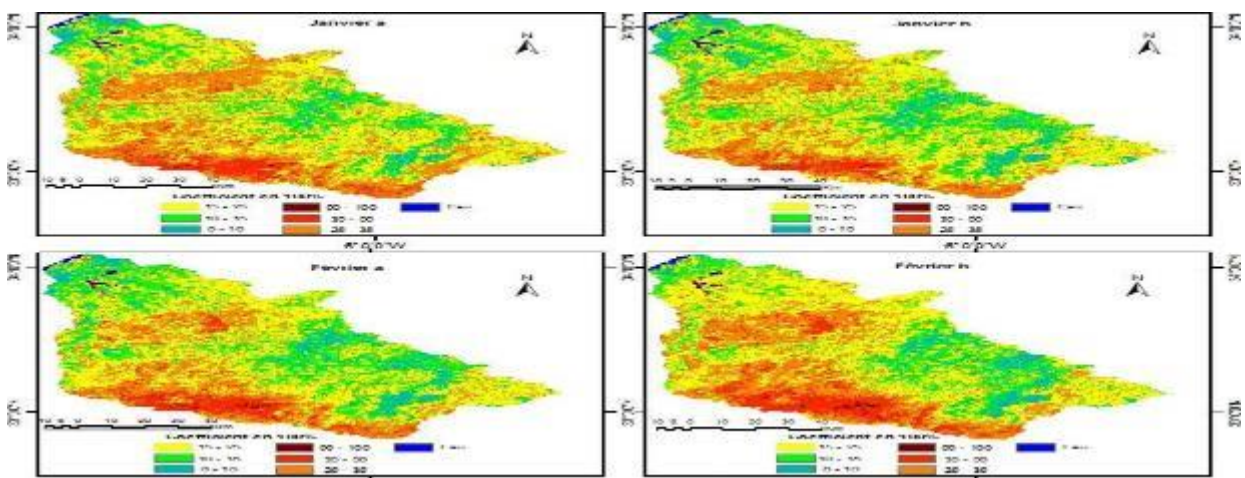


Figure 23 : Variation de la couverture végétale du bassin du Bouregreg en milieu de saison agricole (MODIS 2000-2009).

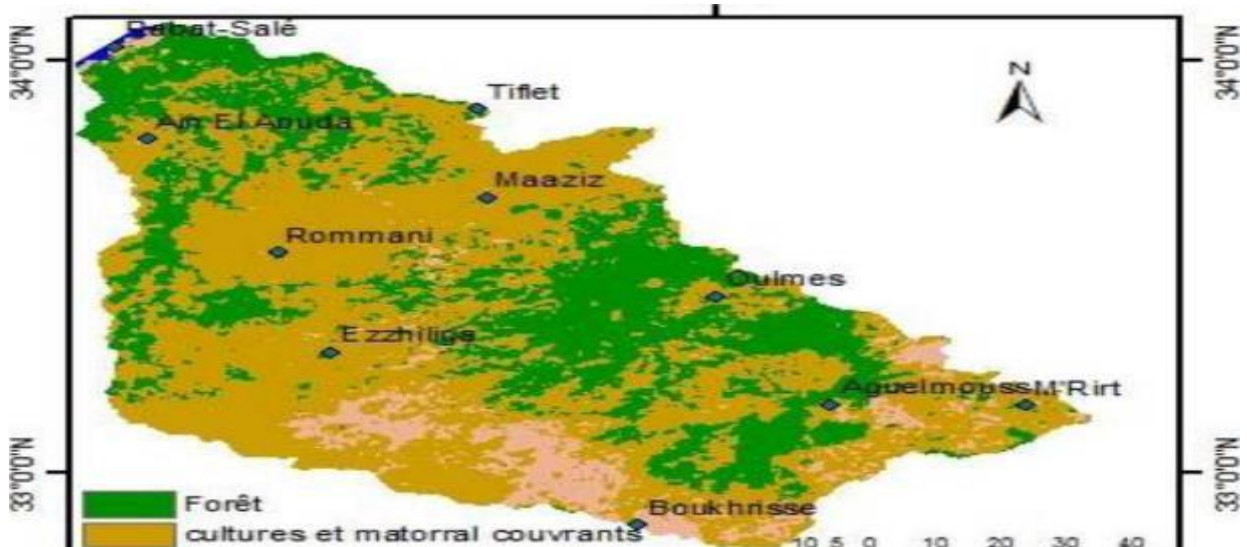


Figure 24 : Carte générale d'occupation du sol à la première moitié de janvier

c- Période de maturité des céréales : Mars et Avril

Le mois d'avril voit ainsi une déclinaison de cette activité végétale. La dynamique temporelle de la végétation de 1982 à 2009 aux mois de mars et avril ne présente pas d'articulations précises. Il s'agit d'une succession d'années favorables et d'années défavorables au niveau de la production végétale (Figure 28).

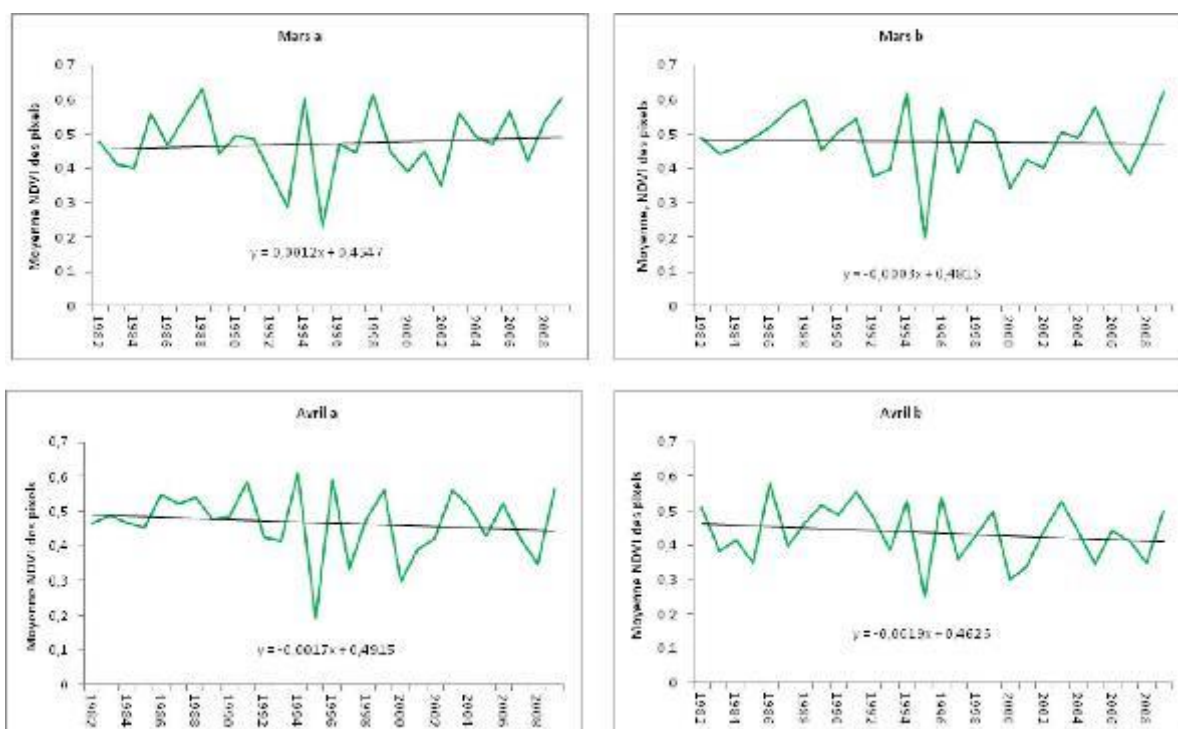


Figure 25 : Courbe d'évolution du NDVI : moyenne annuelle de l'ensemble des pixels aux mois de mars et avril.

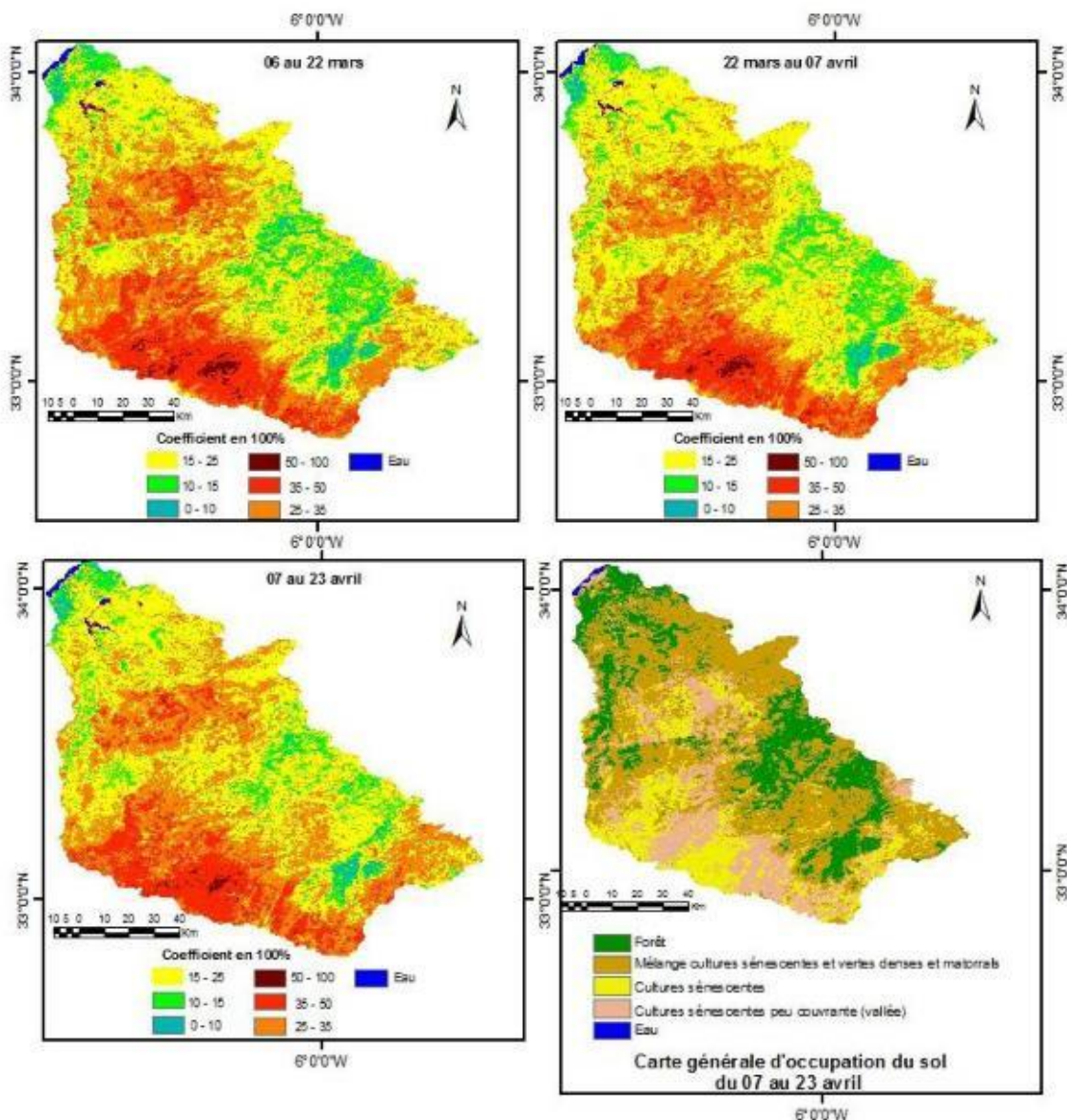


Figure 26 : Variation de la couverture végétale en fonction de la nature de l'occupation du sol aux mois de mars et avril (MODIS 2000-2009)

d- Fin de la saison agricole : Mai-Juin-Juillet et Août

Les mois de mai, juin et juillet constituent la période qui caractérise le plus le changement de l'activité végétale du bassin de 1982 à 2009. Toutes les pentes des courbes d'évolution des séries temporelles annuelles de la végétation sont négatives (Figure 30). L'activité végétale décroît continuellement de 1982 à 2009. Par rapport au début de cette série, le bassin versant du Bouregreg a connu une perte moyenne d'activité végétale de : 28% à la première quinzaine du mois de mai, 30% à la deuxième quinzaine de ce mois, 22% à la première moitié de juin, 20% à la deuxième moitié, 17% à la première moitié de juillet et 14%

à la deuxième moitié de juillet. L'activité végétale diminue progressivement, selon la dynamique saisonnière annuelle normale, du mois de mai au mois de juillet. Le mois d'août (et septembre) constitue une période de transition entre les mois à activité végétale à tendance évolutive négative et les mois à tendance positive. La végétation varie très peu au cours de ce mois.

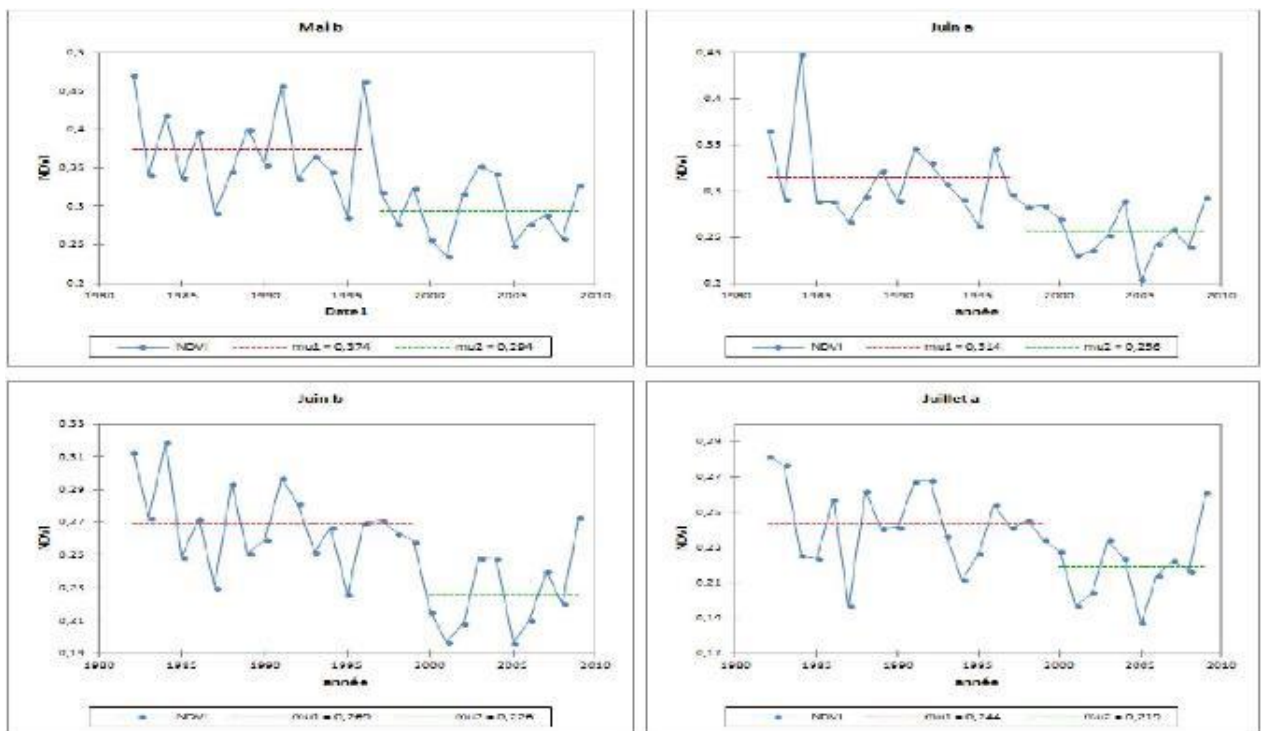


Figure 27 : Résultat du test de rupture de Pettitt pour les séries de NDVI des quinze jours de mai à juillet.

L'analyse du test de tendance de Mann-Kendall appliqué à la série pendant les quinze jours de mai à fin août indique l'existence de tendances significatives à la baisse de la végétation de la deuxième quinzaine de mai à la deuxième quinzaine de juin (alpha de 5%) ou à la première quinzaine de juillet (alpha de 10%). La recherche de rupture dans ces tendances significatives (Figure 30) indique, selon le test de Pettitt, l'existence de rupture en 1996 (mai b), 1997 (juin a) et 1999 (juin b et juillet a). La baisse de l'activité végétale est ainsi de 21% à la deuxième quinzaine de mai (avant et après la rupture), de 18% et de 16% respectivement à la première et deuxième quinzaine de juin, et de 10% à la première quinzaine de juillet. Bien que globalement, la première quinzaine de mai et la deuxième quinzaine de juillet semblent ne

pas indiquer de tendances significatives à la baisse, l'analyse spatio-temporelle par maille de 8 km² indique que de nombreux sous espaces du bassin connaissent une évolution négative marquée de l'activité végétale. En effet, du début du mois de mai à la fin juin, la majorité des espaces du bassin connaît une évolution temporelle négative de la végétation de 1982 à 2009. Ce phénomène apparaît plus important à l'aval du bassin et se reprend au centre et à l'amont. Ces tendances à la baisse de l'activité végétale dans ces espaces sont généralement caractérisées par des ruptures de série (Figure 27).

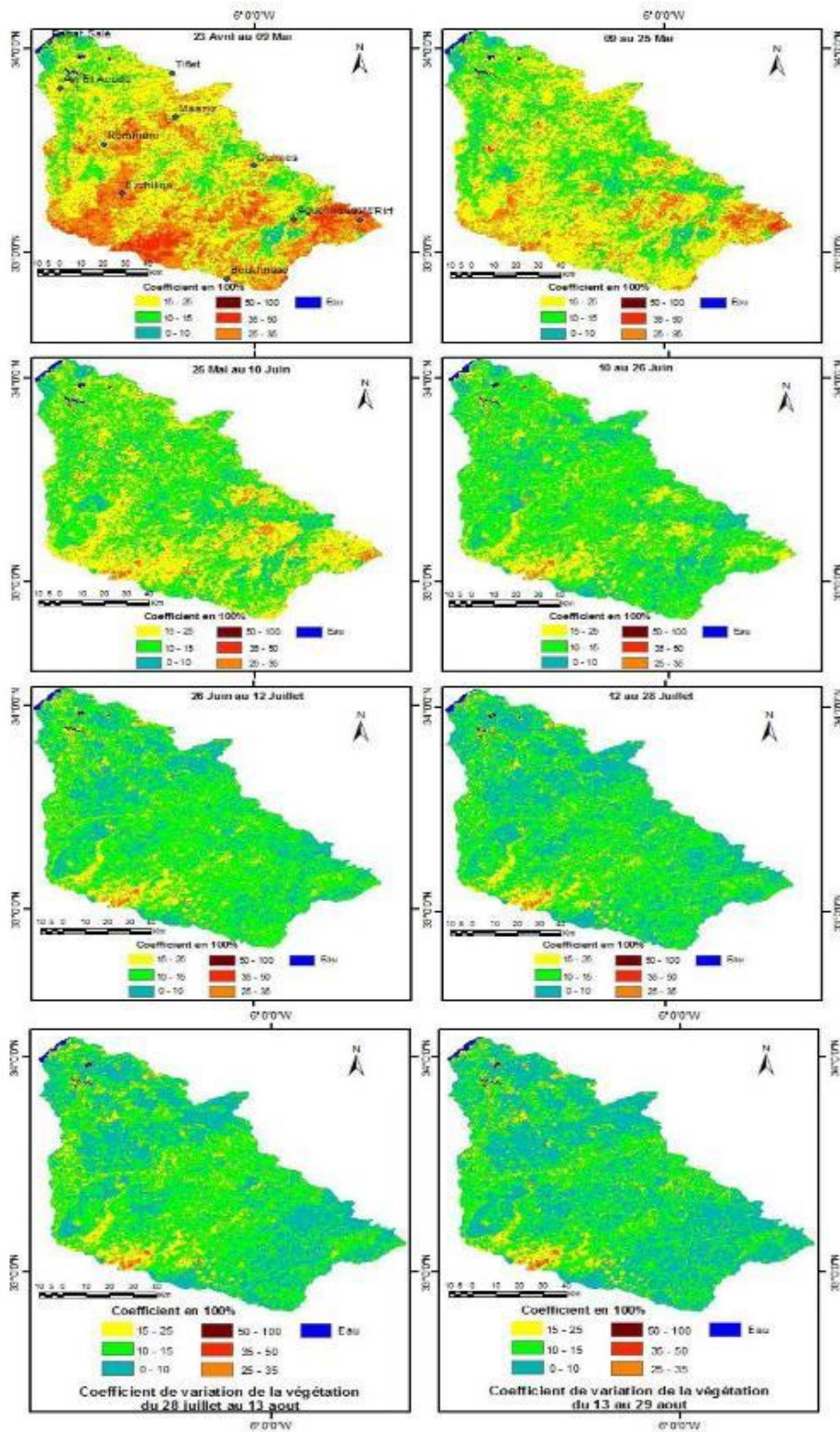


Figure 28 : Variation de la couverture végétale dans le bassin versant du Bouregreg de mai à Juillet (MODIS 2000-2009).

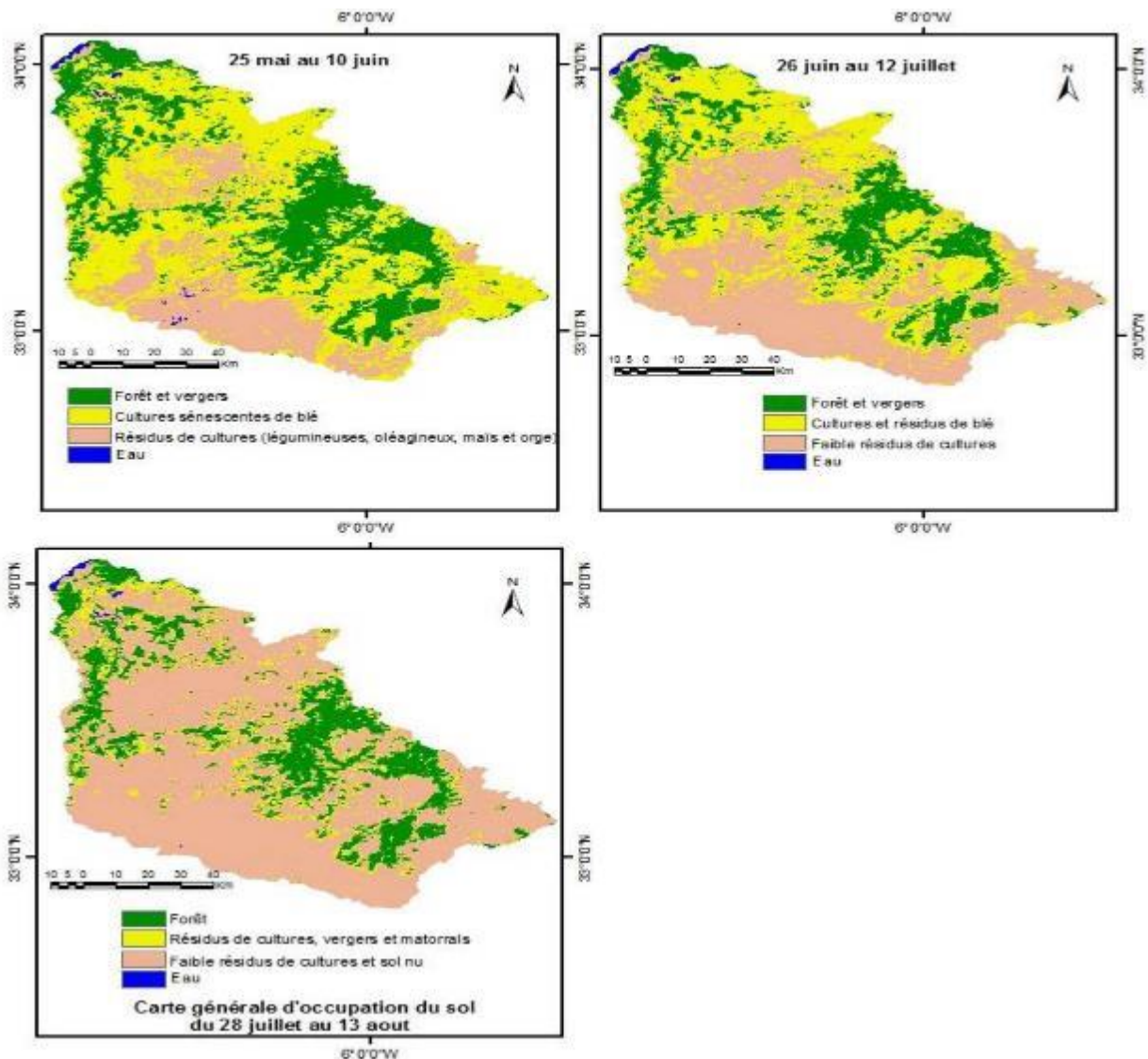


Figure 29 : Carte générale d'occupation du sol en fin de saison agricole (MODIS 2000 à 2009)

4.2.7. Prévisions d'impact du changement climatique futur sur la productivité des cultures à l'horizon 2030

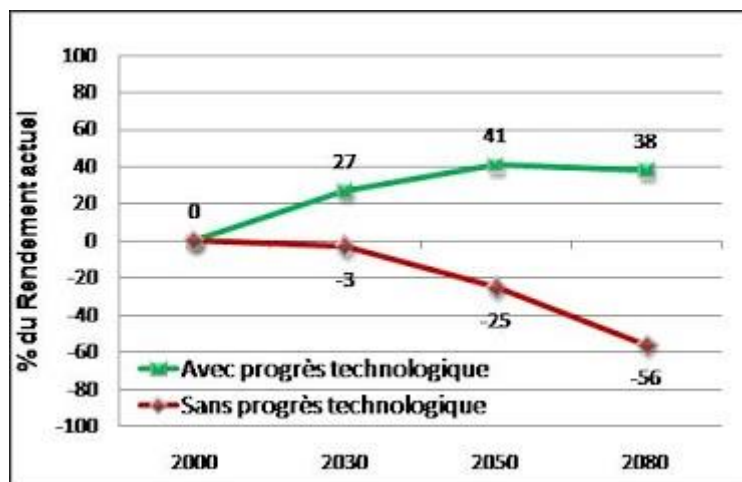
a. Incertitudes concernant les impacts du changement climatique

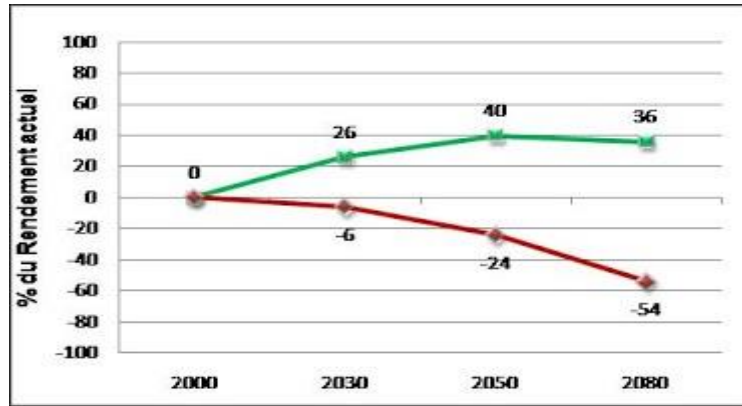
Les modèles physiques sur lesquels reposent les projections climatiques prévoient mieux les valeurs moyennes de pluie et de température que leurs extrêmes (Gommes et al. 2009). Il en découle, que les impacts prévus dans le futur représentent des moyennes de valeurs qui peuvent parfois fluctuer fortement d'une année à l'autre. Les projections de

rendements diffèrent toutefois très peu entre les scénarios A2 et B2 jusqu'en 2030. Au-delà de cette date, et jusqu'en 2100, des divergences énormes existent entre les scénarios en raison des incertitudes liées aux quantités de gaz à effet de serre qui seront réellement émises dans l'atmosphère, de la dynamique du secteur agricole et de la capacité d'adaptation de l'agriculture marocaine.

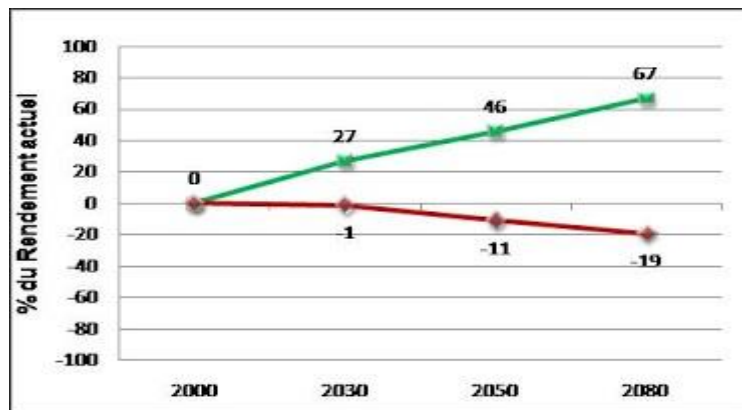
b. Impact du changement climatique sur la productivité des cultures

Le changement climatique va augmenter la probabilité des récoltes faibles ou nulles dans les zones de cultures pluviales, où l'irrigation n'est pas présente pour atténuer les conditions climatiques défavorables. Dans le cas des blés en culture pluviale, l'impact du changement climatique serait relativement faible jusqu'à l'horizon 2030, puis sévère au-delà (Gommes *et al.* 2009). En absence de progrès technologique, les résultats des projections climatiques sur le Maroc indiquent que les rendements du blé tendre et du blé dur en culture pluviale diminueraient, de 6% et 3% respectivement, par rapport au rendement actuel à l'horizon 2030, dans le cas du scénario A2 (Figure 30). À l'horizon 2050, la diminution serait plus sévère pour ces deux espèces, de l'ordre de 25%, et plus sévère encore à l'horizon 2080, de 55%. En présence du progrès technologique maintenu stable, les rendements des blés en culture pluviale continueront à croître, de l'ordre de 26% et 40% du rendement actuel jusqu'aux horizons 2030 et 2050, respectivement. À partir de 2050, le changement climatique serait tel que le rythme actuel du progrès technologique serait insuffisant pour maintenir une progression du rendement du blé dur.

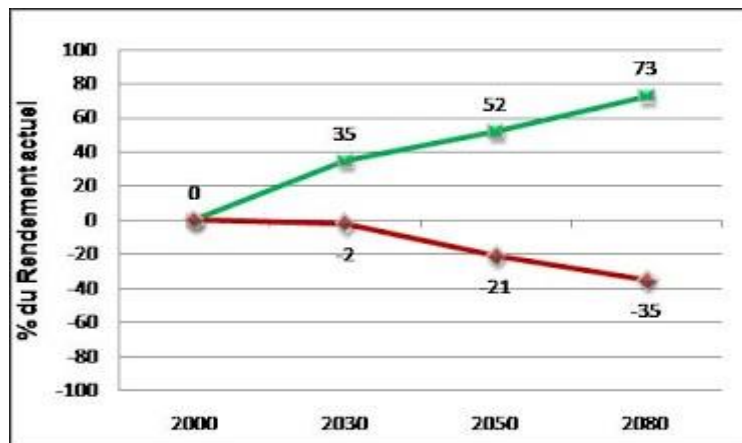




26b



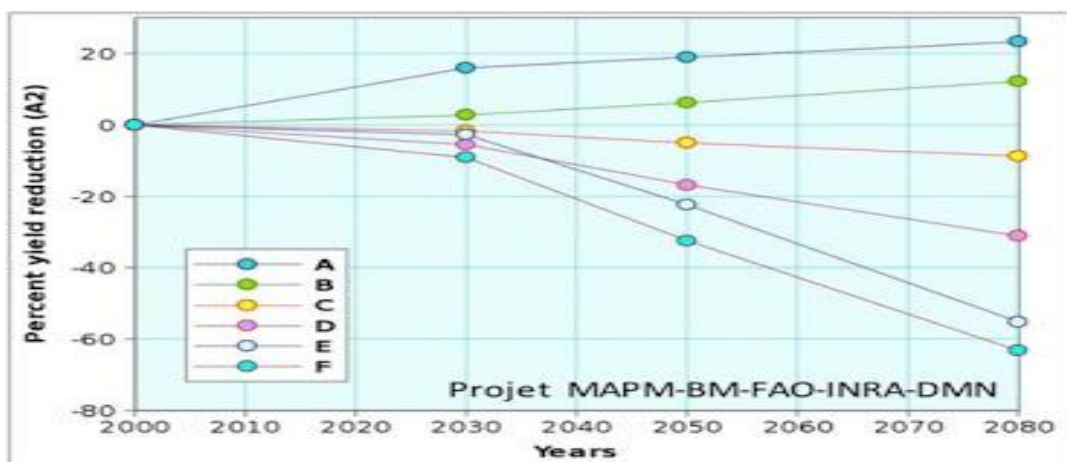
26c



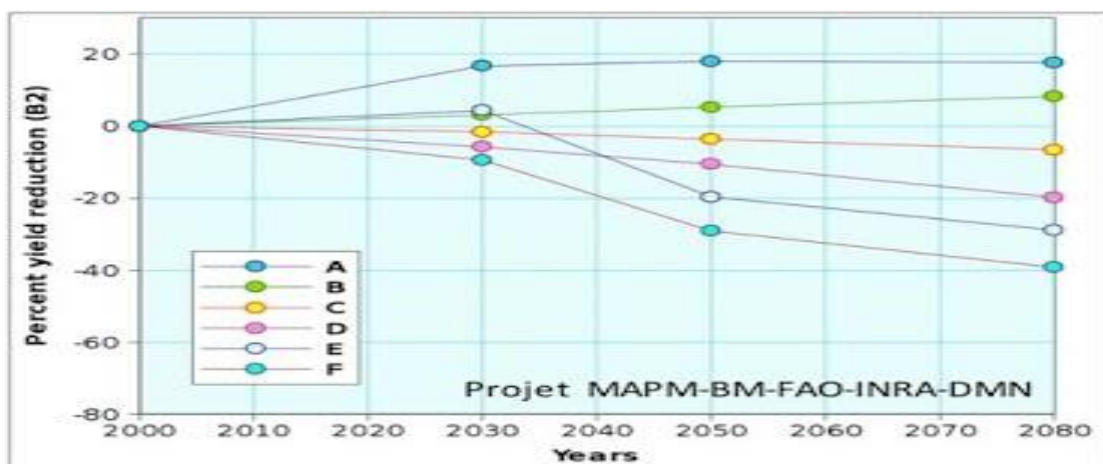
26d

Figure 30 : Impacts du changement climatique sur le rendement du blé tendre pluvial (26a), du blé dur pluvial (26b), du blé tendre irrigué (26c) et du blé dur irrigué (26d), dans le cas du scénario A2. (Gommes *et al.* 2009)

Dans le cas des blés irrigués, l'impact du changement climatique serait relativement faible. En absence du progrès technologique, les rendements du blé tendre et du blé dur en culture irriguée diminueraient relativement peu, de 1% et 2% respectivement, par rapport au rendement actuel à l'horizon 2030, dans le cas du scénario A2. À l'horizon 2050, la diminution serait plus importante pour ces deux espèces, de 11% et 21% respectivement pour le blé tendre et le blé dur, puis de 19 et 35% à l'horizon 2080. En présence du progrès technologique maintenu stable, les rendements des blés irrigués continueront à croître jusqu'en 2100.



28a



28b

Figure 31 : Pourcentage de réduction du rendement des principales cultures au Maroc. Selon deux scénarios de changement climatique, A2 (28a) et B2 (28b), à l'horizon 2100. (Gommes et al. 2009).

L'adaptation par le progrès technologique actuel n'est pas prise en compte ici. Les cultures sont rassemblées en "groupes d'impact" A à F qui peuvent être caractérisés comme suit :

A : Légumineuses irriguées et fourrages - B: Arboriculture fruitière irriguée et cultures légumières - C: Fourrages et cultures légumières - D: Céréales pluviales et légumineuses - E : Céréales d'automne pluviales - F: Autres cultures pluviales.

En résumé, le changement climatique aura donc des conséquences négatives sur l'agriculture marocaine, notamment :

- La chute de la productivité agricole, surtout pour les cultures pluviales et celles pour lesquelles le progrès technologique réalisé est faible ou nul, tels que l'orge, le blé dur, le blé tendre, l'olivier, et les légumineuses alimentaires ;
- La diminution de la capacité des terres à l'agriculture ;
- Le déplacement de l'aire de culture de certaines espèces comme celles qui sont exigeantes en eau (maïs, tournesol, fève, olivier) ou qui seront affectées par la hausse des températures (espèces arboricoles fruitières ayant besoin en froid) ;
- La perte de fertilité des sols en raison de la baisse de la matière organique des sols et de l'érosion hydrique et éolienne ;
- La baisse des disponibilités en eau d'irrigation.

c. Les impacts sur l'eau

Les processus du changement global, comme la croissance démographique (mais aussi l'augmentation de la prospérité et du niveau de vie), les modifications de l'occupation sol et le changement climatique mènent à une augmentation du besoin en eau et, ainsi à une pénurie d'eau. Au cours des 100 dernières années, le besoin global en eau a été multiplié par huit, c'est –à-dire qu'il a augmenté deux fois plus vite que la population. Comme la croissance démographique ne s'arrête pas et que le besoin en eau continue de croître, le 21ème siècle est aussi appelé « ère de la pénurie d'eau ». La variabilité climatique et les changements du climat peuvent encore renforcer la pénurie d'eau. Les agents climatiques les plus importants pour la disponibilité en eau sont les précipitations, la température et la demande évaporative (déterminée par le rayonnement net au niveau du sol, l'humidité atmosphérique, la vitesse du vent et la température) (Bates et al., 2008).

d. Les impacts sur la sécurité alimentaire

La définition de la sécurité alimentaire adoptée par le Sommet mondiale de l'alimentation de Rome en 1995 et utilisée par la plupart des organisations internationales : « La sécurité alimentaire est assurée quand les personnes, en tout temps, ont économiquement, socialement et physiquement accès à une alimentation suffisante, sûre et nutritive qui satisfait leurs besoins nutritionnels et leurs préférences alimentaires pour leur permettre de mener une vie active et saine. » La sécurité alimentaire comporte, ainsi quatre aspects : disponibilité, accessibilité, et innocuité et qualité des aliments (FAO, 1996).

La disponibilité renvoie à une offre alimentaire suffisante, sécurisée de façon durable et à même de répondre à la croissance de la population et aux changements des habitudes alimentaires.

Tableau 4 : Progression annuelle des rendements, en quintal par hectare (Qx/ha.an), des principales céréales avec leurs coefficients de détermination pour chaque zone agro-écologique du Maroc (Série de 1979 à 2006) (DSS, Balaghi et Jlibene, 2009).

Céréales								
Zone agro-écologique	Blé tendre		Blé dur		Orge		Maïs	
	Progrès	R ²	Progrès	R ²	Progrès	R ²	Progrès	R ²
Favorable	0,24	0,79	0,19	0,71	-0,15	0,12	0,08	0,24
Intermédiaire	0,22	0,73	0,26	0,85	0,01	0,00	0,15	0,69
Défavorable Sud	0,11	0,48	0,15	0,70	-0,01	0,00	0,09	0,64
Défavorable Orientale	0,06	0,20	0,08	0,37	-0,09	0,08	0,06	0,30
Montagne	0,17	0,60	0,13	0,70	-0,32	0,02	0,11	0,28
Saharienne	0,05	0,08	0,13	0,20	-0,04	0,03	0,05	0,09
National	0,19	0,87	0,18	0,86	-0,03	0,03	0,11	0,70

On constate aussi que les rendements du blé rechutent à des niveaux très bas lors des années de sécheresse agricole extrême, aux alentours d'une moyenne de 5 Qx/ha à l'échelle nationale. Cette limite inférieure des rendements, qui n'a pas pu être relevée depuis 1961, continue de peser sur la sécurité alimentaire du pays.

5. CHANGEMENT CLIMATIQUE : VULNERABILITE, ADAPTATION ET ATTENUATION

5.1. Approches pour l'évaluation de la vulnérabilité

Les critères de définition pour quantifier la vulnérabilité ont toujours été difficiles, en partie parce que la vulnérabilité est un phénomène qui souvent n'est pas directement observable (Downing et al., 2001). Malgré les nombreux défis qui existent dans la quantification de la vulnérabilité, plusieurs paramètres quantitatifs et semi-quantitatifs ont été proposés et appliqués. Ceux-ci peuvent être classés en deux grandes approches : l'approche des indicateurs et celle des évaluations des variables de vulnérabilité qui mesurent et évaluent la vulnérabilité de certains variables d'intérêt de certaines catégories de facteurs de stress. La vulnérabilité est définie en terme de changement qui ont eu lieu ou auront lieu dans ces variables sélectionnées ou des moteurs de stress.

6. L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE, UNE NECESSITE POUR LE MAROC

6.1. Les formes théoriques de l'adaptation

Le GIEC définit l'adaptation en tant que : processus d'ajustement des systèmes écologique, social et économique à un stimulus climatique constaté ou anticipé, à ses effets et ses impacts. Il désigne un changement de procédures, de pratiques et de structures visant à limiter ou effacer les dommages potentiels ou à tirer bénéfice des opportunités créées par les changements climatiques (GIEC, 2000).

6.2. Stratégies d'adaptation au changement climatique

Les stratégies d'adaptation au changement climatique, surtout à l'aridité, ne peuvent être développées que grâce au progrès technologique. Dans les conditions climatiques difficiles pour l'agriculture qui attendent le Maroc, il ne pourra pas y avoir de sécurité alimentaire sans la disponibilité de **technologiques souveraines** développées pour les conditions particulières du Maroc.

6.2.1. L'option génétique

Le progrès génétique réalisé au Maroc est le fruit d'un effort important fourni par INRA pour créer des variétés, de plus en plus productives et résistantes à la sécheresse et aux

maladies, en dépit de la brusque baisse de la pluviométrie constatée à partir du changement climatique observé au Maroc à partir du début des années 80. L'option génétique permet de relever le potentiel de progrès technologique au niveau d'un pays. La productivité des nouvelles variétés par unité d'eau de pluie est suffisante pour contrecarrer les effets négatifs du changement climatique prévu d'ici à 2030, dans le cas du scénario A2.

6.2.2. L'option de gestion de l'eau de pluie et d'irrigation

Au Maroc, avec une consommation de 83% d'eau stockée, l'agriculture est le secteur clé de la gestion de l'eau, pour le présent comme pour les décennies à venir, Cependant, il existe un risque de pénurie en eau qui va s'accroître sous la pression conjuguée des sécheresses, de la demande des secteurs non agricoles. L'irrigation permettra d'atténuer partiellement l'impact négatif du changement climatique à condition que l'eau soit efficacement gérée, Stratégiquement, l'eau ne devra plus être vue comme un moyen de production à rentabiliser économiquement mais comme une denrée vitale à rationaliser.

6.2.3. L'option de transfert de technologie

Le transfert de technologie est un terme qui désigne le passage d'une technologie, de la station vers la parcelle de l'agriculteur. Au Maroc, la technologie variétale a été plus facile à diffuser auprès des agriculteurs que les technologies agronomiques (désherbage, fertilisation, irrigation d'appoint, etc.). La raison en est l'absence de coût supplémentaire lorsque l'on utilise une nouvelle variété. En effet, cette nouvelle variété a été sélectionnée pour produire d'avantage dans des conditions environnementales (sol, fertilité, insectes, maladies, etc.) similaires à celles des anciennes variétés.

(Jlibene, 2008).

6.2.4. L'option de biotechnologie

Les rendements réalisés actuellement au Maroc sont loin des limites de production pouvant être biologiquement réalisés par les plantes. En amélioration génétique des plantes cultivées, la seule limite connue à l'amélioration des rendements est le potentiel biologique des plantes qui est une fonction du rayonnement solaire et de l'alimentation en eau. Si le rayonnement solaire n'est pas limitant sous nos latitudes, ce sont les ressources en eau qui connaîtront des restrictions dans le futur en raison de la diminution des apports pluviométriques, et probablement aussi les intrants en raison de leur cherté croissante. Jusqu'à présent, la biotechnologie a contribué à améliorer les rendements des variétés grâce à la

création de variétés capables de résister aux insectes et aux herbicides. Il reste à la biotechnologie de créer des variétés plus résistantes à la sécheresse, à la salinité et aux hautes températures en prévision du changement climatique

[1] Assez logiquement, les différences entre scénarios sont plus faibles pour les cultures irriguées que pour les cultures pluviales.

[2] Nous incluons dans ce terme les diverses tendances actuellement observées au Maroc, qui répondent à des logiques économique, environnementale, etc.

7. ATTENUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dans le contexte du changement climatique, l'atténuation est « une intervention anthropogénique visant à réduire les sources ou à augmenter les puits de gaz à effet de serre » (GIEC, 2000). Elle est axée sur la limitation des émissions nettes de façon à ralentir et finalement inverser l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Lier efficacement les programmes d'atténuation et d'adaptation devrait se faire en accord avec l'approche de meilleures pratiques/sans regrets -c'est-à-dire des actions qui réduiront les émissions tout en aidant les pays / régions / communautés à s'adapter au changement climatique par l'utilisation de meilleures pratiques (incluant la technologie et le savoir-faire).

8. APERÇU DE LA GOUVERNANCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE AU MAROC

Le Maroc compte parmi les leaders des pays en développement en matière d'initiatives environnementales et climatiques. A ce titre son plan d'action et ses stratégies sur les changements climatiques prévoient une panoplie d'action et de programme destinés à atténuer les émissions de gaz à effet de serre et à adapter la société marocaine au changement climatique. Les mesures transverses sont nombreuses et appuieront la politique du gouvernement dans la lutte et l'atténuation des impacts au changement global : Stratégies/Plan sectoriels de développement intégrant la dimension environnement :

- INDH / Stratégie sociale
- Stratégie de l'Eau 2030

- Programme Nationale Prioritaire d'Approvisionnement en Eau potable/Irrigation 2020-2027
- Plan National de l'Eau 2020-2050
- Plan National du Climat
- Stratégie des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique.
- Plan Maroc Vert
- Green Generation
- -Plan Halieutis
- Stratégie du Tourisme 2030
- Plan Emergence de l'Industrie
- Plan Nationale de Reboisement
- Programme d'Action National de Lutte contre la Désertification
- Programme National d'Irrigation
- Plan National d'Aménagement des Bassins Versants

L'approche IRES (Institut Royal des Etudes Stratégiques) s'articule autour des axes suivants :

- Etat des connaissances scientifiques ;
- Approfondissement des projections du changement climatique ;
- Etude des vulnérabilités et évaluation des impacts du changement climatiques sur les écosystèmes l'agriculture et les ressources en eau, d'où la nécessité de l'adoption d'une approche territorialisée et d'une lecture croisée des stratégies nationales sectorielles (Agriculture, Eau, Energie, Tourisme...).

9. CONCLUSION

Malgré le nombre important de Programme, Initiatives, Plans Projets et Stratégies Nationales en relation avec la lutte contre le réchauffement climatique, le Maroc ne dispose pas d'une vraie stratégie nationale pour lutter contre le changement climatique. Des lacunes importantes en matière de capacité et de moyens se ressentent lorsqu'il s'agit de produire des évaluations de vulnérabilité pourtant c'est la première étape de toute politique durable pour faire face aux variables et aux changements climatiques. Le renforcement ou la création, de ce type d'évaluation va permettre de mieux connaître le degré de vulnérabilité, les capacités et les besoins pour faire face, mais aussi d'identifier des mesures et des actions d'adaptation afin d'atténuer cette vulnérabilité, ceci dans une perspective de développement durable.

CHAPITRE I :

EVALUATION DE LA VULNERABILITE ENVIRONNEMENTALE ET HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG.

1. PRESENTATION DU BASSIN D'ETUDE « BASSIN VERSANT DU BOUREGREG ».

1.1 Situation Géographique et Topographique

Le Bouregreg, l'un des principaux fleuves du Maroc, s'étend sur 240 kilomètres et couvre une superficie d'environ 9700 km² (DH, 2012). Son débit moyen s'élève à 23 m³/s mais peut atteindre 1 500 m³/s en période de crue. Il prend sa source dans le plateau central à l'altitude de 1 627 mètres au niveau du Jebel Mtourzgane (Figure 37), reçoit les eaux du Grou, et se jette dans l'océan Atlantique à l'embouchure séparant les villes de Salé au nord et Rabat au sud. Son bassin versant est limité au Nord-Est par le bassin de Sebou, au Sud par celui de l'Oum Er Rbia, au Sud-Ouest par les bassins des oueds côtiers (oued Cherrat, oued N'Fifikh, et oued Malleh), et s'ouvre vers l'ouest sur l'océan Atlantique (SIGMED, 2012).

Il est drainé par trois principales artères hydrographiques (Figure 32):

- **L'oued Bouregreg.**
- **Le Grou.**
- **Le Korifla**

Le bassin versant du Bouregreg (situé entre 5.4°–6.8°W et 32.8°–34°N) est de forme elliptique. Il appartient dans sa moitié Est au plateau central marocain (massifs anciens massif hercyniens). Dans sa partie Ouest, il s'étend Partiellement sur la Wilaya de Rabat- Salé, les provinces de Khénifra et de Khémisset. Il est constitué de plaines, de plateaux et vallées alluviales plio-quadernaires. Les altitudes décroissent de l'Est (1600 mètres) vers l'Ouest (0 mètres). L'ensemble géomorphologique du bassin versant peut être subdivisé en quatre unités principales : la dépression orientale, le haut pays, le palier intermédiaire et le palier inférieur. La dépression orientale est cloisonnée entre deux murailles que sont les rebords du moyen Atlas occidental au Sud-Est et le haut pays au Nord-Ouest. Le haut pays est caractérisé par

son altitude soutenu et encaissement de ces vallées. Il est composé des éléments suivant : Des crêtes culminant entre 1050 et 1350 mètres; Le plateau du Fourhal au Sud-Ouest qui constitue l'unité principale du haut pays, qui joue le rôle d'interfluve entre le Grou et l'Oued Ksiksou, affluent du haut Bouregreg. Le palier intermédiaire est une zone entre le haut pays au Sud-Est et la basse meseta, au Nord-Ouest. Elle s'étale entre 600 et 900 mètres d'altitude. Le palier inférieur constitue le bas pays du Bouregreg. Il se compose d'une série de plateaux et de plaine ou la topographie ondule légèrement vers la côte atlantique (CID et ABHBC, 2007).

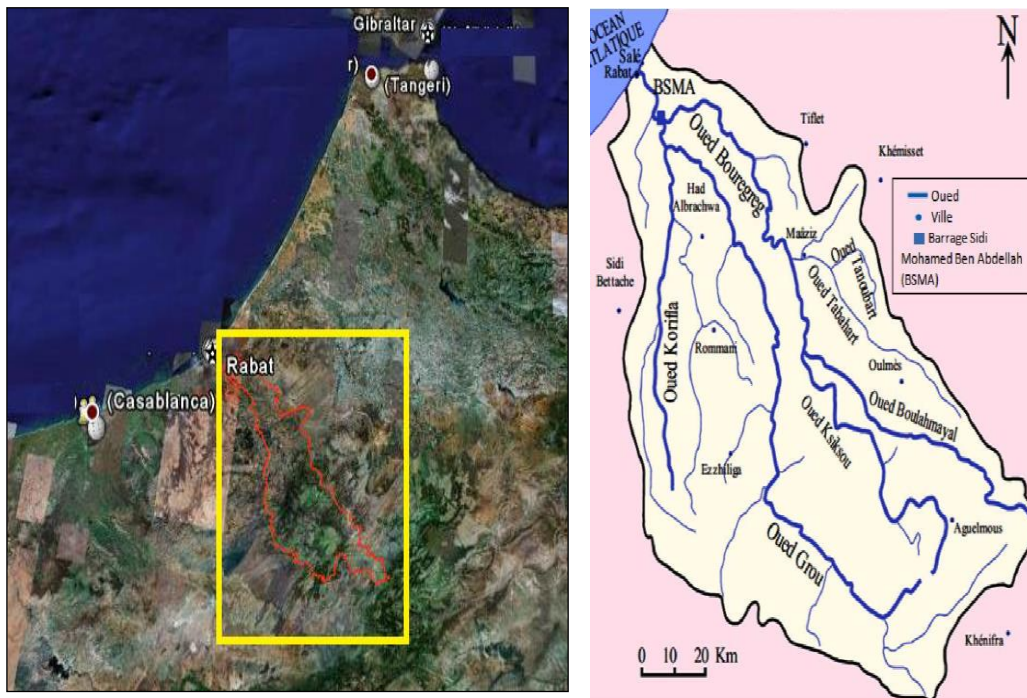


Figure 32 : Position géographique et principaux Oueds du bassin versant du Bouregreg (Google Earth et Bounouira, 2007).



Figure 33 : Paysage représentatif de la topographie du Haut Pays (Plateau M'Rirt) (DREFNO, 2016)

1.2 Cadre géologique

Le bassin versant se trouve dans la partie septentrionale de la Meseta Marocaine limitée au Nord, par le couloir sud rifain, à l'Est par la chaîne atlasique, au Sud par les Jbilet et à l'Ouest par l'océan atlantique. La litho stratigraphie est caractérisée essentiellement par les formations du Primaire, le Tertiaire et le Quaternaire (BEUDET, 1969).

2. VEGETATION

2.1. Identification et description des principales occupations

Six principales occupations sont identifiées au niveau du bassin :

Terrains de cultures	Forêts :
Arboricultures	* Chêne Liège
Terrains de parcours	* Chêne Vert
Matorrals	* Thuya
Reboisements	* Genévrier

Terrains de cultures : Les terrains de cultures correspondent aux terres situées dans les zones à faibles pentes et d'un statut foncier généralement Melk. Localisés particulièrement dans les parties aval et amont du bassin, ces terrains occupent 208 442 ha et présentent des potentialités importantes en termes de productivité et de spéculations. La céréaliculture est la plus répandue dans la zone. Presque la totalité de cet espace est utilisé en bours.



Figure 34 : Matorral à base de chêne vert très dégradé utilisé comme zone de parcours (SBV3).

Les forêts : La forêt couvre 147325 ha, soit environ 37% de la superficie du bassin versant. Sa description et sa caractérisation s'appuient essentiellement sur la composition et le type de peuplements ainsi que le taux de recouvrement du sol par la végétation. (DREFNO, 2016).

3. DISTRIBUTION DES OCCUPATIONS DANS LE BASSIN

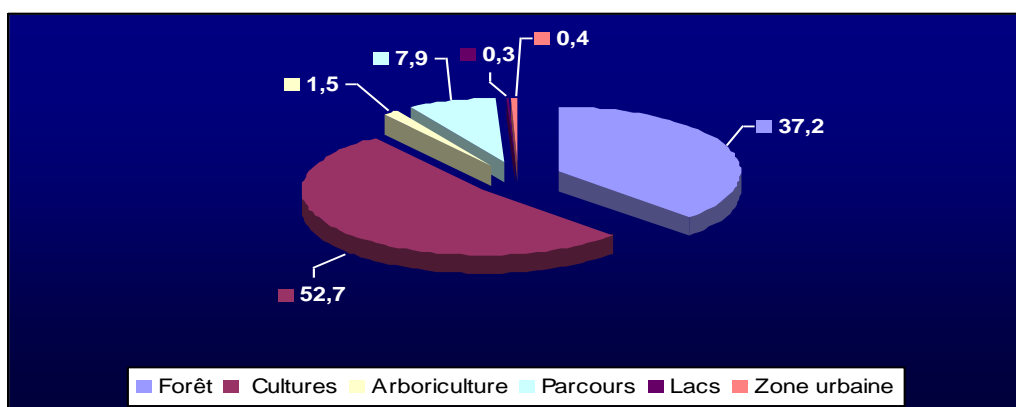


Figure 35 : Importance et répartition de l'occupation des terres dans le bassin versant (DREFNO, 2016)



Figure 36 : Forêt de chêne liège d'El Harcha à recouvrement très dense (Oulmès) (DREFNO, 2016)

Le Thuya de Berbérie, espèce thermophile, se localise sur les zones les plus chaudes et dégradées du bassin. Il se trouve généralement dans un état de développement non satisfaisant. Il occupe une superficie approximative de 9 907 ha.



Figure 37 : Peuplement de Thuya dégradé dans la région des Shouls (SBV5) (DREFNO, 2016)

Tableau 5: Renseignements généraux sur les forêts incluses dans le bassin versant (DREFNO et CDFS, 2016)

Forêt	Superficie totale (ha)	Sup. incluse BV (ha)	%	Essences principales	CDF	Production	Situation
Bouhssoussen	67290	33622	50,0	Chêne liège Chêne vert Thuya	Moulay Bouazza	Bois de Feu Parcours	Révision d'aménagement en cours
Sidi Ahsine	18360	7593	41,4	Chêne liège Chêne vert	Moulay Bouazza	Liège Bois de feu Parcours	Aménagée en 2000
Ouardane	10680	6231	58,3	Chêne liège Chêne vert	Moulay Bouazza	Liège Bois de feu Parcours	Aménagée en 2000
Ment	3957	3957	100	Chêne vert Thuya	Moulay Bouazza	Bois de feu Parcours	Non Aménagée

Ain Abélioune	17000	3100	18,2	Chêne vert Thuya	M'Rirt	Bois de feu Parcours	Non Aménagée
El Harcha	5175	5175	100	Chêne liège Chêne vert	Oulmès	Liège Parcours	Aménagée en 2004
Oued Bouregreg	14949	14949	100	Chêne liège Chêne vert	Oulmès	Liège Bois de feu Parcours	
Ait Ichou Est	2415	2415	100	Chêne liège Chêne vert	Oulmès	Liège Bois de feu Parcours	Aménagée en 2005
Ait Ichou Ouest	9823	7251	73,8	Chêne liège Thuya	Oulmès	Liège Parcours	Aménagée en 2001
Sehoul	8395	3083	36,7	Chêne liège Thuya	Salé	Liège	Aménagée en 2003
Timeksaouine	16160	11530	71,3	Chêne liège Thuya	Oulmès	Liège Parcours	Aménagée en 1999
Ait Hatem	22428	1116	5,0	Chêne liège Thuya	Oulmès	Liège Bois de feu	Aménagée en 1999
AIT Alla Ouest	4950	4660	94,1	Chêne liège Chêne vert Thuya	Oulmès	Liège Parcours	Aménagée en 1999
Ait Alla Est	7917	7917	100	Chêne liège Chêne vert Thuya	Oulmès	Liège Bois de feu Parcours	Aménagée en 2005
Zitchouine	21960	21960	100	Chêne liège Chêne vert Thuya	Oulmès	Bois de feu Parcours	Non Aménagée
Bourzime	14324	5366	37,5	Thuya	Oulmès	Bois de feu Parcours	Non Aménagée
Sidi Larbi	4080	4050	99,3	Thuya	Oulmès	Bois de feu Parcours	Non Aménagée
Mamora	130000	730	0,6	Chêne liège	S.A. Bahraoui	Liège Bois de feu	Aménagée
Koriat	15600	580	3,7	Essences secondaires	Tiflet	Bois de feu	Non Aménagée

						Parcours	
Oued Sator	2040	2040	100	Chêne liège Chêne vert	Tiflet	Bois de feu Parcours	Non Aménagée
Total	397503	147325	37,1				

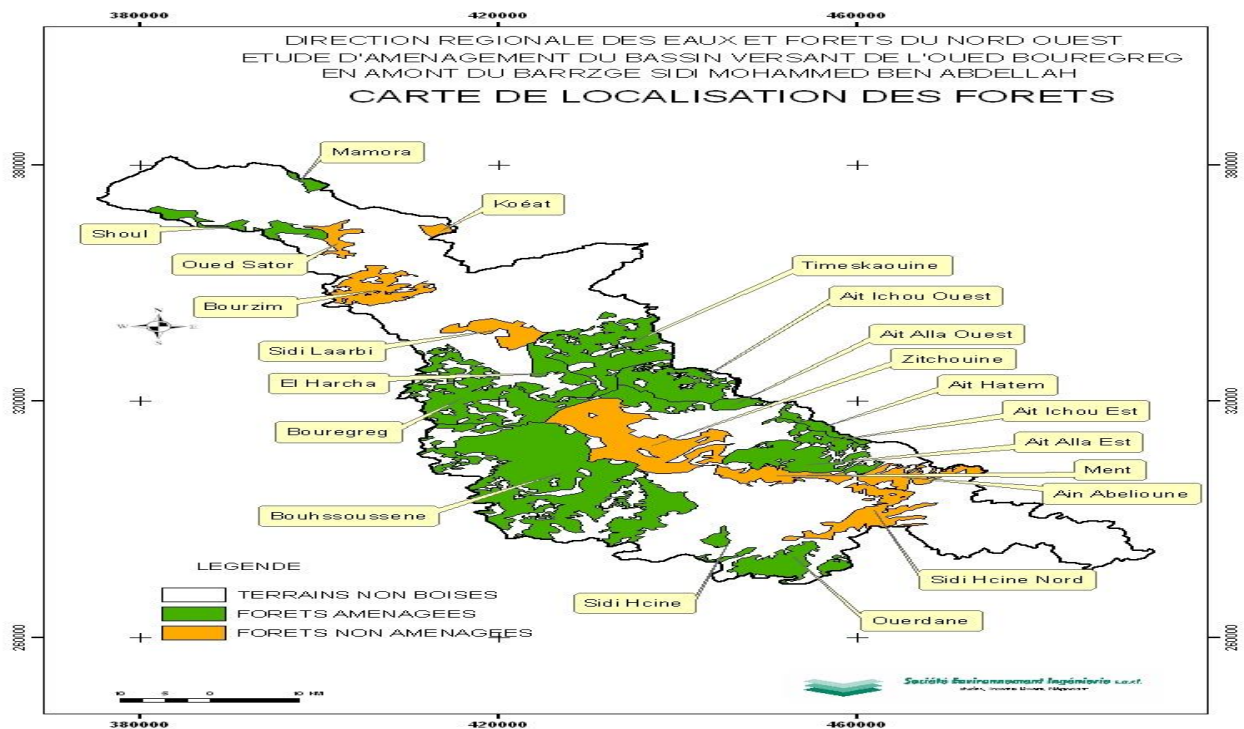


Figure 38 : Carte de localisation des forêts du Bassin Versant du Bouregreg

(DREFNO, 2016)

4. CLIMATOLOGIE

4.1. Températures

4.1.1. Températures Mensuelles

Les facteurs thermiques combinés avec les précipitations ont une influence sur la croissance des espèces végétales. Il s'avère utile de considérer les extrêmes de la température qui conditionnent le développement des plantes. En général, la température moyenne oscille

entre 15 et 18°C pour les stations dont les données sont disponibles comme le montre le (Tableau 6).

Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles (°C)
(CNRF, Rabat et documents d'études, 2016)

Mois	Tiddas	Oulmès	Sidi Ahsine	My. Bouazza	Khénifra
Septembre	23.2	21.2	21.5	21.6	25.6
Octobre	19.3	16.2	16.7	17.2	18.1
Novembre	14.6	11.5	13.6	12.4	13.7
Décembre	11.5	7.8	10.5	9.0	10.3
Janvier	9.8	7	9.7	8.3	9.7
Février	11	8.7	8.2	9.6	10.7
Mars	13.6	10.7	12.1	10.8	13.4
Avril	16	13.1	13.6	12.8	16.2
Mai	18.7	15.8	16.6	15.8	20.3
Juin	22.6	20.9	22.4	21.0	26.5
Juillet	26.3	26.2	25.9	24.9	29.2
Août	26.3	26	26.9	26	29.2
Moyenne	17.7	15.4	16.5	15.8	18.5

Cependant la moyenne des minima atteint 3.2°C à Oulmès, Sidi Ahsine et Moulay Bouazza et moins de 2°C à Khénifra pour le mois le plus froid. Elle est de 4.5°C à Tiddas (Tableau 6).

Les valeurs maximales des mois les plus chauds sont enregistrés au mois de juin, juillet et Août et atteignent entre 30 à 40°C.

Tableau 7 : Températures maximales et minimales mensuelles par station
(CNRF, Rabat et documents d'études)

Mois		Températures moyennes maximales et minimales (°C)				
		Tiddas	Oulmès	Sidi Ahsine	My. Bouazza	Khénifra
Septembre	Min	15.5	14.6	14.5	14.2	15.0
	Max	30.9	27.9	28.5	36.2	28.9
Octobre	Min	12.5	11.1	10.7	11.1	9.4

	Max	26.1	21.2	22.7	26.9	23.2
Novembre	Min	8.7	7.4	8.3	6.9	5.6
	Max	20.5	15.6	18.9	21.9	17.9
Décembre	Min	6	4	4.8	5.0	2.5
	Max	17	11.5	16.3	18.1	14.1
Janvier	Min	4.5	3.2	7.8	3.2	1.5
	Max	15.2	10.8	11.6	16.9	13.4
Février	Min	5.4	4.3	3.2	4.3	2.8
	Max	16.5	13	13.3	18.7	14.9
Mars	Min	7.8	6	6.4	4.6	5.0
	Max	19.5	15.4	17.9	21.9	17.0
Avril	Min	9.7	8.1	7.8	5.8	7.5
	Max	22.3	18	19.5	25	19.2
Mai	Min	11.9	10.4	10.6	8.5	10.6
	Max	25.5	21.2	23.0	30	23.2
Juin	Min	14.8	14.2	14.5	13.3	15.6
	Max	30.4	27.6	30.4	37.5	28.7
Juillet	Min	18	18.5	17.5	17.9	18.4
	Max	34.5	33.8	34.4	40.3	32.0
Août	Min	17.5	18.7	18.8	18.4	18.4
	Max	35.1	33.2	35.0	40	33.7
Moyenne	Min	11	10	10.4	9.4	9.3
	Max	24.4	20.8	22.6	27.8	22.2

4.1.2. Régime thermique

Les températures minimales (m) et maximales (M) jouent un rôle important dans la répartition spatiale et la croissance de la végétation. Ces deux paramètres permettent contrôler indirectement le niveau d'évapotranspiration des espèces végétales.

Tableau 8 : Indicateurs Thermiques (Debrach, 1953)

Amplitude (M-m)	Interprétation	Ecart (M+M)/2	Interprétation
Inférieur à 15°C	Climat insulaire	Inférieur à 10°C	Climat très froid
15 à 25 °C	Climat littoral	10-15 °c	Climat froid
25 à 35 °C	Climat semi Continental	15-20°C	Modéré
Supérieur à 35 °c	Climat continental	Supérieur à 20C	Climat chaud

En se basant sur les valeurs des indicateurs précités, il apparaît que le régime thermique au niveau du bassin versant est caractérisé dans sa majorité par un climat semi continental de type modéré comme indiqué par le (Tableau de synthèse 9).

Tableau 9 : Régime Thermique (CNRF, Rabat et documents d'études)

Stations	M°C	m °C	M-m	(M+m)/2	D°. Continentalité	Type de climat
Rabat	28.4	8.1	20.3	18.2	Littoral	Climat Modéré
Tiflet	35.8	5.6	30.2	20.7	Semi continental	Climat Modéré
Roummani	36.0	4.0	32.0	20	Semi continental	Climat Modéré
Oulmès	33.8	3.2	30.6	18.7	Semi continental	Climat Modéré
Khénifra	40.3	1.2	39.1	20.7	Continental	Climat Modéré
My Bouazza	33.7	3.2	32.8	18.4	Semi continental	Climat Modéré
Sidi Ahsine	35	3.2	31.8	19.1	Semi continental	Climat Modéré
Tiddas	35.1	4.5	30.6	19.8	Semi continental	Climat Modéré
Khémisset	36	5	31	20.5	Semi continental	Climat Modéré
Timekasouine	34	4	30	19	Semi continental	Climat Modéré

4.2. Pluviométrie

Les précipitations au niveau du bassin versant sont soumises à trois influences principales : la latitude qui joue à l'échelle du pays, l'éloignement par rapport à la mer et l'altitude. Cette dernière constitue le facteur déterminant dans l'observation des différences de hauteurs d'eau reçues.

4.2.1. Précipitations annuelles

Les données relatives aux précipitations moyennes annuelles ont souvent une valeur indicative. En effet elles permettent de caractériser le climat dans sa globalité (année pluvieuse ou de sécheresse...). L'analyse du (Tableau 10) montre que les précipitations moyennes annuelles au niveau du bassin versant sont d'une manière générale situées entre 400 mm et 800 mm/an. Elles sont très variables d'une zone à une autre.

Tableau 10 : Précipitations moyennes annuelles (CNRF, Rabat et DRH, Rabat)

Station	Altitude (m)	Pluviométrie (mm/an)
Aguibat Ezziar	90	417
Ain Harrak	400	392
Ain Kohel	630	401
Ain Labiod	971	492
Ain Harcha	267	414
Bir Ameer	150	512
Boukhmis	900	466
Dar lâaroussi	827	589
El Harcha	890	797
Lalla Chafia	180	360
Mâaziz	220	526
My Bouazza	1070	563
Moumou	960	500
Oulmès	1050	773
Sidi Ahsine	1200	603
Sidi Allal El Behraoui	178	501
Sidi Amar	240	387
SMBA	148	463
Souk Sebt Ait Ikkou	335	452
Tiflet	320	529
Tifoughaline	1259	578
Timeksaouine	750	562
Tsalat	630	458
Tiddas	450	478

Toutefois, les zones considérées comme arrosées dans le bassin sont El Harcha, Oulmès, Moulay Bouazza, Mâaziz, Dar Lâaroussi, Bir Ameer, Tifoughaline, Timeskaouine et Sidi Ahssine où la pluviométrie moyenne annuelle dépasse 500 mm/an. Les zones de faibles précipitations sont représentées par, Ain Harrak, Ain Harcha, Lalla Chafia et Sidi Amar où la pluviométrie moyenne annuelle est inférieure à 400 mm/an. L'origine de cette différence observée dans les précipitations moyenne annuelle entre les zones est due principalement à l'altitude.

4.2.2. Précipitations moyennes mensuelles

L'analyse des données des différentes stations pluviométriques montre que les précipitations mensuelles sont irrégulières dans le temps et dans l'espace comme montre le (Tableau 11) et (la Figure 44). Pour la majorité des stations, les précipitations sont plus concentrées dans période allant de décembre à fin mai avec des maxima enregistrés au mois de décembre.

Tableau 11 : Pluviométrie moyenne mensuelle (CNRF, Rabat et DRH, Rabat)

Station	Pluviométrie moyenne mensuelle (mm)											
	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Aguibat Ezziar	8	29	58	66	74	57	45	51	18	8	1	1
Ain Harrak	15	27	55	66	52	45	36	54	29	5	1	7
Ain Kohel	9	39	47	55	54	65	43	49	21	9	3	8
Ain Labiod	14	53	37	63	67	95	51	47	33	19	4	9
Ain Harcha	13	24	52	54	57	52	48	40	17	9	0	0
Bir Ameer	8	53	25	106	73	60	59	97	22	7	0	1
Boukhmis	21	34	48	52	50	58	59	57	38	20	12	17
Dar Lâaroussi	15	47	60	103	76	85	67	69	31	17	11	8
El Harcha	24	64	101	144	120	98	101	75	44	18	4	4
Lalla Chafia	10	33	41	62	50	47	45	45	19	6	1	2
Mâaziz	23	44	50	73	69	93	61	60	28	15	10	0
My Bouazza	8	41	57	73	89	101	65	68	40	18	1	0
Moumou	18	38	53	63	65	81	65	56	30	15	10	6
Oulmès	16	52	90	118	118	102	87	106	50	25	4	5
S.A.Bahraoui	12	38	69	91	73	72	52	52	26	13	0	3
Sidi Ahsine	25	51	66	85	71	89	75	72	33	23	7	6
Sidi Amar	9	31	52	63	54	58	45	40	24	8	1	1
SMBA	14	32	65	95	76	66	46	43	17	7	1	2
Souk Sebt	13	52	36	55	51	57	75	67	26	15	2	2

Tiflet	7	58	34	58	77	104	74	66	44	6	1	0
Tifoughaline	18	37	58	109	72	91	51	67	30	23	13	11
Timeksaouine	13	53	55	87	72	80	64	71	36	16	11	4
Tsalat	15	41	51	63	64	69	56	46	30	11	5	6
Tiddas	14	38	61	84	71	56	64	51	27	11	0	1
Moyenne	14,3	42,0	55,0	78,7	70,6	74,2	59,8	60,4	29,7	13,5	4,3	4,3
CV	0,36	0,25	0,30	0,30	0,26	0,26	0,25	0,27	0,30	0,45	1,04	0,97

En effet, les mois de décembre à février enregistrent une précipitation moyenne mensuelle allant de 71 à 79 mm, contre 30 à 60 mm pour les mois de mars à mai. Juin, juillet, août et septembre sont les mois qui correspondent à de faibles précipitations qui ne dépassent pas 14 mm/mois.

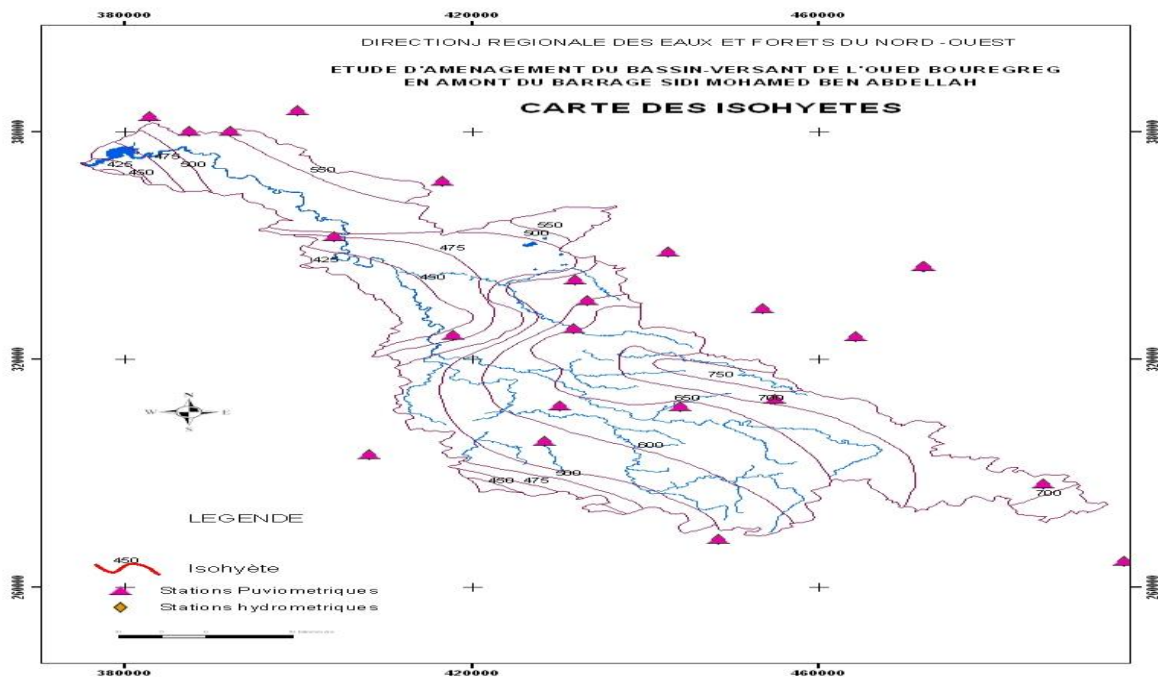


Figure 39 : Carte des Isohyètes (DREFNO, 2016)

La pluviométrie moyenne maximale se caractérise par un pic principal en hiver et un pic secondaire au printemps. Ainsi, pour la période hivernale, elle atteint entre 226 à 233 mm/mois. Elle varie par contre entre 110 à 175 mm/mois pour la saison printanière.

Tableau 12 : Pluviométrie moyenne maximale mensuelle (CNRF, Rabat et DRH, Rabat)

Station	Pluviométrie moyenne maximale mensuelle (mm)											
	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Aguibat Ezziar	63	123	175	205	277	193	131	138	101	50	5	20
Ain Harrak	42	64	229	138	131	111	131	126	137	15	2	24
Ain Kohel	26	118	139	141	99	211	92	133	64	21	6	14
Ain Labiod	56	128	122	139	200	334	230	133	103	49	9	17
Ain Harcha	64	58	132	198	199	314	218	195	129	54	37	23
Bir Ameer	15	147	54	205	167	91	112	145	49	21	1	5
Boukhmis	61	118	136	254	160	162	383	169	214	82	58	72
Dar Lâaroussi	71	180	125	449	199	314	218	195	129	54	37	23
El Harcha	68	185	238	219	312	340	185	288	113	65	18	25
Lalla Chafia	64	133	89	238	260	195	149	126	78	30	12	14
Mâaziz	46	88	106	126	139	160	137	131	77	23	14	0
My Bouazza	30	217	167	180	191	299	141	204	149	127	11	0
Moumou	74	182	132	246	188	206	257	234	81	52	36	31
Oulmès	62	178	221	210	304	319	170	274	109	56	12	14
S.A.Bahraoui	51	139	164	318	157	211	142	121	175	67	1	15
Souk Sebt	52	202	105	143	124	127	137	143	85	35	10	8
Sidi Ahsine	64	166	186	291	167	199	198	286	124	99	30	42
Sidi Amar	51	107	100	274	216	207	135	117	85	34	9	13
SMBA	65	79	162	345	355	409	126	121	96	26	3	21
Tiflet	21	144	71	136	165	192	153	132	105	15	5	2
Tifoughaline	56	99	123	443	216	200	163	273	89	40	76	32
Timeksaouine	57	232	141	219	215	257	199	240	89	58	45	12
Tsalat	69	193	114	235	279	264	220	140	147	63	45	48
Tiddas	63	80	157	330	345	397	142	133	105	35	6	15
Moyenne	53,8	140,0	141,2	236,8	211,0	238,0	173,7	174,9	109,7	48,8	20,3	20,4
CV	0,30	0,35	0,33	0,38	0,33	0,36	0,35	0,34	0,33	0,55	1,00	0,80

Les précipitations moyennes minimales montrent que la période s'étendant de juin à septembre peut être considérée comme une période où le risque de déficit pluviométrique est plus accentué. Ain Labiod, Tsalat Aguibat Ezziar, Tamedrouss, Sidi Amar sont les régions qui connaissent un déficit pluviométrique plus important où la pluviométrie minimale est inférieure à 5 mm/an.

L'écart ou l'amplitude constaté entre les précipitations minimales et celle maximales du même mois est illustrées par la (Figure 40). Cette dernière montre que cet écart enregistre les valeurs les plus importantes durant la saison pluvieuse et notamment le mois de décembre. Cet écart avoisine les 200 mm /mois. L'été reste la saison où les dits écarts sont relativement faibles et approchent une amplitude moyenne variable de 20 à 40 mm/mois.

Tableau 13 : Pluviométrie moyenne minimale mensuelle (CNRF, Rabat et DRH, Rabat)

Station	Pluviométrie moyenne minimale mensuelle (mm)											
	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Aguibat Ezziar	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0
Ain Harrak	1	1	2	8	7	3	1	14	0	1	1	0
Ain Kohel	1	4	3	2	5	4	6	1	1	0	0	3
Ain Labiod	1	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
Ain Harcha	0	0	6	6	6	5	2	0	0	0	0	0
Bir Aneur	0	6	2	1	5	4	6	6	1	0	0	1
Boukhmis	0	0	0	0	2	6	5	1	0	0	0	0
Dar Lâaroussi	0	4	8	3	7	3	0	8	0	2	1	1
El Harcha	2	5	7	20	22	4	25	16	1	3	0	0
Lalla Chafia	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Mâaziz	5	19	10	6	11	42	14	3	6	9	3	0
My Bouazza	0	0	0	0	16	14	6	10	0	0	0	0
Moumou	0	2	0	6	2	3	5	5	4	0	0	0
Oulmès	1	4	8	18	20	2	20	15	0	1	0	0
S.A.Bahraoui	0	0	2	0	6	5	7	0	3	0	0	0
Sidi Ahsine	0	5	0	4	2	12	10	2	0	3	0	0
Sidi Amar	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
SMBA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Souk Sebt	0	0	0	0	16	5	20	22	0	0	0	0
Tiflet	0	0	9	0	13	49	27	3	0	0	0	0
Tifoughaline	0	6	2	1	5	4	6	6	1	0	0	1
Timeksaouine	2	2	8	12	16	6	3	1	2	1	1	0
Tsalat	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0
Tiddas	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0
Moyenne	0,5	2,3	2,7	2,9	5,8	7,0	6,3	4,1	0,9	0,8	0,3	0,3

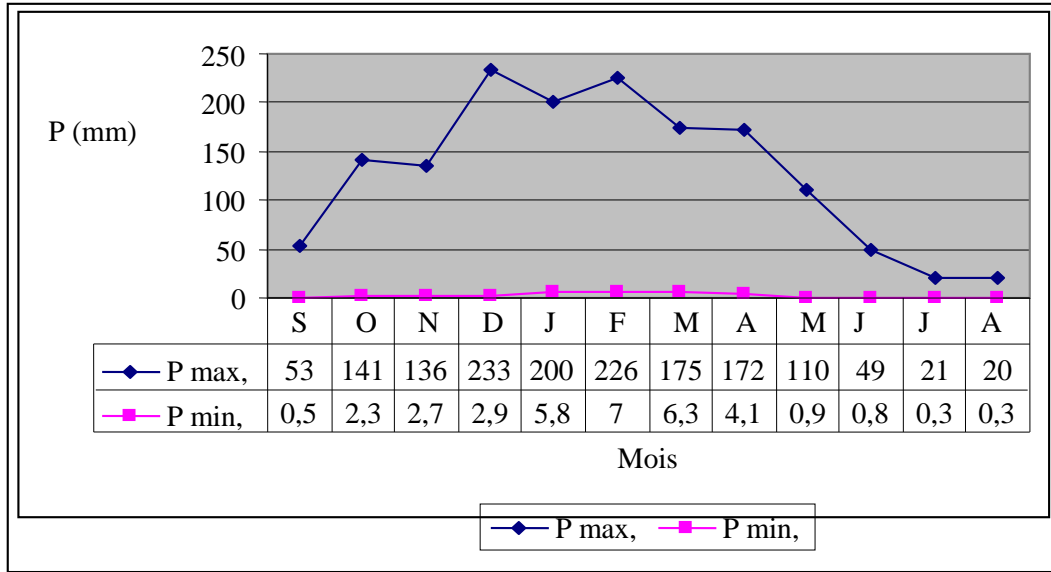


Figure 40 : Représentation graphique des précipitations mensuelles moyennes Maximales et Minimales du bassin (DREFNO, 2016)

4.2.3. Précipitations Journalières

❖ Intensité Pluviométrique

Si les précipitations moyennes annuelles ou mensuelles permettent de donner une idée générale sur le climat de la zone d'étude, il apparaît fort utile d'associer les jours de pluie au volume moyen annuel pluviométrique pour donner une idée sur l'intensité journalière moyenne des pluies. Cette intensité constitue un facteur important dans le phénomène de l'érosion des sols. Le (Tableau 14) donne une valeur moyenne journalière des précipitations. Il ressort de ce tableau que l'intensité moyenne varie de 8mm/j à 10 mm/j. Cette intensité est de 8 mm/j pour l'ensemble des stations avec toutefois une intensité plus accrue au niveau de la zone de Moumou et de Sidi Ahsine.

Tableau 14 : Intensité moyenne journalière (CNRF, Rabat)

Station	Précipitation (mm/an)	nombre moyen de jours de pluie/an	Intensité moyenne Journalière (mm/jour)
Ain Harcha	414	46	8.0
Ain Labiod	492	50	9.8
Boukhmis	466	52	9.0
Moumou	500	50	10.0
Sidi Ahsine	603	57	10.6
Sidi Allal Bahraoui	501	58	8.6
Souk Sebt Ait Ikkou	452	57	7.9
Moyenne		52,9	9,1

❖ Pluviométrie journalière Maximale

Les précipitations journalières maximales constituent un indicateur important dans la planification et la réalisation des ouvrages pouvant limiter les dégâts susceptibles d'être occasionnés par des crues. En effet, les pluies torrentielles dues à des chutes de pluies inopinées provoquent souvent des dégâts au niveau des infrastructures (routes, habitat,...). Elles induisent également des pertes de terre à l'aval et contribuent par conséquent à l'envasement de la retenue du barrage. Comme l'indique le (Tableau 15), les intensités journalières varient de 30 à 39 mm/j comme valeur moyenne et atteignent 55 à 105 mm/j comme valeur moyenne maximale. Le seuil minimal de ces chutes de pluie inopinées est de 5 à 18 mm/j. Ain Lahite (33 à 105 mm/j) et Moumou (34 à 90 mm/j) sont les régions qui connaissent les averses les plus importantes au niveau de la zone du bassin.

Tableau 15 : Précipitation journalière maximale (CNRF, Rabat)

Station	Moyenne (mm)	Maximum (mm)	Minimum (mm)
Boukhmis	30	59	15
Moumou	34	90	12
Sidi Ahsine	39	55	20
Sidi Allal El Behraoui	39	75	18
Souk Sebt Ait Ikkou	33	56	5

4.2.4. Régime pluviométrique saisonnier

❖ Coefficient d'Angot

Dans un climat continental où le déficit hydrique est un élément décisif pour le maintien de la végétation. La moyenne des précipitations reste une notion aléatoire et purement indicative car la répartition saisonnière de la pluviométrie est plus intéressante à considérer que la quantité d'eau qui tombe annuellement. Comme évoquées dans les parties précédentes, les précipitations sont assez fréquentes au printemps et en hiver, le maximum de la pluviométrie est enregistré entre janvier et mars. La saison estivale sèche est caractérisée par des pluies souvent brèves à caractère orageux et où le déficit hydrique est très accentué. En Automne, il y a reprise progressive des pluies avec un maximum au mois d'Octobre. La fréquence relative des pluies saisonnières montre la prédominance d'un seul type de distribution : Hiver et Printemps. Quant au régime pluviométrique saisonnier, il est caractérisé par le coefficient d'Angot (CA) qui est donné par la relation suivante :

$$CA = \frac{\text{Pluviosité saisonnière}}{\text{Pluviosité annuelle}} \times K$$

K=1000/247 pour Hiver,
 K=1000/252 pour Printemps et été
 K=1000/249 pour Automne

Où k est le coefficient permettant de corriger le nombre de jours pour chaque saison. Tels que définis par Angot. L'analyse du régime saisonnier des stations (Tableau 16) laisse conclure que la zone d'étude appartient dans sa majorité à un régime saisonnier du type HPAE. La plupart des stations montre un pic principal en hiver et un pic secondaire au printemps (CNRF, 2016).

Tableau 16 : Régime Pluviométrique Saisonnier (CNRF, Rabat et DRH, Rabat)

Station	Pluviométrie par Saison (mm)				Coefficient d'Angot				Régime Saisonnier
	Aut.	Hiv.	Prin.	Été	Aut.	Hiv.	Pri.	Été	
Aguibat Ez.ziar	96	197	114	10	0,91	1,74	1,08	0,29	HPAE
Ain Harrak	98	163	119	12	0,94	1,75	1,12	0,19	HPAE
Ain Kohel	94	174	113	19	0,85	1,85	1,06	0,26	HPAE
Ain Labiod	104	225	131	32	1,04	1,64	1,02	0,31	HPAE
Ain Harcha	65	106	65	9	0,85	1,43	0,86	0,12	HPAE
Bir Aneur	86	239	178	9	0,89	1,39	1,31	0,41	HPAE
Boukhmis	104	160	154	49	0,83	1,81	1,13	0,24	HPAE
El Harcha	189	362	220	26	0,95	1,84	1,10	0,13	HPAE
Lâaroussi	122	264	167	36	0,92	1,92	1,09	0,09	HPAE
Lalla Chafia	84	158	110	8	0,94	1,78	1,21	0,09	HPAE
Mâaziz	117	235	149	25	0,89	1,81	1,12	0,19	HPAE
My Bouazza	107	264	174	19	0,76	1,89	1,22	0,14	HPAE
Moumou	109	209	151	31	0,88	1,69	1,20	0,25	HPAE
Oulmès	158	338	243	34	0,82	1,77	1,25	0,17	HPAE
Tiflet	99	239	184	7	0,95	1,91	1,03	0,13	HPAE
Sidi Ahsine	142	245	180	36	0,95	1,64	1,18	0,24	HPAE
Sidi Amar	92	175	110	11	0,95	1,83	1,13	0,11	HPAE
Sidi.Allal.Bah	119	236	130	16	0,97	2,07	0,91	0,07	HPAE
SMBA	111	236	106	9	0,90	1,46	1,48	0,17	HAPE
Souk Sebt	102	163	169	19	0,88	2,09	0,98	0,07	HPAE
Tifoughaline	113	272	148	46	0,79	1,90	1,01	0,31	HPAE
Timeksaouine	121	239	171	31	0,86	1,72	1,21	0,22	HPAE
Tsalat	107	196	132	22	0,94	1,73	1,15	0,19	HPAE
Tiddas	113	211	142	12	0,95	1,79	1,18	0,10	HPAE

4.2.5. Synthèse Bioclimatique

4.2.5.1. Quotient Pluviothermique d'Emberger.Q2

Le quotient d'Emberger permet de caractériser le climat méditerranéen du point de vue écologique (Sauvage, 1963). Ce quotient est défini comme suit :

$$Q2 = 1000P / ((M+m) * (M-m) / 2)$$

P : moyenne des précipitations annuelles (mm)

M : Moyenne des maxima journaliers du mois le plus chaud (degré Kelvin)

$$M (^{\circ}K) = t^{\circ}C + 272,6$$

m : moyenne des minima journaliers du mois le plus froid (degré kelvin)

$$m (^{\circ}K) = t^{\circ}C + 272,6$$

Ce quotient permet de distinguer une variété d'étages bioclimatiques régnant au niveau du bassin versant. Ces étages bioclimatiques varient du semi aride au subhumide avec des variantes fraîches à chaudes. Les principaux bioclimats rencontrés dans le bassin sont décrits par le (Tableau 17) et illustrés par la (Figure 46) (CNRF, 2016).

Tableau 17 : Bioclimat du Bassin versant (CNRF, Rabat et documents d'études)

Station	Max (°C)	min (°C)	Q2	Bioclimat
Rabat	28.4	8.1	83.99	Subhumide chaud.
Roummani	36.0	4.0	37.82	Semi aride tempéré
Oulmès	33.8	3.2	69.49	Subhumide tempéré
Khénifra	40.3	1.2	55.0	Semi aride frais
Tiflet	35.8	5.6	56.4	Semi aride tempéré
My Bouazza	33.7	3.2	67.5	Subhumide tempéré
Sidi Ahsine	35	3.2	79.6	Sub humide tempéré
Tiddas	35.1	4.5	53.4	Semi aride tempéré
Khémisset	36	5	55,4	Semi aride tempéré
Timeksaouine	34	4	64.2	Sub humide tempéré

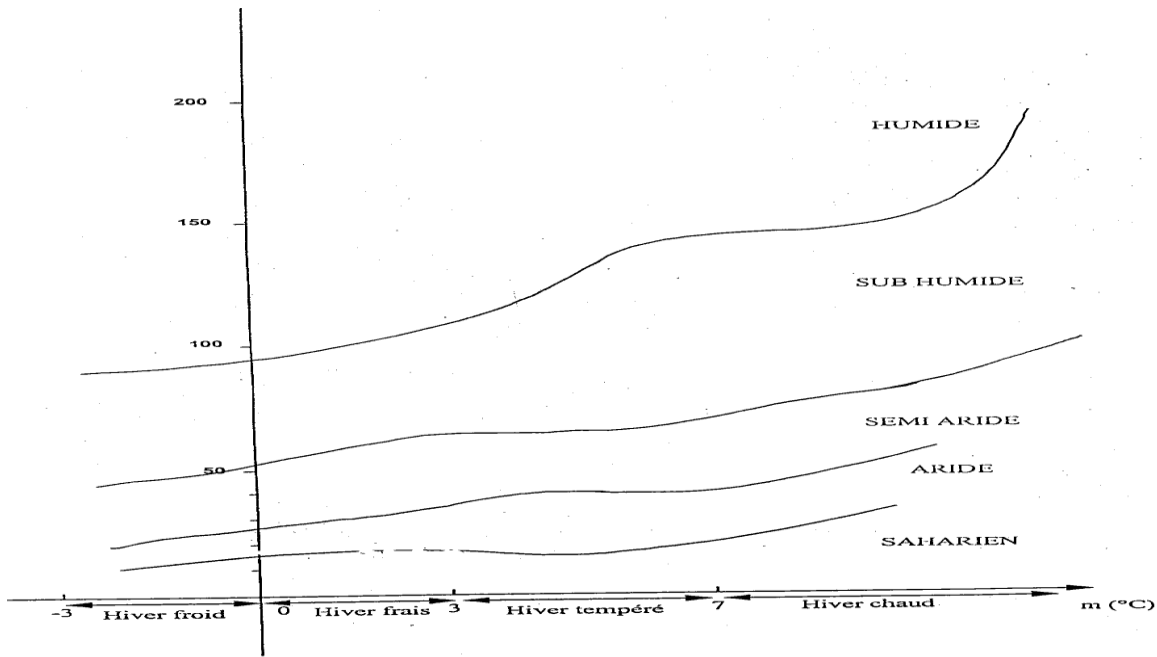


Figure 41 : Classification des Stations selon le Climagramme d'Emberger (CNRF, 2016)

❖ **Diagrammes Ombrothermiques**

Selon les diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gausson des stations dont les données sont disponibles, Il s'avère que la période sèche correspond aux mois de juin à septembre pour l'ensemble des stations comme le montrent les (Figures 42 à 45). Toutefois pour la zone de Tiddas, la période sèche s'étend de fin avril au mois d'octobre. Quant à la période pluvieuse, elle s'étale du mois d'Octobre à la fin du mois Mai (CNRF, 2016).

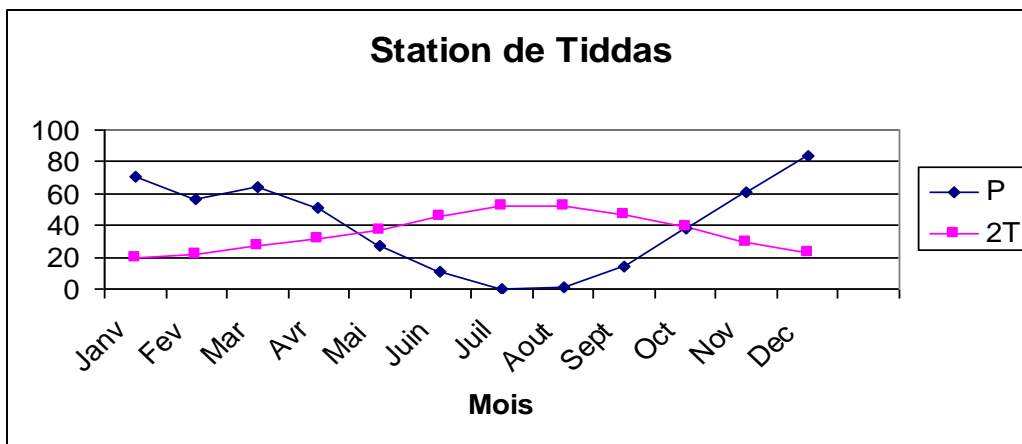


Figure 42 : Courbe ombrothermique de la station de Tiddas

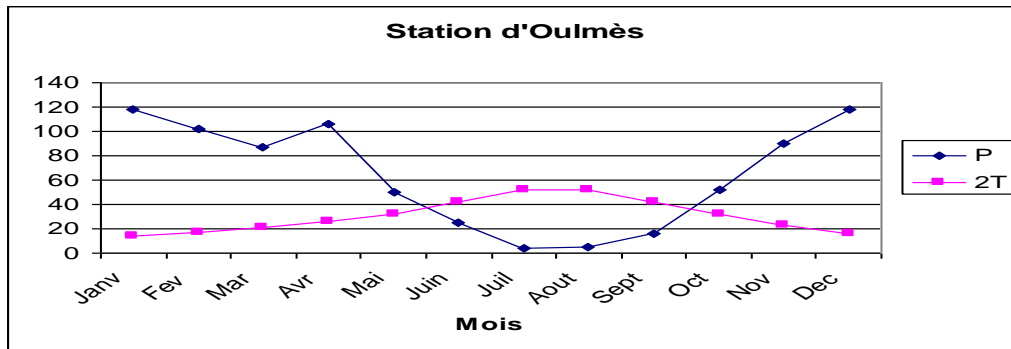


Figure 43 : Courbe ombrothermique de la station d'Oulmès.

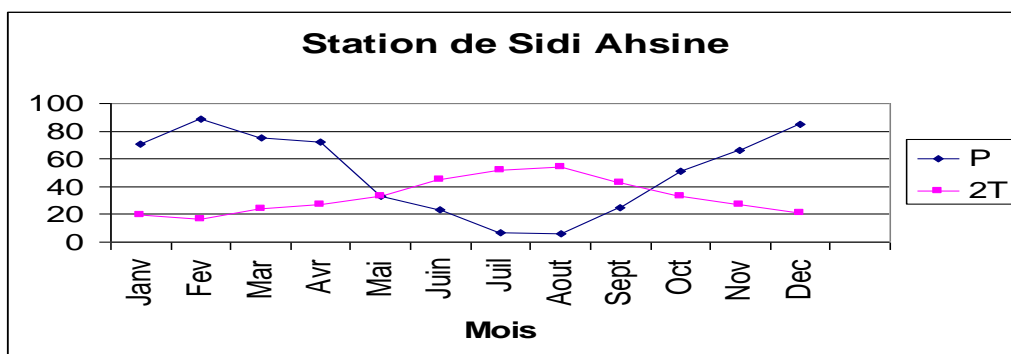


Figure 44 : Courbe ombrothermique de la station de Sidi Ahsine

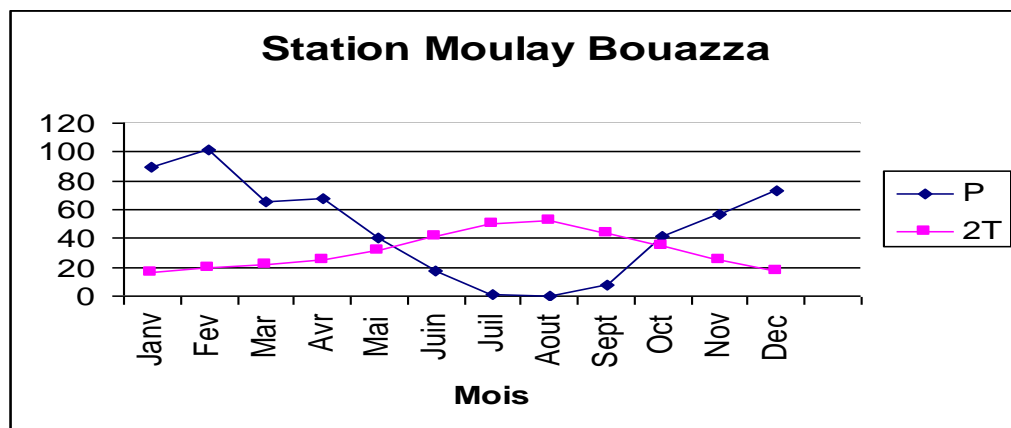


Figure 45 : Courbe ombrothermique de la station de Moulay Bouazza.

4.3. Autres Facteurs

4.3.1. L'évaporation

L'évaporation moyenne dans la région varie entre 1500 et 1600mm/an. Elle augmente considérablement en été et enregistre les valeurs les plus basses en février.

4.3.2. L'enneigement

C'est un facteur important dans la reconstitution de la nappe phréatique et l'amélioration du bilan hydrique. Cependant l'absence de données relatives aux précipitations neigeuses ne permet pas d'approfondir l'étude sur ce phénomène. La période de neige se situe entre le mois de décembre et le mois de février sans que la couche de neige persiste. Cette période correspond également à la période de gel qui s'étend jusqu'au mois de mars. Toutefois la station d'Oulmès signale parfois la présence de la neige avec une persistance de 10 jours.

4.3.3. Les Gelées

En hiver, les gelées sont plus fréquentes et le nombre moyen de jours de gelées signalés par la station d'Oulmès est 20 jours par an.

4.3.4. Les Vents

Dans la zone d'étude, on note deux types de vents : En été, des vents chauds et secs (Chergui). En hiver, les vents sont froids et sont à l'origine de l'accentuation de la gelée dans la zone et en particulier les parties du bassin à hautes altitudes. Les vents d'ouest dominent dans cette saison. Elles sont violents et généralement, chargés d'humidité, d'où leur influence significatives sur les températures (CNRF, 2016).

5. HYDROLOGIE

Le réseau hydrographique de l'Oued Bouregreg s'articule autour de deux rivières principales : O. ksiksou et O. Tabahhart drainant respectivement les SBV n°2 et 4. Ces deux affluents drainent toute la partie amont du bassin couverte par les stations de jaugeage Lalla Chafia et sidi Amar. Les SBV correspondants, de substratum imperméable et de pentes fortes, constituent un des principaux impluviums producteurs des eaux de surface dans le bassin versant. L'activité hydrologique du bassin versant de Bouregreg est étudiée qualitativement et quantitativement en analysant les caractéristiques et les données issues des cartes thématiques et les données de stations de mesure des débits situées à l'intérieur du bassin. (CID et ABHBC, 2007)

5.1. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique correspond à l'ensemble des cours d'eau naturels, permanents ou temporaires, qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant en amont du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA). L'oued Bouregreg est le cours d'eau principal du bassin versant. Il prend sa naissance au plateau de M'Rirt (Région du Moyen Atlas) sous le nom de l'oued M'Rirt et devient par la suite oued Aguenour qui cèdera sa place ou son nom à l'oued Bouregreg, approximativement au milieu du bassin versant.

-Les principaux affluents de l'oued Bouregreg sont de l'amont à l'aval :

Oued Ksiksou qui draine la grande partie de la rive gauche du bassin versant. Ces principaux affluents sont : l'oued Tabassat qui draine la partie amont. Les oueds Zoubir ; el Ma et Bou Knifene qui drainent la partie centre du bassin de l'oued Ksiksou et en fin, l'oued Sakkassel qui se trouve localisé dans la rive gauche de la partie aval. Oued Tajourout qui draine la partie centrale de l'oued Aguenour jusqu'au point de rencontre de ce dernier avec oued Bouregreg. Oued Tabahhart qui prend son origine dans la partie Est du bassin sous le nom de l'oued Chbika pour devenir oued Tenuous et finalement oued Tabahhart. Cet affluent draine une grande partie de la rive droite du bassin versant. Il comprend aussi d'autres affluents, en particulier l'oued Bou Mellal, l'oued el Mahsa et l'oued Sidi Raho. L'oued Bouregreg est également alimenté le long de son trajet par une multitude de cours d'eau permanents et temporaires ainsi que des châabats qui déversent directement sur l'oued (Figure 32).

Tableau 18 : Données générales sur les sous bassin versants.

SBV (n°)	Affluent principal	Superficie (km ²)	Localisation	Périmètre (Km)	Indice de Compacité
1	O. Aguenour	708,3	Partie amont du bassin versant	196	2,06
2	O. Ksiksou	1107	Rive gauche de la partie amont et centre du bassin versant	207	1,74
3	O. Bouregreg moyen	440,4	Partie centrale qui longe l'oued principal	158	2,11
4	O. Tabahhart	948,5	Rive droite de la partie centrale du bassin	222,5	2,02
5	O. Bouregreg bas	751,8	Partie aval du bassin	167,2	1,71
BV	O. Bouregreg	3956	Bassin versant entier	537	2,39

-Mobilisation des eaux de surface

Le barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah, mis en eau en 1974, constitue le principal ouvrage existant en matière de mobilisation des eaux de surface. D'une capacité totale de 480 Mm³, cet ouvrage a pour rôle principal la desserte en eau potable et industrielle de la zone côtière entre Rabat et Casablanca. Dans le but de satisfaire les besoins croissants en eau potable et industrielle de cette zone, le barrage SMBA a fait l'objet de surélévation de la cote 50 m à 70 m NGM dans le but d'augmenter la capacité utile du barrage à 1025 Mm³. Également, il est prévu la construction des barrages de Tiddas (O. Bouregreg) et de Ben Khémis (O. Grou) qui serviront à augmenter le pouvoir régulateur du barrage SMBA. Les eaux ainsi mobilisées permettront de subvenir aux besoins en eau potable et industrielle projetés à l'horizon 2020 et qui sont pour les villes de Rabat et Salé de 290 Mm³/an, contre 301 Mm³/an pour la zone de Casablanca-Mohammadia. Sans oublier bien sûr les besoins en eau d'irrigation qui atteindront 450 Mm³/an. Le barrage de Tiddas, qui relève du bassin objet de cette étude, permettra la mobilisation des eaux de surface d'un bassin versant de 2170 km². Sa capacité de stockage est de 592 Millions de m³. En plus de ce barrage, le bassin du Bouregreg renferme 7 barrages collinaires (Tableau 19) destinés essentiellement à l'abreuvement du cheptel (AC) et au développement de la PMH (Mokhtar, 2004).

Tableau 19 : Données sur les barrages collinaires situés à l'intérieur du bassin.

Barrage collinaire	Province ou Préfecture	Date de mise en service	Capacité (Mm³)	But
Arid	Khémisset	1985	0,70	A.C
Ait Lamrabtia	Khémisset	1985	0,20	A.C
Bouknadel	Khémisset	1999	1,00	A.C
Mahrouk	Khémisset	2001	1,00	A.C
Nkeila	Khémisset	1990	0,72	A.C
Ain Tourtoute	Khénifra	1987	0,85	I et A.C
Tskrame	Khénifra	1989	0,03	I et A.C

Tableau 20 : Données générales sur les stations hydrométriques (DRPE, 2012)

Station	Oued	Sup. BV (Km ²)	Date de mise en service	X (km)	Y (km)
AGUIBET EZZIAR	BOUREGREG	3800	1975	392566	367767
LALLA CHAFIA	BOUREGREG	3266	1971	408834	346611
SIDI AMAR	TABAHART	329	1977	425865	335236
TASLAT	GUENNOUR	690	1977	440043	303814
Barrage SMBA	BOUREGREG	9590	1977	375 200	371 500

Tableau 21 : Coefficients de ruissellement des stations de mesures hydrométriques (DRPE, 2012)

Station	Superficie Km ²	P. moyenne mm/an	Lame d'eau ruisselée mm/an	Cr Moy (%).
AGUIBET EZZIAR	3800	417	54	12,9
LALLA CHAFIA	3266	555,7	142,3	25,6
SIDI AMAR	329	387	77	19,8
TASLAT	690	458	78	17
Barrage SMBA	9590	463	77	16,6

-Apports en eau de surface

Le grand bassin est équipé de 9 stations hydrologiques dont quatre se trouvent à l'intérieur du bassin drainé par l'oued Bouregreg. Ces stations permettent de mesurer et de contrôler les écoulements de surface. Les études réalisées par la DRPE montrent que les bassins de l'oued Grou et de l'oued Bouregreg bien que de surface différentes, contribuent à peu près à égalité dans le débit qui atteint la retenue du barrage. Cela est attribué essentiellement à l'aridité du climat du bassin versant de l'oued Grou. Par conséquent, les apports en eau au niveau du barrage SMBA provenant de l'oued Bouregreg seront pris égale à la moitié des apports globaux.

-Eaux souterraines

En tenant compte des séries stratigraphiques et lithologiques dans la zone d'étude. Les ressources en eau souterraines sont très limitées à l'exception de quelques plages alluviales. Les ressources en eau souterraine, considérés mobilisables dans des conditions techniques et économiques acceptables sont peu importantes. Le contexte hydrogéologique défavorable du bassin du Bouregreg, constitué essentiellement de formations géologiques imperméables, est à

l'origine de l'absence de nappes d'eau souterraines. Les nappes existantes sont d'importance et d'extension très limitées. Elles sont localisées dans des dépressions alluvionnaires. D'une manière générale, toutes les nappes du bassin sont exploitées de façon intensive et enregistrent une baisse généralisée et progressive de leurs niveaux d'eau. Les eaux souterraines sont mobilisées surtout pour l'alimentation en eau potable rurale et l'irrigation de petites superficies. Les volumes mobilisés à partir des eaux souterraines sont estimés à 20 Mm³/an. Au niveau du bassin On y trouve deux nappes principales :

La nappe des Shoul : Elle est située en rive droite de l'oued Bouregreg avec un potentiel mobilisable de l'ordre de 8 Mm³/an. Elle présente un intérêt socio-économique local très important. Sujette à une surexploitation, cette nappe enregistre une baisse annuelle d'un mètre.

La nappe de Tanoubert : Elle est située dans la région de Mâaziz. Elle est localisée dans les alluvions de l'oued Tanoubert. Cette nappe se caractérise par un volume d'eau mobilisable de l'ordre de 1 Mm³/an. A l'instar de la nappe des Shoul, cette nappe est sujette à des exploitations abusives. Les prélèvements sont supérieurs au rythme d'alimentation de la nappe. Les mesures piézométriques effectuées au niveau de cette nappe par la DRPE confirment cette surexploitation. En effet, cette nappe enregistre des fluctuations saisonnières importantes qui peuvent aller jusqu'à 4 m (DRPE, 2012).

D'autres données relatives à ces deux nappes sont décrites par le (Tableau 22).

Tableau 22 : Caractéristiques des nappes souterraines du bassin (DRPE, 2012)

Nappe	Superficie km ²	Épaisseur m	Profondeur m	Perméabilité m ² /s	Productivité L/s
<i>Shoul</i>	200	4	20 à 60	5.10 - 4	1 à 2
<i>Tanoubert</i>	15	Sup. à 10	5 à 10	1.10 - 3	

5.2. Débits annuels moyens

Les mêmes observations et déductions faites au sujet des apports annuels moyens s'appliquent aux débits annuels moyens enregistrés au niveau des stations hydrométriques situées à l'intérieur du bassin (Tableau 23). Le débit moyen le plus faible est observé au

niveau de la station hydrométrique de Sidi Amar qui couvre le sous bassin versant n°5. Les sous bassin versant n°1 correspondant à la partie amont du bassin présente aussi un débit moyen annuel de moindre importance (1,7 m³/s).

Tableau 23 : Débits moyens annuels (m³/s) observés aux stations hydrométriques (DRPE, 2012)

	Aguibet Ezzair	Lalla Chafia	Sidi Amar	Tsalat	SMBA
M	6.5	7.3	0.8	1.7	19.3
Cv	0.989	0.970	1.362	0.886	0.841
Max	21	27	4	5	61
Min	0	0	0	0	2

Les variations enregistrées au niveau des débits sont plus importantes que celles observées au niveau des apports globaux. Les valeurs des coefficients de variation afférents à ses débits confirment l'importance de cette variabilité. Le site du barrage SMBA présente un CV de 0,841 pour les débits annuels moyens. La lecture de données montre que le bassin versant situé en amont de la station de Lalla Chafia est le bassin le plus productif en eaux de surface. Cela paraît évident, parce que c'est le bassin qui reçoit le maximum de précipitations dans un espace formé essentiellement d'un substratum schisteux imperméable et de pentes fortes. Cette partie du bassin constitue un lieu privilégié pour la genèse des crues qui pourraient constituer une menace pour les zones avales. Les apports augmentent lors du passage de la station de Tsalat à la station de Lalla Chafia et diminuent de cette dernière à Aguibet Ezziar qui se trouve à l'aval et sur le même oued. Cette diminution s'explique par deux raisons principales :

- L'oued Bouregreg coule à partir de la station de Lalla Chafia sur des terrasses alluviales qui l'infiltration des eaux dans le sol;
- Les prélèvements directs de l'eau par pompage pour les besoins de l'agriculture deviennent excessifs du fait que la partie aval du bassin est une zone agricole (DRPE, 2012).

5.3. Débits mensuels

Les débits moyens mensuels varient d'une station à l'autre et se caractérisent également par des variations importantes dans le temps. Ils varient entre 0.12 et 0.17 m³/s en périodes

d'étiage (juillet et août) contre 7.5 à 22.9 m³/s durant la saison pluvieuse. D'une manière générale, les écoulements se répartissent en trois phases :

- Une première phase qui correspond à la période de septembre à novembre qui se caractérise par de faibles écoulements
- Une deuxième phase qui correspond à la période d'écoulements élevés. Elle s'agit de la période située entre décembre à avril.
- Une troisième phase d'écoulement moyen à bas et qui correspond à la période de mai à août. (DRPE, 2012)

Tableau 24 : Débits saisonniers (DRPE, 2012)

Stations	Débit mensuel Moyen (m ³ /s)	Débit mensuel max. (m ³ /s)	Débit mensuel min. (m ³ /s)	Débit automne (%)	Débit hiver (%)	Débit printemps (%)	Débit été (%)
Tsalat	2.51	7.50	0.40	6.53	62.87	29.80	2.41
Lalla Chafia	5.46	22.88	0.7	6.37	58.50	33.49	1.63
Aguibet Ezziar SMBA	4.90	17.19	0.11	7.65	57.52	33.27	1.55 ;

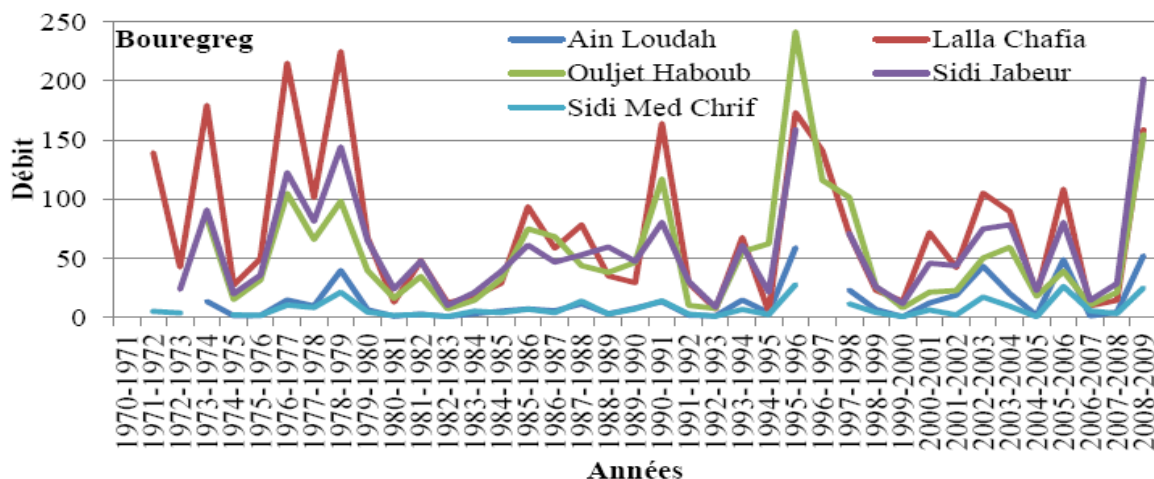


Figure 46 : Evolution des Séries des Débits dans le Bassin Versant du Bouregreg (M3/S) (SIGMED, 2012)

5.4. Bilan hydrologique

A défaut de disponibilité des données nécessaires au calcul du bilan hydrologique, on se limitera, donc, qu'au calcul du déficit d'écoulement moyen au niveau du bassin versant. Ce déficit (D) représente les pertes dues à l'évaporation et l'évapotranspiration du bassin versant, aux infiltrations et aux eaux captées pour l'irrigation. Il est exprimé par la différence entre les apports réels des précipitations et la lame d'eau écoulée.

$$D = AP - LE$$

AP : apport des précipitations

LE : lame d'eau écoulée à l'exutoire

Les apports des précipitations sont estimés en utilisant les précipitations moyennes pondérées des sous bassins versants. Quant au volume moyen annuel enregistré au niveau de la retenue du barrage, il est estimé d'après la lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin versant c'est-à-dire au niveau du barrage SMBA (Tableau 27).

Donc :

$$AP = 2206,5 \text{ M m}^3$$

LE = lame d'eau ruisselée/an * superficie du bassin

$$LE = 77\text{mm} * 395600 \text{ ha} = 0,077\text{m} * (395600 * 10000 \text{ m}^2) = 304,7 \text{ Mm}^3$$

En conséquence :

$$D = 2206,5 - 304,7 = 1901,8 \text{ M m}^3$$

Ce résultat montre que le déficit d'écoulement au niveau du bassin versant est de l'ordre de 86% (DRPE, 2012).

Tableau 25 : Apports des précipitations dans le bassin versant

S.B.V (n°)	Précipitation Moyenne (mm)	Superficie (ha)	Apport annuel moyen (M.m ³ /an)
1	670	70830	
2	565	110700	625,5

3	615	44040	270,8
4	465	94830	441,0
5	525	75180	394,7
Bassin versant		2206,5	

5.5. Caractéristiques des crues du Bassin Versant du Bouregreg

La crue d'un cours d'eau est un phénomène naturel lorsque la pluie est soutenue et généralisée au niveau du bassin. De nos jours, ce phénomène devient très rare et on assiste à des crues intenses et amplifiées. Les changements climatiques et l'action anthropique sont parmi les principaux facteurs qui contribuent à l'apparition et l'amplification des crues. Les précipitations orageuses, la dégradation du couvert végétal naturel et l'utilisation inappropriée des terres en pente sont des phénomènes et des actions qui contribuent à l'apparition et l'accentuation des crues. Le bassin versant de l'oued Bouregreg n'échappe guère à ses faits et manifestations en plus de son contexte hydrogéologique défavorable constitué essentiellement de formations géologiques imperméables.

Les hydro-grammes de crues majeures du bassin montrent une variabilité des formes d'hydro-grammes observés à chacune des stations hydrométriques. Le temps de pointe T_p est approximativement égal au $1/3$ du temps de base T_b dans la majorité des cas étudiés. Les temps de pointe moyens adoptés pour les sites du barrage SMBA et celui de Tiddas, sont respectivement, de 21 h et 13h. Les hydro-grammes de crues adoptés aux sites de barrages SMBA et Tiddas pour les périodes de retours $T = 2$ ans à CMP sont illustrés par (la Figures 61). Généralement, entre le début de la pluie, et le début de la crue, il y a un décalage de l'ordre de quelques heures. Ceci s'explique d'une part par les pertes initiales dues à l'infiltration et l'interception, et d'autre part par le temps de transport des premières eaux de pluies. Par la suite le débit évolue jusqu'à atteindre son maximum (débit de pointe), pour ensuite entamer la décrue. Ensuite, la pente de la courbe de décrue est plus douce. Cet étalement confirme que le bassin très allongé (Cf. au coefficient de Gravélius du bassin). La dernière phase de la réponse peut s'étaler sur plusieurs jours. Il s'agit du retour à un régime permanent après la perturbation due à la crue. Durant cette phase, le débit retrouve progressivement sa valeur normale.

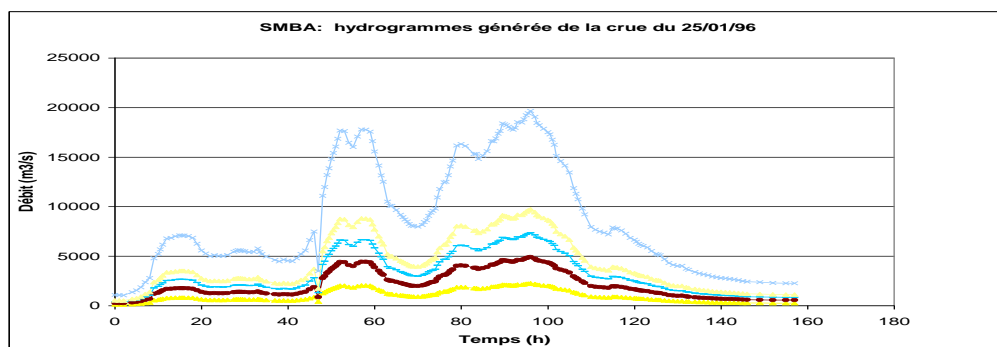
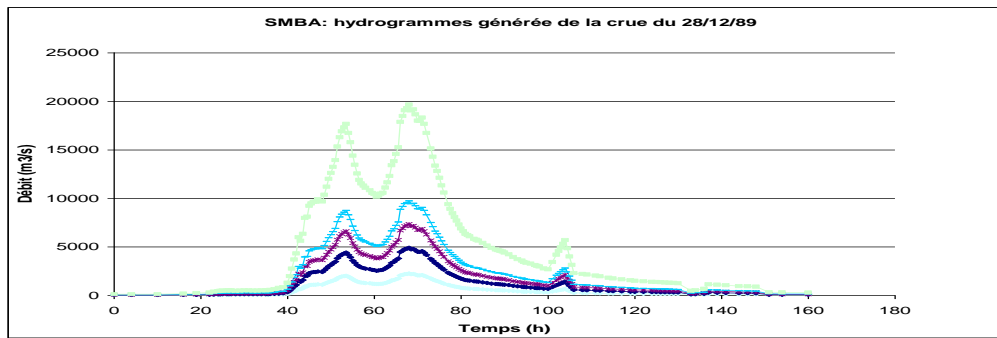
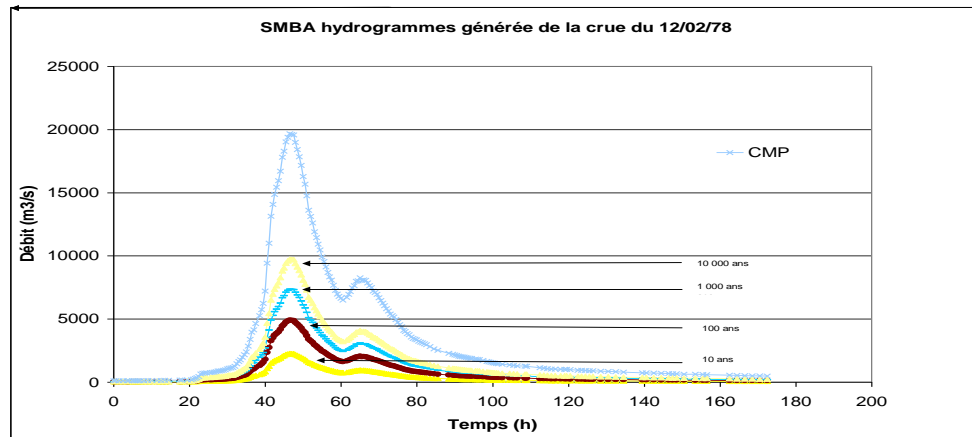


Figure 47 : Hydro-gramme des crues observées au niveau du barrage SMBA (DRPE, 2001)

6. RESSOURCES EN SOLS

L'étude de reconnaissance des sols a pour rôle de rendre compte des types de sols dans la zone du bassin versant du Bouregreg, mais aussi, de déterminer le facteur d'érodibilité des sols nécessaire à l'évaluation de l'érosion.

6.1. Approche méthodologique

L'approche adoptée pour la réalisation de cette carte consiste tout d'abord à exploiter systématiquement toute la documentation cartographique et bibliographique disponible. Il s'agit en particulier des études pédologiques régionales et locales ainsi que les thèses réalisées dans la zone. Ces études disposent d'une description pédologique détaillée des différents types de sols rencontrés dans le bassin. Il s'agit de :

Etude pédologique au 1/100000^e en vue de la mise en valeur agricole dans le cercle d'Oulmès, province de Khémisset, 1995. (Ministère de l'agriculture et de la Réforme Agraire).

- Etude Pédologique des Terres sises dans les cercles de Tiflet et de Khémisset au 1/50.000,

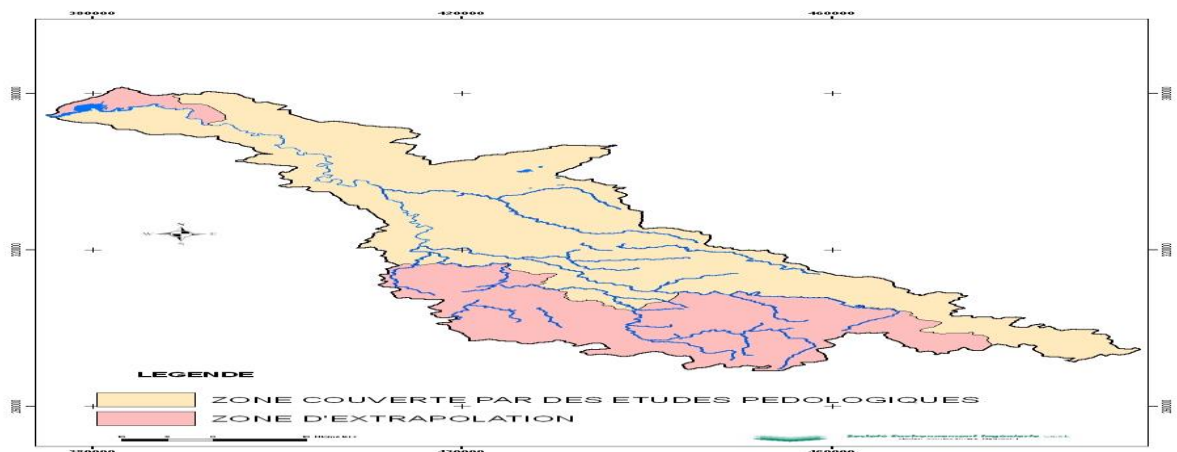


Figure 48 : Localisation des zones couvertes et non couvertes par les études pédologiques (DREFNO, 2016)

(Ministère de l'Agriculture et de la Mise en valeur Agricole) (DPA de Khémisset).

Carte pédologique de Zaërs, de la basse Chaouia et des Shouls au 1/200 000. (Ghanem, Direction de la Recherche Agronomique, 1996).

6.2. Envasement de la retenue du barrage

Le Maroc dispose aujourd'hui de 118 barrages d'une capacité totale de stockage qui dépasse 16 milliards de m³. Il est estimé que près de 60 millions de m³ en moyenne de cette capacité est perdue chaque année par envasement (Belkheiri, 1987) et (INGEMA, 1991).

A l'instar de tous les barrages du Royaume, le barrage S.M.B.A. connaît aussi des problèmes d'envasement de la retenue dus à l'érosion des sols dans le bassin versant. D'après les études bathymétriques réalisées en 1985 au niveau de la retenue du barrage et les résultats de l'étude menée dans le cadre de l'élaboration du Plan National d'Aménagement des Bassins Versants (PNABV, 1996), le taux d'envasement annuel moyen est de l'ordre de 1,70 Mm³.

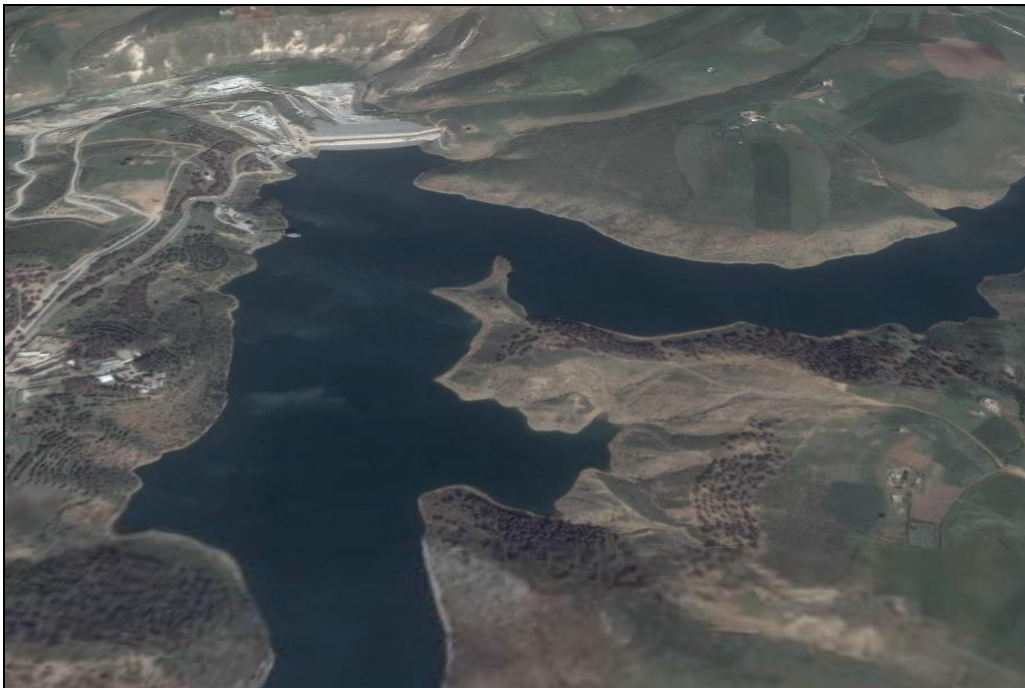


Figure 49 : Vue du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (d'après Google Earth)

CHAPITRE II :

EVALUATION DE LA VULNERABILITE ENVIRONNEMENTALE ET CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG.

1. NECESSITE ET UTILITE DE MESURER LA VULNERABILITE ENVIRONNEMENTALE ET CLIMATIQUE AU MAROC.

Les perspectives en matière de changement climatique sont très alarmantes tant en termes de déviation des principaux paramètres climatiques (Températures, Précipitations) qu'en termes d'impacts sur les secteurs clés tels que les ressources en eau, l'agriculture et les zones côtières. Ce qui nécessitera des efforts considérables en vue de réduire les impacts et de s'y adapter (OSS, 2007). Le Maroc a l'instar des autres parties à la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CC NUCC) est tenu par la convention et diverses décisions de la Conférence des Parties, y compris la (COP22) organisé au Maroc en novembre 2016, d'évaluer l'impact des changements climatiques au niveau national et ses efforts pour s'adapter à ces impacts comme éléments de base pour ses communications nationales. Le Maroc doit choisir parmi les méthodes et outils potentiellement applicables pour l'élaboration de ces évaluations, et parmi diverses sources d'information concernant leur utilisation.

Les communications nationales sur les changements climatiques (CNI en 2001 et SNC en 2009) ainsi que la totalité des rapports consultés en relation avec les changements climatiques au Maroc n'ont pas abordé le concept de vulnérabilité comme défini par le GIEC (exposition, sensibilité, capacité adaptative). Le terme vulnérabilité est a priori souvent avancé subjectivement pour désigner différents sens : impact, dommage, résilience, sensibilité etc (Messouli et al. 2011). L'évaluation de la vulnérabilité est nécessaire :

- Pour identifier l'importance et la localisation des menaces à court et à long termes ;
- Pour répondre aux impacts des désastres naturels et des changements climatiques ;
- Pour faciliter l'alerte précoce face aux désastres naturels et l'adaptation face aux changements climatiques ;
- Pour comprendre la vulnérabilité d'adaptation ;

- Pour aider à identifier et à classer les besoins actuels et potentiels en matière d'adaptation ;
- Pour guider et appuyer les interventions appropriées.

1.1. Conception de l'indice de vulnérabilité environnementale (EVI)

1.1.1. Le choix de l'EVI

Le choix de l'EVI (The Environmental Vulnerability Index) (Kaly et al., 2004) repose sur les principaux résultats du GIEC concernant la vulnérabilité qui est géographiquement et socialement différenciée. Toute évaluation au niveau national doit tenir compte des modèles régionaux de la vulnérabilité dans le pays. Et de la répartition de la vulnérabilité au sein de la communauté nationale. Il y a une tension inévitable que la vulnérabilité se définit le mieux à point, à un endroit particulier dans l'espace ou dans la communauté, et toute agrégation au niveau national peut se traduire par une perte d'informations.

Liens vulnérabilité, changement climatique et développement (GIEC, 2007b).

La vulnérabilité aux changements climatiques peut être exacerbée par la présence d'autres facteurs de tensions.

Des contraintes non liées au climat peuvent augmenter la vulnérabilité au changement climatique en affaiblissant la résilience et peuvent également réduire la capacité d'adaptation en raison des ressources déployées pour satisfaire des besoins en concurrence. Les régions vulnérables subissent des contraintes multiples qui ont un effet négatif sur leur vulnérabilité, leur sensibilité et leur capacité d'adaptation. Ces contraintes sont dues à différents facteurs, dont les aléas climatiques, la pauvreté, les difficultés d'accès aux ressources, l'insécurité alimentaire, la mondialisation de l'économie, les conflits, et les conséquences de maladies.

Dans le futur, la vulnérabilité ne dépendra pas seulement des changements climatiques, mais aussi des voies de développement.

Les études montrent que les projections des impacts des changements climatiques peuvent fortement varier en fonction du mode de développement envisagé. Par exemple, des scénarios alternatifs peuvent présenter des différences considérables quant à la population, au revenu et au développement d'une région, facteurs souvent déterminants du niveau de vulnérabilité aux changements climatiques.

Le développement durable peut réduire la vulnérabilité aux changements climatiques.

En renforçant la capacité d'adaptation et la résilience. Toutefois, à l'heure actuelle il n'y a pas ou peu de programmes pour le développement durable qui incluent explicitement l'adaptation aux effets du changement climatique ou qui encouragent la capacité d'adaptation.

1.1.2. Composition et calcul de l'EVI

L'EVI est un outil qui utilise 50 indicateurs qu'on appelle «smart indicators » qui visent à capturer un grand nombre d'éléments dans un système interactif complexe, il est suffisamment souple pour être appliqué à tous les niveaux (régions, pays, province ou plus petite zone à condition d'existence des données à ce niveau). L'EVI tente de résumer une grande variété de données sur la vulnérabilité environnementale pour une région. Les données nécessaires englobe un éventail de facteurs environnementaux à partir des : données climatiques, température de surface de la mer, information géologique et géographique, espèces biologiques et les données de l'habitat, réserves, activités humaines, population, législation, aspect de santé humaine, etc. Il aide aussi à mettre en évidence les zones de préoccupation au sein de l'environnement, pour une gestion plus efficace des ressources naturelles.

Les indicateurs choisis pour une utilisation dans l'EVI sont fondés sur les meilleurs connaissances scientifiques actuellement disponibles et ont été élaborées en consultation avec des experts internationaux, d'experts nationaux, d'autres organismes et groupes d'intérêt. Les indicateurs sont classés en 5 catégories (Kaly et al, 2000).

-Météorologique et Climatique

-Géologique

-Géographique

-Caractéristiques de la zone d'étude : Ressources et Services

-Anthropique

Les **50** indicateurs choisis pour mesurer la vulnérabilité sont classés en une gamme de sous-indices incluant (Tableau 29) :

Le sous- indice du changement climatique, **EVI-CC 13** indicateurs ;

Le sous- indice des dommages, **D 11** indicateurs ;

Le sous-indice de la biodiversité, **CBD 19** indicateurs ;

Le sous -indice de l'eau, **W 15** indicateurs ;

Le sous-indice de l'agriculture et la pêche, **AF 20** indicateurs ;

Le sous -indice des aspects de la santé humaine, **HH 6** indicateurs ;

Le sous-indice de la désertification, et l'exposition aux catastrophes naturelles **CCD** **11** indicateurs.

Ces sous indices peuvent être regroupés en trois aspects à savoir :

REI = l'exposition aux risques naturels ou humains

EDI = Indice de dégradation de l'environnement. Cet indice mesure la situation actuelle de la « santé » de l'environnement. Il est basé sur l'hypothèse que les impacts passés affectent la capacité de l'environnement de tolérer l'impact de nouveaux impacts.

IRI = Indice de la résilience intrinsèque.

Tableau 26 : Indicateurs de l'EVI et différentes subdivisions définies par ces indicateurs; catégories; aspects; et sous indices (CC, Changement Climatique ; D, dommages ; HH, santé humaine ; AF, agriculture et pêche ; CCD, désertification et exposition aux catastrophes naturelles ; CBD, biodiversité ; W, eau).

N°	EVI	Catégories	Aspects	Sous-indices				
1	Wind	Météorologique Et climatique	REI	CC	D			CCD
2	Dry	Météorologique Et climatique	REI	CC	D	AF	W	CCD
3	Wet	Météorologique Et climatique	REI	CC	D	AF	W	CCD
4	Hot	Météorologique Et climatique	REI	CC	D			CCD
5	Cold	Météorologique Et climatique	REI	CC	D			CCD
6	Sst	Météorologique et climatique	REI	CC		AF		CBD
7	Volcano	Météorologique	REI		D			

Et climatique

8	Earthquake	Géologique	REI		D	
9	Tsunamis	Géologique	REI		D	
10	Slides	Géologique	REI		D	
11	Land	Géographique	IRI	CC		CBD
12	Dispersion	Géographique	IRI			
						CBD
13	Isolation	Géographique	IRI			
						CBD
14	Relief	Géographique	IRI	CC		CCD
						CBD
15	Lowland	Géographique	IRI	CC		CCD
						CBD
16	Borders	Géographique	IRI			
						CBD
17	Imbalance	Ressources et	EDI			AF
						CBD
		Services				
18	Openness	Ressource et	REI			AF
						CBD
		Service				
19	Migratory	Ressource et	IRI			AF
						CBD
		Service				
20	Endimics	Ressources et	IRI			
						CBD

		Service						
21	Introduction	Ressources et	EDI		AF			
		Service						
22	Endangered	Ressources et	EDI					CBD
		Service						
23	Extinction	Ressources et	EDI		AF			CBD
		Service						
24	Vegetation	Ressources et	EDI	CC	AF	W	CCD	
CBD								
		Service						
25	Cover	Ressources et	REI		AF	W	CCD	
CBD								
		Service						
26	Fragmentation	Ressources et	EDI		AF			
CBD								
		Service						
27	Degradation	Ressources et	EDI				W	
CCD								
		Service						
28	Reserves	Ressources et	REI		AF			
CBD								
		Service						
29	Mpa	Ressources et	REI		AF			CBD

		Service				
30	Farming	Ressources et	REI		AF	W
		Service				
31	Fertiliser	Ressources et	REI		HH AF	W
		Service				
32	Pesticides	Ressources et	REI		HH AF	
		Service				
33	Biotechnology	Ressources et	REI		AF	
		Service				
34	Fishereis	Ressources et	REI		AF	
		Service				
35	Fishing effort	Ressources et	REI		AF	W
		Service				
36	Water	Ressources et	REI	CC	HH AF	W
CD						
		Service				
37	Air	Ressources et	REI		HH	
		Service				
38	Waste	Ressources et	REI			W
		Service				
39	Treatment	Ressources et	REI		HH	W
		Service				
40	Industry	Ressources et	REI			

		Service			
41	Spills	Ressources et	REI		
		Service			
42	Mining	Ressources et	REI		
		Service			
43	Sanitation	Ressources et	REI		HH
W					
		Service			
44	Vehicles	Ressources et	REI		
		Service			
45	Density		EDI	CC	D
W					
46	Growth		REI		
W					
47	Touriste		REI		
W					
48	Costal		EDI	CC	D
49	Agreements		REI		
50	Conflicts		EDI		

Les indicateurs sont notés sur une échelle de 1 à 7. Une moyenne globale de tous les indicateurs permet de générer la valeur globale de l'EVI d'une région. Les indicateurs environnementaux sont de nature hétérogène, ils comprennent des variables pour lesquelles les réponses sont quantitatives, qualitatives et à différentes échelles (linéaire, non linéaire, ou

avec différents alignements). Ces indicateurs ont différentes unités de mesure, par conséquent pour être en mesure de les accumuler et de générer une valeur globale, il est exigé de convertir tous ces derniers sur une échelle de vulnérabilité environnementale commune. Cette échelle (Figure 50) est relative allant du score 1 moins vulnérable (plus résilient) au score 7 plus vulnérable (moins résilient).

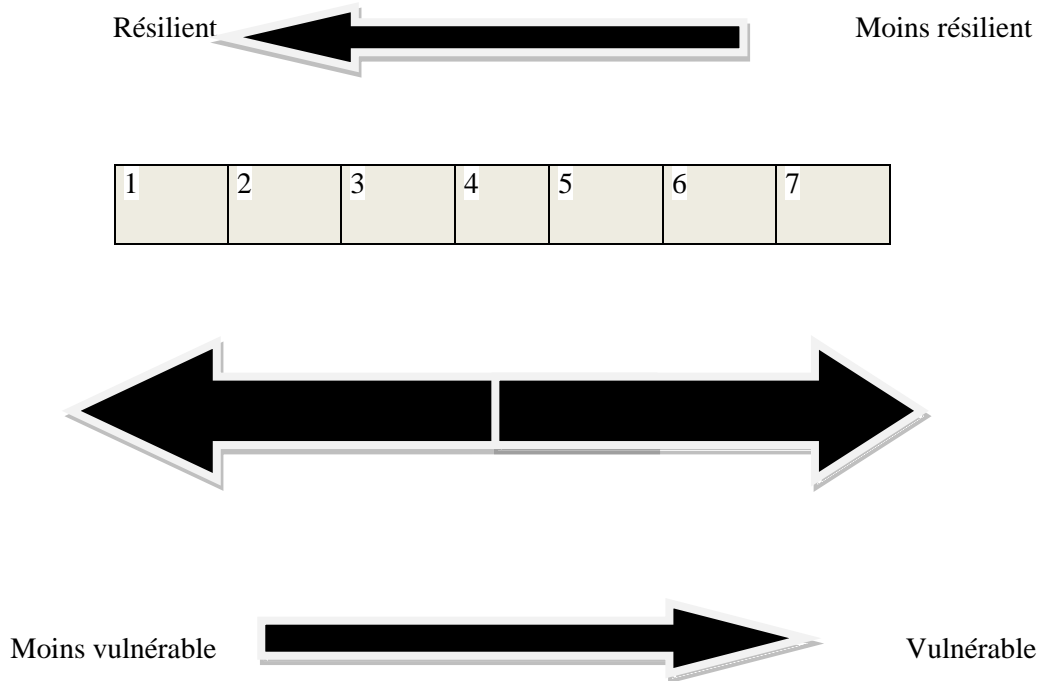


Figure 50 : Echelle de vulnérabilité appliquée aux 50 indicateurs de l'EVI.

Les résultats de l'EVI sont organisés en feuilles Excel, représentant le profil de la région et fournissant un dense bulletin d'information. L'information disponible sur le bulletin comprend un score global de l'EVI en points, avec un pourcentage des données sur lesquelles il a été calculé et une classification de la vulnérabilité globale. Le classement, ci-dessus, identifie rapidement le degré de vulnérabilité de la région.

1.1.3 Atouts et faiblesses de l'EVI

L'EVI étant agrégatif permet l'estimation des vulnérabilités-clés potentielles pour chaque région. L'indice de vulnérabilité est suffisamment souple pour être appliquée à n'importe quelle échelle. L'EVI été conçu pour être souple à la gamme de condition dans le monde entier et de fournir une évaluation de la vulnérabilité globale de l'environnement d'une région. Il est axé sur les risques de dommages à l'environnement naturel dans la mesure où l'environnement naturel est le fondement des structures économiques et sociales d'une région.

En tant que tel l'indice de vulnérabilité est un aspect essentiel pour une meilleure compréhension de l'environnement et des influences des variables sociales et économiques sur la durabilité, et est nécessaire pour compléter l'information sur l'empreinte écologique et l'état de l'environnement. En outre, l'EVI utilise un système de notation mis au point pour permettre aux chercheurs d'évaluer instantanément la vulnérabilité globale ou sectorielle d'une région ; et en termes d'aspects particuliers des risques à des aléas ; les caractères intrinsèques ; les dégâts du passé et des influences de la météorologie, des événements géologiques, la biodiversité et des facteurs anthropiques. L'attribution d'une valeur de vulnérabilité à un indicateur (1 à 7) est basée sur la notion de seuil. Les résultats et données de l'EVI peuvent être couplés avec des outils d'aide à la décision tel que CRiSTAL (Outil d'identification des risques au niveau communautaire-Adaptation et moyens d'existence) pour promouvoir la réduction des risques et l'adaptation aux changements climatiques dans les projets communautaires.

2. CONCLUSION

L'EVI montre que certaines vulnérabilités sont inhérentes, d'autres sont une conséquence des problèmes environnementaux du passé et peuvent être gérées localement, et d'autres sont le résultat d'une mauvaise gestion de l'environnement. Les stress dus aux pressions humaines et aux pressions climatiques conjuguent leurs effets sur les écosystèmes. Pour éviter des conséquences graves et irréversibles (pertes importantes de biodiversité, disparition de nombreuses espèces endémiques, reprise massive de l'érosion...), il est indispensable de ne pas outrepasser la capacité de résilience de ces écosystèmes. Or les seuils au-delà desquels cette capacité s'affaiblit, voire s'effondre, sont aujourd'hui mal connus. Il est donc indispensable d'adopter une gestion prudente. Respecter les « services environnementaux » rendus par les écosystèmes, en particulier la conservation de la biodiversité en général, et particulièrement des espèces rares ou menacées de la flore et de la faune, ainsi que la protection du cycle de l'eau. Etablir des procédures de participation permettant à tous les acteurs sociaux intervenant dans la gestion effective du territoire, et à toutes les parties prenantes concernées par les biens et services produits, d'être effectivement impliqués dans la bonne gouvernance de ces territoires.

CHAPITRE III :

EVALUATION ET DYNAMIQUE CLIMATIQUE FUTUR DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG - APPROCHE MODELISATION -

INTRODUCTION

Dans son quatrième rapport paru en 2007, le GIEC combine vingt-cinq modèles climatiques globaux afin d'évaluer les impacts du changement climatique aux horizons 2050 et 2100. Selon leurs travaux, une hausse des températures de +2 à +3 degré C est à prévoir en région méditerranéenne à l'horizon 2050, puis de +3 à 5 degré C à l'horizon 2100. Cette hausse des températures devrait réduire l'humidité relative de l'air et accroître la charge capacitive d'humidité de l'atmosphère. Les événements précipitant seront moins fréquents mais plus intenses, tandis que les périodes de sécheresses seront plus fréquents et plus longues. La distribution spatiale et temporelle des précipitations s'en verra donc modifiée. Ceci, combiné aux fortes pressions anthropiques sur l'environnement et aux demandes en eau sans cesse croissantes, rendra la satisfaction de besoins en eau pour les différents usages de plus en plus difficile à assurer. Dans la deuxième moitié du XXème siècle, la demande en eau a doublé et elle pourrait encore s'accroître de 20% d'ici 2050. Dès lors, les questions relatives à la gestion des ressources en eau se posent de manière accrue (Milano, 2010). Les ressources en eau du Maroc sont caractérisées par une très forte sensibilité aux aléas climatiques :

Les projections des scénarios climatiques A2 et B2 pour le bassin indique une augmentation de la température d'environ 2-3 degré C et une diminution des précipitations de 40-60% par rapport aux valeurs initiales. Les résultats montrent que la pression sur les ressources en eau à Bouregreg va augmenter, ce qui conduit à une plus grande concurrence pour les eaux de surface dans la région dans les prochaines décennies. Et que la demande en eau pour l'utilisation domestique, le tourisme, l'élevage et l'agriculture ne sera pas satisfaite d'ici l'an 2100. Les résultats illustrent également que les stratégies d'adaptation qui devrait compenser en partie les conséquences attendues du changement climatique en réduisant les facteurs de stress sur les ressources en eau à Bouregreg, ne serait pas suffisante pour assurer un équilibre entre la demande et l'offre sous la pression des changements socio-économiques et climatique.

On s'attend à ce que les quantités d'eau disponibles par habitant diminuent de moitié d'ici à 2050. En ne prenant en compte que les réserves renouvelables correspondant à l'écoulement superficiel et aux nappes renouvelables, il apparaît que, dès 1990, six pays affrontaient déjà des situations de pénurie : Malte, Palestine occupée, Égypte, Libye, Tunisie et Algérie (Tableau 28). Une projection sur l'année 2025, prenant en compte les taux de croissance démographique moyens et les variations de consommation résultantes, laisse augurer une dégradation marquée de la situation dans ces mêmes pays mais aussi de fortes tensions sur le reste de la rive sud, Chypre, Syrie, Liban et Maroc.

Tableau 27 : Ressources en eau par habitant (d'après J. Margat, *Plan bleu*).

Pays	Ressources <i>per capita</i> (m ³ /an) en 1990	Ressources <i>per capita</i> (m ³ /an) en 2025
Libye	230	65
Malte	200	152
Palestine occupée	371	230
Tunisie	490	240
Algérie	545	265
Maroc	1460	545
Syrie	2963	625
Egypte	1078	640
Liban	1380	860
Chypre	1286	1000
Espagne	1909	1515
Turquie	5000	2210
Italie	3262	3200
Albanie	15385	3500
France	5827	5400
Grèce	5836	5430
Ex-Yougoslavie	28700	24200

Dans cette étude, on va étudier les impacts des changements climatiques se focalisant sur les paramètres des précipitations et Températures minimales et maximales comme des données d'observation. On va utiliser et analyser les sorties des modèles de circulation générale (MCG ou GCM) avec des résolutions spatiales plus fine (~1km) pour donner quelques projections relatives à la zone d'étude à dominance de céréaliculture pluviale et d'élevage intensifié. A qui, on va étudier l'impact des changements en précipitations et températures sur les ressources en eau du bassin du Bouregreg.

1. METHODOLOGIE APPLIQUEE

1.1. Zone d'étude

Le bassin versant du Bourereg est situé dans le Centre-nord-ouest du Maroc. Il couvre une superficie d'environ 9700 km². Il est caractérisé au niveau géomorphologique par une baisse des altitudes de l'Est (Aguelmous) vers l'Ouest de plus de 1500m (Rabat-Salé) à 0m au niveau de l'océan Atlantique (Figures 32 et 33). Ce bassin est constitué de formations imperméables d'âge primaire. Ce qui en fait un espace défavorisé au niveau des nappes d'eaux souterraines et par conséquent au niveau de l'irrigation agricole. Ainsi l'activité agricole dominée par les céréales est essentiellement pluviale et soumise aux variations climatiques. Il est situé au Sud Est de la ville de Rabat et s'étend jusqu'à la chaîne du Moyen Atlas. Cette chaîne de montagne lui confère un relief diversifié, et des potentialités hydriques importantes constituées essentiellement des eaux de ruissellement ou de surface.

1.2. Données d'observation

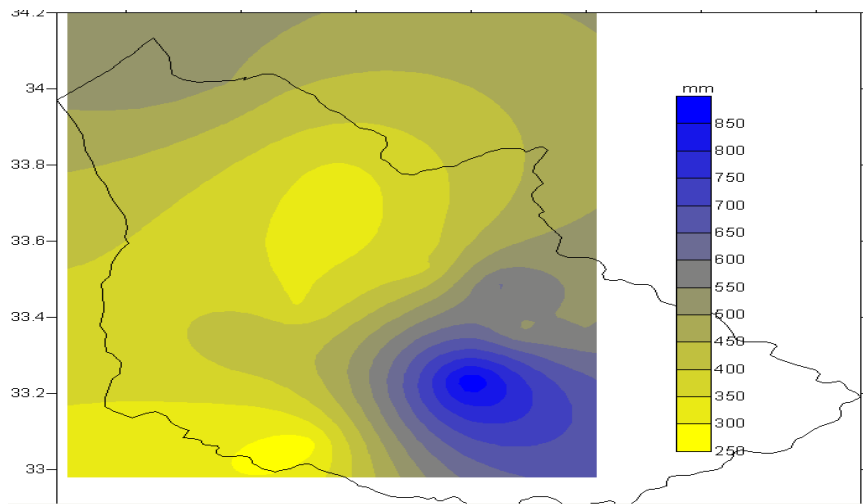


Figure 51 : Répartition spatiale des précipitations moyenne annuelle sur le bassin versant du Bouregreg (SIGMED, 2012)

1.2.1 Amont du bassin :

-Tarhat (région de Khenifra)

Coordonnées géographiques : Latitude : 32,99 N
Longitude : -5,643 W
Altitude : 1036 m.



Figure 52 : Vue de Jbel Mzourgane de point culminant le plus élevé du bassin.

-Températures

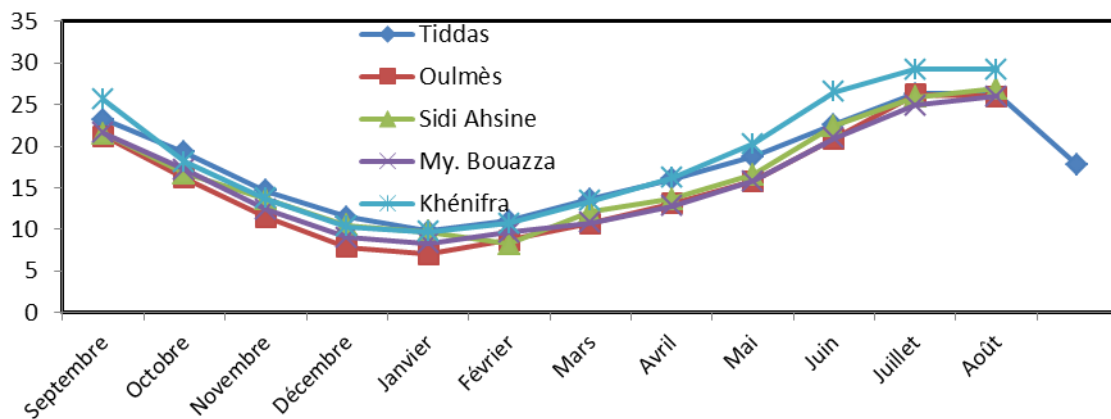


Figure 53 : Températures moyennes mensuelles à l'amont du bassin versant du Bouregreg.

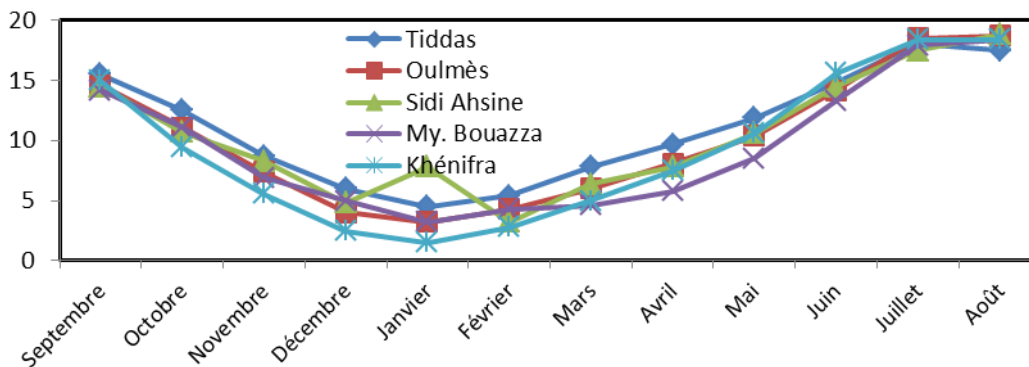


Figure 54 : Températures minimales mensuelles à l’amont du bassin versant du Bouregreg.

Cependant la moyenne des minima atteint 3.2°C à Oulmès, Sidi Ahsine et Moulay Bouazza et moins de 2°C à Khénifra pour le mois le plus froid. Elle est de 4.5°C à Tiddas.

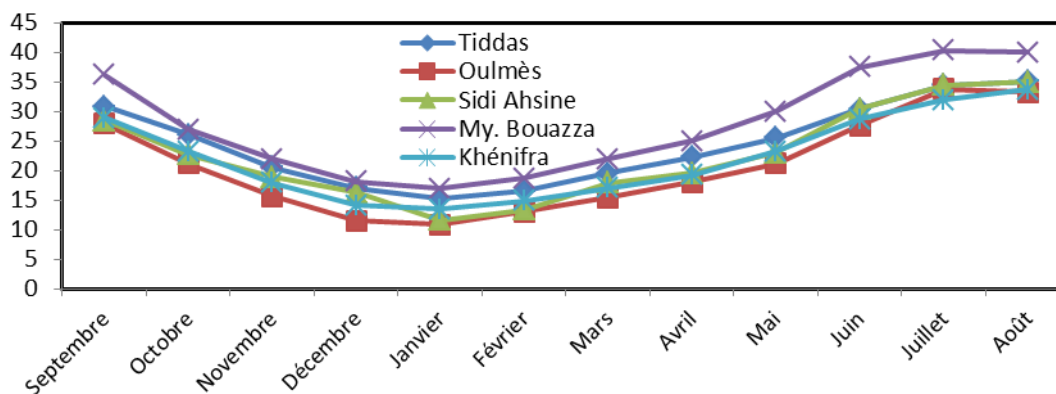


Figure 55 : Températures maximales mensuelles à l’amont du bassin versant du Bouregreg

Les valeurs maximales des mois les plus chauds sont enregistrés au mois de juin, juillet et Août et atteignent entre 30 à 40°C.

Pluies

Cumul pluviométrique annuelle (mm)

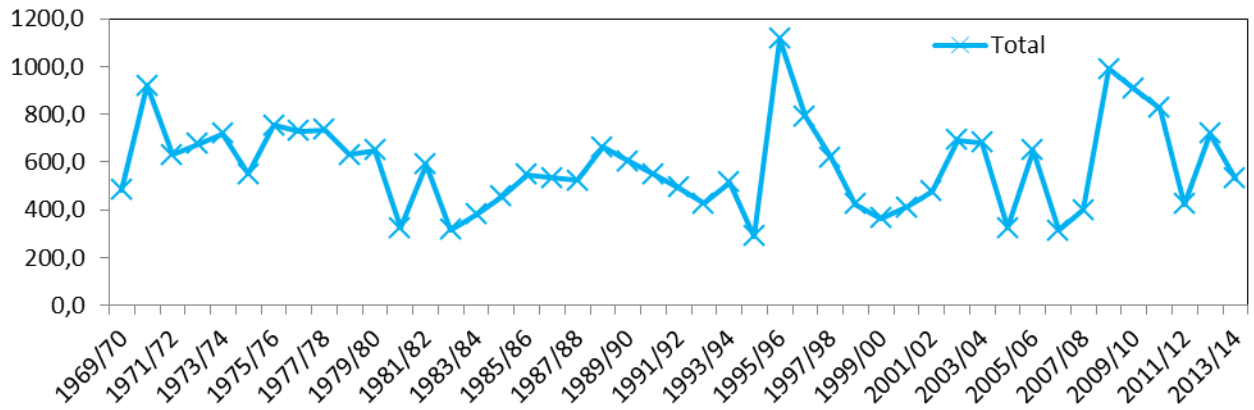


Figure 56 : Pluie annuelle de Khenifra pour la période (1969-70 à 2013-14).

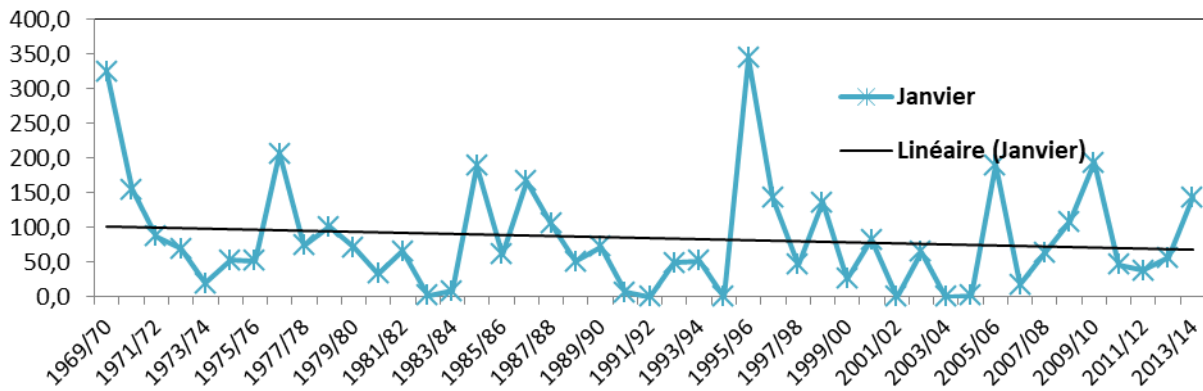


Figure 57 : Pluie du mois de Janvier de Khenifra pour la période (1969-70 à 2013-14).

- Débits

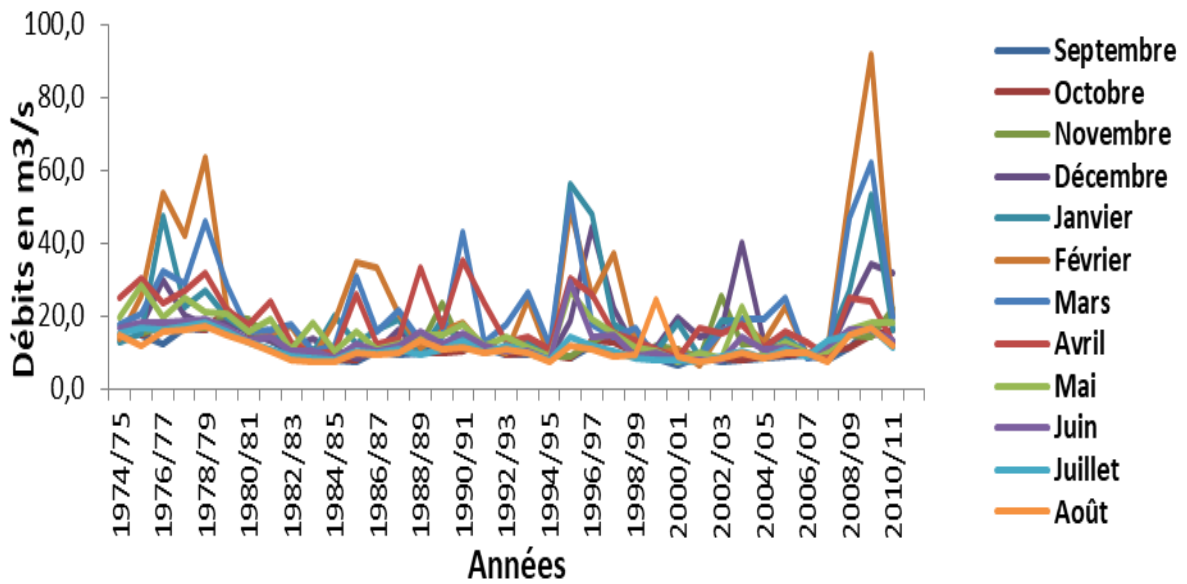


Figure 58 : Débits mensuels de Tarhat (région de Khenifra) pour la période (1974/75 à 2010/2011)

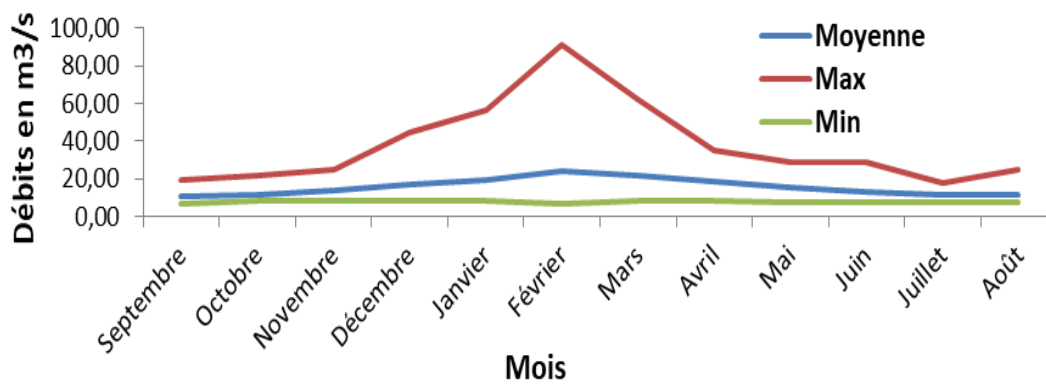


Figure 59 : Débits mensuels (Moyenne, Max et Min) de Tarhat (région de Khenifra) pour la période (1974/75 à 2010/2011).

1.2.2. Centre du bassin :

Marchouch (Rommani), région de Rabat.

Coordonnées géographiques : Latitude : 33°60'41 N

Longitude : 6°71'60 W

Altitude : 339 M



Figure 60 : Vue d'ensemble de la topographie et du paysage du Moyen Bouregreg.

-Pluies

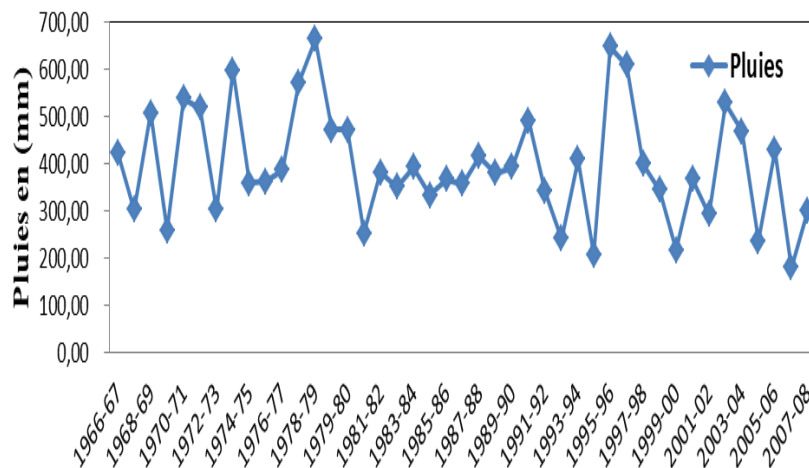


Figure 61 : Evolution Pluviométrique à Marchouch (INRA), de la période (1966 – 67 à 2007 – 2008).

-Températures

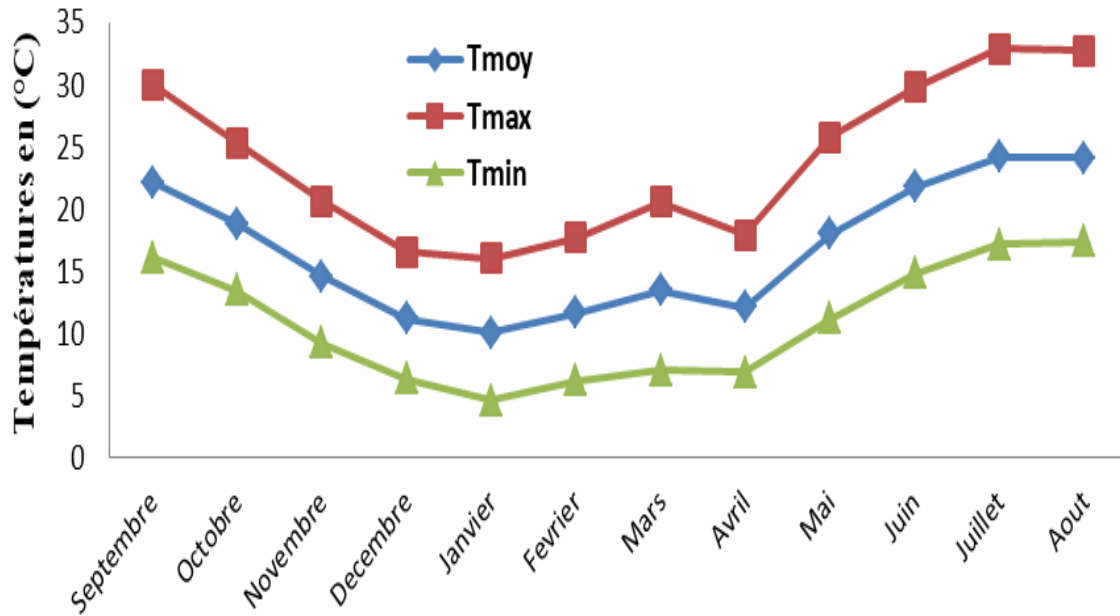


Figure 62 : Evolution des Températures Moyennes Mensuelles (Tmoy, Tmax et Tmin)
Période (2003 à 2008), à Marchouch (INRA).

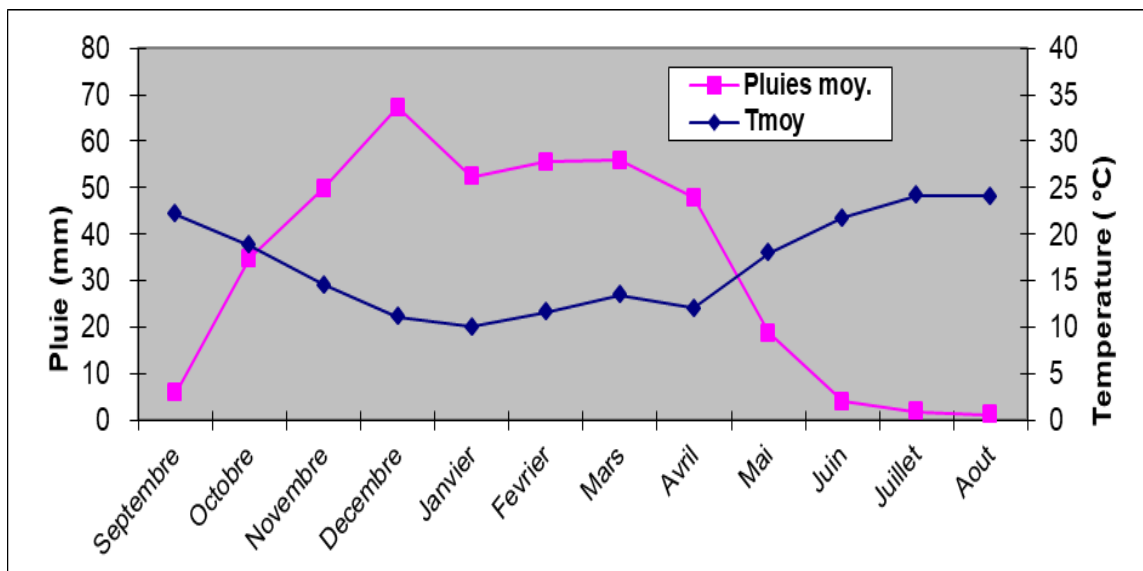


Figure 63 : Diagramme Ombrothermique du Domaine Expérimental de Marchouch (INRA).

1.2.3. Aval du bassin :



Figure 64 : Partie de la retenue du barrage SMBA où déverse directement l'Oued Bouregreg.

- Rabat-Salé et Shouls (région de Salé)

Coordonnées : Latitude : 34°03'00 N

Longitude : 06°45'00 W

Altitude : 74.715 M

1.2.3.1. Caractère général du climat de la région de Rabat- Salé

Le climat à la région de Rabat Salé est influencé par la proximité de l'océan atlantique et de la méditerranée, ainsi la région connaît un climat maritime avec un hiver frais et pluvieux et un été chaud et sec. Les précipitations hivernales sont d'origine advective, dues principalement aux passages des perturbations atlantiques issues généralement du secteur Nord et du secteur Ouest. Quant aux précipitations estivales, elles sont dues aux situations convectives causées par l'infiltration d'air froid en altitude associé au thalweg saharien amenant de l'air chaud du sud. Même si les températures sont en générale douces et influencées par la brise océanique d'ouest durant l'été, la région connaît parfois des vagues de chaleur dues aux phénomène de chergui associé à l'influence des remontées de la dépression thermique saharienne, donnant lieu à une augmentation brusque de températures maximales au dessus de 40°C.

L'indice climatique de Martonne et le quotient d'Emberger calculés sur la période 1961-2012 place la région dans la limite entre l'étage climatique subhumide et semi aride (Tableau 29).

Tableau 28 : Classification climatique selon l'indice de Martonne et Quotient d'Emberger à Rabat Salé.

Indice de Martonne 1961-2012	Quotient d'Emberger 1961-2012
19.8 (la limite entre semi aride et subhumide)	94 (Subhumide)

1.2.3.1.1. Description pluviométrique

La pluviométrie moyenne annuelle à la région est de 512.4mm, cette quantité est répartie d'une manière irrégulière durant l'année, selon le diagramme ombrothermique, la saison humide s'étend du mois d'Octobre au début du mois d'Avril (Figure 81) pluviométrie à la région de Rabat est marquée par la variabilité interannuelle ainsi que la dispersion des totaux annuels. La courbe représentée dans la figure I.1 met en évidence une tendance nette vers la baisse des cumuls pluviométriques annuels. Ainsi, la moyenne de 512.4 mm cache des extrêmes très éloignés : 1163.6 mm en 1996 et 249 mm en 1994 avec un coefficient de variation qui approche 34.3 %. D'après les données, la station de Rabat Salé a connu, depuis les années 80, une évolution climatique marquée par une tendance à la diminution des totaux pluviométriques annuels. On enregistre ainsi un déficit moyen de 19.2 % au cours de la période 1980-1995 par rapport à la période de 1956-2012. Cependant, l'analyse de la série des précipitations mensuelles depuis 1996 met en évidence le retour de périodes pluriannuelles avec des excédents notables par rapport à la normale climatologique de référence 1981-2010 : + 69,6% pour la période 1996-1997, +32,8% pour la période 2002-2003, +47,1% pour la période 2009-2011. La moyenne mobile quinquennale montre très bien cette évolution fluctuante voir (Figures 65 et 66).

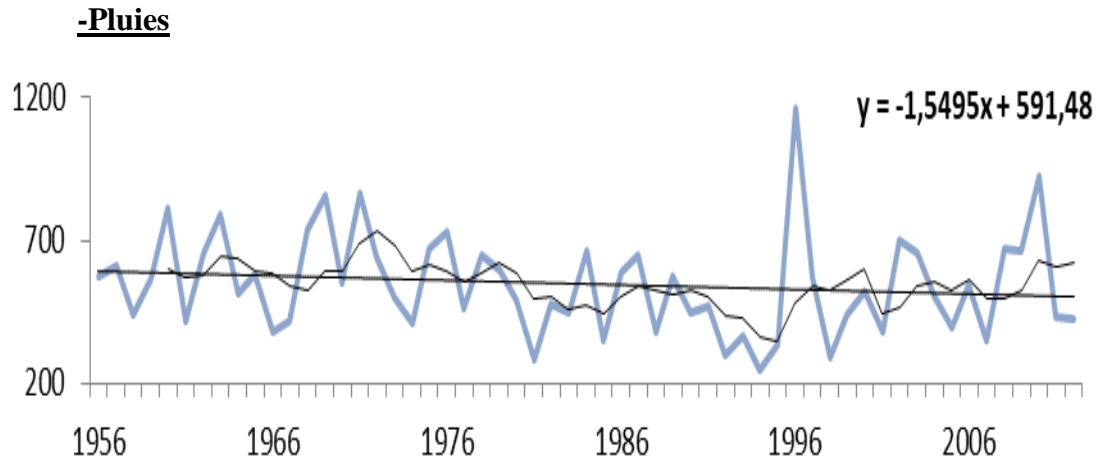


Figure 65 : Evolution des cumuls annuels de précipitations durant la période (1956- 2012) (Rabat- Salé).

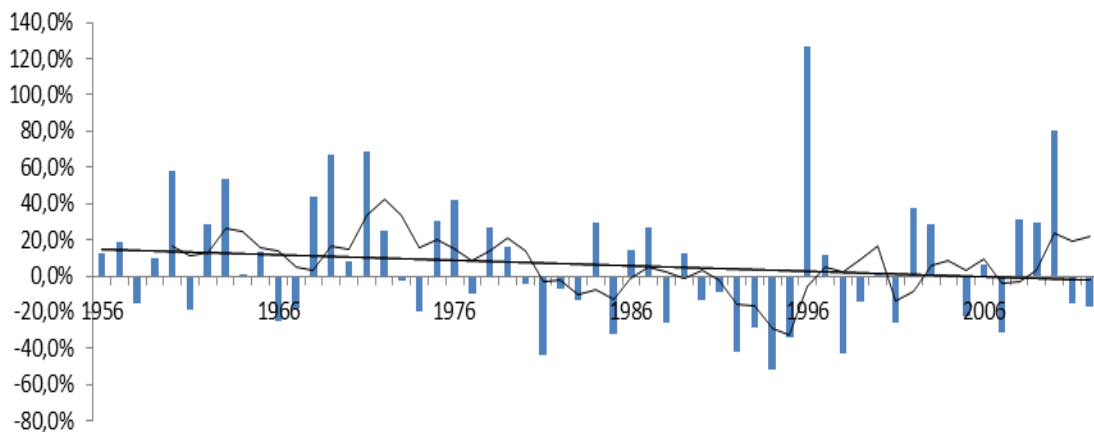


Figure 66 : Ecart des précipitations annuelles par rapport à la normale.

1.2.3.1.2. Températures

En général, les températures à la région de Rabat Salé subissent peu d'écart, douces l'hiver et peu chaude l'été. Ceci est dû principalement aux effets de brises et de l'océan qui contribuent à équilibrer ces dernières. Ainsi la température moyenne annuelle est 17.4 °C, variant entre 12.0 °C enregistrée durant le mois de Janvier et 22.6 °C durant le mois d'Août. La moyenne mensuelle des températures maximales quotidiennes atteint 26.8 °C en Août alors que la moyenne mensuelle des températures minimales quotidiennes bascule jusqu'à 7.5 °C le mois de Janvier.

-Température moyenne

D'après les (Figures 88 et 89), on note une légère variabilité interannuelle des températures moyennes avec un coefficient de variation de l'ordre de 2.95 %, avec une tendance notable vers la hausse de l'ordre de +0.86 °C durant la période 1961-2012, surtout à partir des années 80. En effet, durant la période 1980-2012, on note une augmentation moyenne de l'ordre de +0.6 °C à la température moyennée. L'écart moyen annuel le plus important est de +0.8 °C enregistré l'année 2010 avec une température moyenne de 18.2 °C.

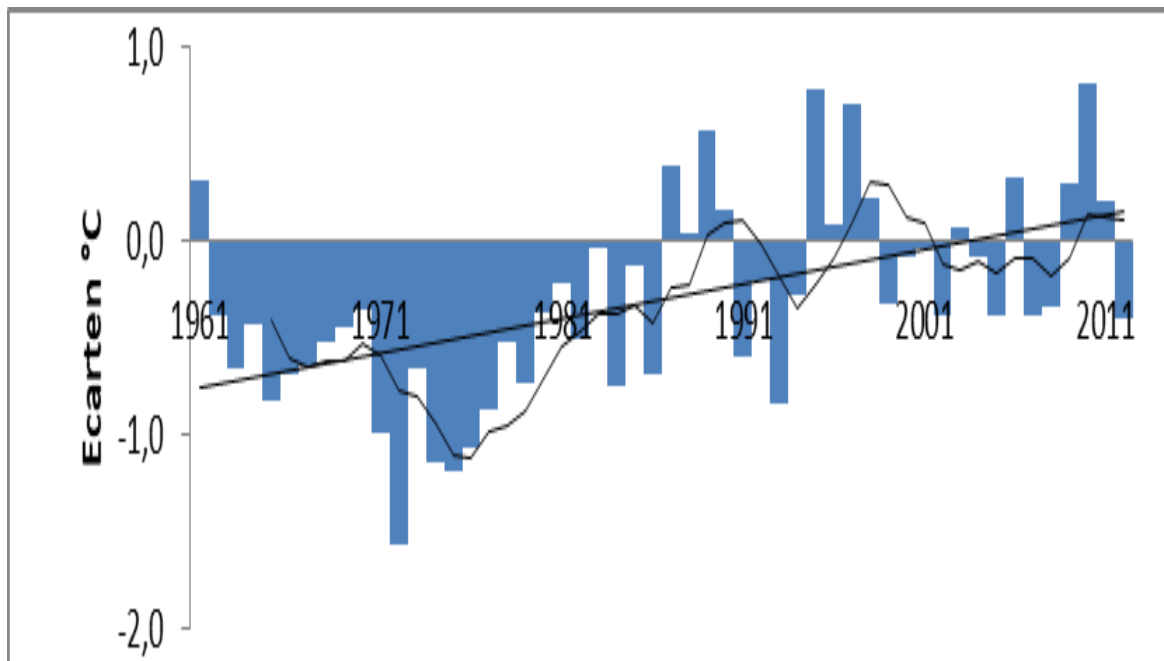


Figure 67 : Evolution de l'écart de la température moyenne annuelle à la normale (1961-2012) (Rabat-Salé).

-Températures minimale

L'évolution des températures minimales à la région de Rabat met en évidence la tendance vers la baisse des températures minimales annuelles, cette baisse est estimée à -1.2 °C entre 1961 et 2012. La baisse est notable surtout à partir des années 2000 avec la particularité d'une nette augmentation durant les années 90. La température la plus basse de la série est -3.6 °C enregistrée le 28/01/2005 (Figure 68).

Ajouter l'analyse et la carte des moyennes des minis.

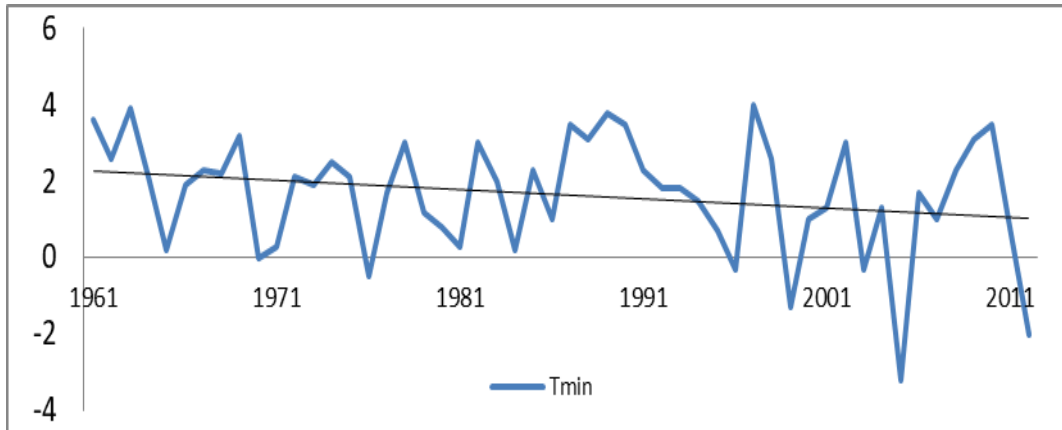


Figure 68 : Evolution des températures minimales annuelles (1961-2012) (Rabat-Salé).

-Température maximale

Les températures maximales ont connu durant la période 1961-2012 une évolution positive de l'ordre de $+0.97\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cependant, depuis 1990, on note une importante diminution estimée à $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre 1990 et 2004. A partir de 2005, la température maximale a repris son caractère évolutif vers la hausse avec une augmentation de l'ordre de $+1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. La température maximale absolue de la série est $47.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ enregistrée le 19/07/1967 (Figure 69).

Ajouter l'analyse et la carte des moyennes des maxis.

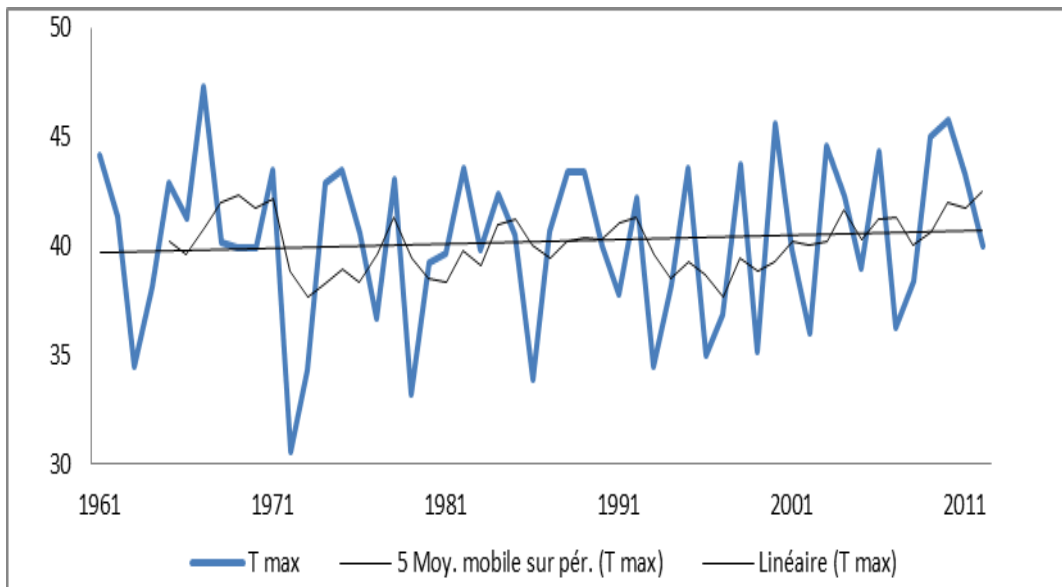


Figure 69 : Evolution des températures maximales annuelles (1961-2012) (Rabat-Salé).

1.2.3.1.3. L'insolation

L'ensoleillement de la région de Rabat Sale, traduit en heures d'insolation, a augmenté d'environ 192 ou 244 heures durant la période 1961-2012 ; soit 3.77 heures par/année. Au regard de la dernière décennie, la durée d'ensoleillement a tendance à diminuer surtout à partir de 2004 (Figure 70).

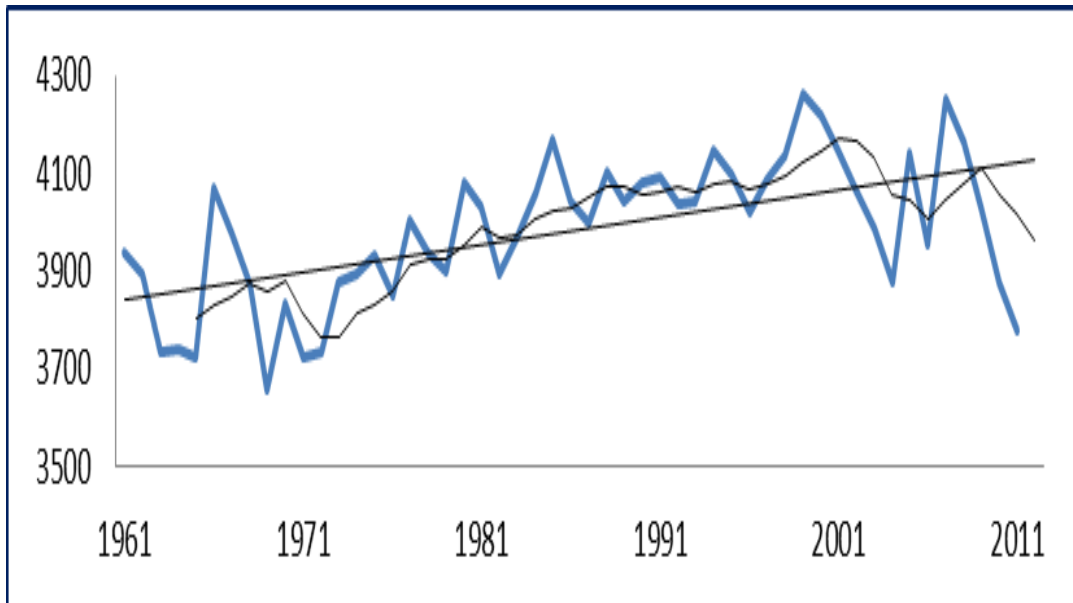


Figure 70 : Cumul annuel de la durée d'insolation pour la période 1961-2012.

1.2.3.1.4. Le Vent

-Caractère général

L'analyse de la dominance du vent en termes d'intensité et de direction à la région du nord a été effectuée à partir des données horaires pour les cinq dernières années 2009-2013.

On ce qui concerne la direction du vent à Rabat Salé, on constate que le vent se manifeste dans plusieurs directions avec des pourcentages plus significatifs dans le secteur nord et le secteur ouest : la direction nord totalise un maximum de 10.3% dont 67% des vents modérés. En deuxième position vient la direction sud et la direction sud est avec respectivement 8.3% et 8.2%. Quant aux vents forts, ils se produisent principalement dans le secteur Sud Ouest avec un pourcentage de 40%. La pointe maximale absolue enregistrée est de 119 km/h le 19/12/1973 d'un vent soufflant de Sud Ouest (Figure 71).

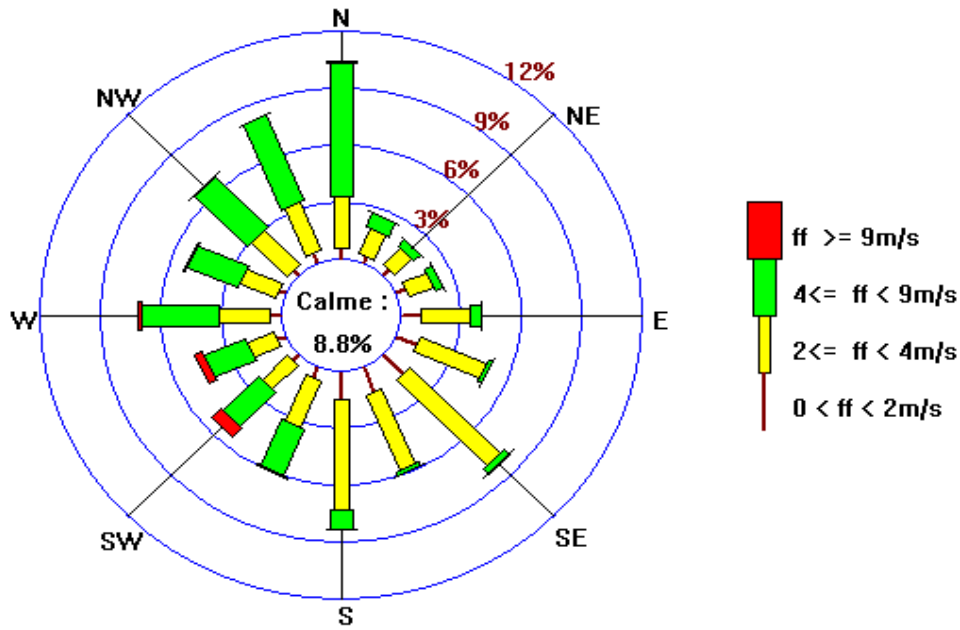
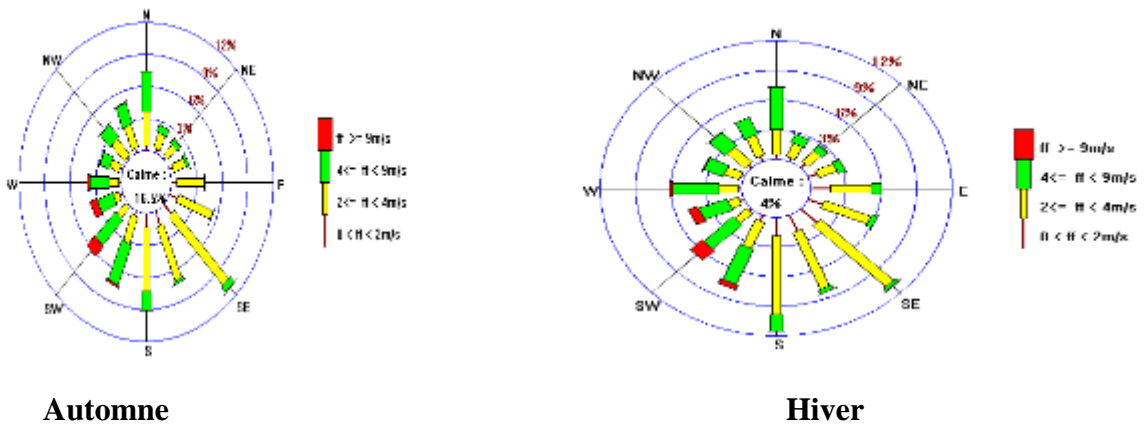
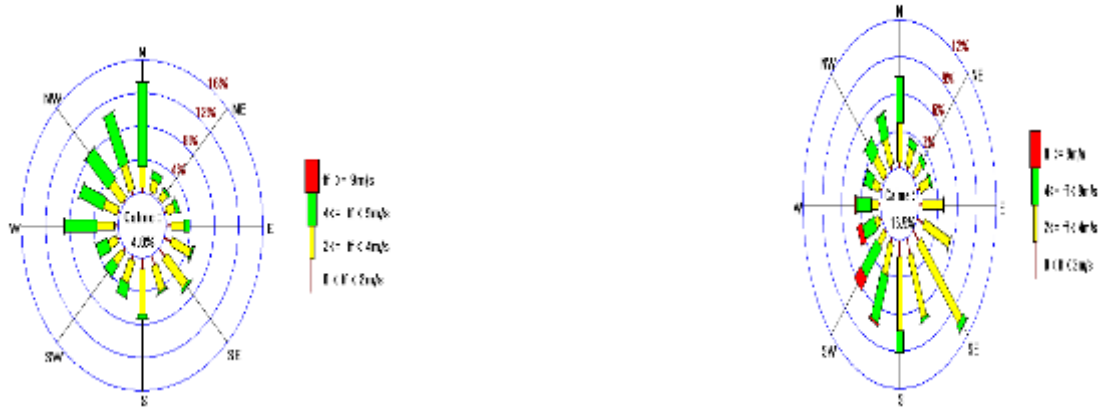


Figure 71 : Rose du vent annuelle pour la période 2009-2013.

1.2.3.2. Evolution Saisonnière

Afin de mettre en évidence les variations dans la distribution des directions et des vitesses du vent durant les différentes saisons de l'année, nous avons calculé le tableau de contingence et tracé la rose du vent pour les différentes saisons à partir des données horaires couvrant la période 2009-2013 (Figure 72).





Printemps

Eté

Figure 72 : Roses des vents par saison (2009-2013) à la région de Rabat.

Les grands vents atlantiques constituent l'élément prédominant de la circulation atmosphérique au niveau du sol à la région de rabat. C'est plus particulièrement de Sud Ouest que soufflent les vents forts durant les saisons d'automne, d'hiver et d'été à la région.

Le vent en saison d'Automne : la prédominance des vents est de secteur Sud qui totalise plus de 11% des vents dont 47% des vents forts soufflent du secteur Sud Ouest.

Le vent en saison d'Hiver : les vents de direction Sud et Sud Est présentent une prédominance respective de 11.5% et 11.1% dont plus de 42% des vents forts soufflent de Sud d'Ouest.

Le vent en saison de Printemps : les vents prédominent dans le secteur nord qui totalise 13.3% des vents dont 76% sont des vents modérés à assez fort. Les vents forts sont présents d'une façon atténuée durant cette saison avec un pourcentage ne dépassant pas les 0.5%.

Le vent en saison d'été : les vents prédominant sont des vents de nord qui totalise 13.3% des vents dont 74% sont des vents modérés a assez fort. 35 % des vents forts.

1.2.3.3. Evolution intra-annuelle des vents forts et violents

Concernant la répartition en nombre de jours des vents forts (>16m/s), on remarque une forte variabilité intra annuelle de la fréquence mensuelle avec des vents forts. Les vents forts se manifestent fréquemment le mois de Décembre et le mois de Janvier avec respectivement 98 jours et 97 jours au cours de la période 1961-2012 (Figure 73).

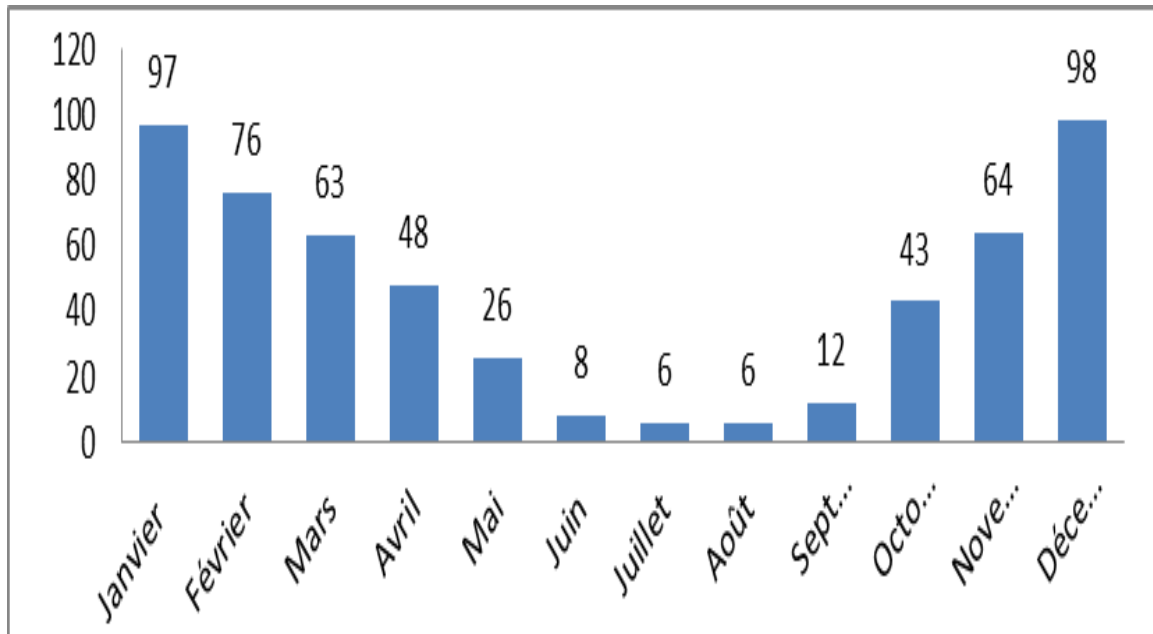


Figure 73 : Nombre de jours avec des vents forts et violents durant la période 1961-2012

1.2.3.4. Humidité

La (Figure 88) illustre l'évolution de la moyenne mensuelle de l'humidité maximale et minimale pour les trente années. On constate que l'écart maximal entre l'humidité moyenne maximale et minimale est de l'ordre de 39 % avec 95.6 % comme valeur maximale le mois de Février et 55.1 % le mois d'Avril.

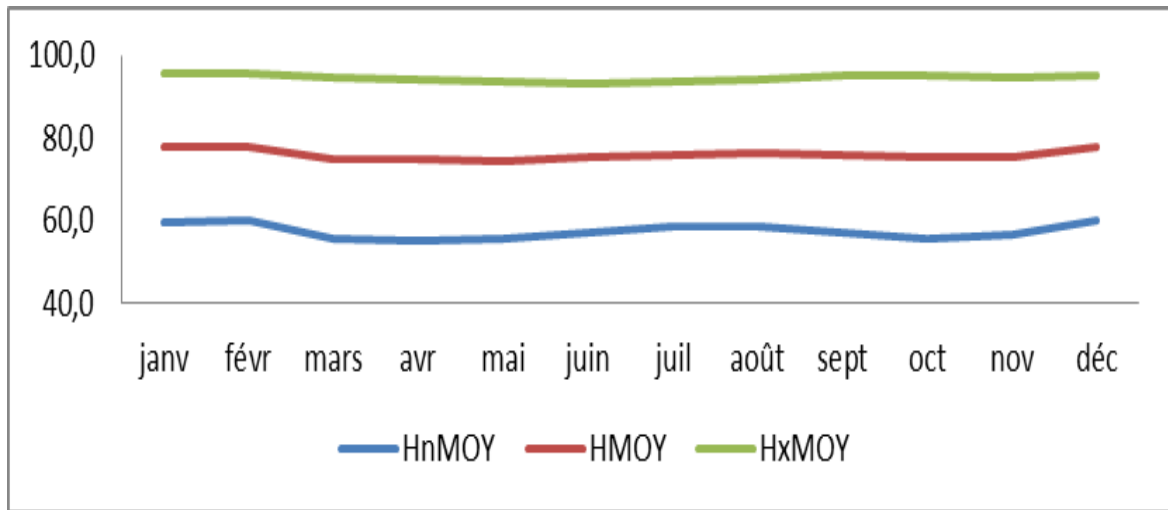
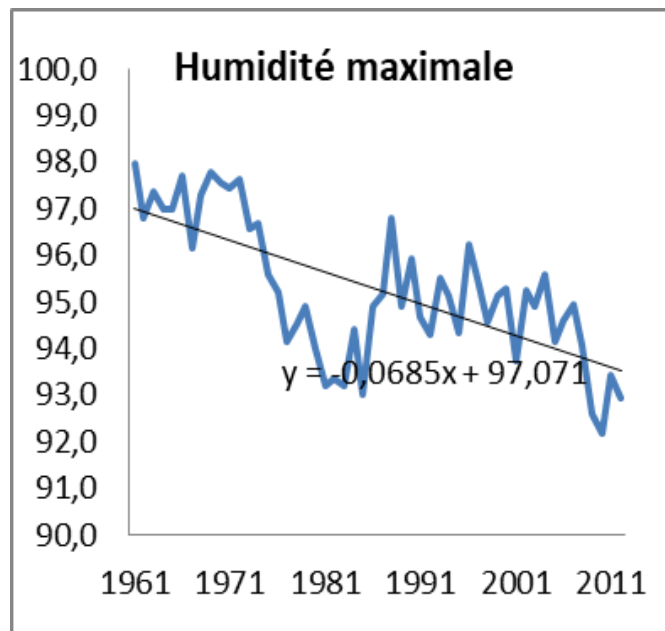
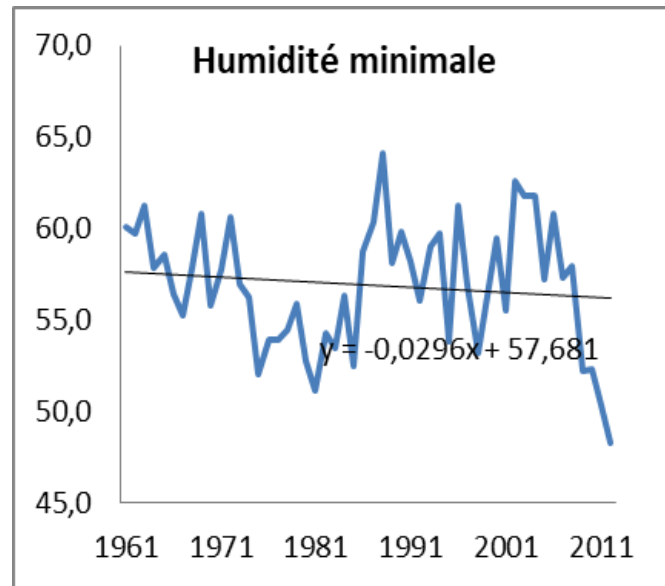


Figure 74 : Moyenne mensuelle de l'humidité maximale et minimale à la région de Rabat





**Figure 75 : Evolution de
Humidité minimale et maximale durant la période 1961-2012.**

La (Figure 75) montre une tendance notable vers la baisse pour l'humidité maximale à Rabat surtout durant les années 80, et une légère baisse pour l'humidité minimale.

1.2.3.5. Phénomènes météorologiques fréquents

Parmi les phénomènes les plus fréquents que connaît la région de Rabat (Figure 100), on repère :

La rosée avec une normale de 63 jours/an, le maximum mensuel est de 9.3 jours le mois de décembre. Le maximum annuel noté durant les trente dernières est de 175 jours en 1993.

Le brouillard avec une normale annuelle de 37 jours, le mois de Mars est le mois le plus exposé à ce phénomène avec une moyenne de 5.2 jours/mois. Le maximum annuel est de 64 jours enregistré l'année 2000. La région est caractérisée par deux types de brouillard : on enregistre une dominance du brouillard de refroidissement en automne et du brouillard d'évaporation au printemps.

L'orage avec une moyenne de 13.1 jours /an. Le mois de Décembre est le mois où la manifestation orageuse est maximale avec une normale de 1.7 jours.

Le chergui avec une moyenne de 26.2 jours/an.

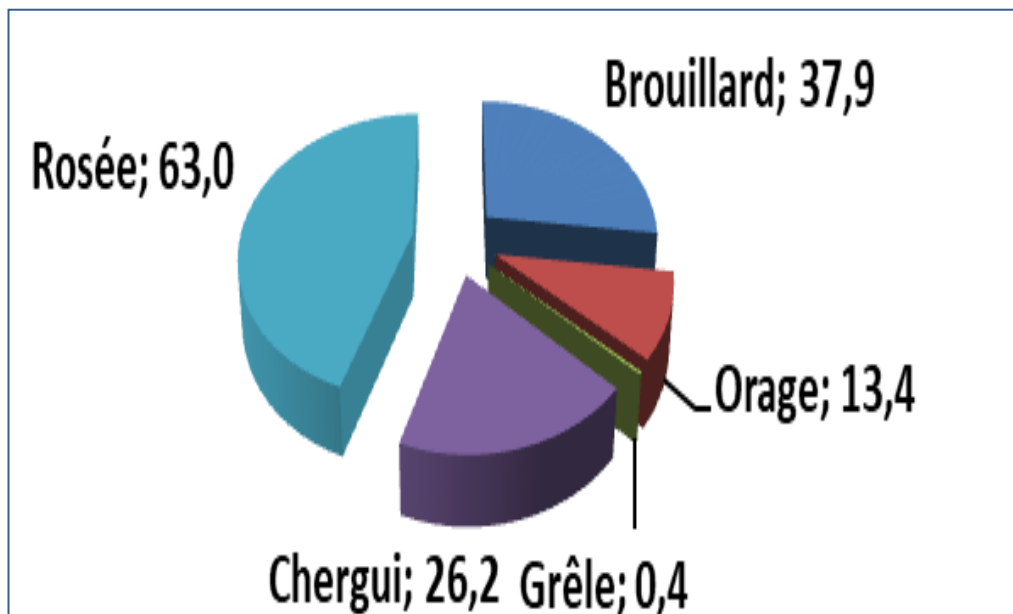


Figure 76 : Nombre annuel de jours des phénomènes météorologiques les plus importants De la région de Rabat.

- Synthèse Bioclimatique

- Quotient Pluvio-thermique d'Emberger.Q2

Le quotient d'Emberger permet de caractériser le climat méditerranéen du point de vue écologique (Sauvage, 1963). Ce quotient est défini comme suit :

$$Q2 = 1000P / ((M+m) * (M-m) / 2)$$

P : moyenne des précipitations annuelles (mm)

M : Moyenne des maxima journaliers du mois le plus chaud (degré Kelvin)

$$M (^{\circ}K) = t^{\circ}C + 272,6$$

m : Moyenne des minima journaliers du mois le plus froid (degré kelvin)

$$m (^{\circ}K) = t^{\circ}C + 272,6$$

Ce quotient permet de distinguer une variété d'étages bioclimatiques régnant au niveau du bassin versant. Ces étages bioclimatiques varient du semi aride au subhumide avec des variantes fraîches à chaudes. Les principaux bioclimats rencontrés dans le bassin sont décrits par le (Tableau 30).

Tableau 29 : Bioclimat du Bassin Versant (CNRF, Rabat et documents d'études)

Station	Max (°C)	min (°C)	Q2	Bioclimat
Rabat	28.4	8.1	83.99	Subhumide chaud.
Rommani	36.0	4.0	37.82	Semi aride tempéré
Oulmès	33.8	3.2	69.49	Subhumide tempéré
Khénifra	40.3	1.2	55.0	Semi aride frais
Tiflet	35.8	5.6	56.4	Semi aride tempéré
My Bouazza	33.7	3.2	67.5	Subhumide tempéré
Sidi Ahsine	35	3.2	79.6	Subhumide tempéré
Tiddas	35.1	4.5	53.4	Semi aride tempéré
Khémisset	36	5	62.0	Semi aride tempéré
Timeksaouine	34	4	64.2	Subhumide tempéré

Dans cette étude, j'ai utilisé les moyennes mensuelles des données météorologiques (Pluies et Températures : Tmax et Tmin) et les débits mensuels de la station hydrométéorologique de Tarhat (Khenifra) (ABH), pour la période de référence (1950-2000), et aussi pour les périodes de projections futurs **2050** (2041-2060) et **2070** (2061-2080) concernant l'amont du bassin. En suite, j'ai utilisé les données météorologiques (Pluies et Températures : Tmax et Tmin) de la station météorologique de Marchouch (Rommani-INRA), pour les périodes (1966-2008) et (2003-2008), et aussi pour la période de projection futur **2030** pour le centre du bassin. Plus, les données météorologiques (Pluies et Températures : Tmax et Tmin) de la station météorologique de Rabat-Salé (DMN), pour la période (1961-2012), concernant l'aval du bassin.

2. MODELISATION

2.1. Données du modèle MCG

2.1.1. Modèle HadCM3 (Scénarios SRES)

Le modèle **HadCM3** (Hadley Center Model 3, Service Météorologique Britannique) du site www.worldclim.org/futurdown.htm et les extraire par le logiciel ArcGis pour visualisation et affichage, puis les comparer avec les données climatiques mensuels présent de l'année (2007-2008) pour le site expérimental de Marchouch, INRA.

-Scénarios (SRES)

Scénario B2 :

Il s'agit d'un scénario optimiste qui décrit un monde où l'accent est Placé sur des solutions locales, dans un sens de viabilité économique, sociale et environnementale.

La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2. Il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution Technologique est moins rapide et plus diverse. Dans nos travaux de recherche, nous avons opté pour les scénarios A2 et B2, ces deux scénarios sont les plus proches de la trajectoire de l'évolution de la société marocaine et des changements associés aux indicateurs climatiques (Gommes et al., 2008). Ils sont largement utilisés à l'heure actuelle dans les travaux de modélisation réalisés avec les modèles couplés les plus complets.

2.1.2. Modèle CNRM-CM5 (Scénarios RCPs)

La nouvelle version du modèle de circulation globale CNRM-CM a été développé par CNRM-GAME (Centre Nationale de Recherches Météorologiques-Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique) et Cerfacs (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée) dans l'ordre à contribuer à la phase 5 du projet inter-comparaison du Modèle couplé (CMIP5). La proposition de l'étude est de décrire ses caractéristiques principales, une évaluation de la demande préliminaire du climat moyen. CNRM-CM5.1 inclus le modèle atmosphérique ARPEGE-climat (v5.2), le modèle Océan NEMO (v3.2), la surface de la terre schema ISBA et le modèle glace de la mer GELATO (v5) couplé à travers le système OASIS (v3).

❖ Scénarios RCPs

Dans la perspective de l'élaboration du 5^e rapport d'évaluation du GIEC, un groupe international d'experts a défini quatre scénarios de référence, qualifiés de profils représentatifs d'évolution des concentrations (RCP, pour *Representative Concentration Pathways*) de gaz à effet de serre (GES), d'ozone et de précurseurs des aérosols pour le XXI^e siècle et au-delà. Ces scénarios, peuvent correspondre à des efforts plus ou moins grands de réduction des émissions de GES au niveau mondial.

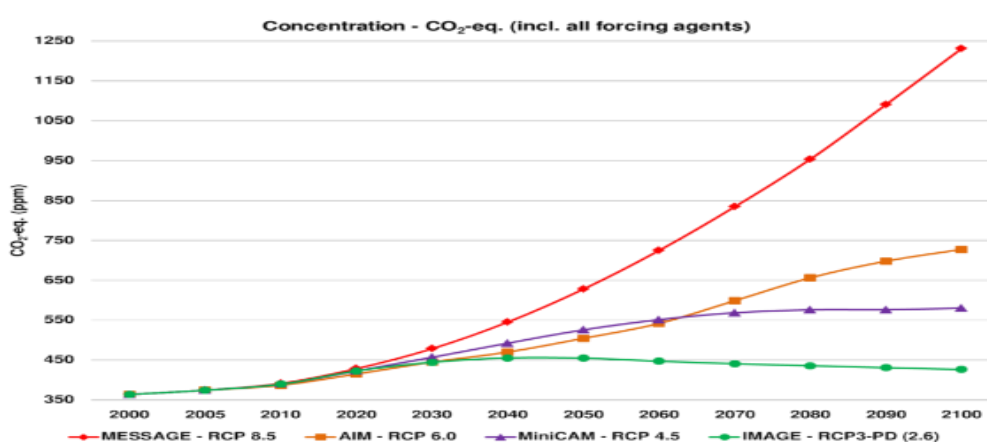


Figure 77 : Concentration de CO₂ avec tous agents de forçage.

Les profils *RCP* sont décrits jusqu'en 2300, alors que les scénarios *SRES* des précédents travaux du GIEC s'arrêtaient en 2100.

2.1.2.1. Analyse statistiques des précipitations et des Températures maximales et minimales.

2.1.2.2. Réduction d'échelle

Pour des simulations à un niveau régional, on recourt à une méthode de « descente d'échelle » (Figure 13) utilisant le développement de modèles régionaux, avec des résolutions de 10 à 50 km qui prennent en compte plus finement la topographie. Ces modèles sont eux-mêmes relayés par des modèles d'impact ou d'adaptation locaux, d'une résolution horizontale de l'ordre du kilomètre.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

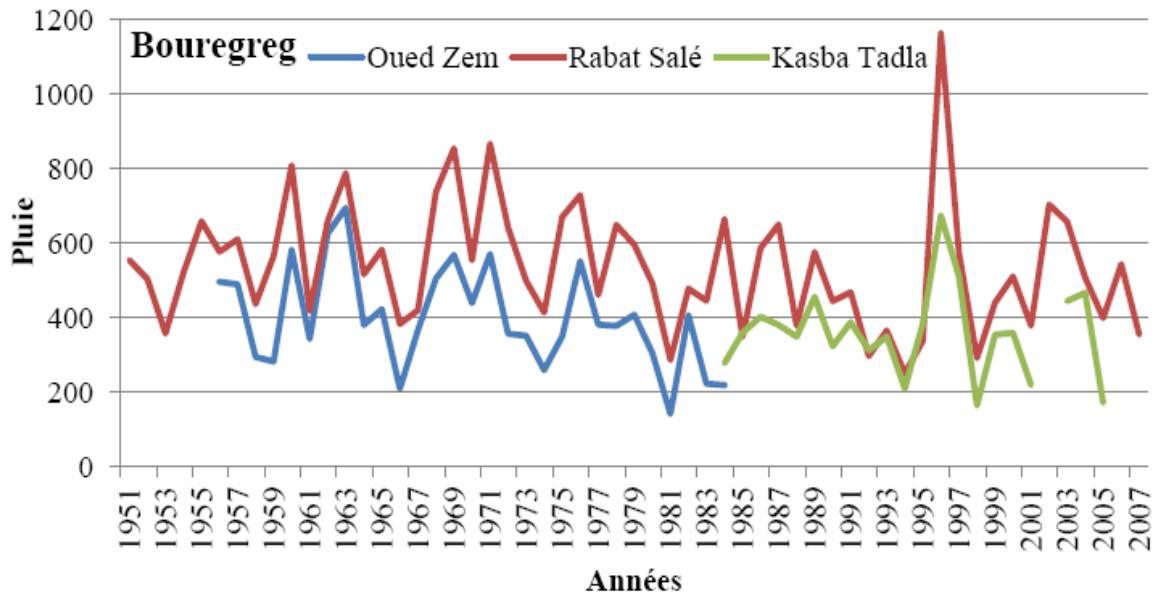


Figure 78 : Evolution des Séries Pluviométriques dans le Bassin Versant du Bouregreg (en mm) (SIGMED, 2012)

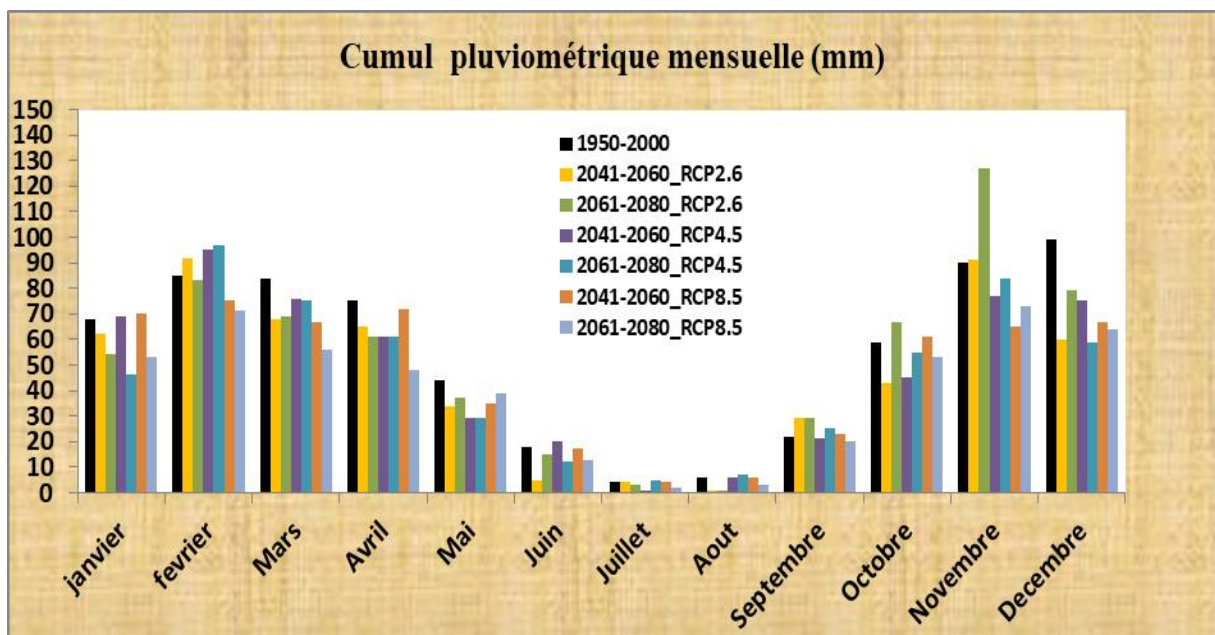


Figure 79 : Pluies mensuelles de Tarhat (région Khenifra) pour la période passée (1950-2000) et Les périodes futures (2041-2060) et (2061-2080) pour les RCPs (2.6, 4.5 et 8.5).

On remarque que :

Tendance à la diminution des pluies durant la saison hivernale (Dec-Janv) pour le scénario RCP2.6, tandis que pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 on a une diminution pour décembre et pas de changement significatif pour janvier.

Diminution des pluies durant la saison du printemps (Mars-Avril-Mai) et le début de la saison hivernale pour les trois scénarios à l'exception du mois Novembre pour le scénarios RCP2.6 où on a une nette augmentation des précipitations moyennes durant la période 2061-2080.

Les deux mois Novembre et Février sont les plus humide par rapport à la période de référence, les scénarios RCP2.6 et RCP4.5 prévoit la conservation de cette propriété à l'exception du scénario RCP8.5.

Le scénario RCP8.5 prévoit une diminution des précipitations durant les mois Novembre à Mars à l'exception du mois de Janvier.

On constate également que les précipitations moyennes pour le scénario RCP4.5 restent quasiment stationnaire durant les deux périodes de projection 2041-2060 et 2061-2080 et ce, durant la fin de la saison humide. On peut interpréter ceci par le faite que le scénario RCP4.5 prévoit une stabilisation de la concentration du CO₂ à partir de l'année 2050 (Figure 93).

On constate qu'il ya une variabilité faible du cumul pluviométrique mensuelle pour la saison humide (Octobre-Avril). Pour les périodes futurs (2041-2060 et 2061-2080) pour les RCPs (2.6, 4.5 et 8.5) par rapport à la période de base (1950-2000). Mais, le graphe illustre un cumul pluviométrique supérieur au futur pour les mois les plus humides de la région (Novembre et Février) par rapport à la période passée. et aussi, une diminution du cumul pluviométrique mensuelle pour les mois critiques de croissance de la céréaliculture de la région (Février-Mai).

La corrélation des pluies entre 2050 et le passé (1950-2000) est 93.15% et l'écart moyen est -8.33, la corrélation entre 2070 et le passé est 91.27% et l'écart moyen est -2.42, et la corrélation entre (2050-2070) est 93.01% et l'écart moyen est 5.92. (Figure 79)

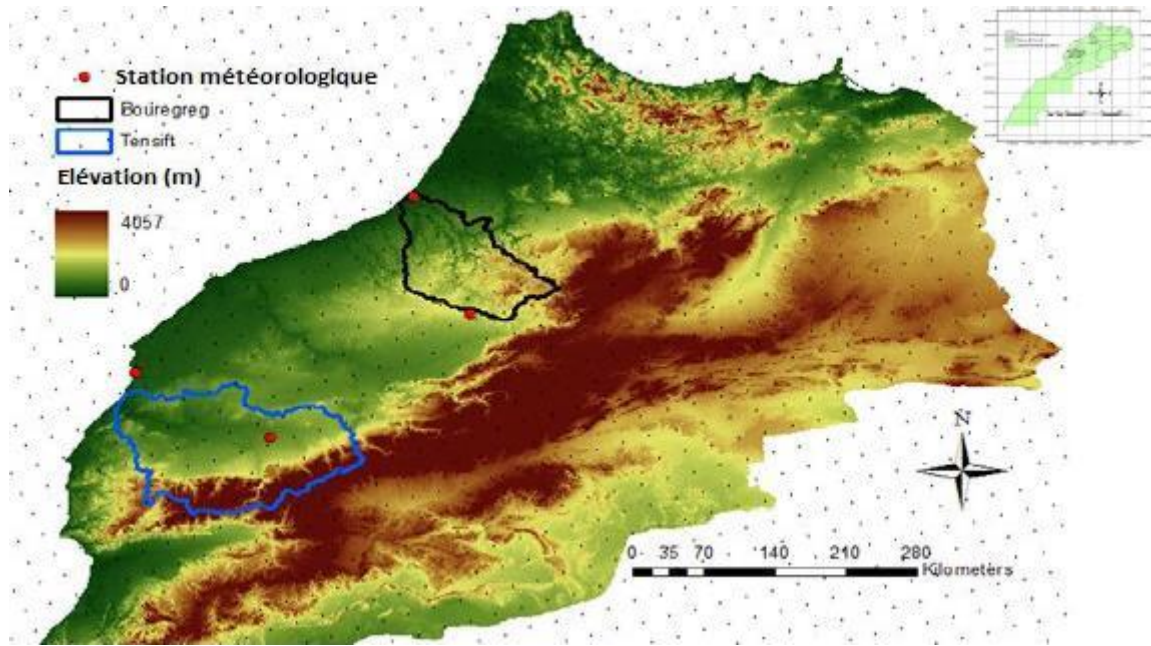


Figure 80 : Grille des modèles climatiques régionaux (Points noirs).

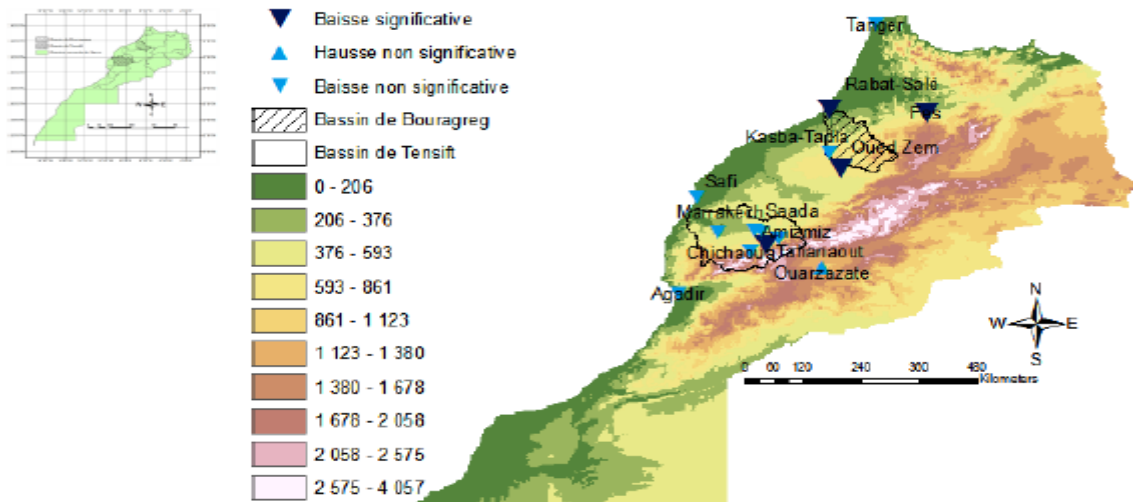


Figure 81 : Tendence des pluies dans la zone d'étude.

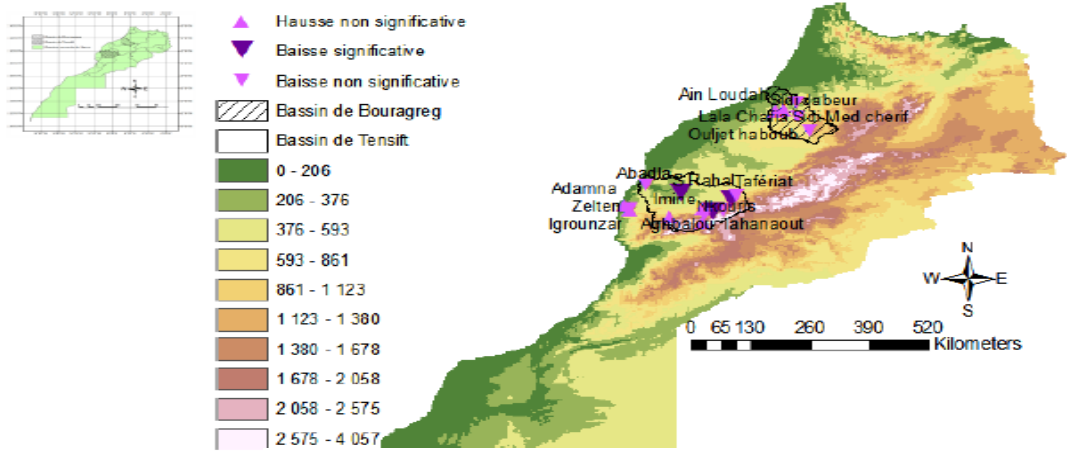


Figure 82 : Tendence des débits dans la zone d'étude.

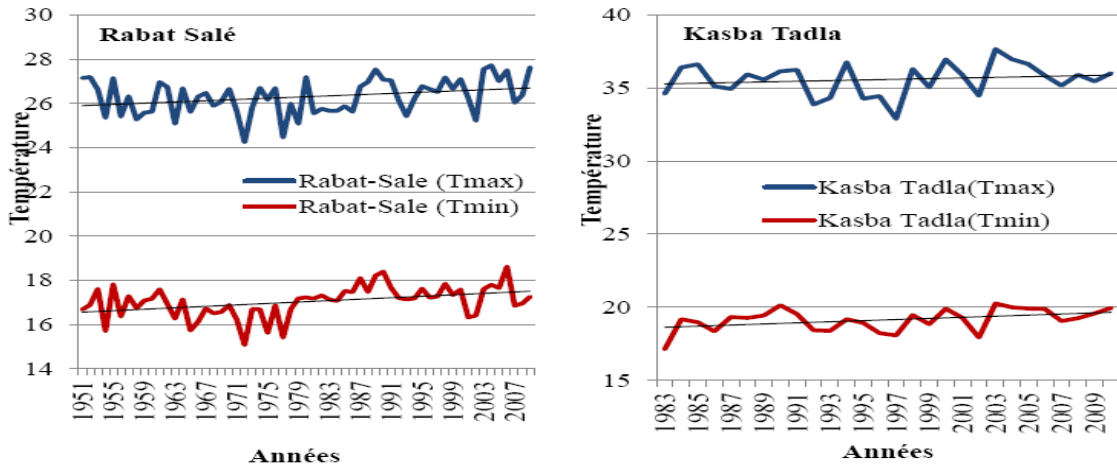


Figure 83 : Températures Maximales et Minimales aux stations de Rabat-salé et Kasba-Tadla en été (°C).

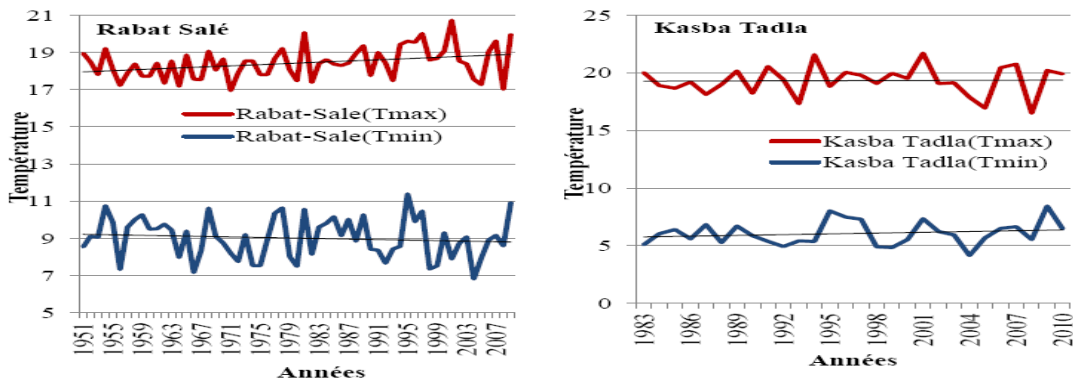


Figure 84 : Températures Maximales et Minimales aux stations de Rabat-salé et Kasba-Tadla en hiver (°C).

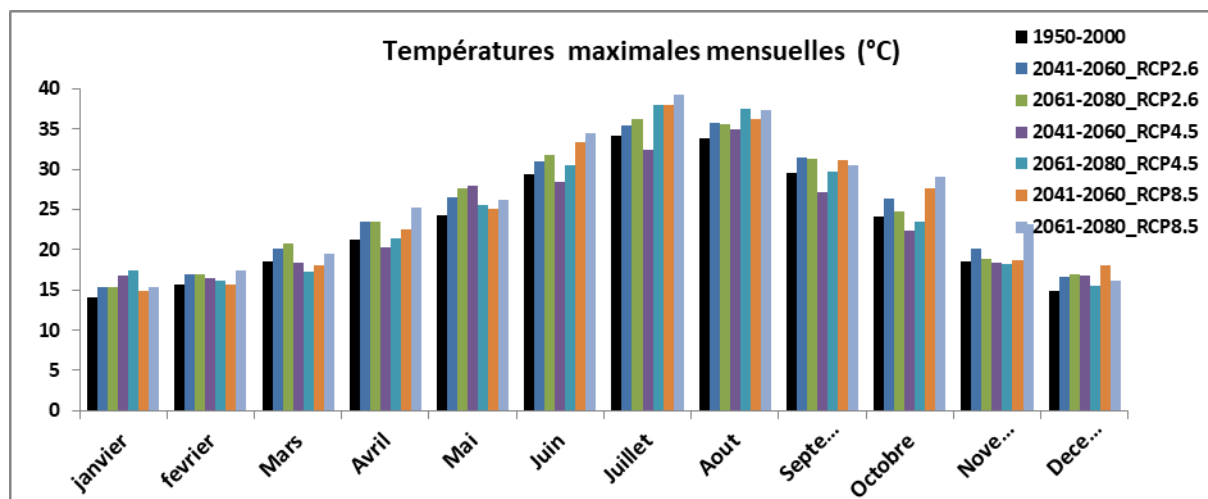


Figure 85 : Températures maximales mensuelles de Tarhat (région Khenifra) pour la période passée (1950-2000) Et les périodes futurs (2041-2060) et (2061-2080) pour les RCPs (2.6, 4.5 et 8.5).

Tendance générale à la hausse des températures maximales par rapport à la période de référence. La hausse est plus marquée durant la saison estivale (Juin-Aout). La hausse est moins significative durant les mois Février, Novembre et Décembre. Le scénario RCP4.5 prévoit des températures maximales inférieures que celles prévues par le scénario RCP2.6 durant le début et la fin de la saison humide. Dans la plupart des cas, le scénario RCP8.5 prévoit une augmentation très marquée des températures maximales surtout durant la période de projection 2061-2080. Le graphe nous montre une augmentation des températures maximales mensuelles pour les périodes (2041-2060 et 2061-2080) pour les RCPs (2.6 ; 4.5 et 8.5) par rapport à la période de référence (1950-2000). Ce qui donnera la période humide (Octobre-Avril) plus chaude. La corrélation des températures maximales entre 2050 et la période passée (1950-2000) est 99.86% et l'écart moyen est 23.36, la corrélation entre 2070 et le passé est 99.46% et l'écart moyen est 24.20, et la corrélation entre (2050-2070) est 23.19% et l'écart moyen est 23.19 (Figure 99).

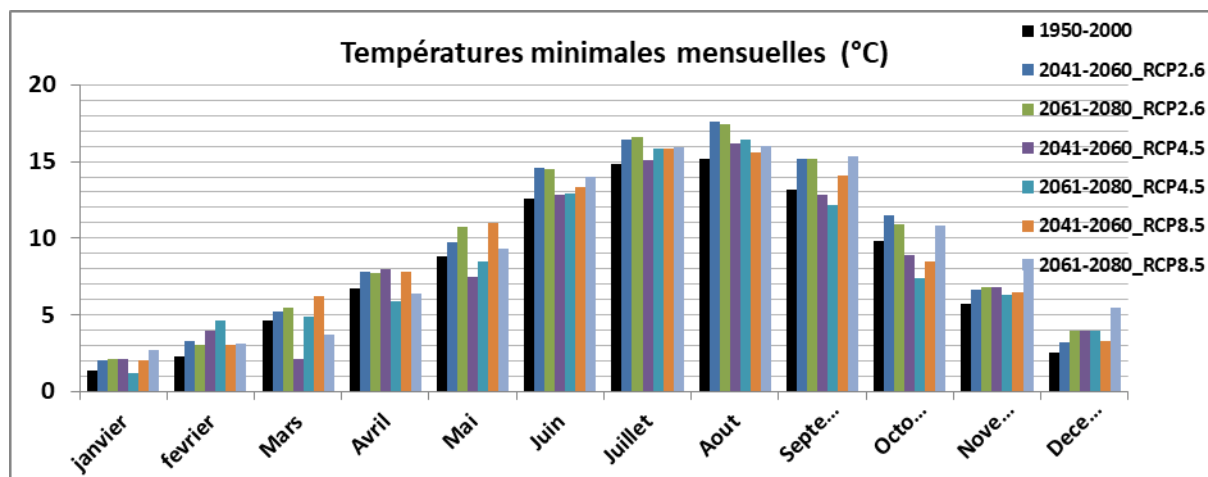


Figure 86 : Températures minimales mensuelles de Tarhat (région Khenifra) pour la période passée (1950-2000) et Les périodes futurs (2041-2060) et (2061-2080) pour les RCPs (2.6, 4.5 et 8.5).

Tendance générale à la hausse des températures minimales par rapport à la période de référence. La hausse est plus marquée durant la saison estivale (Juin-Aout). La hausse est moins significative durant les mois Janvier, Novembre. Le scénario RCP2.6 prévoit une augmentation plus significative pendant Mai-Octobre que les autres scénarios. Le scénario RCP8.5 prévoit des températures minimales plus faibles pendant Février-Mars-Avril. Le scénario RCP8.5 prévoit une augmentation plus marquée des températures minimales durant Septembre→Janvier. (La Figure 100), ci-dessus nous renseigne une augmentation des Températures Minimales mensuelles pour les périodes (2041-2060 et 2061-2080) des RCPs (2.6 et 8.5) par rapport à la période passée (1950-2000). Ceci, rendra la période humide très chaude. La corrélation des températures minimales entre 2050 et le passé est 99.87% et l'écart moyen est 8.36, la corrélation entre 2070 et le passé est 99.85% et l'écart moyen est 8.34, et la corrélation entre (2050-2070) est 99.69% et l'écart moyen est 8.13. Selon les scénarios SRES (B2) et RCPs (2.6 ; 4.5 et 8.5), la zone d'étude deviendra plus aride dans le futur ce qui aura des effets directs et négatifs sur les cultures et surtout les rendements des céréales, et aussi sur les ressources en eau. Ceci, est conforme avec les résultats obtenus dans le rapport « WB/FAO/INRA/DMN » établi par l'étude sur le Maroc par la Banque Mondiale (Gommes *et al.* 2009).

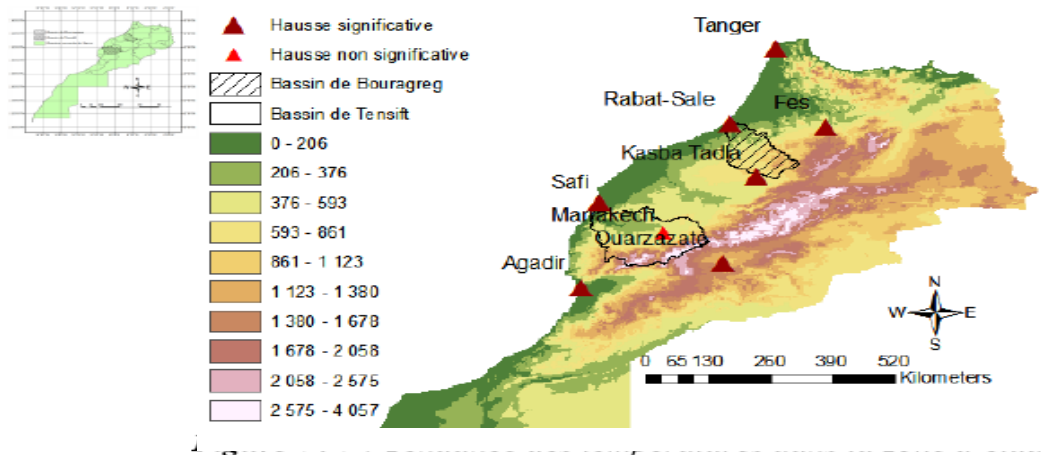


Figure 87 : Tendence des températures dans la zone d'étude.

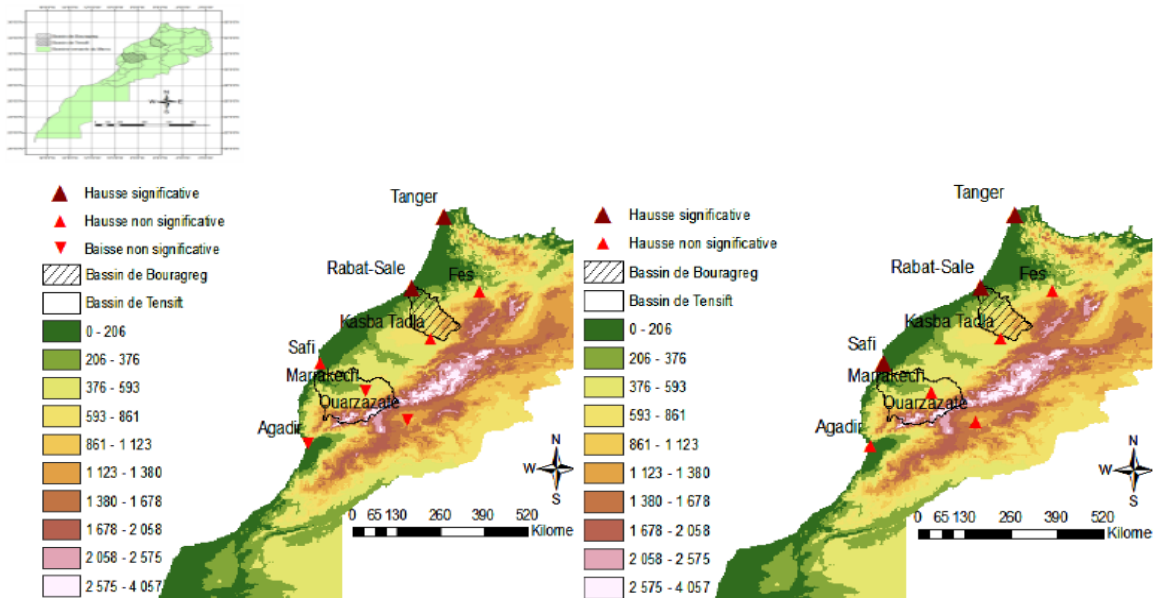


Figure 88 : Tendence des températures maximales dans les sites d'étude en été (gauche) Et en hiver (droite).

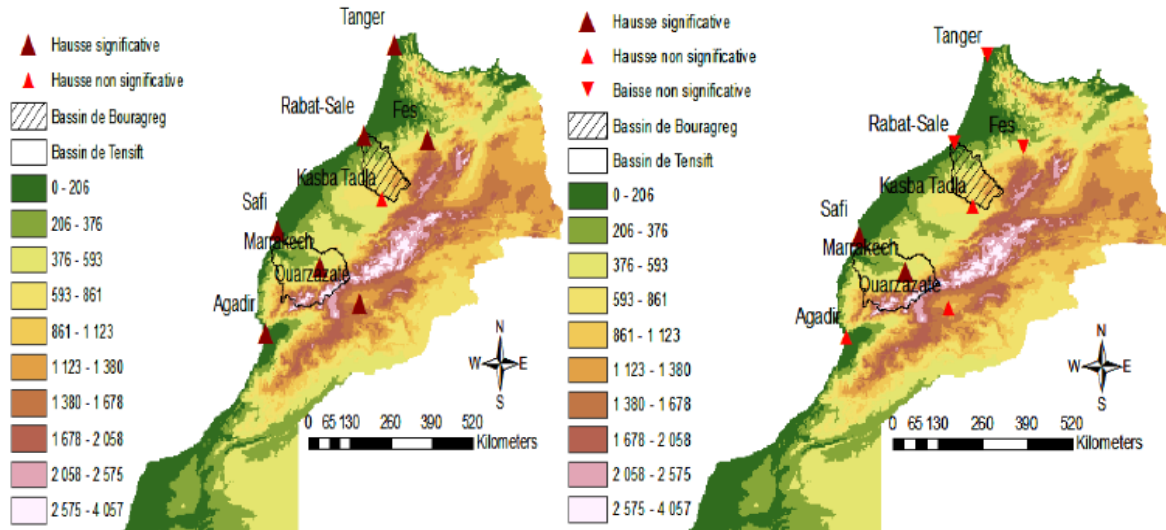


Figure 89 : Tendence des températures minimales dans les sites d'étude en été (gauche) Et en hiver (droite).

4. CONCLUSION

Influence sur la répartition temporelle des précipitations. Le régime hydrologique de l'ensemble du bassin Bouregreg est caractérisé par une très grande variabilité interannuelle marquée par l'alternance des séquences humides et sèches, intercalées par des années de forte hydraulicité ou de sécheresse sévère. Le bassin Bouregreg connaît un déficit hydrique de (8 %), et il est prévu de l'avoir aussi en 2030. Cette situation risque de se dégrader sous l'effet des changements climatiques et de l'aggravation des phénomènes extrêmes en particulier la réduction importante de la pluviométrie et des sécheresses généralisées. la menace de sécheresse plane toujours sur le pays à l'instar des périodes 1980-1985 et 1990-1995, 1998-2002, 2012, 2016 et 2020 durant lesquelles la quasi-totalité des bassins versants ont été en situation de déficit Ce chapitre a pour objectif d'étudier et comparer les tendances et les ruptures dans les séries pluviométriques régionales et les séries hydro-climatiques observées dans les bassins versants du Bouregreg. Il vise également l'analyse des séries de températures et de pluies aux stations de Rabat-Salé et Kasba-tadla. Précisément, cette étude a montré que :

- Les régimes pluviométriques dans le bassin versant du bouregreg diffèrent selon les régions de chaque bassin ; ainsi le régime des pluies au nord du bassin du Bouregreg diffère de celui au sud. Une baisse générale des pluies annuelles est remarquée dans toutes les régions du bassin du Bouregreg. En dehors des séries pluviométriques des régions 4 du Bouregreg, aucune tendance n'est statistiquement significative.

CHAPITRE IV : ÉVALUATION DE LA VULNERABILITÉ AGRICOLE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG.

INTRODUCTION

1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET MOTIVATION SCIENTIFIQUE

Le bassin versant du Bouregreg est localisé dans le centre Nord -Ouest du Maroc. Il appartient à la zone agro-écologique pluviale favorable du Royaume. 78% du territoire marocain est constitué de zones arides et sahariennes, et seulement 15% du pays présente des caractéristiques semi-arides (Figure 104). Cette répartition spatiale bioclimatique constitue la base de l'ensemble des problématiques liées à la dynamique agro-sylvo-pastorale du pays.

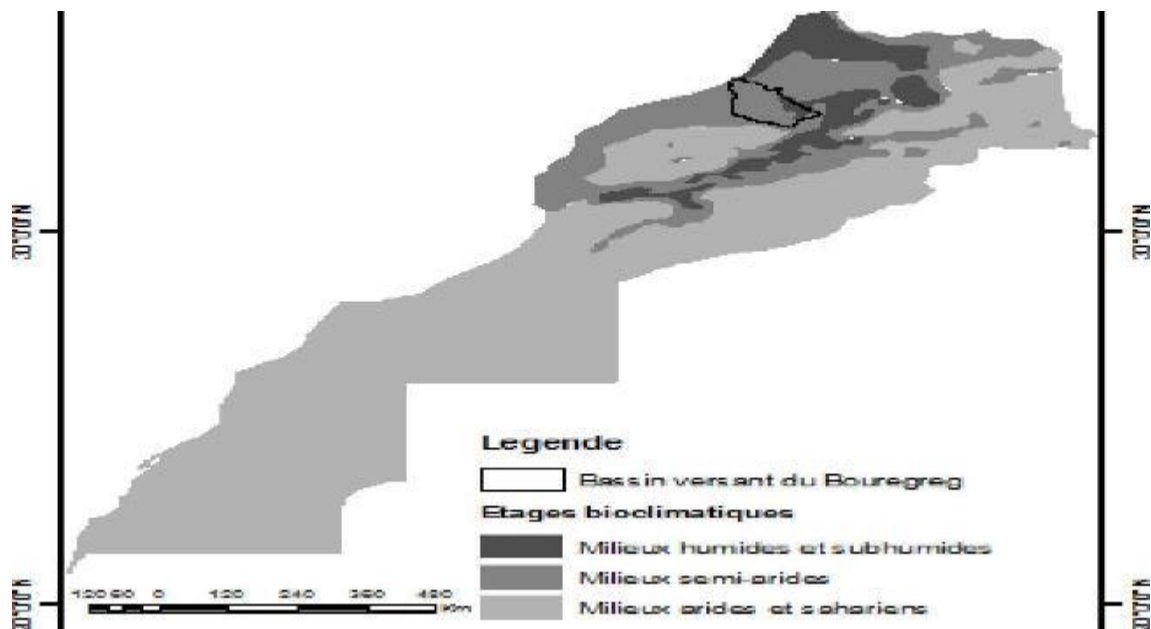


Figure 90 : Localisation du bassin versant du Bouregreg.

La dynamique paysagère actuelle du bassin du Bouregreg est guidée par l'interaction de trois **Facteurs principaux** : -les **facteurs naturels** dominés par l'évolution du climat ; -les **facteurs anthropiques** marqués par une intense activité agricole et pastorale ; et le **contexte social**, historique et politique.

1.1. Des activités agricoles et pastorales soumis à une baisse de la pluviosité.

Le climat marocain est caractérisé par une grande variabilité à la fois spatiale et temporelle Des précipitations et des températures. Le bassin versant du Bouregreg, bien qu'appartenant aux espaces humides du pays, n'échappe pas cette variabilité climatique. (Knippertz et al., (2003), cherchant la corrélation entre la variabilité pluviométrique au Maroc et la circulation océan-atmosphère à grande échelle constate que le coefficient de variation des Précipitations moyennes annuelles oscille entre 25% au niveau de la côte atlantique (comprenant le bassin versant du Bouregreg) et 100% dans les régions du Sahara.

Scénario A2 = scénario pessimiste qui décrit un monde où la population mondiale augmente rapidement, avec une forte croissance économique basée sur les technologies polluantes dans un monde qui est devenu plus protectionniste avec des disparités croissantes entre le Nord et le sud. C'est un monde qui continue d'utiliser les combustibles fossiles avec des inégalités éco-régionales.

Scénario B2 = Scénario optimiste qui décrit un monde où l'accent est mis sur des solutions locales et viables du point de vue économique, social et environnemental. La population mondiale continue d'augmenter mais à un rythme plus lent que dans le scénario A2. Il s'agit des niveaux intermédiaires de développement et les progrès technologiques sont plus lents et plus variés.

1.2. Activités agricoles – disponibilité de la ressource en eau –

❖ Pression sur le milieu

Le secteur agricole demeure un des piliers fondamentaux de l'économie du Maroc. Il représente 13 à 23% du Produit Intérieur Brut. Les analyses de l'évolution de l'économie marocaine présentent une forte corrélation entre l'évolution des performances agricoles et celui du PIB. Les productions agricoles étant elles même très influencées par la variation des quantités pluviométriques. L'orientation de la politique agricole adoptée par le Maroc, dès

1960, s'est appuyée sur un double constat : le caractère traditionnel de cette agriculture marocaine et le poids de la contrainte climatique qui pèse sur elle (Narjisse, 2006). Aussi, pour moderniser le secteur agricole et réduire l'impact des aléas climatiques sur lui, une politique d'irrigation est engagée par la construction de barrages.

1.3. Activités pastorales –dégradation du milieu physique

Les terrains de parcours au Maroc couvrent une superficie globale de 53 million d'hectares dont 21 million de parcours de steppe. Ils assurent 30% des besoins alimentaires du cheptel national. 32 millions de ces parcours sont permanents. Les espaces forestiers représentent une part importante de ces parcours permanents. Les forêts contribuent pour 17% des besoins alimentaires du cheptel (Benbrahimet al., 2004; Balaghi et al., 2007).

2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

2.1. Problématique

De nombreuses études sur l'évolution des conditions de surface au Maroc et dans le bassin versant du Bouregreg en particulier ont été faites (Laouina et al., 2003, 2004; Mohsine,2009; Aderghal et al., 2011; EGIS BCEOM, 2011). Toutefois, ces études réalisées au niveau de ce bassin se sont limitées à des sous espaces (micro-bassin) ou à des espaces régionaux. Les études antérieures souffrent ainsi d'un problème d'échelle d'analyse à la fois au niveau Spatiale, mais aussi au niveau temporelle concernant l'étude de la dynamique environnementale du bassin du Bouregreg En effet, au niveau spatial, les études sur les micro-bassins ne permettent pas de comprendre toute la dynamique de l'interaction entre le climat, les activités agropastorales et leurs impacts sur le milieu naturel.

- D'autre part, il s'agit d'utiliser différents modèles climatiques réduits sur le bassin versant du Bouregreg pour analyser les scénarios climatiques futurs et leurs impacts potentiels au niveau agricole.

3. METHODOLOGIE GENERALE DE L'ETUDE

Les détails méthodologiques de cette étude seront abordés au début de chaque chapitre. L'étude de l'impact des activités -Une entrée climatologique (Brou, 2005) ; -Une entrée biogéographique. Le choix est fait ici d'aborder l'étude par l'analyse de la dynamique de la végétation (entrée biogéographique). La végétation présente en effet, à un moment donné, une synthèse des interactions des facteurs externes que sont le milieu socio-économique et culturel, le climat et le support pédologique. La méthodologie générale d'analyse s'articule autour de deux axes : une approche spatiale et une approche temporelle. Au niveau spatial, il s'agit d'adopter une démarche allant du global au détail (réduction d'échelle). Le bassin versant du Bouregreg a une dimension d'environ 9700 km². L'outil le plus adapté à une analyse de l'ensemble du bassin est certainement la télédétection. A ce niveau, le premier et le deuxième ordre de grandeur spatial sont définis par l'utilisation des images de basse et moyenne résolution spatiale de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et de MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer). Le troisième et le quatrième ordre de grandeur sont marqués par le traitement des images de haute résolution spatiale (Landsat et SPOT 5). Au niveau temporel, l'étude s'étend de 1980 à 2009 avec deux types de résolution: -l'analyse des images de haute résolution temporelles que sont les images de NOAA et de MODIS, mais aussi les statistiques agricoles et climatiques; -et les analyses ponctuelles à partir des images de basse résolution temporelle (Landsat et SPOT 5). Le traitement et l'analyse des images, selon les différents ordres de grandeur énoncés précédemment, permet d'atteindre chacun des trois objectifs spécifiques.

Image/resolution spatiale/resolution temporelle

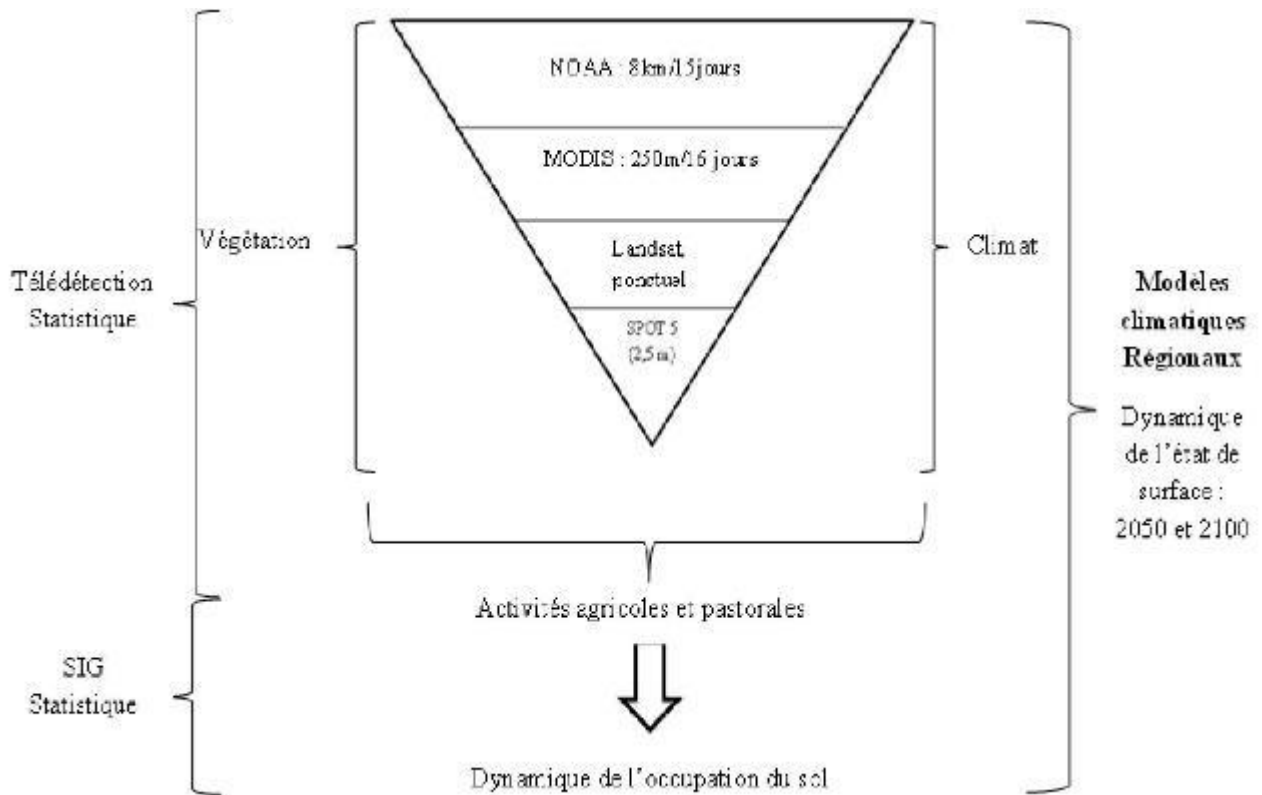


Figure 92 : Schéma méthodologique général

4. CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION ET DE L'OCCUPATION DU SOL.

Le bassin versant du Bouregreg est situé au centre Nord-Ouest du Royaume du Maroc. C'est un bassin méditerranéen localisé entre les parallèles 32°50 et 34°30 Nord et les méridiens 5° et 7° Ouest. D'une superficie de 9800 km², il est limité au nord et au nord-est par le bassin du Sebou, au sud et au sud-est par celui d'Oum Er-Rbia, à l'ouest et au nord-ouest par les bassins côtiers de Casablanca et l'Océan Atlantique. Ce bassin est drainé par trois principales artères hydrologiques : l'oued Bouregreg, l'oued Grou et l'oued Korifla.

Au niveau climatique, le bassin est localisé en milieu semi-aride.

4.1. Cadre physique du bassin versant du Bouregreg

4.1.1. Cadre géomorphologique (Beaudet, 1969 ; Marghich, 2004)

Le bassin versant du Bouregreg est de forme grossièrement allongée suivant la direction NNW-SSE. Ce plateau appartient dans sa moitié Est, au plateau central marocain (massifs anciens hercyniens). Dans sa partie ouest, il est constitué de plaines, de plateaux et de vallées alluviales plio-quaternaires. Les altitudes décroissent de l'Est (1600 mètres) vers l'Ouest (0 mètre).

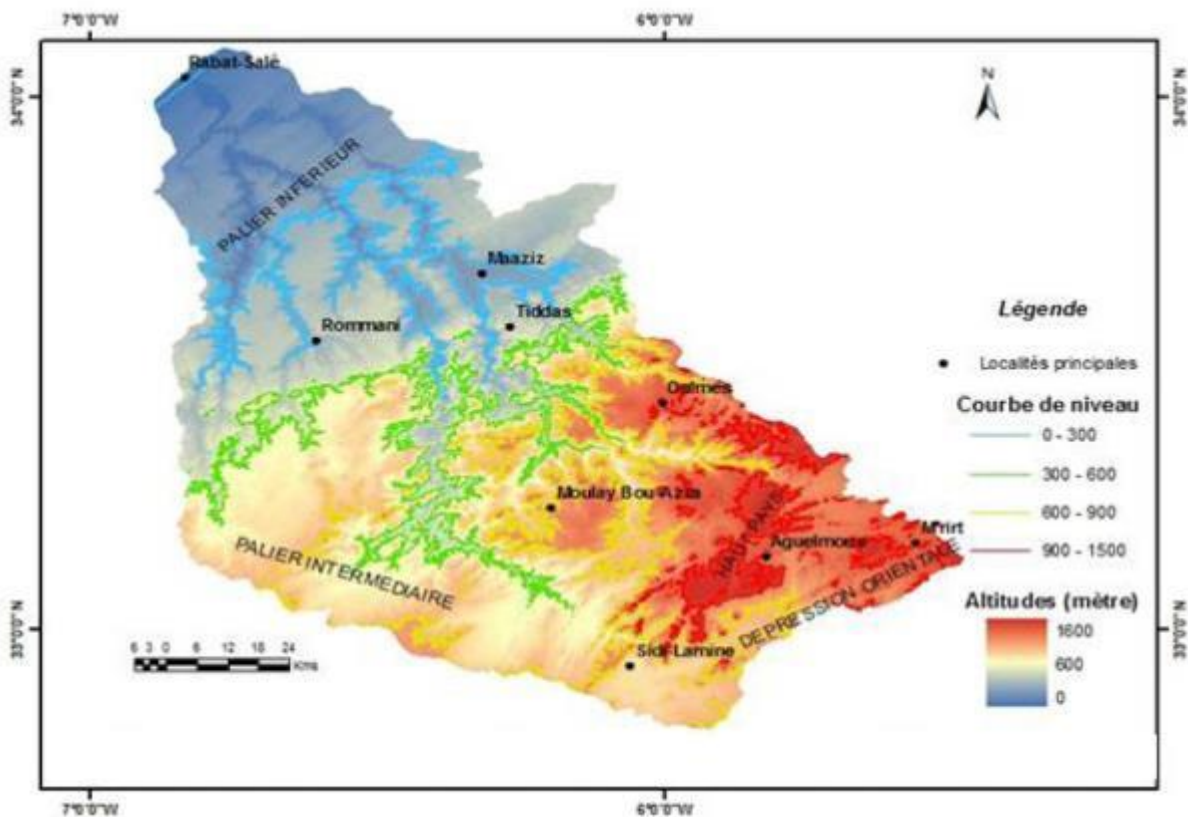


Figure 93 : unités géomorphologiques du bassin versant du Bouregreg: les paliers sont limités par les courbes de niveau sur la figure (Beaudet 1969).

4.1.2. Cadre pédologique

Les études de cartographie des sols du Maroc restent insuffisantes. La superficie totale cartographiée est de 22 millions d'hectares, soit 31% du territoire national (Badraoui, 2006). Les données relatives à la pédologie du bassin du Bouregreg sont très fragmentaires et ne

concernent que les régions de Zaïers, la basse Chaouia et Sehoul. Le reste du bassin n'a pas fait l'objet d'étude pédologique vu son intérêt agricole limité (Bénabdellouahad, 2006). Les milieux semi-arides dont appartient le bassin versant du Bouregreg, présentent le domaine principal de développement des encroûtements calcaires. On y trouve à la fois, des sols caillouteux assez peu évolués sur les terrasses et les glacis, des sols rouges sur les 25 affleurements calcaires et sur les croûtes, des vertiques tels que les tirs dans les plaines à matériel argilo-limoneux et à forte capacité de rétention d'eau (Laouina et Atlas du Maroc, 2002).

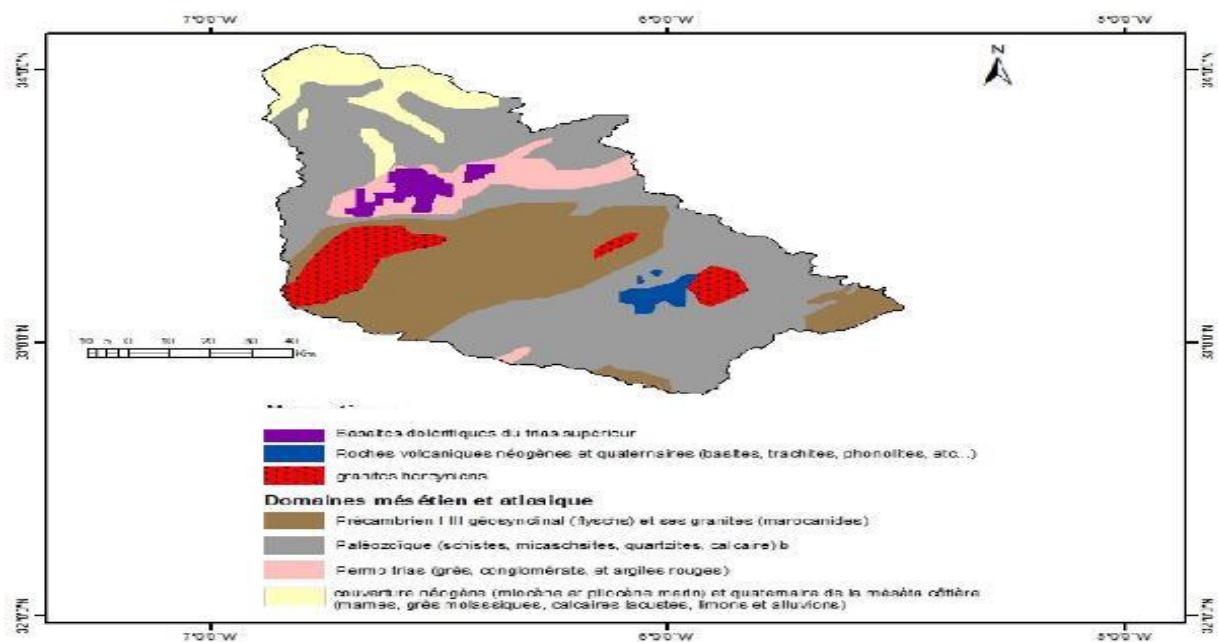


Figure 94 : Structure géologique du bassin versant du Bouregreg.

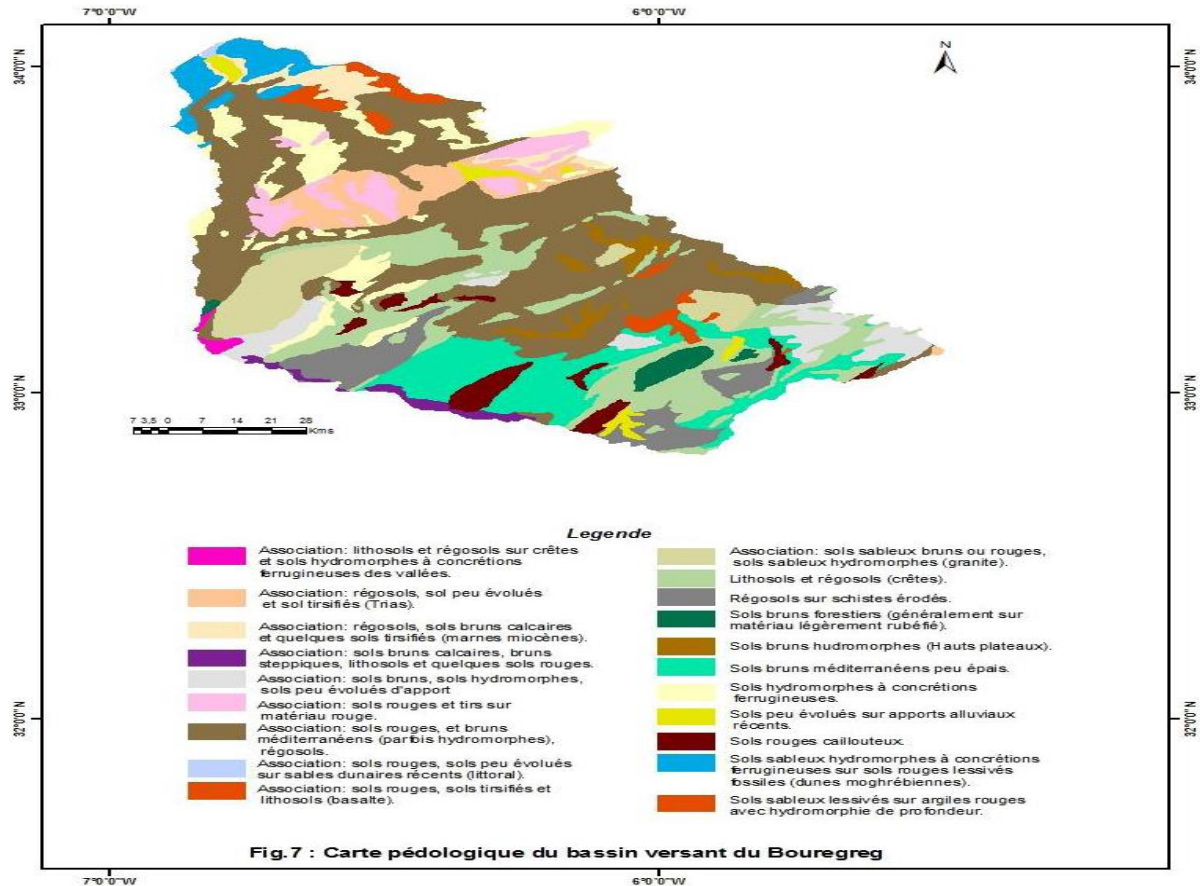


Figure 95 : Carte pédologique du bassin versant du Bouregreg.

4.1.3. Cadre hydro-climatique du bassin versant du Bouregreg

4.1.3.1. Cadre hydrologique

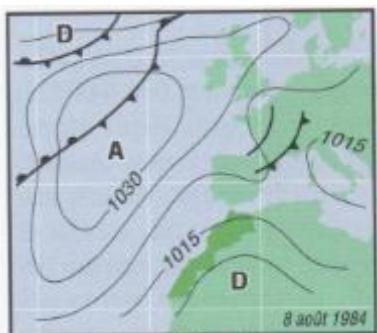
Le bassin versant du Bouregreg est drainé par trois principaux oueds hydrographiques : l'oued Bouregreg, l'oued Grou, et l'oued Korifla (Figure 37). Le cadre hydrogéologique défavorable du bassin du Bouregreg fait que les ressources en eau sont essentiellement utilisées pour l'alimentation en eau potable et pour la production hydroélectrique. Les surfaces irriguées sont de l'ordre de 8850 hectares, concentrées essentiellement dans les régions de Tiddas, Oulmes et de Maaziz. Quelques nappes souterraines de faible extension existent dans le bassin du Bouregreg : -La nappe de Sehoul qui est considérée comme une extension naturelle de la nappe de la Mâamora. Cette nappe couvre une superficie totale de 200 km². Sur le plan hydrogéologique, elle est développée dans des terrains constitués de calcaires gréseux et sables consolidés du pliocène, reposant sur des marnes grises du substratum ; La nappe de Tanoubert qui est située dans la région de Maaziz. La nappe de Tanoubert est localisée dans une bande large de 1 km traversée par l'oued Tanoubert, affluent

du Bouregreg et principale source de son alimentation en période de crue. Elle couvre une superficie de l'ordre de 15 km² et circule dans des formations quaternaires et miocènes, constituées d'alluvions et sables d'épaisseur variable entre 5 m au bordure et 20m au niveau des lits fossiles; -En dehors des zones d'affleurement au niveau desquels existent les nappes de Sehoul et de Tanoubert, la grande partie du bassin versant du Bouregreg est constituée d'un milieu discontinu, formé essentiellement de formations schisteuses du primaire, des argiles rouges du trias, de quartzites et des basaltes.

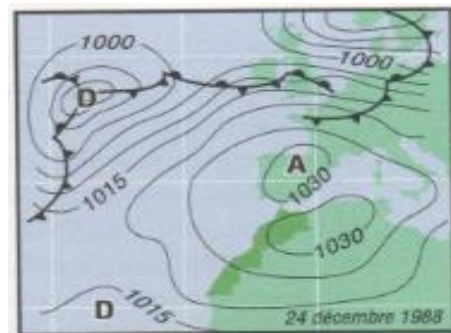
Ces formations qui ne représentent pas d'intérêt hydrogéologique, peuvent renfermer des débits faibles ne dépassant pas 1 à 2 l/s, en cas de fortes fracturations ou d'altération. (DH, 2012)

4.1.3.2. Un bassin soumis à un climat méditerranéen semi-aride

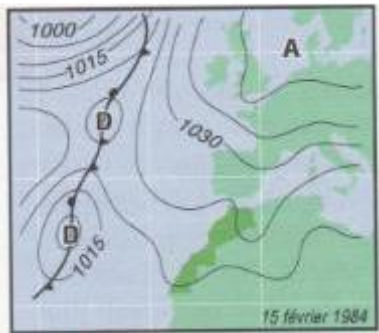
Le Maroc est au niveau de sa dynamique climatique, le lieu de confrontation de masses d'air polaires et tropicales. Les masses d'air polaires peuvent être plus ou moins froides et humides, d'où la diversité des situations hivernales, situation de calme anticyclonique ou situation perturbée d'ouest, de sud-ouest ou de nord-ouest (Figure 96). Le climat marocain varie des espaces arides au sud aux espaces humides au nord. Il est ainsi influencé par l'océan Atlantique et par la mer méditerranée, mais aussi par le relief. Ce dernier impose au Maroc un gradient pluviométrique ouest-est, en plus du gradient sud-nord. Le bassin du Bouregreg connaît le même gradient pluviométrique. Le bassin versant du Bouregreg est soumis à un climat méditerranéen de type semi-aride.



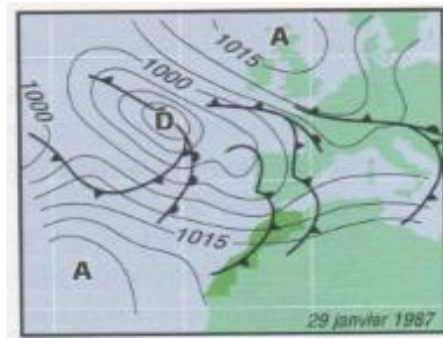
Dépression saharienne (chergui) :
beau temps d'hivers
températures très élevées



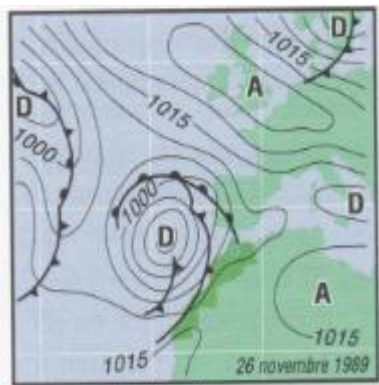
Anticyclone sur le Maroc :
beau temps d'hivers



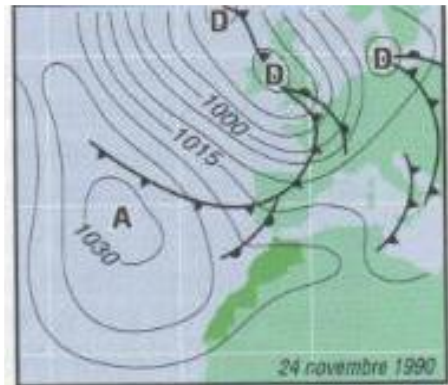
Temps très froid du Nord-est
Pluvieuses



Perturbations d'ouest : succession de perturbations
pluvieuse



Perturbation du Sud-ouest



Perturbation du Nord-ouest

(Atlas du Maroc, 2002)

Figure 96 : Position des masses d'air au Maroc.

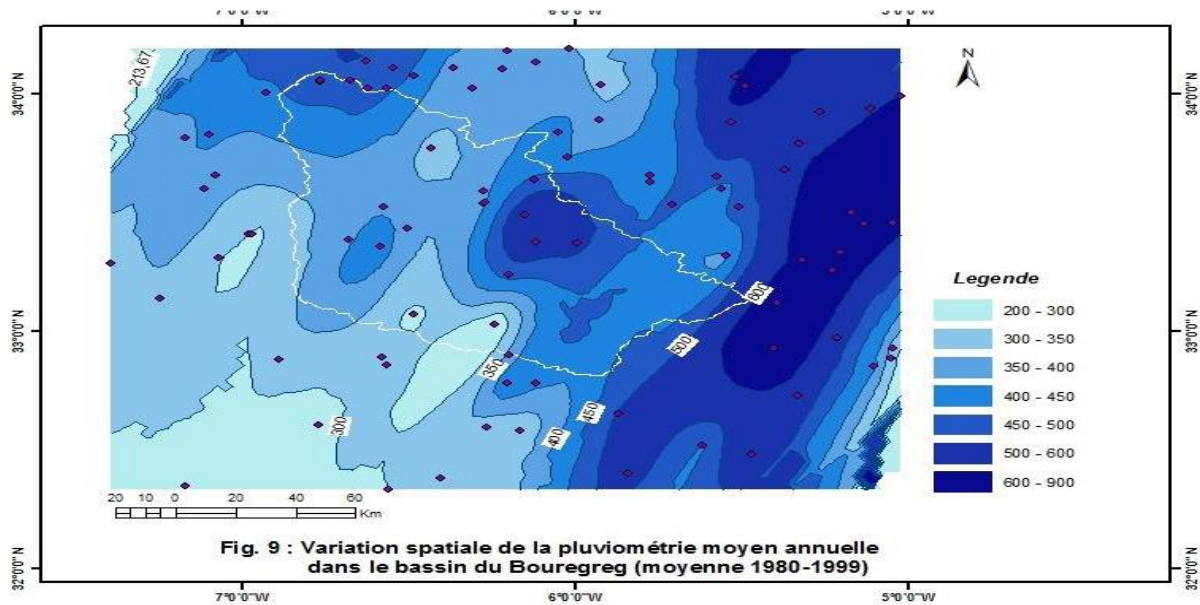


Figure 97 : Variation spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin du Bouregreg (moyenne de 1980 à 1999) (DMN et FAO, 2007)

4.1.4. La couverture végétale du bassin versant du Bouregreg (Berkat et Tazi, 2004; Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, 1992)

Les conditions pédoclimatiques du bassin du Bouregreg façonnent une végétation majoritairement sclérophylle. L'aval du bassin est marqué par l'existence de forêts dominées par *Quercus suber* (chêne liège) à l'Est de Rabat-Salé (Figure 98). En forme de futaie assez claire ou de taillis sur souche, ces formations végétales se tiennent sur sable plus ou moins profonds, traversée par des vallées cultivées et interrompues sur des surfaces variables par des îlots de reboisement à *Eucalyptus* spp. *Acacia cyanophylla* et *Pinus* spp. La végétation arbustive (strate arbustive et strate herbacée) est une mosaïque régie par le gradient bioclimatique de moins en moins humide vers l'Est et par la profondeur de l'horizon sableux reposant sur argile, et par la densité de l'ombrage créée par le chêne liège lui-même. La strate herbacée pérenne est peu abondante à cause d'une pression de pâturage forte.

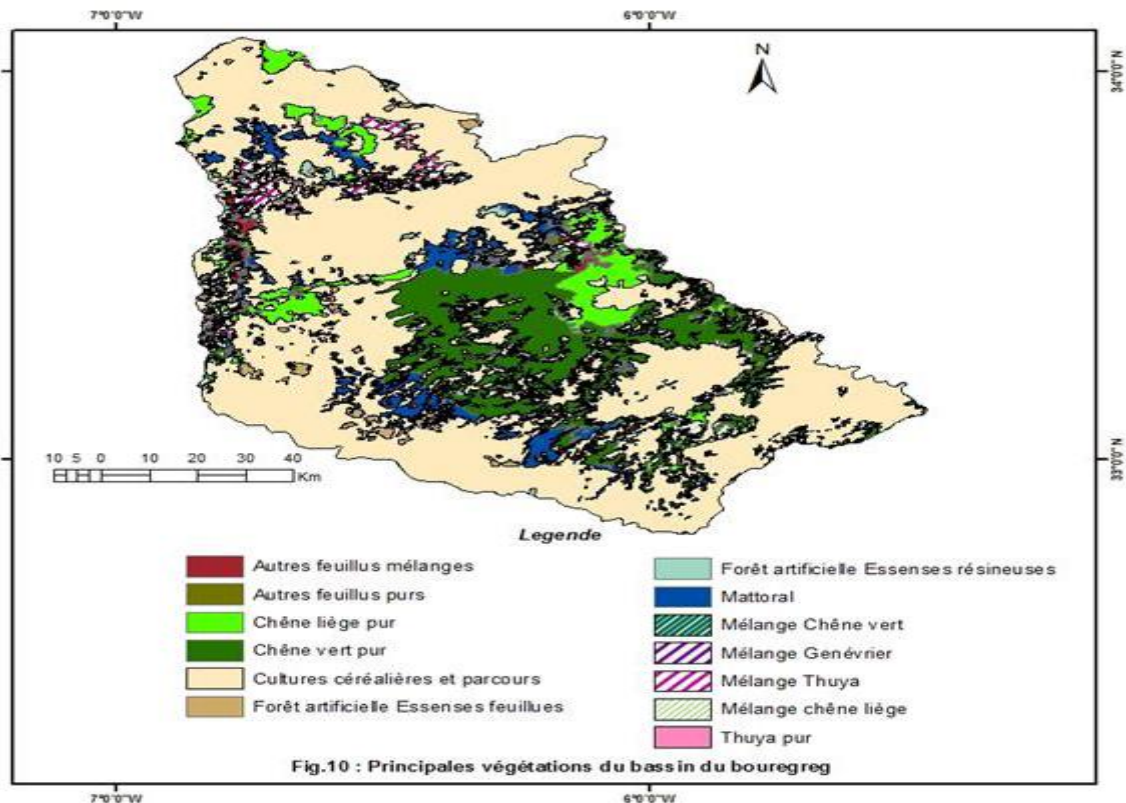


Figure 98 : Principales végétations du Bassin Versant du Bouregreg (CERGEO)

5. IMPORTANCE DU CADRE PHYSIQUE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG DANS LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION.

Le cadre physique constitue un système dynamique où chaque élément du système (climat, eau, sol, végétation) est en interaction dynamique par rapport à lui-même mais aussi par rapport à l'ensemble du système. La mise en valeur par l'homme du milieu naturel est souvent à l'origine de déséquilibres importants et de ce fait de dégradations de l'espace (Blondel 1995, Veyret, 1998). Le système de production végétal dans le bassin versant du Bouregreg comprend deux subdivisions principales : la végétation forestière et herbacée (naturelle ou plantée) et la végétation cultivée (plante cultivée annuelle ou pérenne).

6. CALENDRIER AGRICOLE AXÉ SUR LA CÉRÉALICULTURE ET L'ÉLEVAGE EXTENSIF

La céréaliculture du blé reste la principale activité agricole du bassin du Bouregreg. Le calendrier agricole est dominé, de ce fait, par cette culture. D'autres cultures comme les légumineuses et les oléagineux occupent des superficies modestes. Au niveau des céréales, la période de semis du blé (tendre ou dur) s'étend du 15 novembre au 15 décembre (Figure 99).

La récolte est effectuée entre le 15 juin et le 10 juillet. L'orge qui est la seconde céréale (par ordre d'importance de surface cultivée) connaît une période de semis plus étendue : du 01 novembre au 31 janvier. Cette céréale est récoltée du 01 juin au 15 juin. Le Maïs quant à lui reste une culture printanière. Il est semé du 01 mars au 15 mars. La récolte de cette céréale se déroule du 01 juin au 30 juin. Les légumineuses (fève sec, Haricot commun sec, lentille, pois chiche) obéissent toutes au même calendrier agricole. Elles sont semées du 15 novembre au 15 décembre et récoltées du 01 mai au 20 mai. Enfin, les oléagineux (arachide, betterave, soja, sésame) présentent un calendrier beaucoup moins homogène que les précédentes cultures. L'arachide et le soja sont des cultures de printemps, le sésame est une culture de printemps et d'été, la betterave s'étend sur des saisons plus larges (Figure 114). La dynamique saisonnière globale des plantes cultivées est ainsi dominée par la culture du blé.

Le calendrier du système agropastoral s'articule comme suit : -Pâturage sur les parcours et les jachères de janvier à mai ; -Pâturage des chaumes de juin à octobre ; -Consommation de paille, de céréales de septembre à mars.

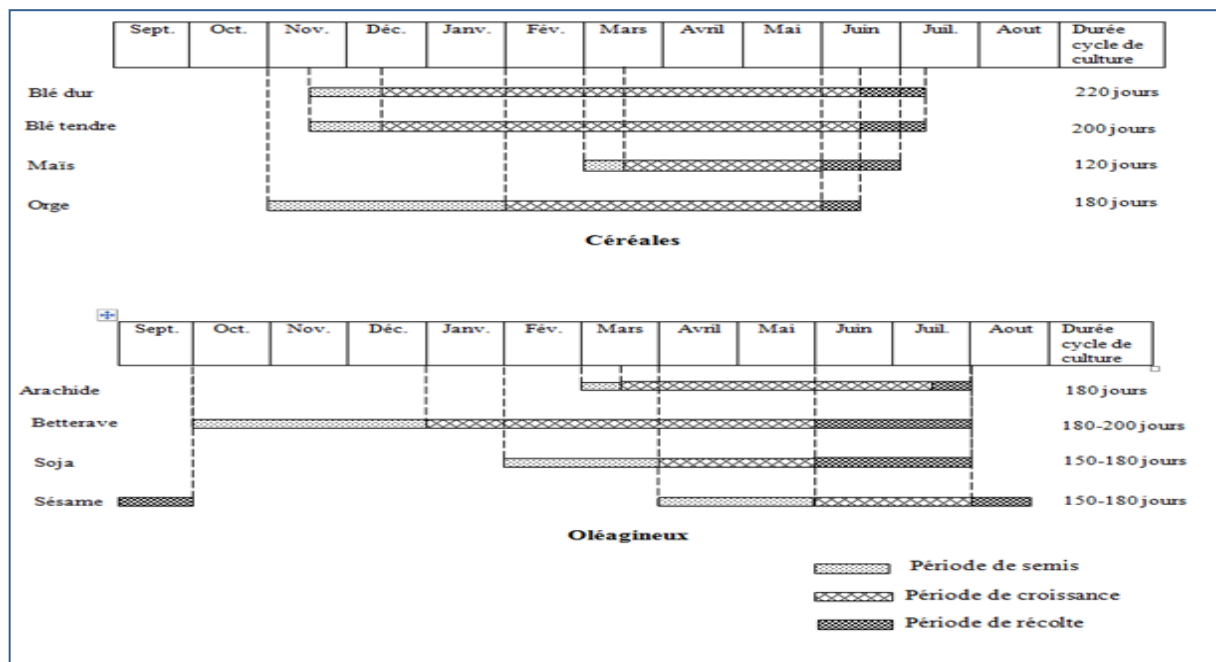


Figure 99 : Calendrier culturel du bassin versant du Bouregreg (INRA, 2012)



Figure 100 : Pâturage sur jachère d'un troupeau d'ovin, caprin et bovin au printemps (Maaziz).

7. CONCLUSION

Le bassin versant du Bouregreg se situe dans la partie humide du Maroc. C'est un bassin semi-aride où la pluviométrie évolue selon deux gradients : un gradient principal Nord-sud et un gradient secondaire Est-ouest. Les espaces ouest plus arrosés atteignent des quantités de plus de 700 mm de précipitation contre moins de 300 mm dans le sud. Ces précipitations sont souvent agressives sur cet espace dont la topographie est généralement faite de fortes pentes. Au niveau géomorphologique, les altitudes décroissent de plus de 1500 mètres à 0 mètre d'Est en Ouest. Ce cadre géomorphologique renferme des sols fragiles. Cependant la relative humidité du bassin dans l'espace marocain fait de lui un espace de grande production céréalière et d'élevage extensif. L'interaction entre milieu physique et activités agricoles et pastorales au niveau de ce bassin d'environ 9700 km² peut être étudié à partir d'outil de la télédétection de des SIG. En effet, l'analyse de la dynamique du paysage d'un tel bassin est d'autant plus complexe qu'il s'agit d'étudier à différentes échelles emboîtées les interactions entre les facteurs physiques (notamment le climat) et les facteurs anthropiques (les activités agropastorales) dans un milieu fragile. Dans un tel environnement, quel est la part d'évolution du milieu liée aux activités anthropiques de celle liée au climat ? Il est évident qu'il est impossible de chiffrer cette dynamique dans ce sens. Aussi, l'étude présente est centrée sur l'interaction entre l'évolution récente du climat et les mutations au niveau végétale. Mutations végétales qui elles sont en étroite dépendance vis-à-vis des activités agricoles et pastorales.

Etude Expérimentale

PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

1. PRESENTATION DE ROMMANI (REGION DE RABAT) –CENTRE DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG-

1.1. Situation Géographique

Le bassin versant du Bouregreg (Région de Rabat-Salé) est couvert une superficie de 9.700 Km² (découpage administratif), il est situé dans la partie nord-ouest du Maroc, entre les latitudes 33° et 33°50 Nord et 5°30 et 7° Ouest. Il est limité au Nord -Est par le bassin de Sebou, au sud par celui de Oum –Er Rbia, au Sud -Ouest par les bassins des oueds côtiers (Cherrat, Nefifikh et Mellah) et s'ouvre vers l'Ouest sur l'océan atlantique. De forme elliptique, il est drainé par **trois principales artères hydrographiques** :

- L'oued Bouregreg.
- Le Grou.
- Le Korifla

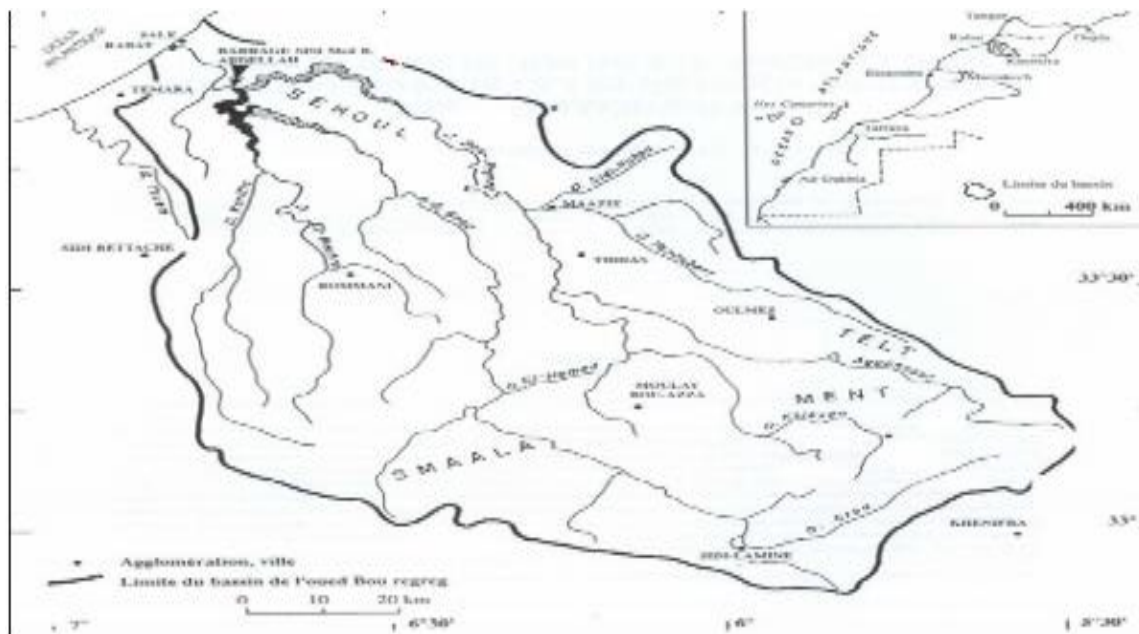


Figure 101: Situation géographique du bassin versant du Bouregreg (El Agbani et al. 1992).

La délimitation géographique de la région de Rommani est délimitée par Les communes rurales de Brachoua, de Merchouch et de Jemaa Moullabled. La superficie agricole utile (SAU) représente la moitié des superficies totales, avec des disparités entre communes rurales.

Tableau 30 : Superficie des exploitations de la région de Rommani en (ha).

Superficie	Brachoua	Merchouch	Jemaa Moullabled	Total
0-5	39%	58%	64%	53%
5-10	23%	16%	19%	20%
10-20	18%	15%	9%	14%
20-50	9%	6%	5%	7%
>50	11%	4%	3%	6%
Nombre	1114	857	1075	3046
%	37%	28%	35%	100%

1.2. Caractéristique topographique et pédologique

Le relief de trois communes rurales est composé de 18% plaines, 54% de plateaux, 8% de montagnes et collines et 20% de vallée et cuvettes. Les reliefs accidentés (montagnes et collines) qui sont sujets à l'érosion hydrique ne représentent que 8% de la superficie. La majorité des superficies ont un relief plat (Tableau 32).

Tableau 31 : Relief de la région de Rommani (CT Rommani, DPA Khemisset et DRA R/S)

Relief	Brachoua	Merchouch	J. Moullabled	Total
Plaine	13%	24%	25%	18%
Plateau	81%	27%	27%	54%
Montagnes et collines	0%	21%	2%	8%
Vallées et cuvettes	6%	29%	46%	20%
Superficie en ha	44 381	31 631	11 727	87 739
Superficie en %	51%	36%	13%	100%

Le bassin versant du Bouregreg offre une gamme variée de sols reflétant la diversité lithologique avec une dominance de sols rouges et brun méditerranéens riches en fer et en Magnésite avec des variétés principales de sols hydromorphes à texture sableuse riche en pisolites ferrugineuses, de sols minéraux et de sols peu évolués à texture argilo-limoneuse. D'autre part, ces sols sont caractérisés par une évolution rapide de la matière organique et par leur hydromorphie. Celle-ci est liée à la fois à l'imperméabilité du substratum schisteux, au climat et à l'évolution pédologique elle-même. Les sols sont d'excellente qualité, à dominance Tirs (46%) suivi de Harch (33%) et du Hamri (21%) à texture argileuse, limono-sableuse et argilo-limoneux respectivement (Tableau 33).

Tableau 32 : Texture des sols de Rommani (INRA, 2012)

Type de sol	Brachoua	Merchouch	J. Moullabled	Total
Tirs	15 533	21 207	3 987	46%
Hamri	8 876	5 381	3 870	21%
Rmel	0	0	0	0%
Hrach	19 972	5 133	3 870	33%
Superficie en ha	44 381	31 721	11 727	87 829
Superficie en %	51%	36%	13%	100%

1.3. Caractéristiques climatiques

Vu la proximité de l'Océan atlantique, la région de Rabat-Salé est sous l'influence d'un climat maritime assez pluvieux. Ce domaine reçoit en moyenne de 585 mm/an des pluies sur une période de 25 ans (1957-1981) (Gillet, 1986). Par ailleurs la moyenne annuelle établie sur une période de 50 ans (1956-2005) est de 609,5 mm (SEEE, Département Hydraulique, 2007).

Il profite des influences océaniques. Les températures subissent peu d'écart : douce l'hiver et peu chaudes l'été : moyenne annuelle des maximales : 22,0°C, moyenne annuelle des minimales : 12,5°C. (Minimum absolu : -01,3°C le 02/02/1999, maximum absolu: 47,3°C le (19/07/1967) et ce depuis la création de la station météorologique de Rabat-Salé en 1947.

D'après (Emberge, 1964), le climat qui règne dans l'ensemble du bassin versant du Bouregreg est un climat semi-aride. L'activité hydrologique du Bassin du Bouregreg est irrégulière. Elle dépend essentiellement de la nature des pluies. Ce climat est le même à la région de Rommani, avec une pluviométrie de 350 mm en moyenne répartie sur 50 jours pluvieux au cours de l'année. La pluviométrie se caractérise par une forte variabilité intra et inter annuelles. La gestion de l'eau est essentielle dans cet environnement, pour entretenir une production durable. Le stock d'eau dans le sol est en général faible, en raison de la faible pluviométrie et des pratiques culturales qui augmentent l'évapotranspiration.

2. METHODE ET DONNEES UTILISEES

Dans cette étude, j'ai visité le domaine expérimental de Marchouch à Rommani (CRRA, INRA, Rabat). J'ai utilisé les données météorologiques (Pluie et Températures) mesurées par les stations climatologiques classique et automatique du domaine expérimental, et collectées par le personnel de ce dernier. Concernant les pluies de la période (1966-67 à 2007-08) de la station classique et les pluies et températures de la période (2003-2008) de la station automatique. Plus, les données des rendements mesurés du blé tendre et ses dates phénologiques, pour Les campagnes agricoles (2002-03 à 2008-09), avec la même date de semis (12 novembre) et les rendements des campagnes (2001-2002) et (2002-2003) avec différentes dates de semis respectivement (29 novembre et 12 décembre). Aussi, j'ai utilisé la texture de Marchouch et sa grille climatique spatialisée du JRC, transmise par l'INRA concernant les paramètres climatiques quotidiennes (T max, T min, Pluie, et Radiations) de la période (1989 à 2008) afin d'utiliser le modèle CropSyst de simulation des rendements, que j'ai tourné aux CRRA de Settat, Tanger et Rabat. Enfin, pour les projections des rendements

futurs selon les modèles des changements climatiques, j'ai utilisé les paramètres climatiques mensuels futurs (T max, T min, Pluie) pour l'année 2030 avec le scénario B2 et modèle HadCM3 du site www.worldclim.org/futurdown.htm en utilisant la grille climatique spatialisé du site et extraction des données par le logiciel ArcGis pour visualisation et affichage, puis les comparer avec les données climatiques mensuels présent de l'année (2007-2008) pour le site expérimental de Marchouch.

2.1. Description du milieu d'étude expérimental

- Domaine Expérimental de Marchouch « Rommani » de l'INRA.

2.1.1. Localisation géographique

Coordonnées : Latitude : 33°60'41 N

Longitude : 6°71'60 W

Altitude : 339 M

La Commune rurale de Marchouch est délimitée au :

Nord par la commune rurale de Sidi Bettach

Sud par la commune rurale d'Ezzhiliga

Est par la commune rurale de Brachoua

Ouest par la commune rurale de Had Ghoualem.

La commune rurale de Marchouch appartient au cercle de Rommani. Elle comprend 11 douars. La superficie totale est de 31721 ha dont 15692 ha de SAU soit 50% de la superficie. Les cultures sont conduites essentiellement en bour. Seuls 97 ha sont conduits en irrigué. Les forêts et parcours représentent 31 % de la superficie totale.

2.1.2. Caractérisation générale

La population totale de la commune est de 11075 (RGPH, 2004) représentant ainsi 2% de la population totale de la province de Khémisset. Elle a subi une évolution très faible pendant les dernières années (taux d'accroissement annuel de 0.4 %) Le nombre d'exploitations est de 859 soit 2 % du nombre total des exploitations au niveau de la province. La taille moyenne des exploitations est de 18 ha.

2.1.3. Le Climat

Le climat de la région est de type semi-aride. La pluviométrie annuelle moyenne varie entre 350 et 400 mm. Le relief est représenté essentiellement par les vallées cuvettes (29 %), les plateaux (27 %), les plaines (24 %) et les montagnes (9 %) (INRA, 2004).

2.1.4. Le Sol

Les types de sol à Marchouch sont :

- Vertisol (Tirs) le plus dominant
- Argileux-limoneux
- Argileux-sableux
- Brun-calcaire
- hydromorphes **(Domaine Exp. Marchouch, CRRA, INRA Rabat, 2012).**

Tableau 33 : Texture des sols du Domaine Expérimental de Marchouch.

Profondeur (cm)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	pH
0-20	50,0	37,3	12,7	7,8
20-40	51,3	38,2	10,5	8,2
40-90	52,5	35,1	12,4	8,6

2.1.5. Occupation de terres

Le système de production agricole le plus dominant est celui de la céréaliculture - élevage, avec le développement de l'arboriculture en zones montagneuses. La céréaliculture couvre une superficie de 246.000 ha soit 66 % de la SAU, avec comme culture principale le blé tendre (60 % de la sole céréalière). En plus de la céréaliculture, on trouve les légumineuses alimentaires, les cultures fourragères, les cultures maraîchères, les cultures industrielles et l'arboriculture (Tableau 35). La sole fourragère est faible par rapport à l'importance du cheptel. Elle est dominée par l'avoine, l'orge et le lupin. La superficie réservée à la jachère est de l'ordre de 6800 ha soit environ 2 % de la SAU. Les parcours et forêts représentent 52 % de la superficie. Les cultures céréalières occupent la première place au niveau de la zone principalement dominées par le blé tendre, le blé dur et l'orge. Les

légumineuses alimentaires sont considérées par les agriculteurs comme un bon précédent cultural pour les céréales. Cependant, Leur culture a connu une régression importante ces dernières années à cause des problèmes liés à la commercialisation, au besoin en main d'œuvre et aux maladies.

**Tableau 34 : Superficie des principales productions agricoles de la région
(Moyenne de 1995 à 2003) en (ha) (DPA Khemisset 2004)**

	Superficie	
	Ha	%
Céréales	244.550	66
Légumineuses	28.240	7.5
Plantations fruitières	21.101	5.6
Maraîchage	7.151	1.9
Cultures fourragères	18.500	5
Cultures industrielles	2.420	0.6
Cultures tropicales	2190	0.6

Les rendements moyens des principales cultures obtenus qui sont présentés dans le (Tableau 36) sont faibles par rapport aux rendements réalisés dans certaines exploitations pilotes, indiquant que les potentialités de la région ne sont pas exploitées.

Tableau 35 : Rendements réalisés pour les principales cultures de la région en (Qx/ha) (DPA Khemisset 2004)

Espèce	Moyennes de rendement
<u>Céréales</u>	
Blé tendre	11.11
Blé dur	9.8
Orge	9.6
Maïs	6.5
Triticale	19.0
<u>Légumineuses</u>	
Fève	7.3
Petit pois	7.3
Lentille	7.5
Pois chiche	7.7
Haricot	7.1
<u>Cultures fourragères</u>	
Avoine	30
Orge fourragère	14.7
Seigle	28.7
Vesce avoine	34.4
Lupin	33.6

3. DONNEES UTILISEES

(Domaine Expérimental Marchouch, INRA)

3.1. Données météorologiques disponibles

Les observations météorologiques utilisées dans cette étude sont :

Les pluies mensuelles annuelles sur une période de 1966 à 2008 (Station climato classique) ; Les températures maximales, minimales et vitesses du vent à 2m journalières pour les campagnes agricoles (Septembre -Août) allant du 2002/03 à 2008/09 (Station climatologique automatique). La grille climatique spatialisée (13107) de Marchouch des

paramètres quotidiens : pluies, températures maximales, minimales et rayonnement. Pour une période de 1989 à 2008 (JRC, 2009) transmise par l'INRA.



Figure 102 : Type de Station Climatologique Classique. (SEEE, 2007)



Figure 103 : Type de Station Météorologique Automatique (DMN, 2007)

3.2. Données rendements en blé tendre disponibles

Les données disponibles concernant les rendements moyens obtenus pour les campagnes agricoles de 2000/01 à 2008/09 (Domaine Exp. Marchouch, INRA, 2011), pour la même date de semis (12 novembre) et celles des campagnes (2001-2002) et (2002-2003) pour différentes dates de semis respectivement (29 novembre et 12 décembre).

Pour les variétés les plus utilisées dans la région sont Achtar, Mehdiya, Massira et Errehane. Les plus adaptées aux conditions biotique et abiotique, de point de vue rendement

et qualité. Elles sont les plus consommées au Maroc, et subventionnées par l'état (Jlibene, 2011).



Figure 104 : État du Blé *Tendre* de Marchouch en Mars (CRRA, INRA Rabat, 2011).

3.3. Suivi de la végétation

Tableau 36 : Calendrier phénologique des céréales de Marchouch (CRRA, INRA, 2011)

Dates d'observation	Semis	Levée	Tallage	Montaison	Épiaison	Floraison	Maturité
12 Novembre	x						
22 Novembre		x					
10 Janvier			x				
15 Février				x			
25 Mars					x		
30 Mars						x	
25 Mai							x

Levée : Date d'apparition de la plumule (1ère feuille) à la surface du sol. (22 Novembre)

Troisième feuille : Date d'apparition de la 3^{ème} feuille quand elle atteint 1 cm

Tallage : Une talle, née à la base de la feuille la plus basse, atteint 1 cm (10 Janvier)

Montaison : Apparition du 1^{er} nœud sur la tige principale, à 1 ou 2 cm du sol. (15 Février)

Épiaison : L'épi apparaît de la gaine (feuille terminale) (25 Mars)

Floraison : Épanouissement des fleurs (30 Mars).

Maturation : Coloration jaune de l'épi, feuille basses desséchées.

Maturité : Grains trop durs pour être fendus à l'ongle. (25 Mai).



Figure 105 : État du Blé *Tendre* de Marchouch en Avril (CRRRA, INRA Rabat, 2011)

4. ANALYSE STATISTIQUE

4.1. Analyse statistique des données agro-météorologiques

4.1.1. Rôle des analyses statistiques

Les analyses statistiques jouent un rôle important en agro-météorologie, car elles permettent la corrélation des séries de données provenant de sources diverses, notamment des données biologiques, pédologiques et culturales et des mesures physiques de l'atmosphère. La complexité et la multiplicité des effets des facteurs de l'environnement sur la croissance et le développement des organismes vivants, et par là même sur la production agricole, font qu'il est parfois nécessaire d'employer des méthodes assez complexes pour détecter les interactions de ces facteurs et leurs conséquences pratiques. Il ne faut pas oublier que les conseils sur la planification agricole à long terme, le choix de l'entreprise agricole la mieux adaptée, la fourniture d'équipements appropriés et la mise en place de mesures de protection contre les

conditions climatiques sévères dépendent en grande partie de la qualité des analyses climatologiques des données agro-climatologiques et connexes, et par conséquent des méthodes statistiques sur lesquelles ces analyses se fondent. Un autre point à souligner est l'obligation fréquente qu'on a de comparer des mesures du milieu physique à des données biologiques souvent difficiles à quantifier.

4.1.2. Périodes de référence.

La période qui sert de référence pour les statistiques sera choisie en fonction de la compatibilité avec chacune des activités agricoles. En général, les périodes calendaires d'un mois ou d'un an ne conviennent pas. On propose comme références, les périodes suivantes :

Périodes décadaires ou hebdomadaires pour les analyses statistiques opérationnelles, telles que l'évapotranspiration, le bilan hydrique, les sommes de température, la fréquence des cas où une valeur est supérieure ou inférieure à un seuil critique. Toutefois on a des difficultés à ajuster à une série d'années les données d'une période hebdomadaire, qui présente l'avantage d'être adoptée mondialement pour toutes les activités.

Pour certaines activités agricoles, les périodes doivent correspondre aux stades phénologiques ou aux moments où certaines opérations sont entreprises. Le bilan hydrique, les sommes de températures, les séquences de jours avec pluies ou températures inférieures à certains seuils, etc. peuvent donc être analysés pour :

- la saison moyenne de croissance ;
- des périodes correspondant à des stades phénologiques particulièrement critiques ;
- des périodes durant lesquelles des travaux culturaux, des traitements de protection des végétaux ou des mesures préventives sont jugés nécessaires. Cette suggestion, bien étendue, implique une parfaite connaissance du calendrier normal des activités agricoles dans la région.

4.1.3. Méthodes statistiques.

❖ Contrôle des séries

Avant de choisir une série de valeurs pour les traiter statistiquement, on doit en examiner soigneusement la validité. Les contrôles appliqués aux données agro-climatiques doivent être identiques à ceux des données climatologiques conventionnelles ; en particulier,

on doit s'assurer de l'homogénéité des séries et éventuellement reconstituer les données manquantes. On suppose que les valeurs individuelles ont été préalablement vérifiées avec soin (uniformité et cohérence).

❖ **Distributions de fréquences**

Les distributions de fréquences présentent un intérêt particulier en agriculture à cause de l'existence de seuils écologiques qui, atteints, peuvent provoquer soit une limitation de rendement (seuil de croissance), soit des réactions irréversibles à l'intérieur du tissu vivant (seuils de sensibilité). Les fréquences cumulées conviennent particulièrement à des fins opérationnelles, puisque l'agronome peut les mettre directement en application. Il est recommandé de préparer les tableaux en indiquant les fréquences moyennes de cas où les valeurs de certains paramètres sont supérieurs (ou inférieurs) à des seuils donnés durant une période déterminée, par exemple :

Seuils des températures maximales et minimales quotidiennes qui servent à évaluer le risque de chaleur excessive ou de gel et la durée de ce risque.

Seuils des déficits hydriques décennaires, en tenant compte des réserves en eau du sol. On peut ensuite évaluer la quantité d'eau requise pour l'irrigation.

Seuils de l'humidité relative relevée toutes les heures ou toutes les trois heures. Si l'on dispose de séries d'observations suffisamment longues (10 à 20 ans), on peut en déduire la durée moyenne des périodes de dépassement (en plus ou en moins) des seuils déterminés, ce qui est utile pour le séchage, la ventilation, etc. Lors du calcul de ces fréquences moyennes, on a intérêt à extraire les informations concernant les valeurs extrêmes observées durant la période choisie (saison végétative, stade de croissance, période de sensibilité particulière, etc.)

❖ **Moyenne**

Si les distributions de fréquences sont sans aucun doute utiles à des fins opérationnelles, les valeurs moyennes des principaux éléments climatiques (décennaires, mensuels ou saisonniers) peuvent s'utiliser largement pour comparer les régions climatiques. Pour montrer la distribution des éléments climatiques, on doit cependant compléter ces valeurs moyennes par des paramètres de dispersion appropriés comme l'écart type, le coefficient de variation (variabilité), les quintiles et les valeurs extrêmes. Il faudra peut être comparé les séries d'observations agro-climatologiques qui n'ont pas été faites simultanément. Dans ce cas, pour

obtenir des moyennes comparables, on doit effectuer des ajustements de séries de manière à combler les lacunes.

❖ **Méthodes de corrélation**

On emploie les méthodes de corrélation pour découvrir objectivement et quantitativement la relation éventuelle entre plusieurs variables. Cette méthode est particulièrement précieuse en agro-météorologie à cause de l'implication simultanée ou successive, durant le développement des cultures, de nombreux facteurs et aussi parce qu'il est impossible pour nombre d'entre eux (facteurs climatiques en particulier) de préparer des expériences sûres puisqu'on ne peut contrôler leur occurrence. Il y a deux séries de circonstances dans lesquelles on peut plus particulièrement employer la méthode de corrélation :

Pour compléter les séries climatologiques présentant des lacunes. La comparaison des données des différents éléments atmosphériques (par exemple : précipitation, évapotranspiration, durée d'insolation) permet de faire l'estimation des données manquantes à partir des autres éléments mesurés. Pour comparer les données climatologiques aux données biologiques ou agronomiques, par exemple les rendements, la qualité des cultures (teneur en sucre, poids de matière sèche, etc.). On doit apporter un soin particulier lors de l'interprétation de ces corrélations et les résultats doivent être soumis à des tests rigoureux de signification avant d'être diffusés. On peut avoir une orientation utile pour le choix des stations de référence en comparant les coefficients de corrélation calculés à partir des observations du site étudié avec ceux des stations voisines pour les mêmes périodes.

La découverte d'un coefficient de corrélation significatif doit inciter l'agro-météorologiste dans la plupart des cas à chercher une explication physique ou biologique à cette relation et non pas à se satisfaire du seul résultat statistique.

5. MODELISATION

CropSyst : Modèle de suivi de la croissance de culture

5.1. Présentation du modèle

❖ **Généralités**

CropSyst : Modèle fonctionnant sur PC pour décrire la croissance de cultures. (CropSyst, Claudio O Stöckle, 1994) peut être utilisé pour estimer quantitativement la

croissance et la production de différentes cultures en fonction d'un ensemble de conditions météorologiques et de conditions de sol. CropSyst comme tout modèle donne une présentation simplifiée de la réalité. En réalité, les rendements des cultures sont le résultat de l'interaction entre des facteurs sociaux et écologiques. Dans CropSyst, seuls les aspects écologiques sont pris en considération. CropSyst aborde le problème de la production agricole de manière progressive. Trois niveaux hiérarchiques sont identifiés : croissance potentielle, croissance en condition de stress hydrique ou stress nutritionnels (manque de fertilisants) et croissance réduite (attaque par des parasites). Chacun de ces types de croissance correspond à un niveau de production :

5.2. Production potentielle

Avec CropSyst, on calcule les productions potentielles et deux niveaux de productions limitées : ceux limités par le manque d'eau et le manque de nutriments. Ce calcul se fait dans un certain ordre. La croissance de la culture est déterminée par le rayonnement assimilé, la température et les caractéristiques de la plante uniquement. La concentration en CO₂ de l'atmosphère est supposée constante. Tous les autres facteurs agissant sur la production sont supposés non-limitants.

5.3. Production limitée par manque d'eau et de nutriments.

En plus des facteurs pris en considération dans la détermination de la production potentielle, l'effet de la disponibilité en eau et des fertilisants pour la plante est étudié. Si l'apport en eau ou en nutriments est en dessous de l'optimal durant une phase ou l'ensemble de la période de croissance, ceci va conduire à une production limitée par manque d'eau ou de fertilisants.

5.4. Production réduite

A ce niveau, la réduction possible des rendements des cultures prises en considération est celle liée à des facteurs biotiques tels les attaques parasitaires, les mauvaises herbes ou autres attaques cryptogamiques. D'abord, on estime la production potentielle (niveau 1). Le second niveau est celui correspondant à la production en condition de stress hydrique. Ensuite vient le dernier niveau 3, limité par le manque de nutriments et donnant des productions inférieures à celles du niveau 2, seuls les macroéléments (N, P, K) sont pris en compte à ce niveau 3.

5.5. Échelle temporelle et échelle spatiale

Lors de chaque simulation, **CropSyst** simule la croissance d'une culture spécifique, dans un contexte donné de sol et de situation météorologique. Pour chaque simulation, il faut définir les conditions initiales qui comprennent, entre autres, le calendrier cultural et l'état initial de la fertilité et de la teneur en eau des sols sur lesquels les simulations seront pratiquées. La croissance et le développement des cultures sont décrites avec une échelle de temps de un jour, tandis que le prélèvement de nutriments par la plante est calculé au départ globalement pour l'ensemble de la période de croissance.

La croissance des cultures est simulée à partir de données météorologiques journalières de plusieurs années et de différents types de sols retrouvés dans une région. Cependant, souvent toutes ces données ne sont pas disponibles, notamment les données météorologiques journalières sont rares. Dans ce cas, les données météorologiques, à l'exception de la pluie, sont dérivées des données mensuelles par une procédure d'interpolation linéaire. La variabilité des données de pluies journalières est générée en distribuant les pluies dans le mois grâce à l'utilisation d'un générateur mathématique de pluies.

CropSyst est un modèle unidimensionnel de simulation. Si l'on veut l'utiliser dans l'espace, il faut repérer des points qui soient représentatifs d'une région donnée, faire les simulations en ces points et utiliser ensuite une technique d'interpolation ou d'agrégation spatiale. Il est possible de faire varier les niveaux de production dans le temps en fournissant différentes dates de démarrage de la végétation ou/et en sélectionnant des variétés avec différentes longueurs de saisons de croissance (tardives, précoces,...). **CropSyst** offre différentes options pour définir le début de la saison de croissance. Le début de la simulation peut être fixé à la date de semis ou à la date de l'émergence, il peut aussi être calculé par le modèle lui-même. La fin de la saison est fixée par l'état de maturité de la culture ou la mort de la culture ou encore à une date fixée par l'utilisateur. Les données de sols nécessaires à **CropSyst** sont souvent dérivées de cartes par des fonctions de pédotransfert qui établissent des relations empiriques entre la texture, la matière organique des sols et les propriétés hydrodynamiques de sols nécessaires au modèle. Cette approche est satisfaisante lorsqu'on travaille sur des régions entières mais ne convient pas dans le cas des zones réduites où des analyses de sols détaillées s'imposent.

5.6. Limitations de CropSyst

CropSyst simplifie la réalité des phénomènes qui agissent sur la production agricole. CropSyst ne peut faire qu'avec les données qu'il aura reçues. Si les données d'entrée sont de mauvaise qualité, il ne faut pas espérer de bons résultats. Souvent des expérimentations de terrain permettront de vérifier la qualité des résultats obtenus. Les procédures de validation telles qu'expliquées lors du premier cours s'appliquent ici complètement. Une partie des problèmes de tous les modèles provient, rappelons-le, de la simplification du fonctionnement des processus à simuler. Dans **CropSyst**, en particulier certains paramètres qui devraient varier dans le temps (ex: partitionnement - stade phénologique) restent constants pendant l'ensemble de la période de croissance.

6. RESULTATS ET DISCUSSION.

6.1. Analyse des composantes climatiques

6.1.1. Régime des Précipitations

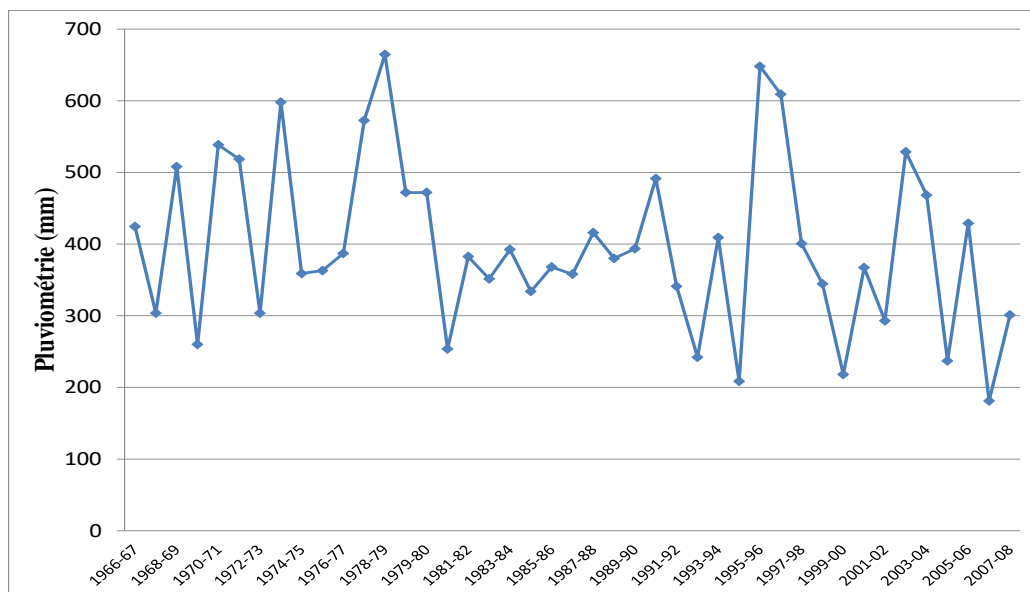


Figure 106 : Évolution de la pluviométrie au Domaine Expérimental Marchouch, INRA
Période (1966/67 à 2007/08)

❖ Interprétation

On constate l'irrégularité des pluies interannuelle, dans la période 1966/67 à 2007/08 avec un pic de 664,50 mm enregistré en campagne 1978/1979 et un minimum de 181,10 mm

enregistré en campagne 2006/2007. La tendance baisse pour la période 1966/07 à 1980/81, les pluies varient entre 600 et 200 mm à l'exception de la campagne 1978/79 du « pic » du graphe. Pour la période 1981/82 à 1994/95, la tendance est constante, les pluies varient entre 500 et 200 mm. La dernière période 1995/96 à 2007/08, la tendance rechute. Les pluies varient entre 648 à 181,10 mm du « minimum » (Figure 121).

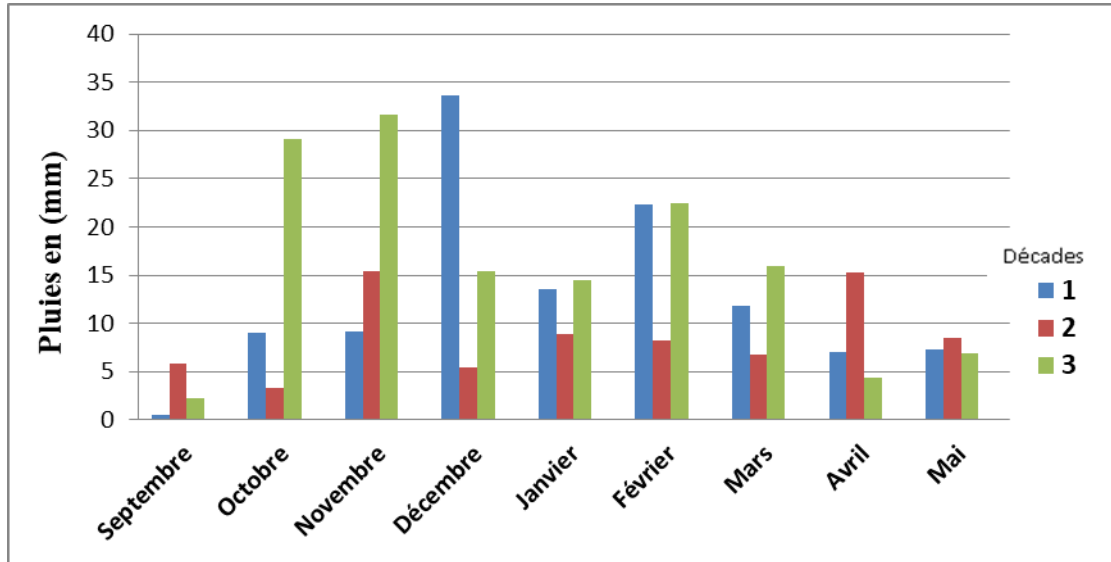


Figure 107 : Variabilité décadaire des pluies pendant le cycle de croissance du blé pour la période (2003 à 2009) correspondant entre la date de semis (2^{ème} décade du novembre) à la date de maturation (3^{ème} décade du Mai) durant le cycle de croissance du blé à Marchouch.

❖ Interprétation

Cette (Figure 122) illustre la répartition de l'irrégularité des pluies décadaires durant le cycle de croissance du blé pour la période (2003 à 2009) à Merchouch. Entre les mois septembre et décembre on a un cumul des pluies décadaires qui augmente progressivement, ce qui est important pour les premiers stades du cycle de croissance, entre les mois décembre et janvier une chute du cumul des pluies qui correspond à la phase froide du cycle, tandis qu'au mois de février les pluies augmente de nouveau ce qui est important pour l'alimentation de la réserve en eau car c'est le stade critique de la croissance végétal ou la plante a très besoin en eau. À partir du mois mars les pluies décadaires diminue jusqu'au fin du cycle .c'est la phase de la floraison jusqu'à la maturité ou les degrés -jours des températures sont plus importants.

6.1.2. Régime des Températures

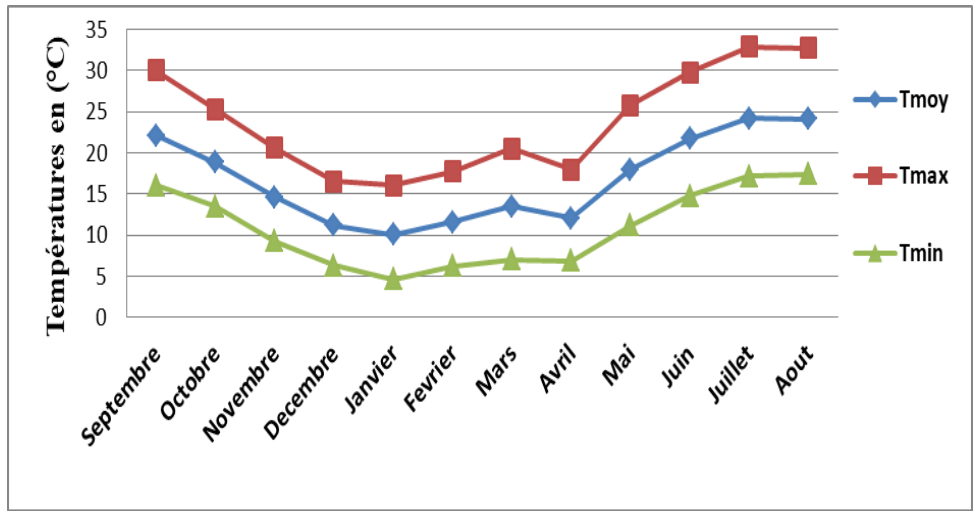


Figure 108 : Moyennes mensuelles des températures de la période (2003 à 2008) au Domaine Expérimental de l'INRA à Marchouch.

❖ Interprétation

On constate l'évolution de l'irrégularité des moyennes mensuelles des températures (T moy, T max et T min) inter-mensuelle de la campagne agricole pour la période 2003 à 2008. Avec un maximum de 32,93 (°C) enregistré en mois de juillet, un minimum de 04,63 (°C) enregistré en mois de janvier. et une moyenne entre 10,05 à 24,19 (°C) enregistrée respectivement pour les mois Janvier et Juillet. On remarque qu'il y a une baisse significative des températures pour l'intervalle septembre – janvier, et le contraire entre février et aout, on a une augmentation progressive des températures.

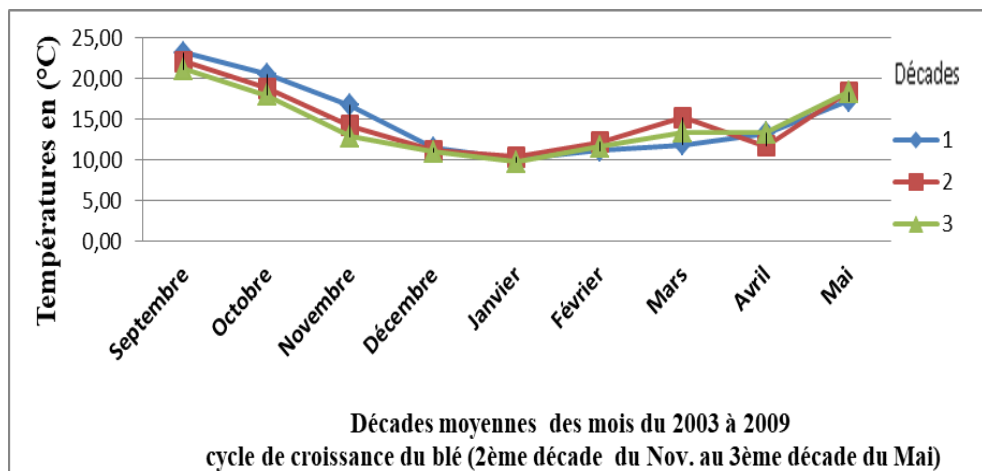


Figure 109 : Conditions météorologique Typique (variabilité des températures) durant le cycle de croissance du blé à Marchouch (INRA)

❖ Interprétation

L'information tirée de ce graphe concernant la variabilité décadaire des températures. Elle est traduite par la baisse des températures des 3 décades entre les mois septembre et janvier, et leur augmentation pour la période Février– Mai : ce qui coïncide respectivement avec les deux périodes humide et sèche de la saison végétative.

6.1.3. Diagramme Ombrothermique

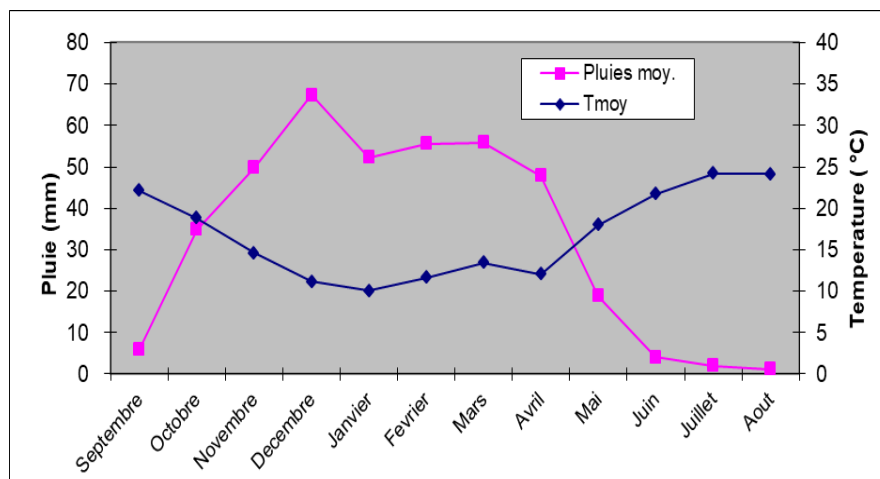


Figure 110 : Diagramme Ombrothermique du Domaine Expérimental de Marchouch, INRA.

❖ Analyse et interprétation

Ce diagramme nous renseigne sur les périodes humide et sèche pendant la campagne agricole (Septembre – Août) et la période de croissance végétale pour la série de 2002/2003 à 2007/2008. La saison humide est comprise entre les mois Octobre et Avril de la campagne, durant laquelle on a le cycle de la croissance végétale. et la saison sèche comprise entre les mois Mai et Septembre c'est-à-dire la fin et le début de la campagne agricole.

7. ANALYSE DE LA CROISSANCE ET PRODUCTION DU BLE

7.1. Caractérisation Agro-climatique

7.1.1. Dates de semis et déficit hydrique

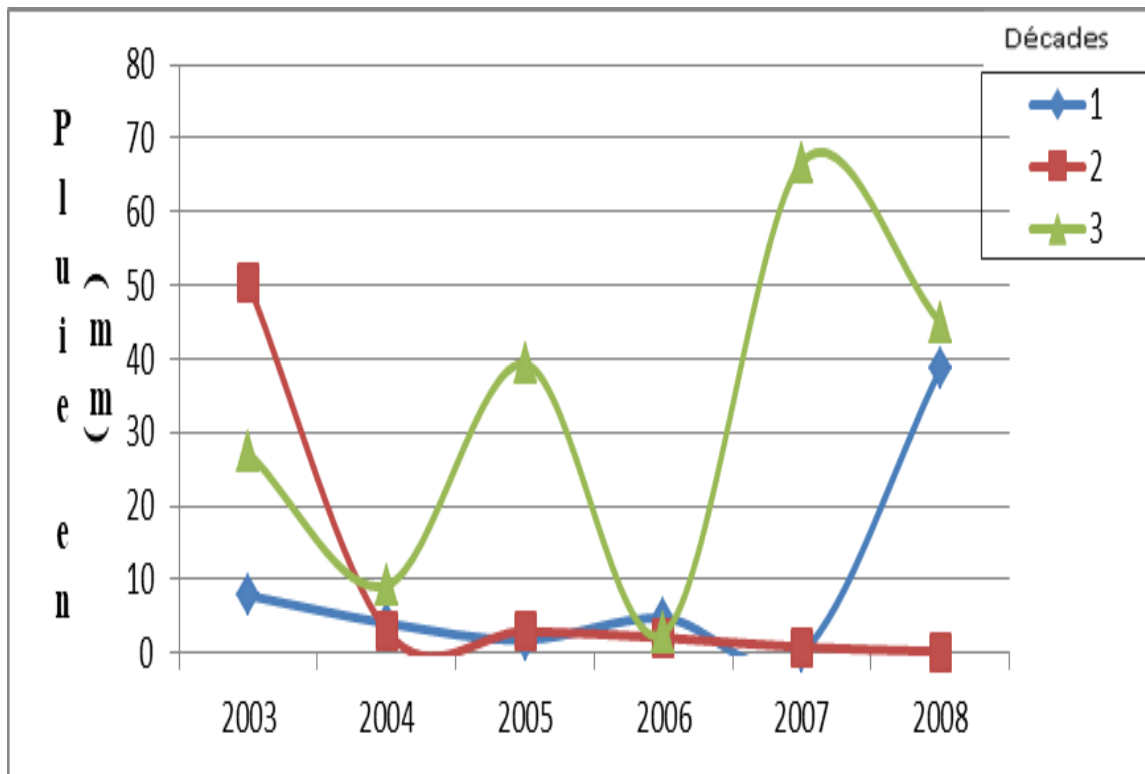


Figure 111 : Évolution des trois décades du mois Novembre au Domaine Expérimental

Marchouch, INRA.

❖ Analyse et interprétation

Ce graphe nous montre l'évolution temporelle des cumuls des pluies des 3 décades du mois novembre pour la période 2003 à 2008. Il nous permet de choisir la date optimale du semis précoce, qui nous permet l'utilisation du cumul des premières pluies tombées, afin de satisfaire la réserve utile des besoins en eau pour la plante pendant la phase de levée. On constate plus de pluies en décade 3 par rapport aux décades 2 et 1 du novembre. Ce qui explique la disponibilité en eau après la date de semis correspondant à la 2^{ème} décade du novembre, évitant le déficit et stress hydrique de la plante.

7.1.2. Rendements mesurés



Figure 112 : Évolution des rendements, au Domaine Expérimental Marchouch, INRA.

❖ Analyse et interprétation

Le graphique nous présente l'irrégularité des rendements moyens du blé tendre des campagnes agricoles de la période 2000/01 à 2008/09. Les rendements sont marqués par un pic de 55,24 qx/ha mesuré en campagne 2004/05 et un minimum de 3,42 qx/ha mesuré durant la campagne 2006/07.

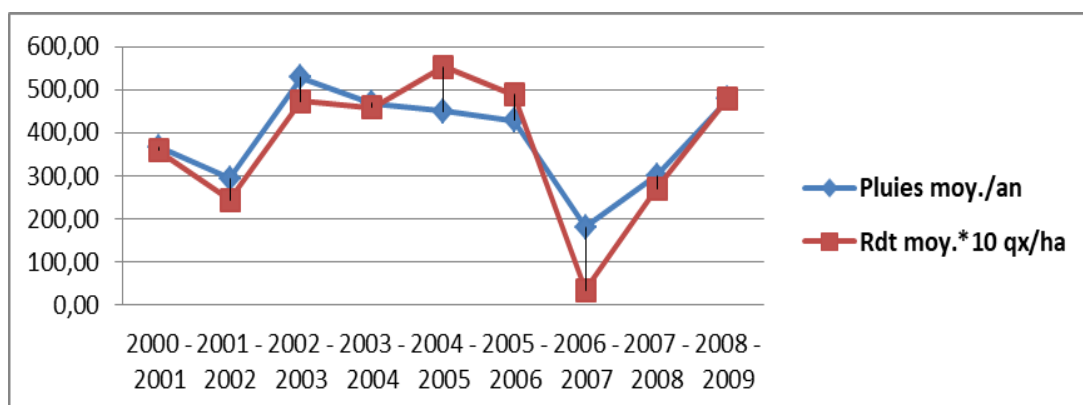


Figure 113 : Comparaison des fluctuations de rendements et de pluviométrie, au Domaine Expérimental Marchouch, INRA.

❖ **Analyse et interprétation**

La (Figure 128) illustre une variabilité significative entre les rendements et les pluies pour la période 2000/01 à 2008/09 des campagnes agricoles. Il nous permet de tirer l'information de la dépendance des rendements en fonction des pluies, facteur le plus important pour la détermination de la variabilité des rendements.

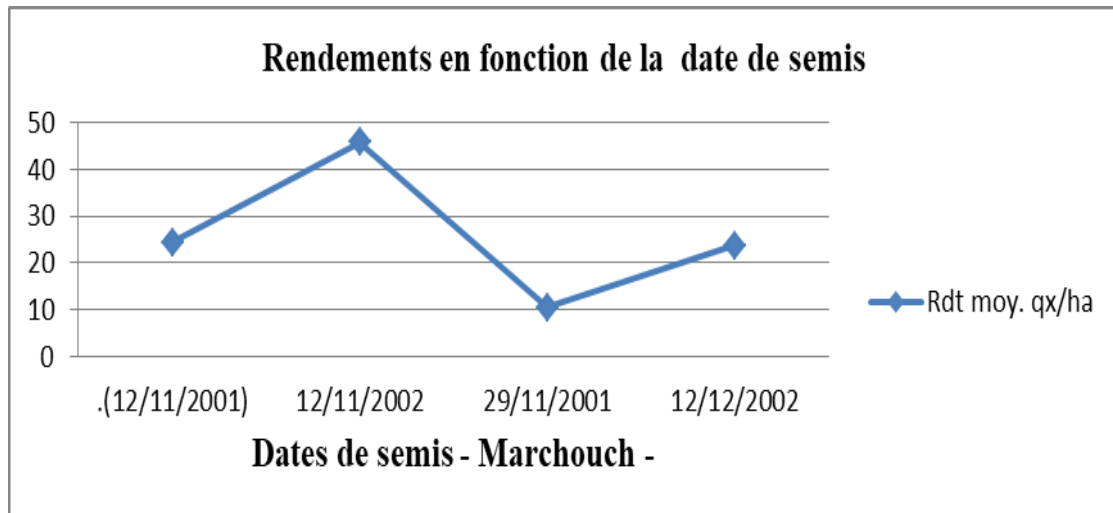


Figure 114 : Rendements en fonction de la date de semis, au Domaine Expérimental de Marchouch, INRA.

❖ **Analyse et interprétation**

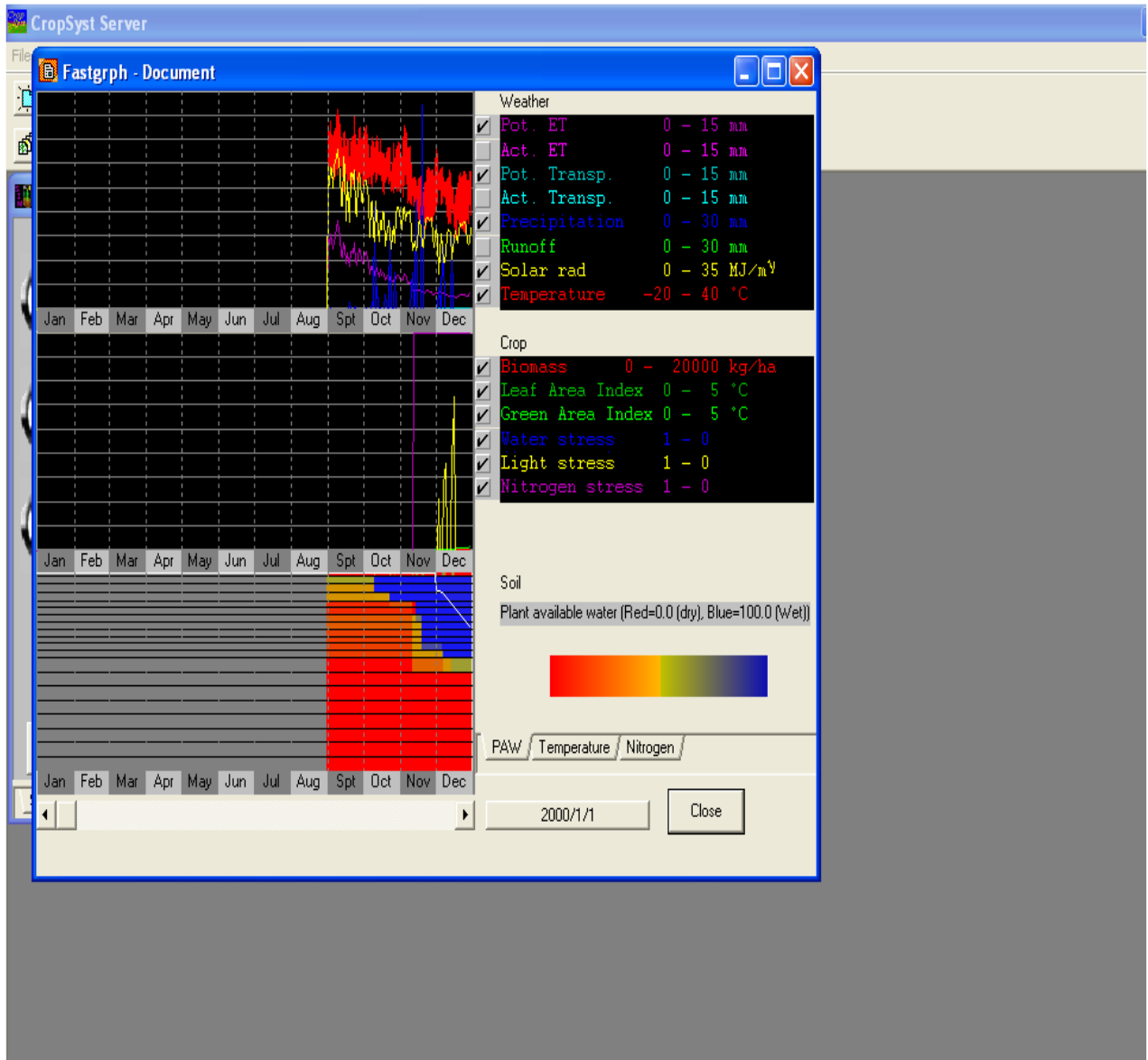
Dans cette (Figure 129), on a des rendements élevés pour la date de semis 12 Novembre et de faibles rendements pour les dates de semis 29 Novembre et 12 Décembre. Donc le bon choix de la date de semis correspond aux meilleurs rendements est la 2^{ème} décade du novembre.

7.1.3. Simulation des rendements par le modèle CropSyst

(Stöckle, Nelson, 2005)

Sorties simulation

7.1.3.1. Document fastgraph



❖ Analyse et interprétation

Ce document présente les sorties du modèle concernant :

Le climat (Précipitations, Températures, Radiation solaire, Evapotranspiration)

La culture (Biomasse, LAI, Stress Hydrique, Stress lumière, Stress Azote)

Et le sol (Humide, Sec).

7.1.3.2. Simulation des rendements et paramètres phénologiques

Tableau 37 : Rendements et paramètres phénologiques simulés du blé.

Année	Semis Jours	Émergence Jours	Maturité Jours	Rdt. (Qx/ha)	Biomass (Qx/ha)	Sol Drainage (mm)	Act ET (mm)
2001	315	332	146	40.00	51.80	0.0	174.2
2002	315	330	142	43.89	115.45	0.0	310.1
2003	315	328	145	51.51	136.77	0.0	311.2
2004	315	329	151	43.65	105.90	88.6	273.7
2005	315	330	145	49.00	64.23	70.6	169.9
2006	315	329	144	33.00	80.70	88.6	212.1
2007	315	327	148	10.00	33.32	0.0	82.8
2008	315	327	140	27.21	65.81	0.0	157.1

❖ -Analyse et interprétation

Ce tableau nous donne les paramètres phénologiques (stades de croissance, biomasse, ET) et les rendements simulés du blé d'hiver. On a la même date de semis 315 jours de l'année qui correspond au 12 novembre, le jour de l'émergence est presque égale, varie entre l'intervalle 12 et 17 jours après le semis. La date de maturité varie entre l'intervalle 140 jours de l'année correspond au 20 Mai et 151 jours de l'année correspond au 31 Mai. Les rendements varient entre le minimum 10 qx/ha avec une biomasse de 33,32 qx/ha et une faible évapotranspiration de 82,8 mm pour la campagne 2006-2007, et le maximum 51qx/ha avec une biomasse de 136,77 qx/ha et une grande évapotranspiration de 311,2 mm pour la campagne 2002-2003. Donc les résultats données par ce tableau concernent les données rendements qui sont agro-économiques et les données biomasses qui sont agro-écologique.

De plus, on peut évaluer l'état de la production par le rapport (MS/ETP). Si il est positif, signifie une bonne production qui est du à la matière sèche (MS), et si il est négatif signifie une mauvaise production qui est du à la sécheresse marqué par augmentation de l'évapotranspiration (ETP).

7.1.3.3. Comparaison entre rendements mesurés et simulés

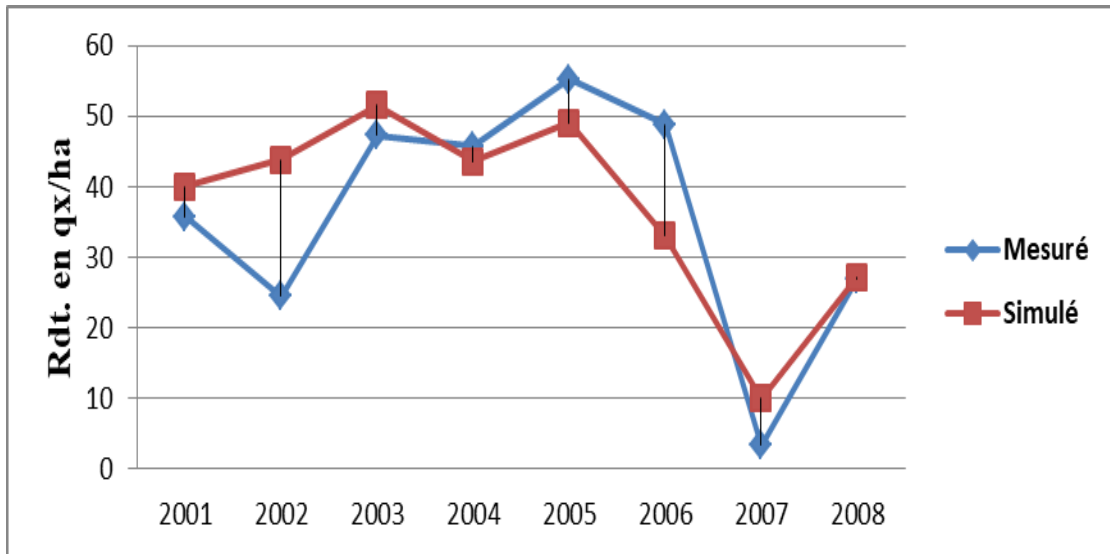


Figure 115 : Comparaison entre rendement mesuré et simulé au Domaine

Expérimental Marchouch, INRA.

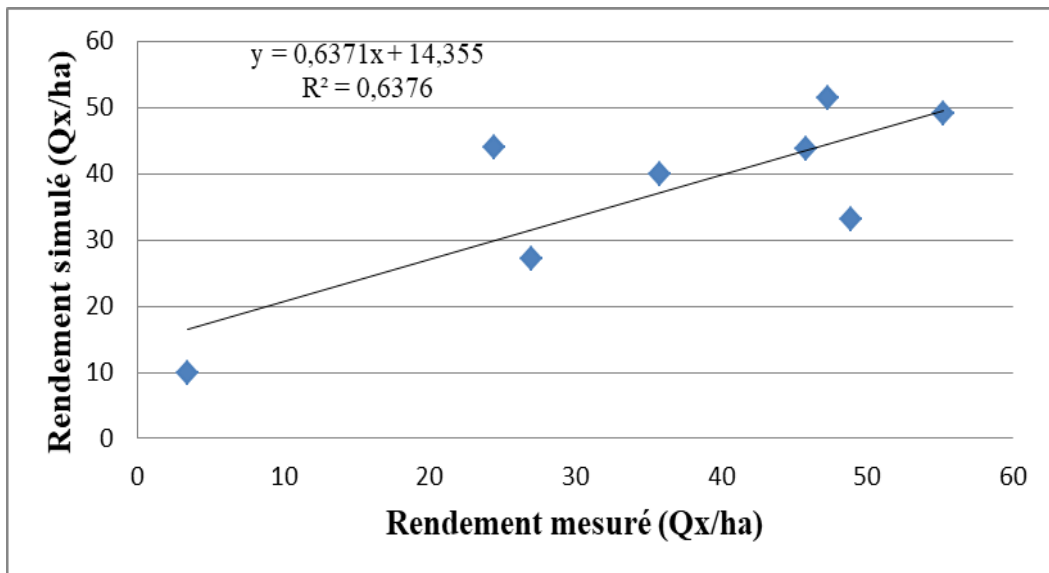


Figure 116 : Relation entre les rendements mesurés et simulés à Marchouch.

Tableau 38 : Rapport des récoltes simulé.

Semis	Emergence	Floraison	Maturation	Maturité	Récolte	Emergence	Actuel ETP (mm)	Rendement (Qx/ha)	Rendement (Qx/ha)	Pluie (mm)
								simulé	mesuré	
12/11/2000	30/11/2000	28/04/2001	13/05/2001	26/05/2001	11/06/2001	333,2000	171,16	40.00	35.82	161,60
13/11/2001	27/11/2001	28/04/2002	11/05/2002	23/05/2002	08/06/2002	331,2001	309,03	43.89	24.46	362,20
13/11/2002	27/11/2002	02/05/2003	14/05/2003	25/05/2003	10/06/2003	331,2002	308,62	51.51	47.32	457,20
13/11/2003	27/11/2003	05/05/2004	18/05/2004	31/05/2004	16/06/2004	331,2003	276,23	43.65	45.78	437,50
12/11/2004	27/11/2004	03/05/2005	13/05/2005	25/05/2005	10/06/2005	332,2004	167,74	49.00	55.24	168,70
13/11/2005	27/11/2005	03/05/2006	14/05/2006	25/05/2006	10/06/2006	331,2005	211,18	33.00	48.86	268,40
13/11/2006	25/11/2006	05/05/2007	16/05/2007	29/05/2007	14/06/2007	329,2006	237,31	10.00	3.42	188,20
13/11/2007	25/11/2007	26/04/2008	07/05/2008	22/05/2008	07/06/2008	329,2007	156,66	27.21	27.00	158,40

❖ **Analyse et interprétation**

On constate dans ce tableau les données sorties du modèle CropSyst concernant les dates phénologiques du blé tendre d'hiver du domaine expérimental de Merchouch, INRA, Le jours de l'émergence parmi les jours de l'année (365), l'évapotranspiration (ETP), la pluie et les rendements simulés avec insertion des rendements mesurés pour les comparer.

Aussi, on peut tirer du tableau, le bilan climatique de l'année. Traduit par la différence entre les pluies et l'évapotranspiration (Pluie – ETP). Si elle est positive signifie que l'année est humide et si elle est négative signifie que l'année est sèche.

8. LES RENDEMENTS FUTURS SELON LES MODELES DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES.

8.1. Climat dans le futur selon le scénario B2

8.1.1. Températures Maximales.

Tableau 39: Comparaison entre les températures maximales actuelles de la campagne (2008-09) et futur de l'année (2030) du Domaine Exp. Merchouch, INRA.

	Présent	Futur
	2008-2009	2030
Mois	T max	T max
Septembre	28,22	28,40
Octobre	22,44	22,80
Novembre	17,67	16,30
Décembre	15,25	13,10
Janvier	14,33	15,30
Février	17,54	17,10
Mars	20,59	19,40
Avril	20,26	20,50
Mai	26,26	26,90
Juin	30,86	30,70
Juillet	29,22	34,60
Aout	31,44	33,50
Moyenne/an	22,84	23,22

8.1.2. Températures Minimales.

Tableau 40 : Comparaison entre les températures minimales actuelles de la campagne (2008-09) et futur de l'année (2030) du Domaine Exp. Marchouch, INRA.

Mois	Présent	Futur
	2008-2009 T min	2030 T min
Septembre	15,70	16,60
Octobre	12,10	13,30
Novembre	7,60	9,50
Décembre	6,40	6,80
Janvier	5,90	5,20
Février	7,40	6,20
Mars	9,80	7,40
Avril	7,00	9,30
Mai	11,70	12,30
Juin	16,10	15,90
Juillet	15,40	17,60
Aout	16,20	17,90
Moyenne/an	10,94	11,50

8.1.3. Précipitations.

Tableau 41: Comparaison entre les pluies actuelles de la campagne (2007-08) et futur de l'année (2030) du Domaine Expérimental Marchouch, INRA.

Mois	Présent	Futur
	2007-2008 Pluie	2030 Pluie
Septembre	1,40	7
Octobre	15,94	10
Novembre	67,52	17
Décembre	14,85	8
Janvier	52,87	2
Février	45,44	2
Mars	13,07	3
Avril	44,74	2
Mai	45,25	2
Juin	0,00	0
Juillet	0,00	1
Aout	0,00	3
Cumul/an	301	57

❖ **Analyse et interprétation**

Pour les pluies, selon le modèle B2 proposé pour la zone d'étude, il s'avère que dans le futur il y aura moins de pluies (environ moins de 80%). Il s'agit d'une aridité forte qui s'installera dans la région du Domaine Expérimental Merchouch, INRA, selon le scénario climatique. Pour les températures (T max et T min), selon le modèle du scénario climatique B2, il y aura une augmentation de température environ (+1 à 2°C). La zone d'étude deviendra plus chaude dans le futur.

9. LES RENDEMENTS FUTURS SELON LE SCENARIO B2.

Selon ce scénario climatique, la zone d'étude deviendra plus aride dans le futur ce qui aura des effets directs et négatifs sur les rendements des céréales. Ceci, est conforme avec les résultats obtenus dans le rapport « WB/FAO/INRA/DMN » établi par l'étude sur le Maroc par la Banque Mondiale (Gommes et al. 2009).

10. CONCLUSION

Le secteur agricole est l'un des secteurs les plus vulnérables aux risques climatiques. En plus de la sécheresse qui constitue le risque majeur qu'affronte ce secteur, d'autres risques climatiques, en l'occurrence le gel, la grêle, les inondations et les vents violents affectent également le niveau de la production agricole à des intensités variables selon les régions et les campagnes agricoles. Les impacts de ces risques sont de plus en plus accentués par des pratiques culturelles inadéquates. Ainsi que par les changements climatiques (réduction des pluies et celle des périodes de croissance des cultures).

Ce travail étudie les aléas climatiques qui engendrent des fluctuations importantes de la production agricole dans la région de Rommani, qui se traduit par une comparaison et corrélation entre les rendements et les paramètres météorologiques donnant ainsi la dépendance significative entre les deux. Une approche de modélisation par CropSyst a été utilisée dans le but d'avoir des rendements estimés et les comparer aux rendements mesurés. Les rendements du blé peuvent être prévus aussi bien par des approches empiriques que par de simulation. En effet, les rendements du blé sont très corrélés au cumul pluviométrique de la saison agricole. Aussi, les rendements simulés par CropSyst sont cohérents et corrélés avec ceux qui sont observés en stations expérimentales. L'approche proposée est relativement

facile à comprendre et n'est pas contraignante étant donné qu'elle repose sur des méthodologies robustes et qu'elle peut être adaptée en fonction de la disponibilité en données de base. Le modèle CropSyst proposé peut être utilisé, par les pouvoirs publics en mode opérationnel, pour la prédiction des rendements du blé au Maroc, aux niveaux provincial et national. Plusieurs auteurs ont affirmé que l'accentuation des risques climatiques dans le secteur agricole rend nécessaire la poursuite et le renforcement des actions d'anticipation et d'adaptation. Afin de mieux cerner cette problématique dans tout le Bassin Bouregreg, il serait judicieux de faire un suivi de très rapproché dans l'espace et dans le temps. Et ce, par une étude de comparaison de la région étudiée aux différentes régions du Bassin, avec une application des modèles de simulation de l'agriculture. L'adoption de modélisation aidera sans doute les décideurs à alerter les agriculteurs sur les risques de sécheresse agricole et à prévoir à l'avance les besoins en importation du blé, aidant ainsi la sécurité alimentaire du pays et aussi ; pour estimer l'impact des changements climatiques sur la productivité du blé dans la région de Rommani.

- LES FACTEURS CLIMATIQUES DE LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION.

1. Dynamique spatio-temporelle des précipitations de 1980 à 2009

1.1. Evolution interannuelle de la pluviométrie du bassin

Le Maroc, de façon générale, connaît une baisse de pluviosité depuis le milieu des années 1970 et le début des années 1980. L'intervalle d'analyse de la dynamique temporelle des précipitations (1980-2009) se situe ainsi dans une période où les quantités pluviométriques ont connu une baisse importante. Aussi, cette nouvelle analyse d'une période de 30 ans permet -elle de mettre à jours les connaissances quant à la climatologie de ce bassin versant.

En dehors des stations de Rabat et de Meknès qui appartiennent véritablement à la zone agro-écologique, à savoir le «bour favorable», les stations voisines du bassin appartiennent généralement à des zones agro-écologiques différentes. Les stations de Béni Mellal, Ifrane et

Kasba Tadla appartiennent à la zone de montagne. Quant à la station de Casablanca, elle appartient à une zone intermédiaire entre la zone du sud et le «bour favorable».

L'analyse de l'évolution interannuelle de la pluviométrie de 1980 à 2006 (27 ans), pour les stations principales fait ressortir trois ensembles de dynamiques différentes :

Les stations influençant le sud du bassin sont (Kasba Tadla, Khouribga) sont caractérisées par des pentes d'évolution presque nulles ou des pentes positives très faibles;

-Les stations influençant le centre et l'ouest du bassin (les stations du littoral atlantique : Casablanca, Rabat-Salé) sont caractérisées par une évolution notable à la hausse de la pluviométrie de 1980 à 2006; -Les stations influençant une partie du centre et les espaces nord constituant les hauts plateaux du Bassin (Meknès et Ifrane) sont marquées par d'importantes évolutions à la baisse des quantités pluviométriques.

Pour vérifier l'existence ou non de tendance dans ces séries pluviométriques, le test de Mann-Kendall est appliqué. C'est un test de tendance non paramétrique, d'abord étudié par Mann (1945) puis repris par Kendall (1975) et amélioré par Hirsch (1982, 1984) qui a permis de prendre en compte une composante saisonnière (Yue et Pilon, 2004).

La statistique S de Kendall représente un solde qui, lorsqu'il est positif, indique une évolution à la hausse du phénomène étudié, et dans le temps, lorsqu'il est négatif indique une baisse du phénomène. Toutefois, pour savoir si ces hausses et ces baisses sont suffisantes pour être considérées comme une tendance significative, la p-value du test de Mann-Kendall doit être inférieures au niveau de significativité fixé au départ du calcul (ce niveau est ici de 5%). Ainsi, les valeurs du test de Mann-Kendal (S) sur la recherche des tendances significatives dans ces séries chronologiques confirment cette observation générale de l'évolution interannuelle de la pluviométrie (Tableau 44).

Les stations de Meknès et d'Ifrane présentent, à cet effet, un solde négatif d'évolution des quantités pluviométriques, quand les stations du littoral présentent les plus forts taux de Kendall. Pour un niveau de significativité de 5%, seule la station de Meknès confirme une tendance à la baisse de la pluviométrie interannuelle. Aussi, l'observation des coefficients de variation permet de comprendre que les tendances à la baisse ou à la hausse de la pluviométrie ne sont pas linéaires (Figures 137 et Tableau 44). Les coefficients de variation sont importants d'une année à l'autre. Exception faite de Meknès où ce coefficient est inférieur à 30% (28%), toutes les stations présentent des coefficients de variation interannuelle de la pluviométrie compris entre 30 et 40%. Les écarts par rapport aux moyennes annuelles sont partout supérieurs à 120 mm. Ceci traduit d'ailleurs la complexité de la modélisation de cette dynamique pluviométrique interannuelle. Les stations de Meknès et Ifrane présentent une fonction marquée par une baisse continue avec quelques années exceptionnelles caractérisées par des hausses importantes. Quant aux autres stations (exception faite de Khouribga), elles

présentent une première phase de hausse et de baisse de la pluviométrie interannuelle de 1980 à 1995. Les segments de 1996 à 2006 marquent une tendance à la hausse de la pluviométrie. La station de Khouribga se caractérise, quant à elle, par une certaine stagnation. L'année 1996 apparaît comme l'année la plus pluvieuse de toutes les séries. Quant aux minima des séries, ils diffèrent d'une station à l'autre. Cependant, de façon générale, l'année 1981 est l'année la moins pluvieuse de la série 1980 à 2006. Mais comparativement à la limite inférieure de la série chronologique de la dynamique végétale (1982), l'année la moins humide de l'ensemble des stations est l'année 2005. Aucune des stations pluviométriques ne présente de rupture de série de 1982 à 2006, selon le test de Pettitt pour des intervalles de confiance de 99 à 90%.

1.2. Evolution saisonnière de la pluviométrie

De façon générale, le bassin versant du Bouregreg est soumis à un régime méditerranéen de type semi-aride. Ce régime pluviométrique est unimodal avec une seule saison humide de septembre à mai. La moyenne pluviométrique est d'environ 400 mm/an. La répartition spatiale de la pluviométrie présente un gradient Nord-Sud et Est-Ouest (Figure 139).

L'espace N et ouest du bassin (station d'Ifrane, Mkenès et Rabat) est la plus humide du bassin. La moyenne interannuelle pluviométrique de la période 1980-2006 est de 495 mm à

Rabat, 471 mm à Meknès et à 873 mm à Ifrane. Les stations de la partie sud du bassin, moins humides présentent des moyennes de 335 mm à Casablanca, 328 mm à Khouribga et 345 mm à Kasba Tadla. L'importante variation interannuelle de la pluviométrie est aussi une expression d'une variabilité intra annuelle marquée. Le mois le plus humide de l'année est le mois de décembre, même si certaines stations comme Casablanca et Béni Mellal ont tendance à connaître leur maximum au mois de novembre. Le mois de décembre ou novembre (selon les stations) enregistré, dans la partie nord (d'ouest à l'est), les quantités moyennes de 93 mm à Rabat, 77 mm à Meknès et 153 mm à Ifrane. Dans les parties sud du bassin, (d'ouest en est), ces quantités sont de 64 mm à Casablanca, 60 mm à Khouribga et 49 mm à Kasba Tadla. Le mois de juillet est le plus sec de l'année. Les mois secs connaissent généralement des pluviométries nulles (Figure 117).

Tableau 42 : Récapitulatives de l'évolution interannuelle de la pluviométrie de 1980 à 2006.

Min	165,1	154,8	249,6	84,4	264,3	529,6	298,1
Annee min	1981	2005	1994	1991	2001	2005	1981
Max	744,6	809,1	1164	674,4	923,9	1866	1030
Annee max	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996
Moyenne	334,7	328	495,3	346,7	471	872,8	474,7
Mediane	306,6	302	444,9	354,2	445,8	821,4	441,1
Ecart-type	123,9	128,4	188,3	127,8	131,8	262,1	143,7
Coef. Variation	37,0182253	39,1463415	38,0173632	36,8618402	27,9830149	30,0297892	30,2717506
Mann-Kend (S)	53	21	35	19	-83	-27	9
p-value	0,139	0,338	0,239	0,354	0,0437	0,294	0,434

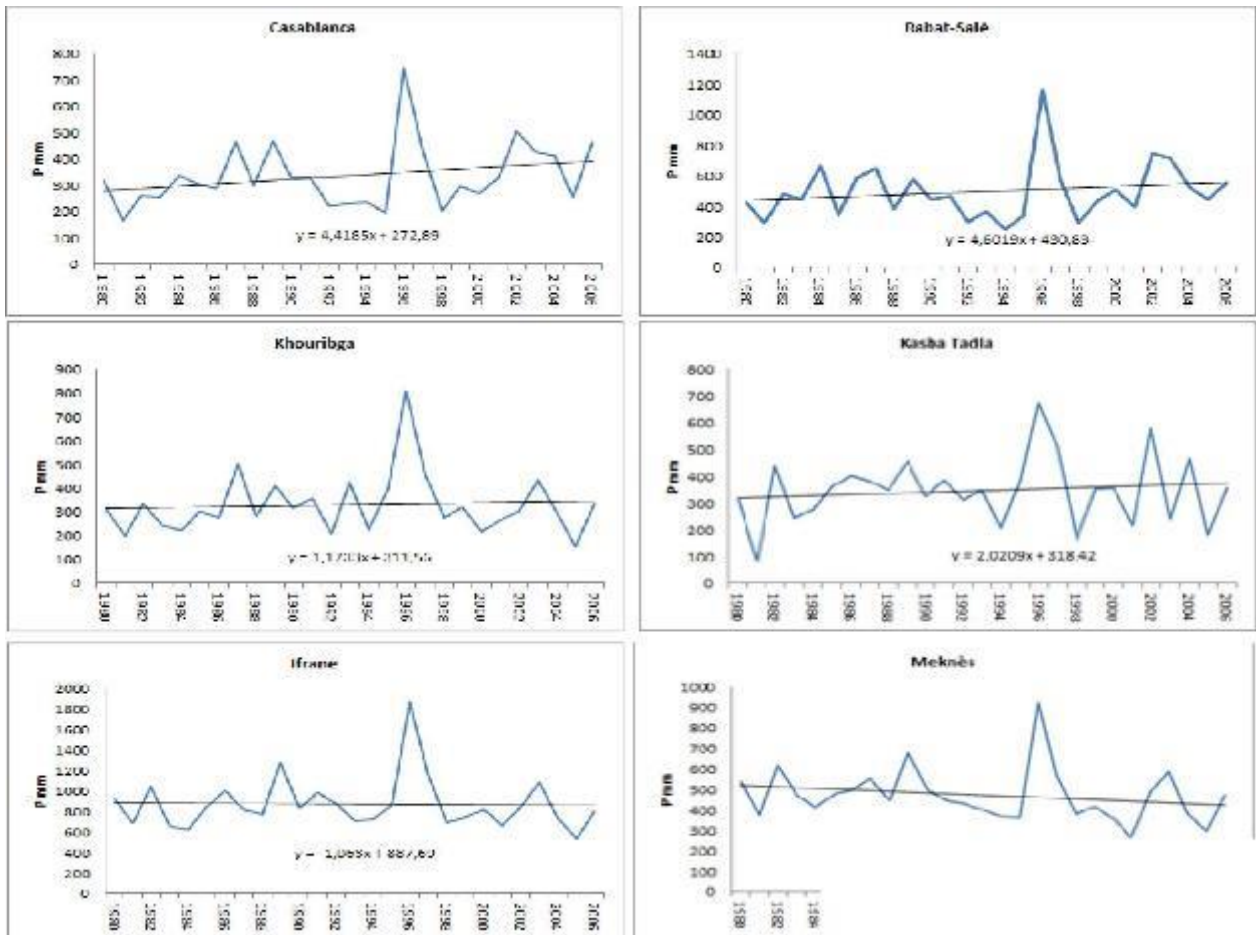


Figure 117 : Courbe d'évolution interannuelle de la pluviométrie dans l'espace du Bassin du Bouregreg.

Les variations moyennes des précipitations mensuelles d'une année à l'autre sont élevées. Elles sont généralement supérieures à 60% avec des pics au mois de septembre (début de la saison humide avec un coefficient moyen de 180 %) et de mai (fin de la saison humide avec un coefficient moyen de 141%). Les mois de novembre, décembre, janvier et février qui présentent un intérêt particulier pour la production agricole et principalement céréalière subissent aussi d'importantes variations de quantités pluviométriques interannuelle. L'analyse de la dynamique interannuelle des saisons permet de regrouper les mois en trois classes :

-La classe des mois marqués par une dynamique à pente négative qui sont les mois de février, mars, avril et mai (Figure 138) ;

-La classe des mois marqués par une dynamique à pente positive, à savoir les mois de septembre-octobre et décembre ;

-La classe des mois marqués par des comportements intermédiaires entre les classes précédentes. Selon les stations, il est observé soit une évolution à la baisse, soit une évolution à la hausse de la pluviométrie. Il s'agit des mois de janvier et novembre.

A l'intérieur de ces classes subsistent des exceptions. Ainsi, bien que le mois d'octobre tend à gagner en humidité de façon générale, il est observé, au contraire, une évolution à la baisse à Ifrane. Le même constat est fait pour le mois de février à Meknès. Cette exception tend également pour les mois à évolution négative où est observée une dynamique contraire à Rabat au mois de mars et mai, et à Khouribga au mois de mai. En somme, pendant que l'automne devient de plus en plus humide, le printemps évolue vers des mois plus secs au niveau pluviométrique.

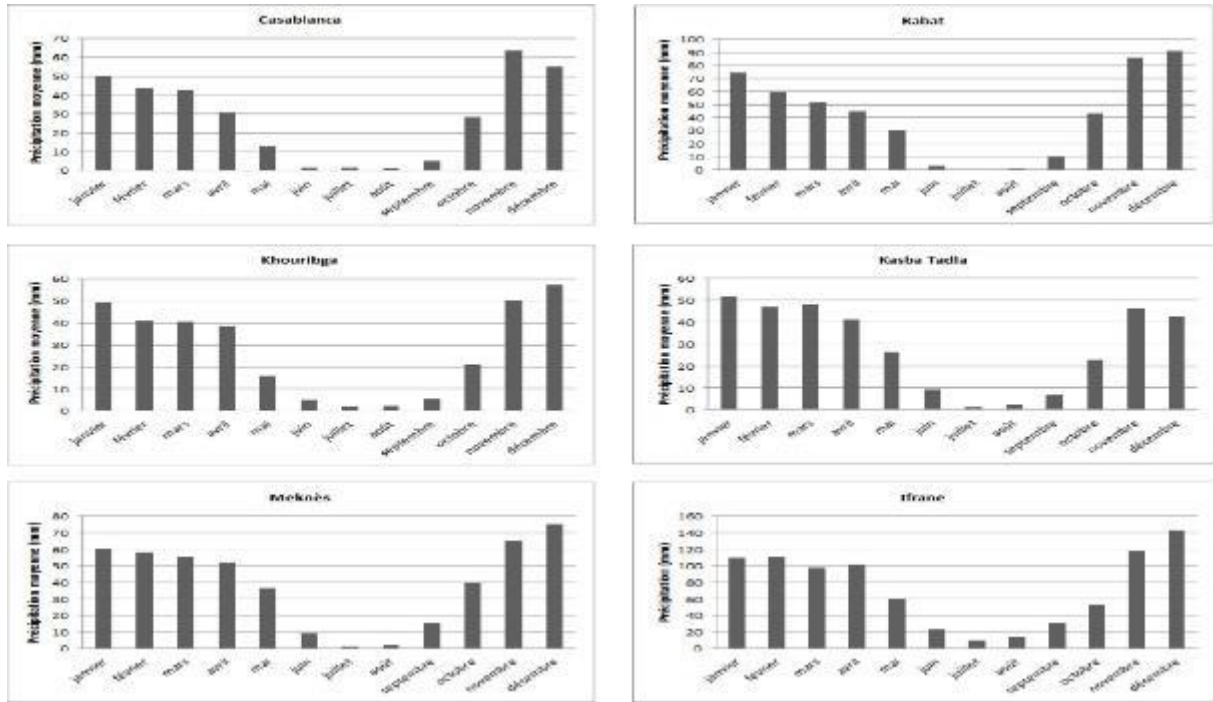


Figure 118 : Régime pluviométrique de l'espace du bassin du Bouregreg (SIGMED, 2012)

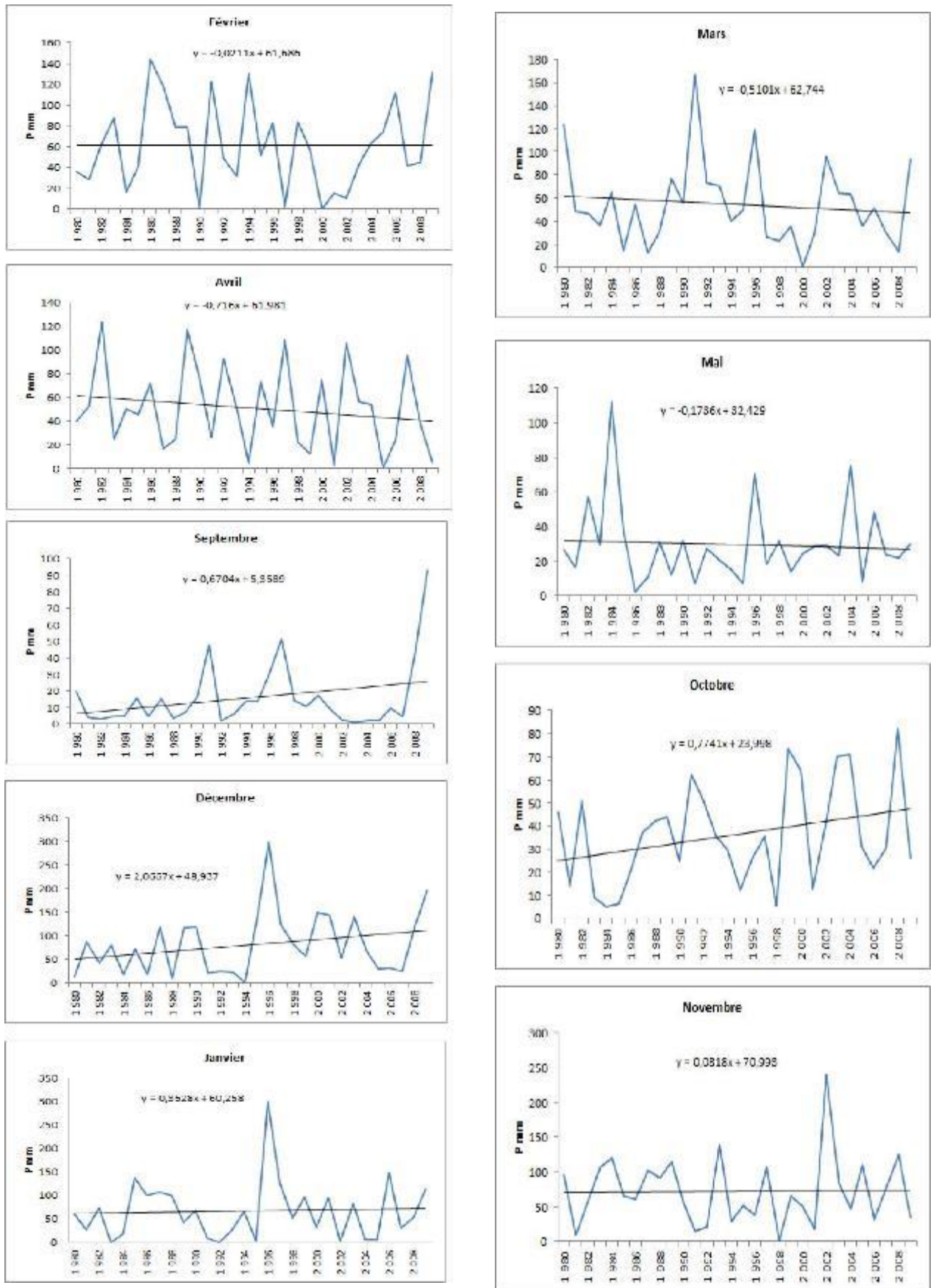


Figure 119 : Evolution interannuelle des précipitations mensuelles dans le bassin du Bouregreg.

L'analyse des tendances d'évolution des précipitations mensuelles des mois humides à travers le test de mann-kendall indique 4 classes de mois :

- **Le mois d'octobre** où la tendance à la hausse des précipitations est confirmée avec un degré de confiance de 95% pour toutes les stations, excepté celles de Meknès et d'Ifrane. Cette dernière est d'ailleurs caractérisée par une tendance confirmée à la baisse pour un degré de confiance de 90%. Pour un seuil de significativité alpha de 10%, il apparaît des ruptures dans les séries chronologiques des précipitations de ce mois (Figure 119). Selon le test de Pettitt, la rupture intervient en 1998 pour les stations de Casablanca et Rabat (partie ouest du bassin) et en 1986 pour la station de Khouribga (partie Sud du bassin). Cette dernière connaît le taux le plus important d'évolution des précipitations entre les moyennes d'avant et d'après 1986 (273%). La station de Kasba Tadla (partie sud-est du bassin), bien que marquée par une forte tendance à la hausse de la pluviométrie en octobre, ne connaît pas de rupture de série.

Ainsi, les parties Sud du bassin ont tendance à connaître un gain de quantité pluviométrique tandis que les parties Nord obéissent à une logique contraire ;

-**Le mois d'avril** où, pour un degré de confiance de 90%, la baisse des précipitations est confirmée pour les stations de Khouribga, Rabat et Meknès, soit plus de la moitié ouest du bassin. Toutefois, aucune rupture de série n'apparaît dans les séries chronologiques ;

-**Les mois d'exception** où certaines stations marquent des différences importantes et contraire à la dynamique générale. Il s'agit du mois de mai pour la station de Rabat, avec une tendance positive significative ; du mois de septembre pour la station de Casablanca (dynamique positive) ;

-**Les autres mois** de la saison humide, bien que marqués par des tendances diverses d'évolution de la pluviométrie entre 1980 et 2009, restent significativement non remarquable

Bien que l'intervalle d'analyse de l'évolution de la pluviométrie des mois de juin, juillet et août (période intermédiaire entre deux saisons hydrologiques consécutives) soit de 27 ans

(1980-2006), des tendances assez pertinentes peuvent y être décelées. A l'observation de l'évolution des précipitations sur cette période, les mois de juin et août ne présentent pas de tendance notable à la baisse ou à la hausse des précipitations mensuelles. Cependant, ces mois connaissent une très faible pente positive. Le mois de juillet (mois le moins humide de l'année) est quant à lui caractérisé par une dynamique à pente négative. Le test de tendance confirme une évolution négative significative avec un degré alpha de 10%, pour les stations de Kasba Tadla (partie sud-est du bassin) et de Meknès (partie nord du bassin).

1.3. Analyse de l'impact de la variabilité climatique sur le dynamisme de la végétation dans le bassin versant du Bouregreg.

1.3.1. La corrélation variabilité climatique-production et masses Végétales

Il est important de rappeler que l'analyse séparée de l'évolution spatio-temporelle de la végétation sur le bassin versant du Bouregreg indique qu'au niveau interannuel général, il existe une évolution à la baisse de la végétation. L'analyse mensuelle a ainsi mis en lumière le fait que certains mois étaient marqués par des gains de végétation (octobre-novembre et janvier-février) au contraire de d'autres mois marqués par de fortes tendances à la baisse de la végétation (mai, juin et juillet). La même analyse faite au niveau pluviométrique indique des résultats qui ne semblent pas être en tout point en étroite corrélation avec la dynamique végétale. La dynamique Temporelle de la pluviométrie de 1982 à 2009 permet de diviser l'espace du bassin en deux pôles :

- Les espaces dont la pente d'évolution des quantités pluviométriques annuelles est positive. Ce sont les zones de Rabat, Khouribga et Kasba (de l'ouest au sud-est du bassin);
- Les espaces dont la pente d'évolution de la pluviométrie est négative. Il s'agit des espaces couverts par les stations de Meknès et d'Ifrane (le centre et l'est du bassin).

L'analyse mensuelle de la dynamique de la pluviométrie indique que les mois de février à mai présentent des évolutions à la baisse des quantités pluviométriques contrairement au mois de septembre-octobre et décembre. Les mois de la saison estivale ne connaissent pas de réel changement au niveau pluviométrique. Ce qui contraste avec la dynamique observée au niveau de la végétation de 1982 à 2009.

La vérification de cette hypothèse nécessite donc une analyse mettant en relation les deux variables (végétation et pluviométrie). Les comparaisons entre la moyenne globale ou la somme globale de la végétation représentée par son indice NDVI et la pluviométrie globale du bassin n'exprime pas grande chose au niveau biophysique ou agro-climatique. Ceci d'autant plus que les réalités pluviométriques, au niveau spatial dans le bassin, sont très différentes. Il est donc important d'étudier la corrélation entre pluviométrie et biomasse en fonction d'unités climatiques homogènes. Ainsi, le shapefile délimitant les unités climatiques du bassin a été superposé aux images de NDVI de NOAA de la période de 1982 à 2009 pour extraire des espaces homogènes au niveau pluviométrique et végétal. Une régression linéaire de la végétation en fonction de la pluviométrie est faite. Un intervalle de deux semaines

sépare les données pluviométriques de celle de la végétation comparée. Cet intervalle correspond au temps de réponse de la végétation. Ainsi, (le Tableau 49) confirme que l'observation à la baisse de la végétation en période estivale n'est pas directement liée à la dynamique pluviométrique (les coefficients de détermination et même la corrélation sont très faibles). Par contre, l'évolution de la végétation pendant les saisons humides de 1982 à 2009 est, à un certain degré, influencée par les quantités pluviométriques. Les coefficients de corrélation parfois important (autour de 50%) justifient les constats selon lesquels les productions agricoles sont liées aux variations climatiques dans le bassin. Dans la moitié Ouest du bassin (Rabat), les variations pluviométriques sont responsables d'environ 20% de la dynamique végétale. Dans la moitié Est, cette proportion est plus importante. Elle est de 43% et 30% respectivement en mars et en avril à Ifrane. L'impact de la variabilité climatique pendant ces mois humides sur la dynamique végétale est encore plus important dans la moitié sud-est du bassin. Cette partie couverte par la station de Kasba est, en effet, la zone la moins humide du bassin. Elle est aussi un espace important de production d'orge. L'orge étant souvent associé à l'élevage au Maroc, cela laisse penser à une zone fragile au niveau végétale et pluviométrique. Ainsi, pendant les mois humides le gain de végétation est lié à une concentration de l'activité agricole pendant cette période ainsi qu'au progrès techniques et scientifiques liés aux cultures céréalières. Il est important d'indiquer que l'indice de végétation des cultures céréalières en pleine saison humide est très élevé, compte tenu de ce qu'elles se comportent comme une pelouse. L'augmentation des superficies de cultures céréalières et particulièrement du blé tendre a aussi pour effet d'augmenter la masse végétale globale pendant la saison humide au niveau des images NOAA. Au contraire de ces mois, la période de mai à juillet connaît des tendances notables à la baisse de la masse végétale. L'analyse de la régression linéaire entre cette dynamique végétale et l'évolution des quantités pluviométriques de 1982 à 2009, permet de comprendre que la pluviométrie n'est pas directement responsable de cette forte baisse de la végétation. Cependant, de façon indirecte, cette baisse est due aux effets cumulés de sécheresses récurrentes observées au niveau du Maroc depuis les années 1980. En effet, les recherches précédentes (Laouina, 2004; Aderghal ,2011) expliquent cette dynamique végétale par deux facteurs que sont l'urbanisation galopante de la bande côtière atlantique marocaine, et la pression pastorale qui s'accroît dans les espaces humides du Maroc suite aux sécheresses. Ce constat reste inquiétant d'autant plus que les zones humides connaissent à leur tour les baisses pluviométriques les plus importantes du Royaume.

Tableau 43 : Récapitulatif de la régression linéaire entre la pluviométrie et la végétation de 1982 à 2009.

Rabat	Régression NDVI- P	février	mars	avril	juin	juillet	Novembre
	coéf. Corrélacion	0,44807344	0,4896485	0,45464192	0,14453911	0,14833991	0,35458292
	coéf. Détermination	0,20076981	0,23975566	0,20669927	0,02089155	0,02200473	0,12572905
	Erreur standard	15,479866	7,84909439	7,99600684	0,40350922	0,27617908	6,07803853
Ifrane	Régression NDVI- P	février	mars	avril	juin	juillet	Novembre
	coéf. Corrélacion	0,34580856	0,65572031	0,55046923	0,43379938	0,29976904	0,06867276
	coéf. Détermination	0,11958356	0,42996913	0,30301637	0,1881819	0,08986147	0,00471595
	Erreur standard	0,07016954	0,05516654	0,05965532	0,03167486	0,02325278	0,054906
Kasba Tadla	Régression NDVI- P	Février	mars	avril	juin	juillet	Novembre
	coéf. Corrélacion	0,3640373	0,50390019	0,3900231	0,22401146	0,19949716	0,34633194
	coéf. Détermination	0,13252316	0,2539154	0,15211802	0,05018114	0,03979912	0,11994581
	Erreur standard	10,8203653	10,4858683	9,34437749	3,16178593	0,02194853	0,03470815

Une analyse de la pluviométrie décadaire de la période de 1988 à 2009, pour les mois de la saison agricole permet de mieux comprendre les manifestations pluviométriques de ces sécheresses. Pour cette analyse, les stations de Rabat, d'Ifrane et de Kasba Tadla sont retenues car elles influencent la presque totalité du bassin. (La Figure 120) présente la fréquence des décades dont les quantités de précipitation sont inférieures à 2 mm. Cette valeur proche de zéro a été choisie pour désigner une décade très sèche car la capacité de rétention en eau des sols peut jouer un effet tampon permettant aux plantes de continuer à puiser dans la réserve utile. Ainsi, ressort-il de l'analyse des fréquences de décades nulles pendant cette période de 21 ans que, de façon générale, aucun mois n'est épargnée par des risques de sécheresse. Cependant, en dehors des risques importants de début de saison (d'octobre à la deuxième décade de novembre) et de fin de saison (les décades de mai), les décades sans précipitation sont aussi important de la deuxième décade de janvier à la deuxième décade de février. La deuxième décade du mois de mars est aussi marquée par ces intervalles secs. A titre illustratif, à la deuxième décade de janvier, la fréquence de décade sèche est de 62% à Rabat, 52% à Kasba Tadla et 43% à Ifrane. Ces périodes sèches pendant les semis (novembre) et la croissance et la maturité des céréales (décembre-avril) ont des impacts importants sur

productions finales (Douguedroit et al, 1998; Jlibene et Balaghi, 2009). Il est possible de mettre en relief les périodes sèches intra saisons agricoles par le graphique du cumul décadaire des précipitations. (La Figure 121) présente l'exemple pour les quatre années les plus sèches à Rabat. Une bonne campagne agricole est celle où, pendant la campagne, les décades connaissent une progression continue en pluviométrie (20 mm, selon Jlibene et Balaghi, 2009) pendant les phases de semis, de croissance et de maturité des céréales. Ainsi, sur le graphe l'allure horizontale des segments de courbes marque des périodes de sécheresse. Cette figure permet de comprendre que la sécheresse agricole de 1994-1995 est due à un déficit pluviométrique important en début de saison. La sécheresse de 1999-2000 est due, elle, à une rupture pluviométrique en milieu de saison culturale. Quant aux sécheresses de 1992-1993 et 2006-2007, elles sont le résultat de succession de décades peu pluvieuses au cours de toute la campagne agricole.

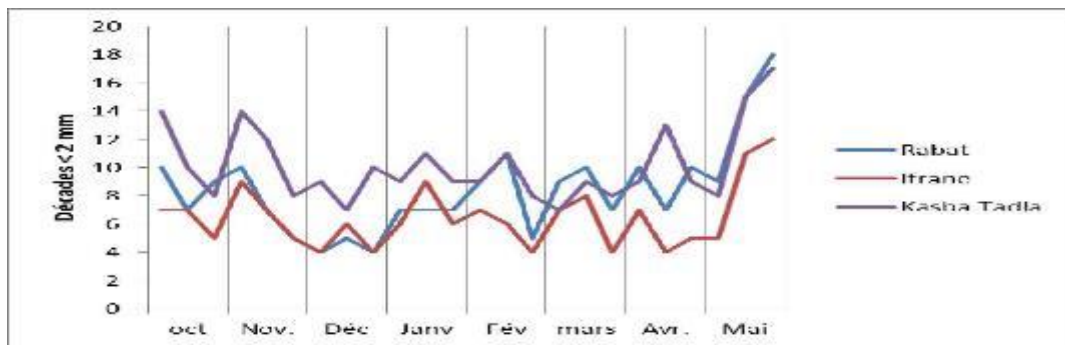


Figure 120 : Fréquence des décades pluviométriques nulles.

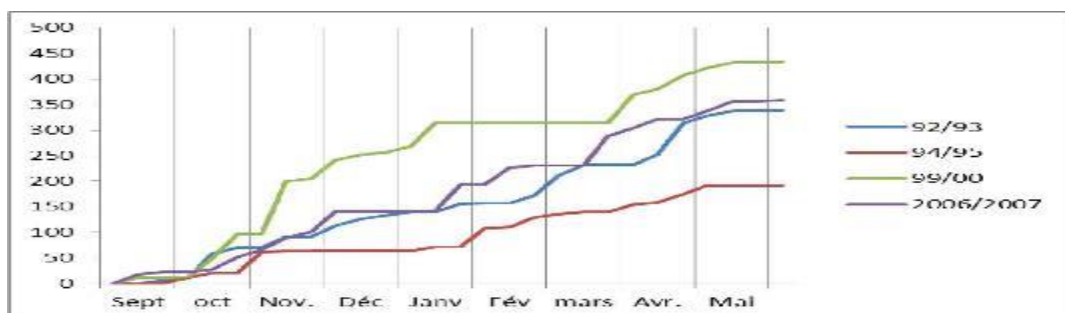


Figure 121 : Détection de périodes sèches dans les campagnes agricoles d'années sèches A Rabat.

La sécheresse agricole est un déficit pluviométrique marqué et suffisant pouvant entraîner une réduction significative de la production agricole (Barakat et Handouffe, 1998). Dans le cas présent, la sécheresse et son impact sur les productions agricoles (essentiellement céréalières) de 1980 à 2009 est analysée à la fois à partir des productions saisonnières mais aussi à partir de l'évolution de la pluviométrie décadaire de 1988 à 2009. Les céréales représentent les 2/3 des productions agricoles au Maroc.

Dans le bassin du Bouregreg, cette proportion est encore plus importante. Ces productions céréalières en agriculture pluviales sont étroitement dépendantes de la pluviométrie. Ainsi, il est possible à partir de ces productions céréalières annuelles d'analyser l'évolution de la sécheresse agricole dans le bassin versant du Bouregreg. Il est ainsi question d'étudier la sécheresse et son intensité à partir de leurs effets sur les productions enregistrées de 1980 à 2009. Le blé dur, le blé tendre et l'orge constituent la presque totalité des céréales produites dans le bassin versant du Bouregreg. La (Figure 178) représente la répartition des productions moyennes de la période de 1980 à 2009 par provinces et préfecture. De façon générale, le centre et l'amont du bassin sont les espaces de plus grande production céréalière (Khémisset et Khénifra). Toutefois, l'espace sud (Khouribga) reste la zone de plus grande production d'orge. L'espace de Rabat est la plus faible productrice céréalière. L'observation des quantités permet de savoir que le blé tendre est de loin la céréale la plus cultivée, suivi de l'orge et du blé tendre. Les quantités moyennes de blé tendre sont plus du doubles de celle du blé dur et presque le double de celles de l'orge dans la province de Khémisset.

Pour déterminer les épisodes de sécheresse et leur intensité, une régression linéaire des productions en fonction du temps est faite. Les productions céréalières "évoluent selon une régression géométrique due à l'évolution avec le temps des superficies cultivées et des rendements" (Barakat et Handouffe, 1998). Une limite inférieure de production par rapport à la normale de la régression est calculée avec un intervalle de confiance de 95%. Les productions inférieures à la limite inférieure de l'intervalle de confiance marquent la sécheresse. L'intensité de cette sécheresse, exprimée en pourcentage, les Principales productions céréalières du bassin du Bouregreg (moyenne de 1980 à 2009) $S = \text{limite inférieure de l'intervalle de confiance} = \text{la production de céréale d'une année } x$ Ainsi, l'évolution saisonnière de la production d'orge de 1980 à 2009 permet de diviser le bassin en deux entités (Figure 122) :

-La partie amont du bassin (Khénifra et Khouribga) où la production d'orge connaît une dynamique positive ; -Les parties centres et aval du bassin où les productions sont en baisse. Dans l'un ou l'autre cas, ces productions ne sont pas des tendances significatives au niveau statistique. L'analyse de régression de l'évolution des productions d'orge (Figure 177) permet de conclure qu'au cours des campagnes agricoles de 1980 à 2009, 40% des années ont été sèches à Khénifra. 37% l'ont été à Rabat, 33% à Khouribga et 27% à Ben Slimane (sud de Rabat). L'analyse du graphique de la (Figure 177) permet d'observer que la fréquence des sécheresses est plus importante à partir des années 1990 et particulièrement pendant la décennie 1990 –2000. Cette décennie représente 50% des sécheresses observées au cours de la période de 1980 à 2009 à ben Slimane. Cette proportion est de 64% à Khémisset, 58% à Khénifra, 30% à Khouribga (la plus importante zone productrice d'orge dans le bassin). Les campagnes 1992/1993 ; 1994/1995 et 1999/2000 sont des années sèches pour tout le bassin au niveau de la production d'orge, avec des intensités de sécheresse supérieures à 70%. L'analyse de la dynamique de l'intensité des sécheresses montre qu'en plus des fréquences élevées de ce phénomène à partir de 1990, leur intensité est également plus importante à partir de cette date. La répartition spatiale de la production de blé dur dans le bassin indique que le centre et l'amont (hormis l'espace de Khouribga) sont les espaces de plus grande production de blé dur du bassin. La production moyenne de la période de 1980–2009 est de 605000 quintaux à Khémisset (centre) et 474000 quintaux à Khénifra (amont). La plus faible production de la série est enregistrée à Rabat (46000 quintaux). La répartition spatiale de l'évolution des sécheresses indique que les parties amont du bassin (Khénifra et Khouribga) connaissent les plus importantes fréquences de sécheresse pour les cultures de blé dur. Cette fréquence est de 43% pour cette partie du bassin de 1980 à 2009. La fréquence des années sèches diminue vers l'ouest. Elle est de 33% à Khémisset, au centre du bassin, et de 27% à Rabat et Ben Slimane à l'ouest. Au niveau de l'évolution temporelle des productions de blé dur, il est observé une baisse importante des quantités annuelles de 1980 à 2009 sur tout le bassin. Ces productions ont été marquées par de nombreuses sécheresses. L'analyse détaillée de la structure des sécheresses pour cette culture (fréquence et intensité) est très similaire au cas observé pour les cultures de l'orge. Les sécheresses des campagnes 1992-1993 ; 1994-1995 et 1999-2000 marquent tout le bassin avec des intensités supérieures à 60%. Les fréquences des sécheresses les plus importantes sont situées entre 1991-1992 et 2001-2002. La fréquence est ainsi, pour cette période, de 80% à Khémisset, 75% à Rabat, 63% à ben Slimane, 62% à Khénifra et 46% à Khouribga. L'intensité de ces sécheresses est dans la

majorité des cas, supérieure à 50%. La répartition spatiale des productions de blé tendre est presque identique à celle du blé dur, avec des productions plus importantes au centre et à l'amont du bassin. C'est la culture céréalière la plus importante du bassin en termes de quantité. Les productions moyennes sont de 1,579 million de quintaux à Khémisset, au centre du bassin, de 1980 à 2009. Cette production est de 685000 quintaux à l'amont du bassin et moins de 400000 quintaux dans le reste de ce bassin. L'analyse de l'évolution des productions de 1980 à 2009 présente des tendances significatives à la hausse pour tout le bassin (Figure 124). A Khémisset par exemple, les productions du début de la série ont été multipliées par 12 en 2008-2009. Cependant, au contraire de cette évolution importante à la hausse des productions de blé tendre, l'analyse des périodes de sécheresse indique que cette culture est de plus en plus sujette aux aléas pluviométriques. En effet, la période d'avant 1990 est caractérisée par la quasi-inexistence d'épisodes de sécheresse (Figure 123).

Ces sécheresses sont devenues très importantes de 1990 à 2009. Leur fréquence est de 45% (pour cette période) à Khémisset, Khouribga et Rabat (soit environ une année sur deux), 40% à ben Slimane et 35% à Khénifra. Les intensités de sécheresses les plus basses (37% en moyenne) sont enregistrées dans l'espace de plus grande production (Khémisset).

Par contre, les espaces de Rabat, Khouribga et Ben Slimane présentent des intensités moyennes de sécheresse supérieures à 50%.

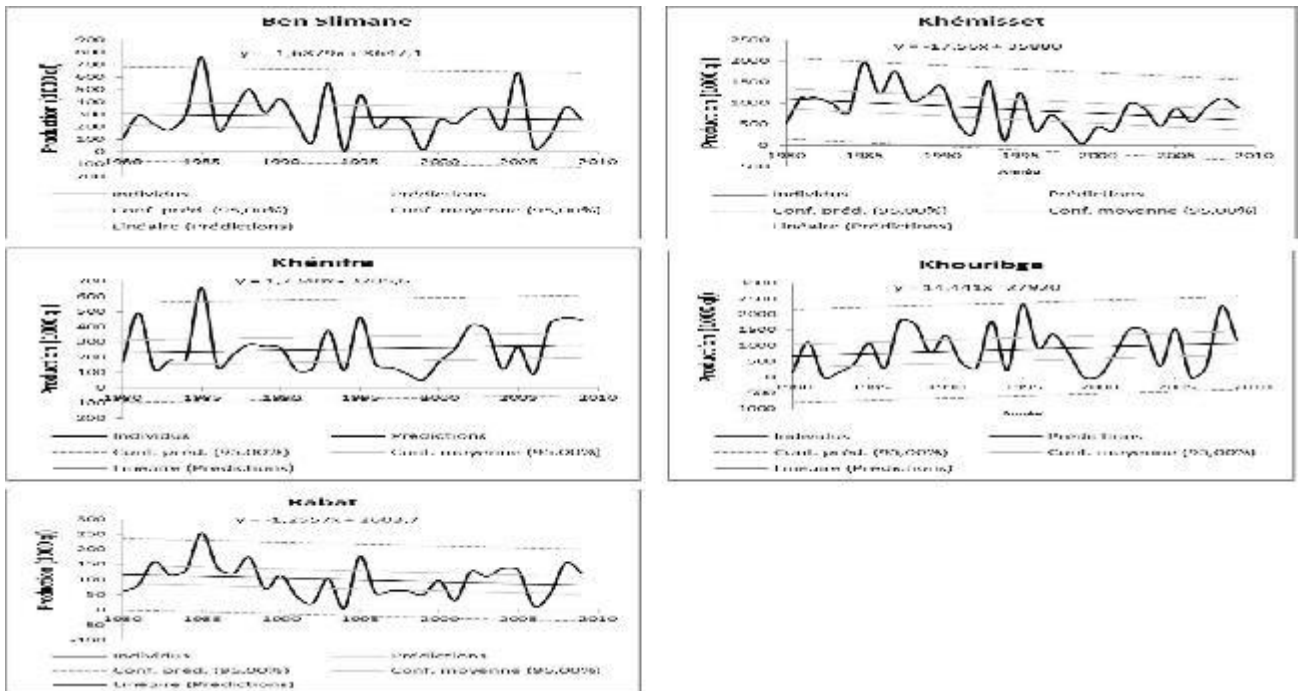


Figure 122 : Production d'orge dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009 (SIGMED)

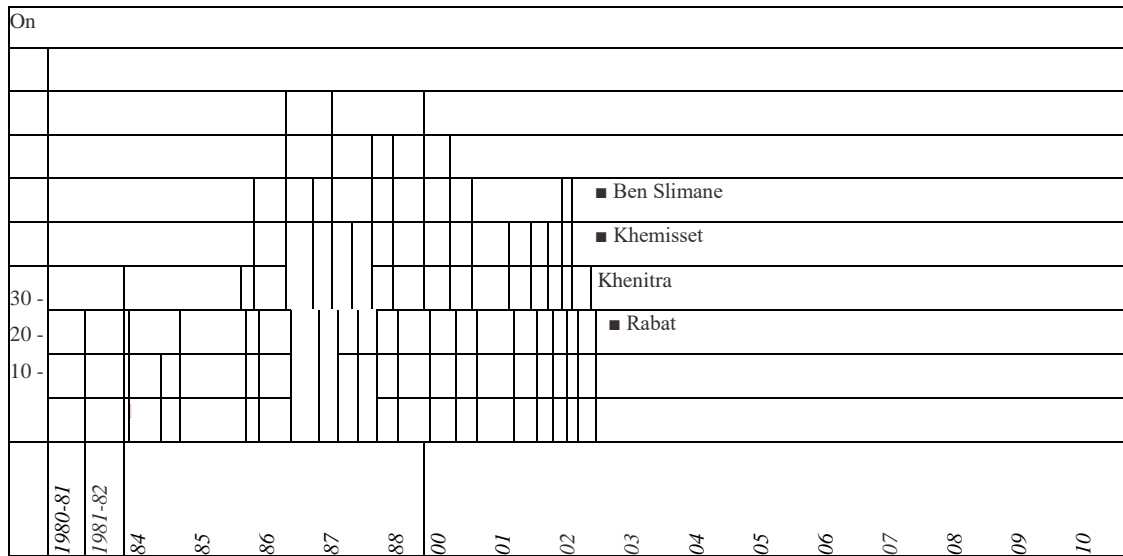
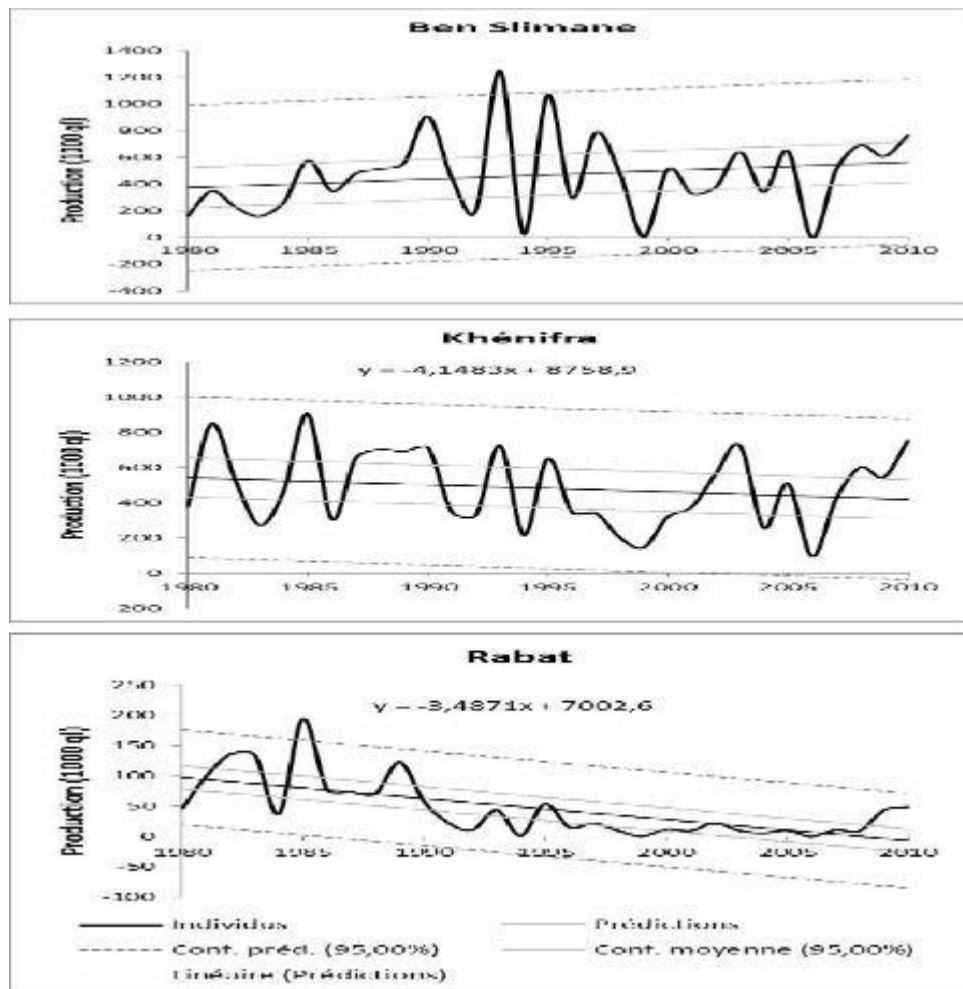


Figure 123 : Intensité des sécheresses pour la culture de l'orge de 1980 à 2009



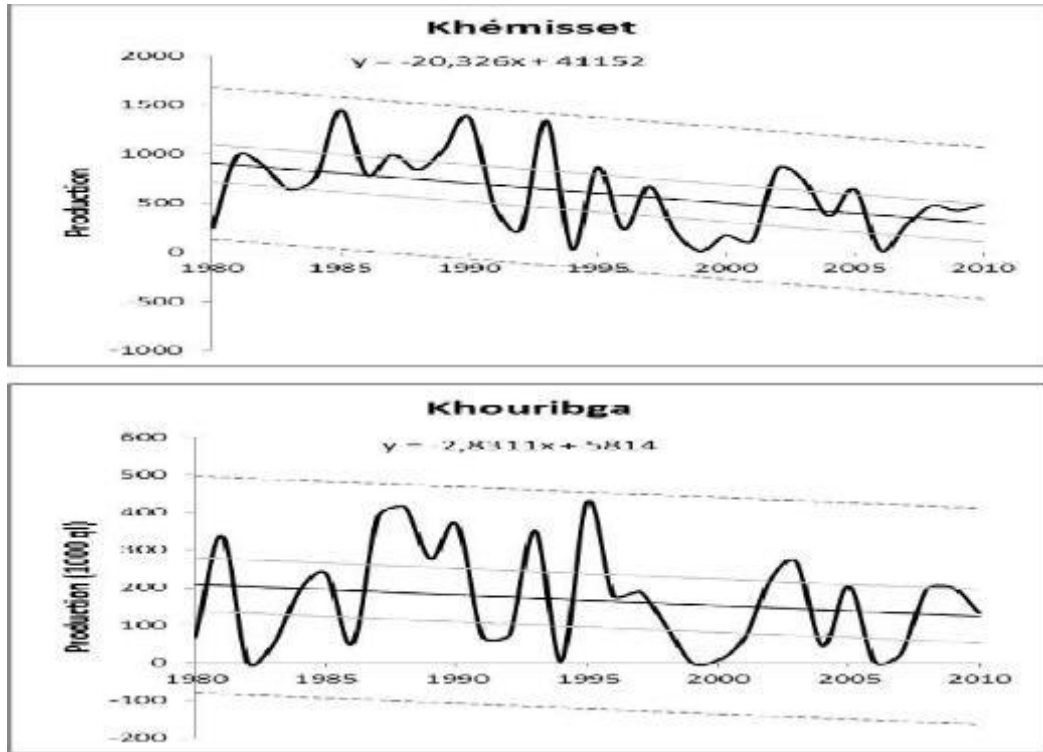


Figure 124 : Production de blé dur dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009 (SIGMED)

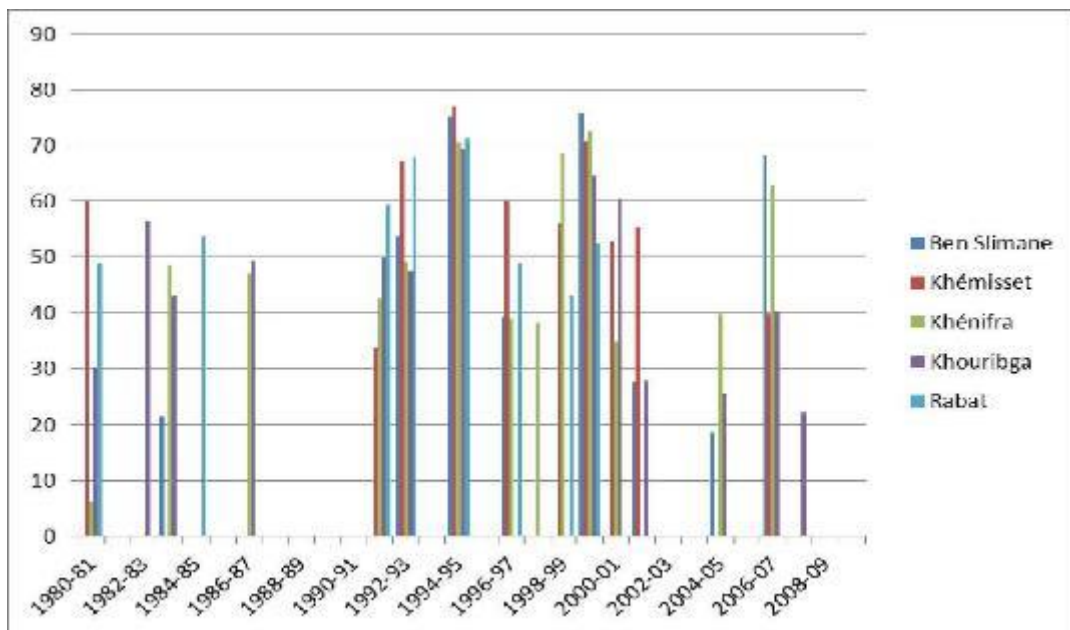


Figure 125 : Intensité des sécheresses pour la culture de blé dur de 1980 à 2009.

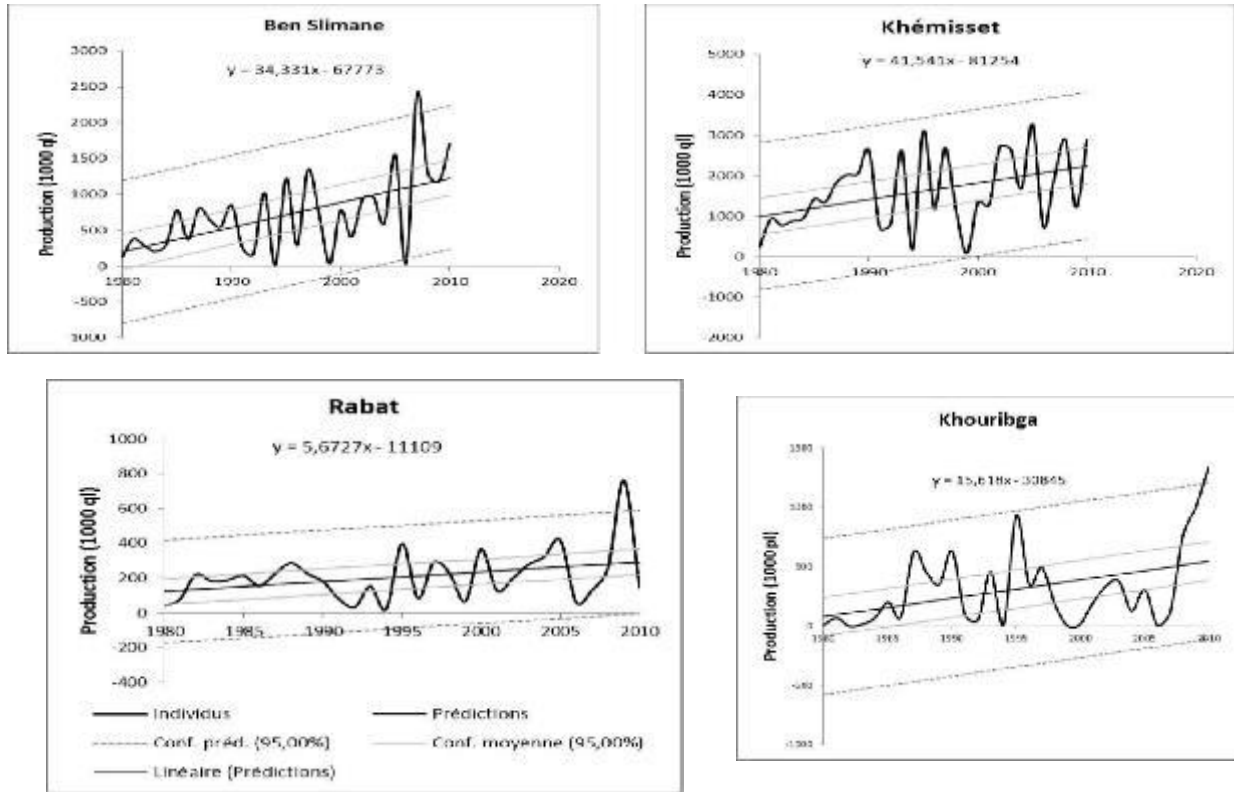


Figure 126 : Production de blé tendre dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009 (SIGMED)

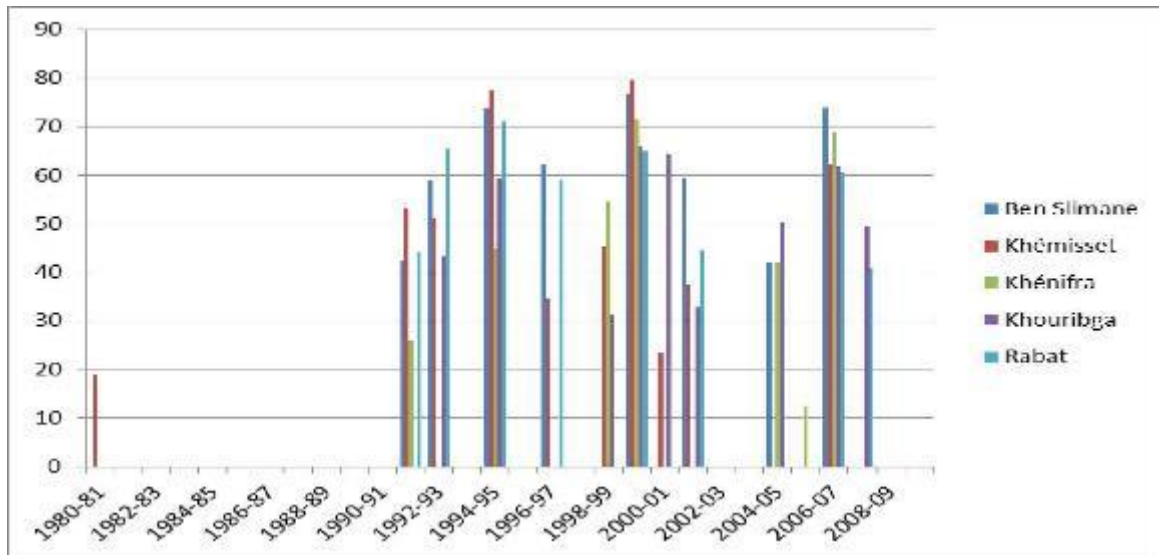


Figure 127 : Intensité des sécheresses pour la culture de blé tendre de 1980 à 2009.

En conclusion de l'évolution spatio-temporelle de la sécheresse agricole, il apparaît que, les espaces de plus grande production céréalière (le centre et l'amont du bassin) sont les plus affectés par les sécheresses. Cette évolution concorde avec la dynamique observée de l'humidité dans le bassin versant du Bouregreg. En outre, les sécheresses sont devenues de plus en plus fréquentes depuis 1990. L'analyse de la fréquence des sécheresses pour toutes les trois céréales combinées par année, permet de conclure que sur les la période de 1980 à 2009, les années 1980-1981; 1991-1993; 1994-1995; 1996-1997; 1998-2002; 2004-2005 et 2006-2007 (11 années sur 30) sont les plus caractéristiques des sécheresses enregistrées dans le bassin. Aussi, force est-il de constater que la forte hausse des productions de blé tendre, hormis les progrès scientifiques et techniques, est liée à une augmentation importante des superficies au détriment des celles des autres céréales (Figure 128). Les cultures comme l'orge ne se retrouvent au final que sur des espaces défavorables et marginaux (EL Mekki, 2006). Ce qui est en harmonie avec la dynamique de la végétation dans le bassin de 1980 à 2009. Il est, en effet, observé que la zone de plus grande production de l'orge (khouribga, au sud-est du bassin) est la moins importante en matière de l'évolution de l'activité végétale.

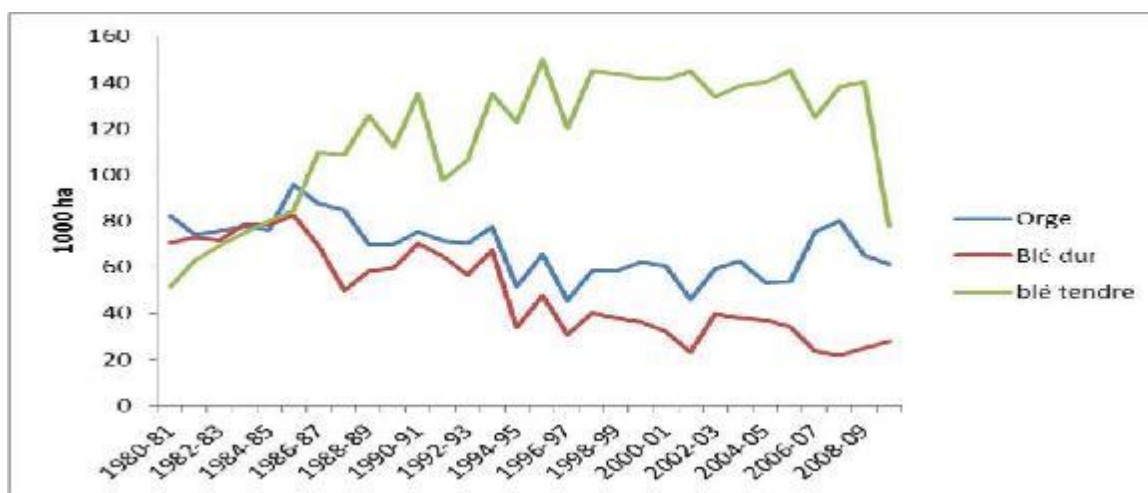


Figure 128 : Evolution des superficies cultivées pour les principales céréales à Khémisset.

- LES FACTEURS ANTHROPIQUES DE LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION.

1. La carte d'occupation du sol

Les images landsat qui sont utilisées pour suivre la dynamique d'occupation du sol sont regroupées en deux catégories. Pour une image de printemps à classifier est associée l'image d'été de la même année ou de plus ou moins une année. La classification choisie est celle d'une classification par arbre de décision. Ceci pour plusieurs raisons : - la première est qu'il est difficile, par une méthode courante comme le maximum, de vraisemblance de séparer certains objets, en particulier la végétation éparses dont la réflectance sur l'image satellite se confond avec le sol nu. La seconde raison est que la classification par arbre de décision permet de prendre en compte le facteur relief, qui est un élément important de la colonisation végétale des espaces dans ce bassin.

La troisième raison est que la réflectance des formations forestières se confond avec celle du verger et des cultures céréalières sur sol sombre dans le bassin.

La classification des images a été précédée de deux opérations à savoir : un prétraitement des images et une reconnaissance des objets sur le terrain par photographie et GPS (Global Positioning System). Les images LANDSAT téléchargées étant ortho-rectifiées, le prétraitement a concerné la correction atmosphérique des images et leur reprojection dans le système local (Maroc zone 1, système Lambert conique conforme, datum Merchich). La correction atmosphérique s'est faite en entrant les paramètres relatifs à la prise de vue contenus dans la métadonnée dans le module de correction atmosphérique du logiciel ENVI.

La structure de l'arbre de décision utilisé reste la même pour toutes les classifications. Mais les valeurs de réflectance sont modifiées étant donné qu'elles sont prises à des époques différentes et dans des conditions climatiques qui peuvent différer.

Chaque classification fait intervenir le même type de fichier. Pour 1985, il s'agit de :

-une image LANDSAT TM (path/row : 201/37) de printemps (11 mars 2007). C'est l'image à classifier ; -d'une image LANDSAT TM (path/row : 201/37) d'été (01 juillet 2007) qui sert à délimiter les formations forestières et le verger des autres types de couverture végétale. Cette scène est complétée par une autre scène du 26 septembre 2007 (LANDSAT TM, path/row : 202/36) qui, elle, couvre la partie aval du bassin ; -un MNT ASTER (30 m de résolution spatiale) qui sert à intégrer l'aspect relief dans la classification ; -une image délimitant les localités du bassin. Un traitement d'image a été fait pour les deux autres images

(l'image d'été) et le MNT Contraste de densité de végétation sur les versants : à gauche le versant exposé au Nord, à Droite le versant exposé au Sud Pour l'image LANDSAT du 01 juillet 2007, il s'agit de faire une classification par maximum de vraisemblance. La classification par maximum de vraisemblance est basée sur des méthodes probabilistes. On calcule pour chaque pixel de l'image sa probabilité d'être rattaché à telle classe plutôt qu'à telle autre (Girard et Girard, 1999). Cette méthode est choisie dans le cas ci car il s'agit de construire une image classifiée avec seulement deux classes, à savoir les formations forestières et le verger d'une part et le reste des classes d'occupation du sol confondu (sol nu, culture annuelles, eau et agglomérations). Il est ainsi plus aisé d'utiliser l'image d'été d'extraire les formations forestières. L'évaluation des zones d'entraînement choisies pour la classification de l'image de juillet fait apparaître des confusions presque négligeables. En effet, les formations forestières et le verger se distinguent à 99,73% des autres formes d'occupation du sol. Seul environ 5% des espaces de culture et autres peuvent être confondus à celle de la végétation forestière.

- LA DEGRADATION DES SOLS : UNE RESULTANTE DE LA COMBINAISON DES FACTEURS CLIMATIQUES ET ANTHROPIQUES

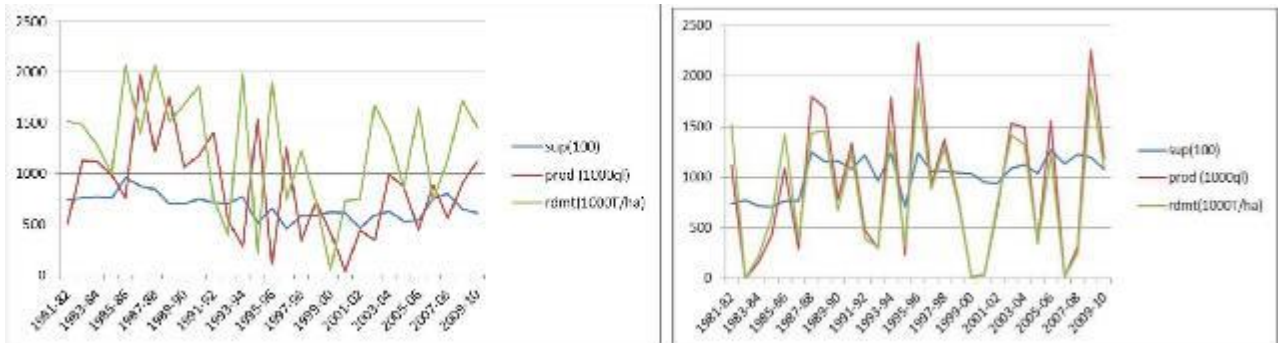
1. Sols fragiles

Roose (2010) résume la dégradation des terres dans les zones semi arides comme la dégradation de la structure et de la macro porosité sur place. Cette dégradation se manifeste en : -La minéralisation des matières organiques du sol ; L'exploitation minérale par les cultures qui entraînent la baisse des activités de la microfaune et de la faune, responsable de la macro porosité du sol et de la diffusion de l'air et de l'eau dans le sol; -La quelettisation et l'enrichissement en sable et graviers des horizons de surface par érosion sélective des particules, des matières organiques et des nutriments, suite à la battance des pluies.

(La Figure 130) résume ce processus de dégradation. Ce schéma permet d'expliquer la dégradation des sols du bassin versant du Bouregreg. La biomasse des zones forestières lorsqu'elle connaît une dégradation des suites d'activités agricoles et pastorales et devient du matorral, les phénomènes d'érosion et de tassement du sol surviennent de plus en plus. Quant aux cultures, elles sont généralement saisonnières, exposant ainsi les sols à des phénomènes importants de dégradation à certaines périodes de l'année. Les sols du bassin versant du Bouregreg sont constitués principalement de : sols rouges et bruns méditerranéens, de

vertisols (ou tirs), de sols hydromorphes minéraux, de lithosols et de régosols. Les sols rouges et bruns méditerranéens sont typiques des zones forestières et présentent un horizon organique bien différencié. Les vertisols ou tirs sont des sols lourds argileux de couleur foncée. Ils sont en association avec d'autres types de sol sur l'ensemble du bassin. Les sols hydromorphes minérales sont localisés en partie dans les zones côtières et les bas plateaux du bassin. Ils sont généralement caractérisés par un horizon supérieur sableux, un horizon inférieur argileux et un horizon intermédiaire contenant une forte proportion de pisolithes ferrugineux. L'évolution vers de niveaux importants de dégradation du sol dans le bassin est marqué par la présence significative des lithosols et régosols. Ces sols sont des produits de l'érosion, généralement de l'érosion hydrique des zones forestières dégradées. Les lithosols constituent le terme ultime de l'érosion sur une roche dure. La roche affleure sur une grande partie de la surface et il ne reste que quelques tâches de sols discontinues. Ce sont aussi souvent des sols squelettiques. Les régosols sont constitués de roches tendres ou facilement fragmentées, décapées par érosion. Ces régosols continuent d'être attaqué par l'érosion hydrique (Billaux et Bryssine, 1967).

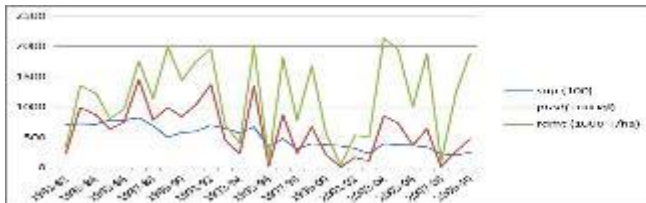
Khemisset



Orge

Houribga

Ble dur



Ble tendre

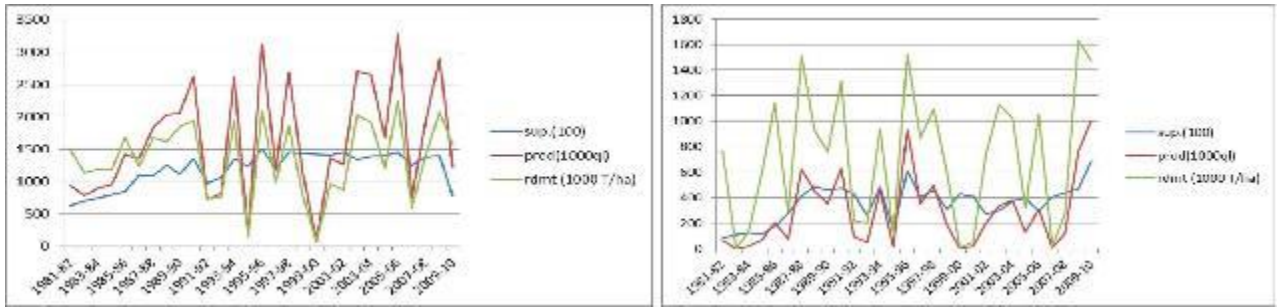


Figure 129 : Evolution des superficies et des productions dans les provinces de Khemisset (centre du bassin) et de Khouribga (Sud du bassin)

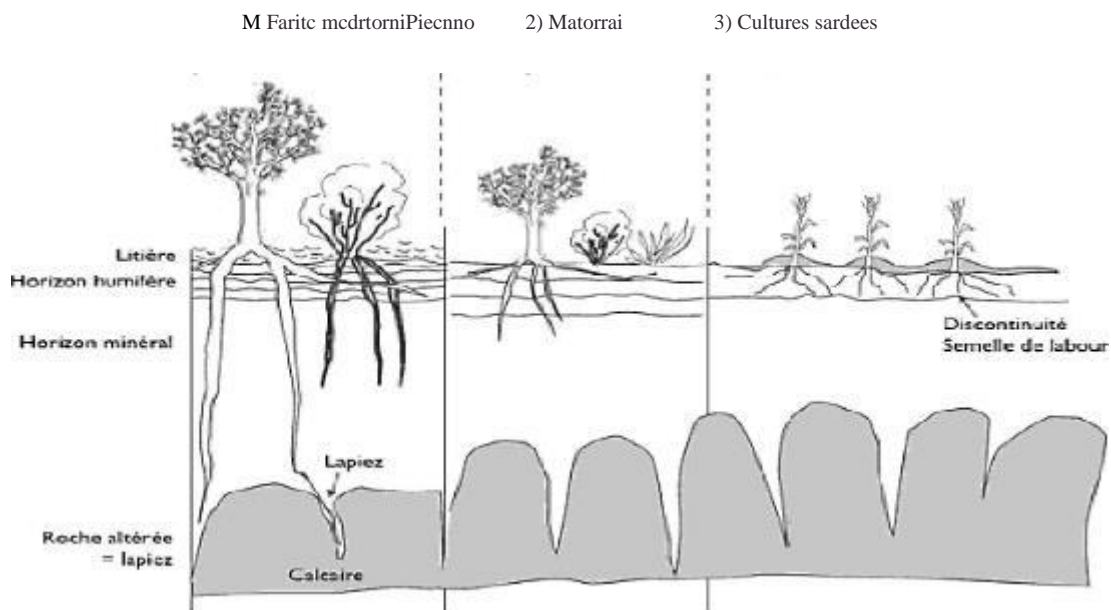


Figure 130 : Etapes de la dégradation des sols au Maroc : la diminution de la protection végétale des sols (de la forêt à une mise en culture ou une exploitation pastorale) entantement des sols fragiles (Roose, 2010)

La classification des images de Landsat de 1985 et 2007 permet d'observer une progression importante de la dégradation des sols de 1985 à 2007 (Figure 151). En 1985, les sols peu dégradés représentent 35% du bassin (341 803 ha) contre 26% en 2007 (253 848 ha).

Cette régression des superficies des sols peu dégradés se fait au détriment d'une augmentation des superficies des sols modérément ou très dégradés. Ainsi, la proportion des sols modérément dégradés est passée de 58% du bassin en 1985 (569 014 ha) à 64% (620 397 ha) en 2007. Quant à la proportion des sols très dégradés, elle est de 7% (72975 ha) du bassin en 1985 contre 9% (85189 ha) en 2007.

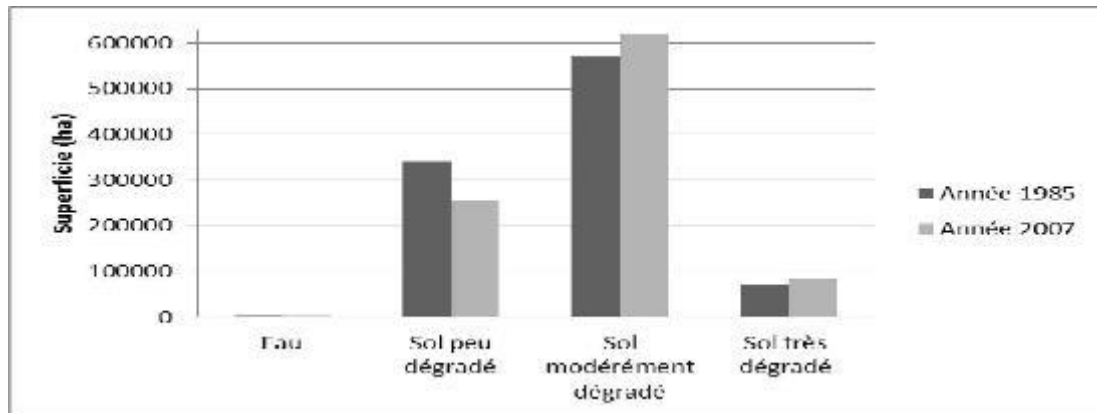


Figure 131 : Graphique des classes de dégradation du sol (classification d'image de Landsat).

La distribution spatiale de la dynamique de cette dégradation permet d'en saisir les causes majeures. Les sols peu dégradés sont localisés pour l'essentiel dans les espaces forestiers du bassin ainsi qu'au centre avec des sols tirsifiés (en association avec d'autres types de sol). Les sols modérément dégradés couvrent l'ensemble des zones agricoles, surtout céréalière. Quant aux sols très dégradés, ils sont localisés en partie dans le sud du bassin, ainsi qu'au centre et à l'aval du bassin (souvent sur les rebords des formations forestières). De 1985 à 2007, la dégradation qui était surtout concentrée dans une partie du sud du bassin, au centre et à l'aval (nord) du bassin s'est surtout étendue à l'amont et aux zones forestières en particulier. Dans cette partie amont du bassin, les sols peu dégradés se sont considérablement réduits et il en est même apparu des espaces très dégradés. Dans le sud, les sols très dégradés se sont considérablement étendus.

2. Un bassin marqué par d'importantes dégradations des sols de 1980 à 2009

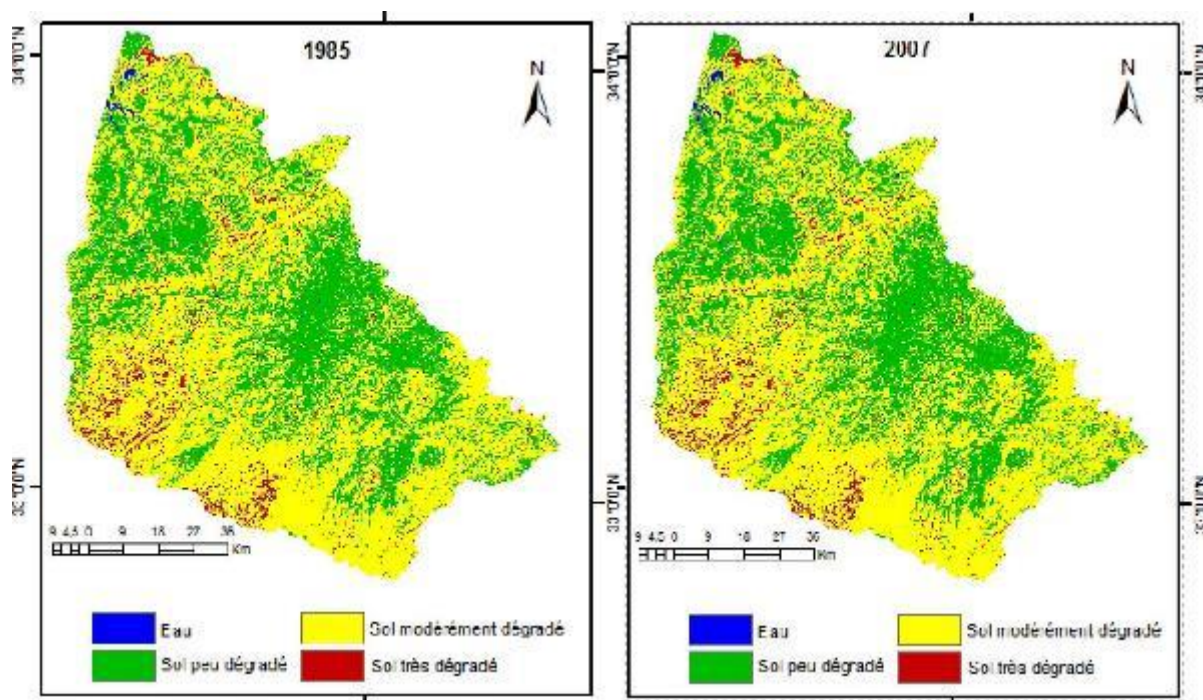


Figure 132 : Evolution de la dégradation des sols dans le bassin versant du Bouregreg (SIGMED)

En association avec les types de sol, la dégradation peut être classée en plusieurs catégories expliquant d'ailleurs leurs origine : -Les espaces fortement et modérément dégradés sont liés, d'une part, à l'érosion hydrique (érosion en nappe (ou érosion aréolaire) et à l'érosion linéaire en rigoles et ravines), et d'autre part à l'hydromorphie et à l'ensablement. L'érosion hydrique est en relation avec l'activité agricole et pastorale, la pluviométrie et généralement la topographie de l'espace. L'érosion en nappe est difficilement distinguable dans le paysage. Toutefois, il demeure une forme importante de l'érosion dans le bassin versant du Bouregreg. Les gouttes de pluie attaquent l'ensemble des surfaces du sol et les matériaux arrachés sont transportés par le ruissellement en nappe. La (Figure 133) représente un exemple de cette érosion sur les surfaces agricoles saisonnières. Les parcours sur les forêts dégradées sont également favorables à ce type d'érosion. En effet, pendant la saison estivale (période de transition entre deux saisons agricoles successives), les sols sont dénudés et rendus vulnérables par le passage répété du cheptel. Les pluies d'automne (début de saison

agricole) ont souvent des conséquences érosives importantes (Laouina, 1997). La majorité des sols modérément dégradés en sont l'expression visible. L'évolution importante à la baisse du couvert végétale pendant la saison sèche entre 1980 et 2009 (chapitres précédents) permet ainsi de comprendre l'importante progression à la hausse de cette forme d'érosion dans le bassin versant du Bouregreg.

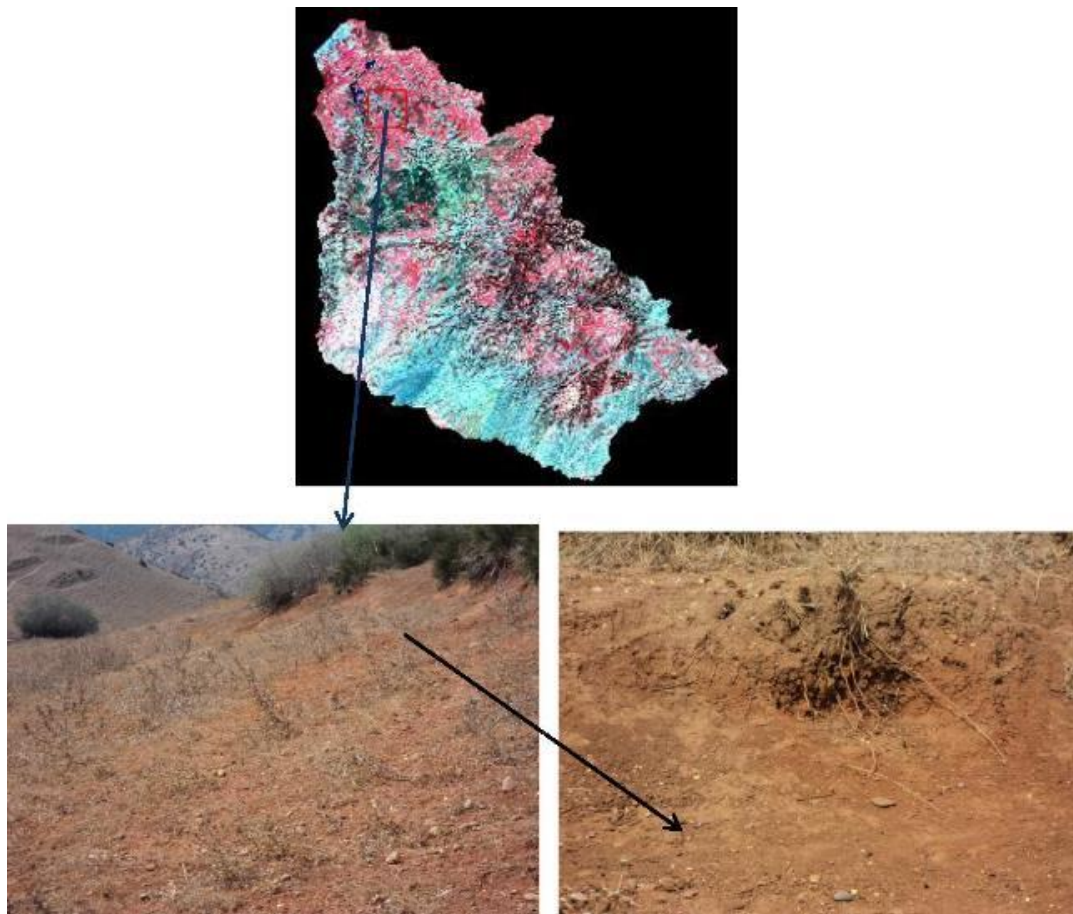


Figure 133 : Espace agricole céréalier marqué par l'érosion en nappe (photo de gauche), sur la photo de droite (partie supérieure de la photo de gauche) apparaît en arrière-plan l'épaisseur originelle du sol protégé ici par le matorral.

Cependant, le phénomène érosif le plus visible et le plus spectaculaire dans ce bassin demeure l'érosion linéaire. Elle caractérise en partie les sols très dégradés. Les espaces agricoles marqués par ce type d'érosion sont généralement des terrains marginaux conquis sur des versants en pente forte (Figure 135). Cette érosion est aussi l'expression d'une dégradation du couvert végétal naturel. En effet, le passage de la végétation forestière à un matorral sous la pression des activités anthropiques, principalement pastorales conduit à la

naissance des griffes et des rigoles qui peuvent évoluer en ravines impressionnantes (Figure 136). La pression du cheptel réduit en effet de façon drastique la biomasse. Et le passage répété des animaux sur les versants en pente forte crée des terrassettes qui constituent souvent les ponts de départ de ces ravines (Figure 160). Aussi, force est-il de constater que le Sud du bassin marqué par des espaces importants de sol très dégradé est la zone de plus forte densité du cheptel, surtout de caprin. Il faut cependant nuancer ce constat car cette partie du bassin connaît une dégradation historique dont l'origine demeure mal connue (Beudet, 1967).



Figure 134 : Matorral servant de parcours pour le bovin (aval du bassin). Au premier plan, surface est entamée par l'érosion hydrique suite aux activités pastorales. Au second plan un troupeau de bovin



Figure 135 : Espace agricole sur pente forte marqué par des griffures importantes, dans le coin supérieur droit se trouve un semi de blé menacé.



Figure 136 : Ravine à l'intérieur d'une forêt dégradé au centre du bassin (zone de pâturage).



Figure 137 : La photo de gauche présente en lignes horizontales les terrassettes formées par le passage des petits ruminants. A droite de la photo du bas, une partie de ces terrassettes s'est transformée en ravine coupant les chemins des animaux.

Ainsi la dégradation des sols bruns méditerranéens des zones forestières laisse souvent apparaître la roche mère sous-jacente (Figure 158). L'analyse des deux images classifiées en fonction de la topographie permet de constater que le facteur topographique n'est pas forcément l'élément principal du processus de d'érosion dans le bassin. En effet, le (Tableau 46) indique que les espaces dégradés se situant sur des pentes inférieures à 10° sont plus importants que les espaces sur des pentes fortes, ceci quel que soit le niveau de dégradation. Cela traduit également le fait que la dégradation des sols dans le bassin n'est pas seulement due aux phénomènes érosifs. Les sols très dégradés à l'aval du bassin et dans certaines dépressions sont souvent liés à l'hydromorphie ou à la conquête des espaces agricoles par du sable, élément d'autant plus facilement transportable que les sols sont dénudés (Figure 139). Ce phénomène est également caractéristique de la dégradation des sols du Sud-Ouest du bassin. En relation avec les cours d'eau, une autre forme de dégradation des sols est le

sapement des berges des cours d'eau et des barrages. -Les espaces peu dégradés sont d'une part, les espaces dont la biomasse forestière est importante (cas de l'amont du bassin), ou des sols qui sont équilibrés, plus épais et plus stables. C'est le cas pour une partie du centre du bassin (Figure 139).

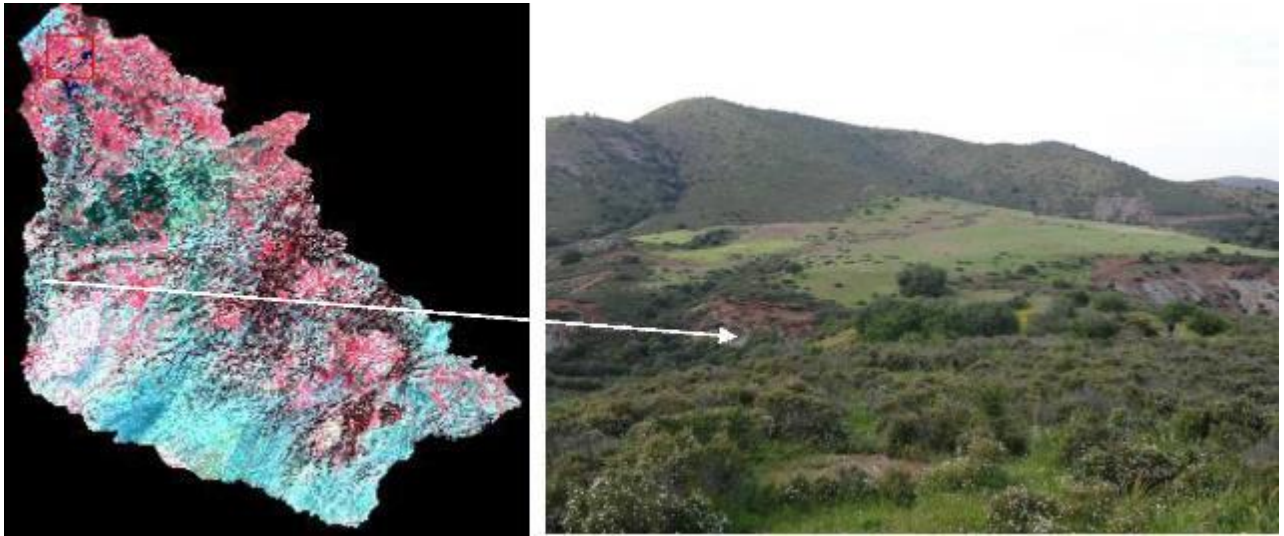


Figure 138 : Matorral (premier plan) avec apparition sur des versants de la roche mère (en gris à droite et à gauche de l'arrière-plan du matorral).



Figure 139 : Exemple d'espace hydromorphe où la végétation saisonnièrement a sphyxiée a disparue.

Tableau 44 : Statistique récapitulatif de la classification des images de Landsat du bassin.

classe d'occupation de sols	1985		2007	
	superficie	% du bassin	superficie	% du bassin
Eau	2408,67	0,25020072	3160,71	0,32835302
Sol peu dégradé sur pente faible	156259,98	16,2315133	118854,63	12,3473133
Sol peu dégradés sur pente forte	185542,56	19,2732428	134993,7	14,0239341
Sol modérément dégradé sur pente faible	365975,28	38,0157007	387035,73	40,2075325
Sol modérément dégradé sur pente forte	203038,29	21,0906126	233361	24,2429039
Sol très dégradé sur pente faible	36487,71	3,79016272	52444,43	5,44823375
Sol très dégradé sur pente forte	36487,71	1,34856719	32744,88	3,40172942



Figure 140 : Erosion de berge, en bas à gauche l'effondrement d'une digue de protection.



Figure 141 : Culture de fève sur sol équilibré. On observe une absence d'érosion linéaire malgré la topographie accidentée.

3. L'aval du bassin versant du Bouregreg, un exemple des pressions anthropiques et climatiques.

La carte d'occupation du sol de l'aval du bassin versant du Bouregreg (Figure 142) met en relief l'expression spatiale de l'impact des activités humaines et du climat sur le bassin versant du Bouregreg. Ainsi, est-il constaté, au niveau des pressions anthropiques, que l'agglomération de Rabat-Salé (le bâti sur la carte) est une menace constante de dégradation des deux îlots de forêts de chêne liège de l'aval du bassin. Le bâti pénètre par endroit à l'intérieur de ces forêts. Au-delà de la zone urbaine dense, s'étend une dispersion de ce bâti sur l'espace périurbain de cette agglomération, exprimant ainsi une dynamique constante de l'urbanisation dans cette partie du bassin. Au niveau de l'évolution de la dégradation du couvert végétal en général, cette carte permet d'observer l'importante dégradation des versants dans les espaces à forte pente orientés vers le Sud (matorral et sol nu sur la carte). Ces versants sont naturellement plus chauds et plus fragiles. Aussi, la forte pression du cheptel transforme-t-elle les forêts, situées le long des deux branches de l'oued, en matorraux, en végétation herbacée ou en sol nu. Ces espaces sont ainsi le théâtre d'importante dégradation des sols par érosion hydrique sur des versants dénudés. Concernant l'activité agricole, la carte met en exergue la dominance des céréales dans le système de production agricole du bassin. Les fortes pressions sur les terres font que les jachères sont passées de biennale à annuelle. La carte permet de comprendre que face aux réductions de rendements et aux dégradations des sols, le système de rotation des cultures entre céréales et légumineuses s'installe dans le bassin (Laouina, 2010).

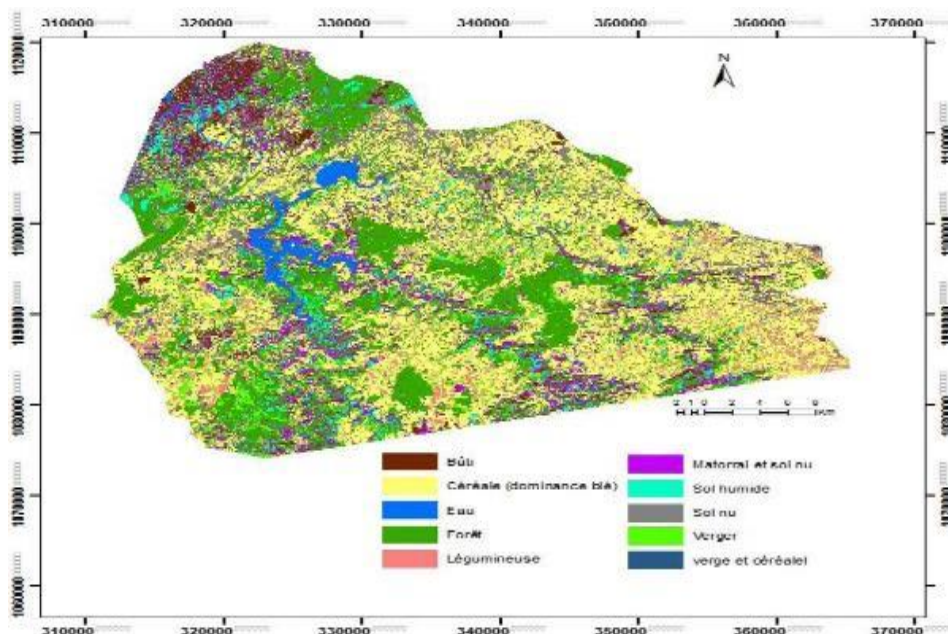


Figure 142 : Carte d'occupation du sol de l'aval du bassin versant du Bouregreg en avril 2008 (SPOT 5).

- RISQUES ET SCENARIOS FUTURS DE DEGRADATION DU BASSIN VERSANT DU BOUREGREG HORIZON 2050 ET 100

INTRODUCTION

Le bassin versant du Bouregreg connaît d'importantes mutations au niveau agricole et pastoral. Ces mutations sont directement ou indirectement liées aux variations du climat ou aux potentialités climatiques de cet espace. L'agriculture, essentiellement pluviale, est fortement sous la dépendance des aléas climatiques. Quant à la gestion des parcours, elle est étroitement liée à l'impact des variations saisonnières des précipitations sur la végétation. La dynamique de la population et des activités agropastorales, en interaction avec l'évolution du climat du bassin, amène à soulever la question du risque de dégradation de la végétation et des sols à terme dans cet espace. La baisse des quantités pluviométriques, constatées depuis les années 1970 et qui s'accroît actuellement, soulève également la question des impacts potentiels du changement du climat dans ce pays et dans le bassin du Bouregreg en particulier. Pour appréhender l'évolution future du bassin dans un tel contexte et dans l'optique d'une meilleure adaptation possible, ce chapitre aborde, d'abord sous l'aspect de SIG, l'étude du risque de dégradation du bassin en croisant toutes les couches d'informations issues des chapitres précédents. Ensuite, sous l'aspect statistique, des scénarios d'évolution climatique sont analysés. Les modèles numériques de simulation du climat offrent ainsi divers scénarios d'évolution probable du climat sous la dynamique des gaz à effet de serre. Dans cette étude sur l'évolution future du climat du bassin versant du Bouregreg, des modèles numériques issus du projet ENSEMBLE sont utilisés pour des simulations d'évolution des précipitations, des températures (y compris la température de surface) à l'horizon 2050 et 2100. Sur la base des résultats de ces simulations, la question de l'impact potentiel de l'évolution de ces différents paramètres climatiques sur les productions céréalières est envisagée.

1. ANALYSE DU RISQUE DE DEGRADATION DES TERRES A MOYEN TERME

1.1. Une méthodologie SIG inspirée du projet MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use)

Le processus de dégradation des sols est une combinaison de plusieurs facteurs. Ces facteurs sont naturels (la lithologie, la profondeur et la texture du sol, la pente et l'exposition des versants) et anthropiques (l'exploitation économique des sols, les types d'aménagement). Le SIG mis en place pour spatialiser le bassin selon le risque de dégradation des sols est un modèle modifié de celui du projet MEDALUS. Ce SIG raster est basé sur le croisement de quatre indicateurs de risques. Ces indicateurs sont calculés comme des indices. Il s'agit d'un Indice de Qualité du Sol (IQS), d'un Indice de Qualité du Climat (IQC), d'un Indice de Qualité de la Végétation (IQV) et d'un Indice de Qualité Anthropique (IQA) (Figures : 163-166). Chacun des indices est constitué d'un certain nombre de paramètres auxquels sont affectés des poids traduisant leur degré d'influence sur la dégradation des sols. La combinaison des différents indicateurs selon un système d'indice de pondération permet d'obtenir la carte d'Indice de Sensibilité à la dégradation (ISD) (Kosmas et al. 1999; Zehtabian et al., 2005; El Bouqdaoui, 2007 ; Benabderrahmane et Chenchouni, 2010).

1.2. L'indice de la qualité du sol (IQS) :

L'Indice de la Qualité du Sol est calculé selon l'expression où:

MP = matériel parental

P = indice de pente

T = indice de texture

Ainsi, quatre classes de sol sont déterminées: très bonne aptitude culturale (indice 1), aptitude culturale moyenne (indice 1,33), aptitude culturale faible (indice 1,66) et aptitude culturale mauvaise (indice 2). L'analyse de la distribution spatiale de la qualité de l'indice de la qualité du sol permet de subdiviser le bassin en trois grandes entités (Figure 143) :

- Des espaces de très faible qualité de sol localisés dans la partie sud de l'amont du bassin. Ces espaces correspondent d'ailleurs à des régosols ou à des sols de très faible épaisseur.

- Les espaces forestiers constituent également des zones à faible qualité d'indice de sol car ils sont pour l'essentiel localisés sur des pentes fortes, ce qui en fait des espaces fragiles lorsqu'ils sont exploités économiquement.
- Les espaces de culture sur les terrains non accidentés constituent la dernière subdivision. Ils sont d'une qualité moyenne à faible. Leur proportion est d'environ 63% du bassin.

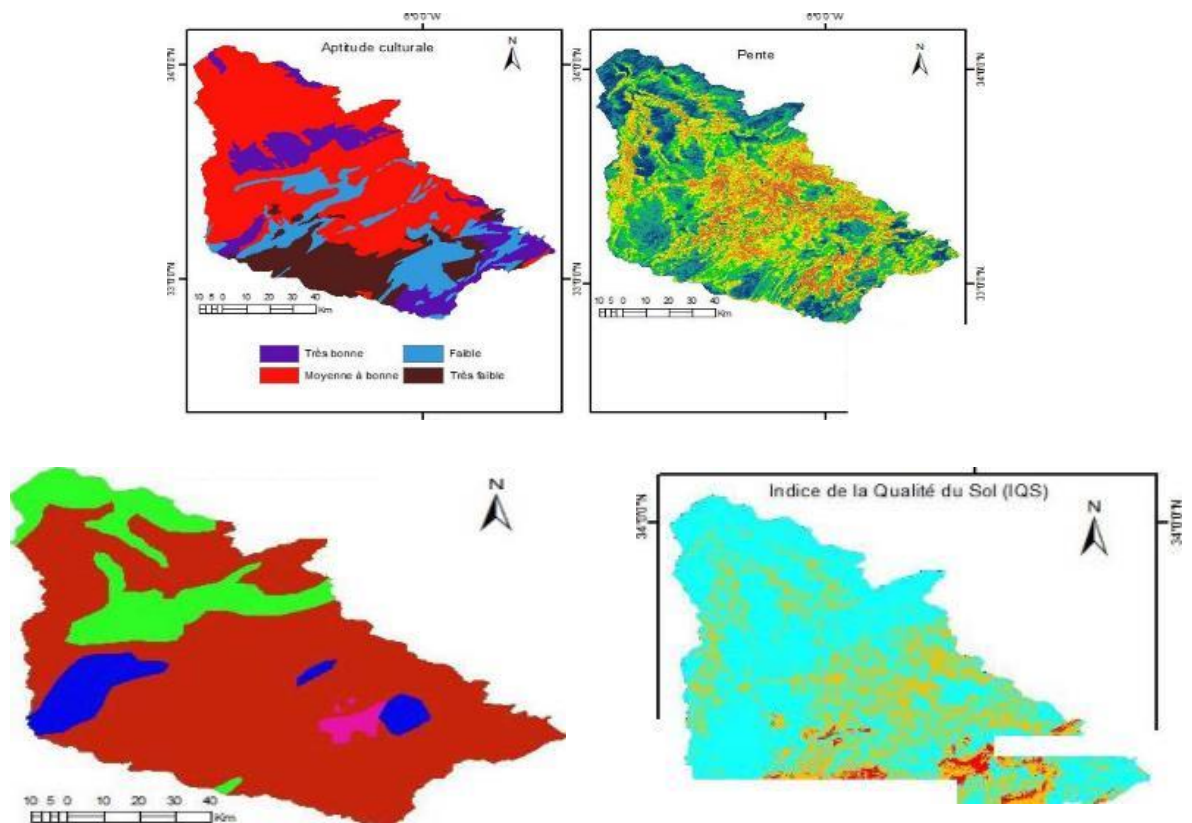


Figure 143 : Caractérisation de la qualité du sol.

1.3. L'Indice de la Qualité de la Végétation

L'indice de la qualité de la végétation est la combinaison le cas échéant, de trois indicateurs : -Le risque d'incendie, -la protection contre l'érosion, -la résistance à la sécheresse.

Il est obtenu par la formule:

$$IQV = (RI \times Pe \times RS)^{1/3}$$

Où : RI = risque d'incendie

Pe = protection contre l'érosion

RS = résistance à la sécheresse

Le (Tableau 47) résume la structure de ces indicateurs et leur poids dans la caractérisation du risque de dégradation.

Tableau 45 : Paramètres de caractérisation de l'indice de la qualité de la végétation

Poids	Risque d'incendie	Protection contre l'érosion	Resistance à la sécheresse
1	Sol nu, affleurement rocheux, végétation très éparse, bâti, eau	Chêne et autre type de forêt	Forêt
1,33	cultures, jachères	Verger et jachères	verger
1,66	Verger, forêt (mélange d'espèce)	Cultures, eau	culture
2	Forêt de chêne	Sol nu, affleurement rocheux	Végétation très éparse

- A l'opposé des espaces de bonne qualité, les espaces de mauvaise qualité sont aussi constitués d'espaces agricoles situés sur les hauts plateaux (amont du bassin) ainsi que dans la partie nord (aval du bassin). Ce sont surtout des espaces céréaliers de blé.
- Les espaces à caractéristique intermédiaire sont constitués par les forêts.

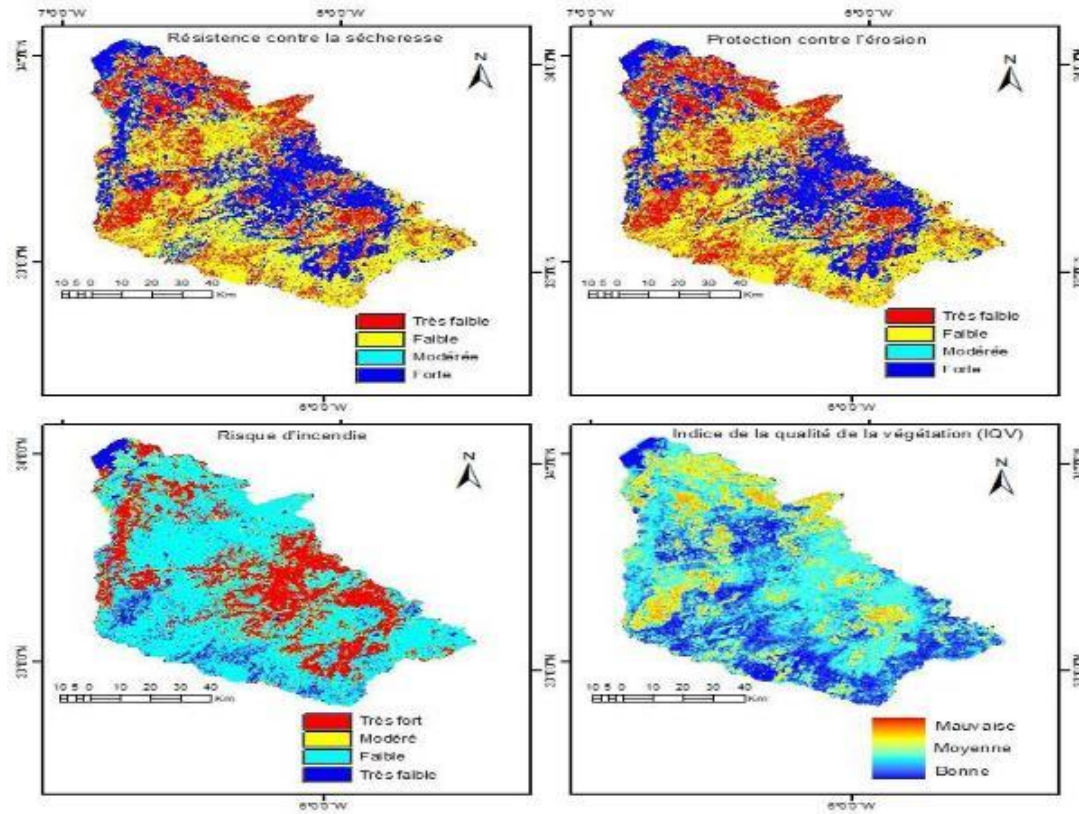


Figure 144 : Caractérisation de la qualité de la végétation (SIGMED)

1.4. L'Indice de la Qualité du Climat (IQC)

L'indice de la qualité du climat est la résultante du croisement de trois indicateurs que sont les précipitations, l'orientation des versants et l'aridité. Il est décliné par la formule :

$$IQC = (PP \times IA \times OR) / 3$$

Où :

PP = précipitation

IA = indice d'aridité

OR = orientation des versants (exposition des versants)

Les précipitations utilisées pour caractériser l'ensemble du bassin sont les moyennes annuelles des 90 stations pluviométriques de la période de 1980 à 2000. Les quatre classes retenues sont : inférieur à 350 (aride à semi-aride, indice 2), de 350 à 450 (semi-aride, indice 1,5) et supérieur à 450 (subhumide, indice 1).

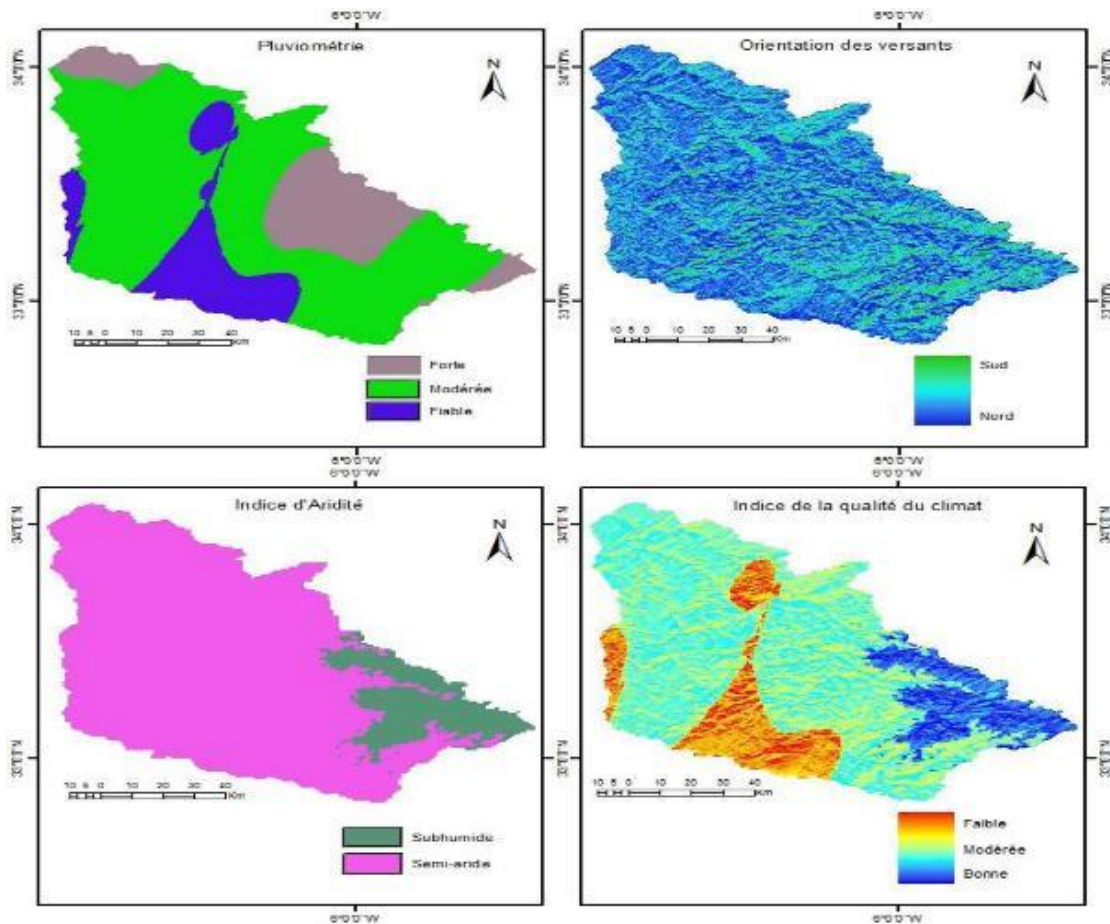


Figure 145 : Caractérisation de la qualité du climat (SIGMED, 2012)

Ce sont :

Les climats de bonne qualité, localisés dans la partie amont nord du bassin. C'est un espace caractérisé par un climat subhumide;

- Les climats de qualité moyenne, localisés sur le reste du bassin à l'exception des versants orientés vers le Sud et de la partie amont Sud du bassin. C'est l'espace de climat semi-aride ;
- Les climats semi-arides de faible qualité due à leur exposition vers le Sud ;
- Les climats de très faible qualité localisés en partie dans le Sud (amont) du bassin. Il s'agit d'un climat qui oscille, selon les années, entre l'aride et le semi-aride.

1.5. L'Indice de la Qualité Anthropique (IQA)

Cet indice caractérise la pression anthropique sur l'espace. C'est le croisement des indicateurs représentant le taux d'accroissement de la population (1982–2004), la densité de la population en 2004, la densité du réseau routier sur l'espace et la densité du cheptel. Les différentes cartes de ces paramètres ont été produites au chapitre précédent. La formule permettant le calcul de l'IQA est : $IQA = (TA \times DA \times DR \times DC \times DP)^{1/5}$ Où :

TAA = taux d'accroissement annuel

DA = densité de l'habitat

DR = densité de route

DC = densité du cheptel

DP = densité de la population

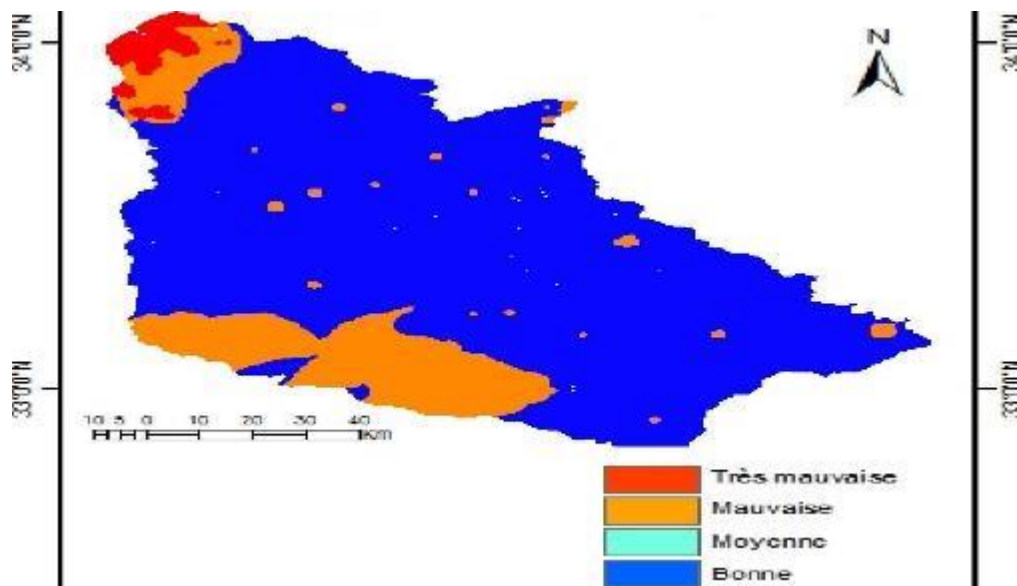


Figure 146 : Caractérisation de la qualité anthropique (SIGMED, 2012)

La répartition de la densité de l'habitat comprend 4 classes qui sont :

- les classes de faible densité (inférieur à 10 maisons / km², indice 1);
- les classes de densité modérée (de 10 à 20 maisons / km², indice 1,33);
- les classes de forte densité (de 20 à 50 maisons / km², indice 1,66);

- et les classes de très forte densité (supérieur à 50 maisons par km², indice 2)

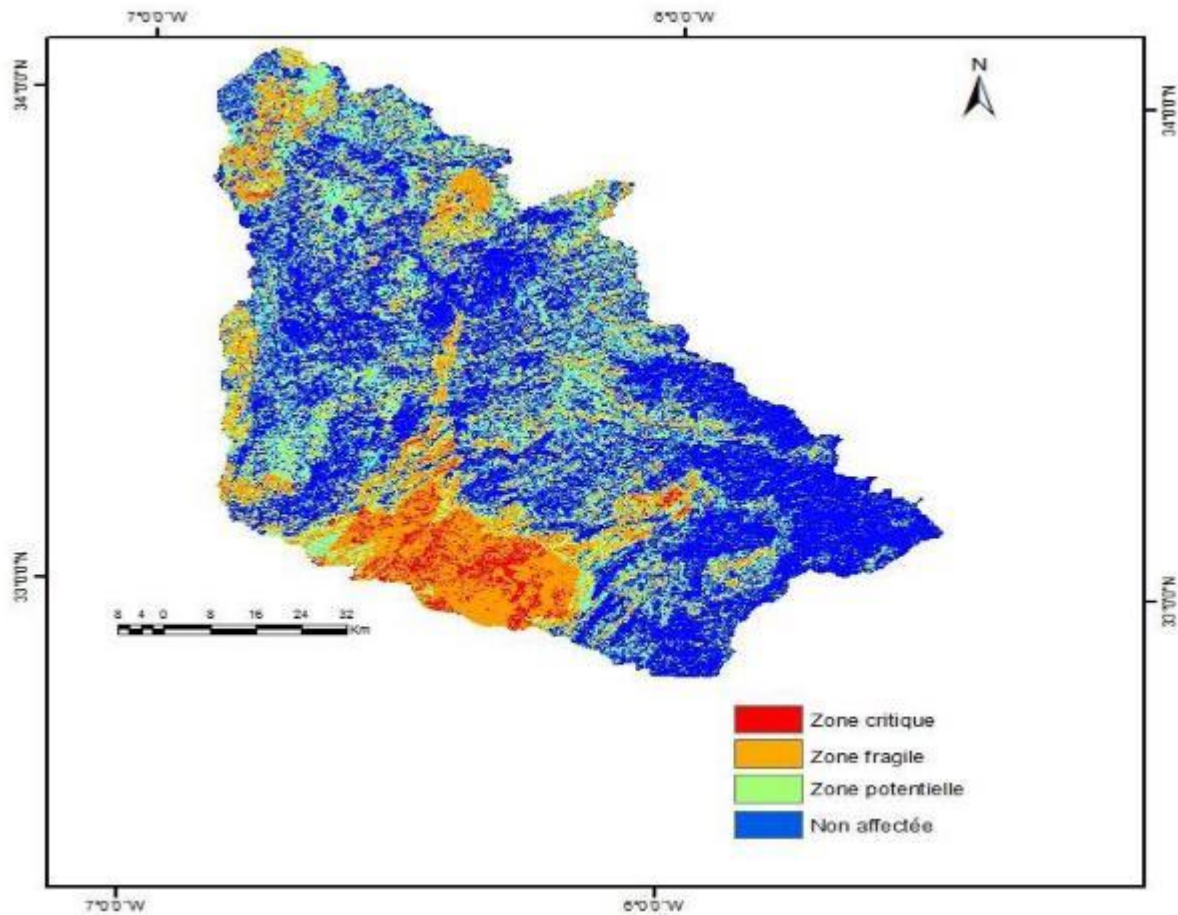


Figure 147 : Carte du risque de dégradation des sols dans le bassin versant (SIGMED, 2012)

L'Indice final (Indice de la Sensibilité à la Dégradation) est obtenu par la formule

$$ISD = (IQS \times IQV \times IQC \times IQA)^{1/4} \text{ Où :}$$

ISD = Indice de la sensibilité à la dégradation

IQS = Indice de la Qualité du Sol

IQV = Indice de la Qualité de la Végétation

IQC = Indice de la Qualité du Climat

IQA = Indice de la Qualité Anthropique

Le résultat final du SIG permet de mettre en évidence 4 classes principales. Les limites de classes sont définies selon celui du projet MEDALUS (Tableau 48).

Tableau 46 : Classe de dégradation des sols (Kosmas et al. 1999)

Typ ^e	Sous type	ISD
Zone critique	C3	>1.53
	C2	1.42-1.53
	C1	1.38-1.41
Zone fragile	F3	1.33-1.37
	F2	1.27-1.32
	F1	1.23-1.26
Zone potentielle	P	1.17-1.22
Zone non affectée	N	<1.17

Ainsi, les causes anthropiques pouvant conduire à la dégradation de l'espace du bassin versant du Bouregreg et indiquées par chaque classe, peuvent se résumer en trois :

Pour les zone critiques, les zones potentiellement dégradables, la menace majeure reste la pression pastorale ;

- Pour les zones fragiles, il s'agit de risque liés à l'agriculture et à la dynamique de l'urbanisation ; -Pour les zones non affectées, il s'agit en partie d'espaces de faible densité de population et/ou de faible densité de pression pastorale.

2. ANALYSE DES SCENARIOS DU CHANGEMENT

CLIMATIQUE DU BASSIN ET IMPACT POTENTIEL SUR L'AGRICULTURE.

2.1. Les modèles climatiques régionaux utilisés : ALADIN, CRCM, RACMO.

Les Modèles de Circulation Générale couplée Océan-Atmosphère (MCGOA ou MCG) permettent la modélisation numérique du climat. Ces modèles ont des résolutions spatiales de 200 à 300 km, ce qui n'est pas adapté aux études locales du changement climatique et de ces impacts. Pour combler cet état de fait, les MCG sont réduits par deux principales techniques Les méthodes de réduction dynamique et les méthodes de réduction d'échelle statistique

(Figure 168). «La méthode de réduction d'échelle statistique consiste à établir une relation statistique reliant une ou plusieurs variables caractérisant l'état de l'atmosphère à grande échelle (variables prédictives ou prédicteurs) à une ou plusieurs variables climatiques locales, comme les précipitations ou la température en un lieu donné (variables prédites ou prédicteurs).» (Driouech, 2010). Les méthodes de réduction d'échelle dynamiques sont des modèles à aire limitée qui sont forcés à partir des GCM. Ce sont des «méthodes dynamiques utilisant des modèles à méso-échelle simulant le climat local d'une région déterminée à résolution fine (20 à 50 km) en prenant en compte les spécificités régionales.» (Sultan, 2011). A la suite de l'application de ces deux méthodes, sont obtenus les Modèles de Climatologie Régionaux (MCR). Les MCR utilisés pour cette étude sont des modèles à aire limitée disponibles à travers le projet ENSEMBLE. Ces modèles destinés au territoire de l'Europe couvrent la partie Nord du Maroc dans lequel se trouve le bassin versant du Bouregreg (Figure 168). Le (Tableau 49) résume les caractéristiques des MCR utilisés. Un seul scénario SRES (Spécial Report on Emission Scénarios) est aussi utilisé. C'est le scénario A1B de la famille des scénarios A1. Cet dernier émet l'hypothèse d'un monde caractérisé par une croissance économique très rapide, un pic de la population mondiale au milieu du siècle et l'adoption rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Le sous -groupe A1B fait l'hypothèse de l'équilibre entre sources d'énergie à forte composante fossile et sources d'énergie non fossile (GIEC, 2008).

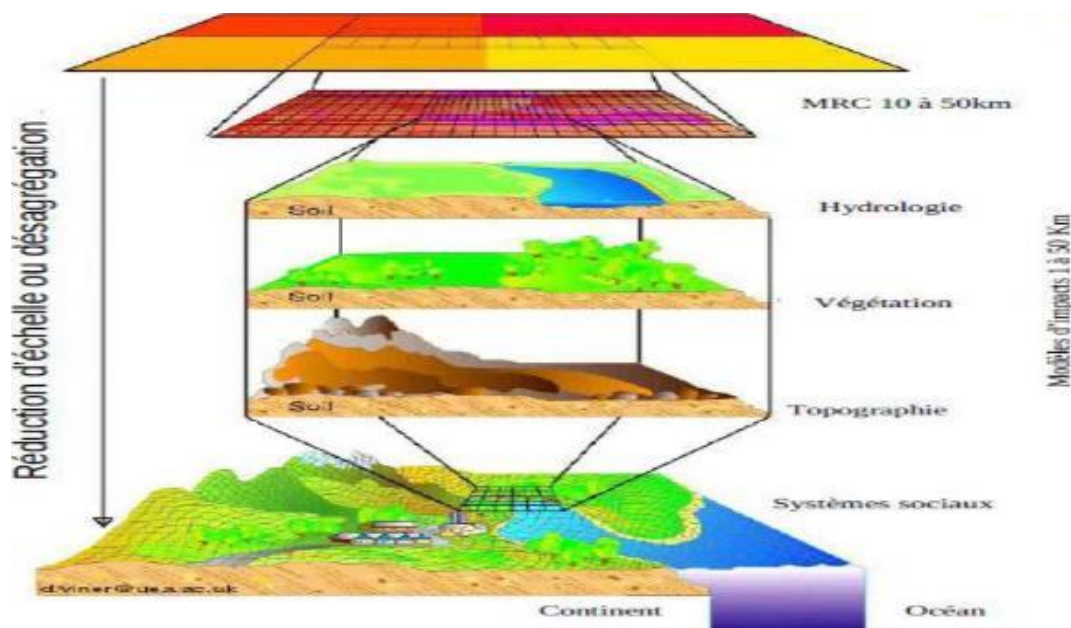


Figure 148 : Schéma du concept de réduction d'échelle (d'après D. Viner, Climatic Research Unit – University of East Anglia, Royaume Uni, <http://www.cru.uea.uk/cru/info/modelcc/>)

Tableau 47 : Caractéristique des MCR utilisés.

Scenario	MCG de forage	MCR	Résolution	Acronyme	Date limite de projection
A1B	ARPEGE_RM5.1	ALADIN	25km	CNRM-RM5.1	2100
A1B	MIROC	RACMO	50km	KNMI-RACMO2	2100
A1B	ECHAM5-r3	RACMO	50km	KNMI-RACMO2	2050
A1B	CGCM3	CRCM	25km	OURANOSMRCC4.2.1	2050

3. COMPARAISON ENTRE LES DONNEES DES MODELES ET LES DONNEES OBSERVEES.

Les données climatiques extraites partir de MCR sont analysées par les méthodes statistique descriptive. Les analyses de tendance et d'homogénéité des séries sont aussi réalisées. Les données de précipitation simulées sont exprimées en kg/m²/s et celles des températures en kelvin. Pour une comparaison avec les données météorologiques archivées sur la période de 1980 à 2009, ces données sont converties en mm pour les précipitations et en degré Celsius pour les températures. Concernant les précipitations, les données représentant les moyennes mensuelles et annuelles de six stations météorologiques (Casablanca, Khouribga, Rabat, Kasba Tadla, Meknès et Ifrane) sont utilisées pour caractériser la zone du bassin. Quant aux données de température, étant donné que seule celle de Rabat est disponible, pour éviter une comparaison erronée, les résultats des simulations ont été pris tels. En effet, les différences de température, entre la ville de Rabat sous dominance atlantique et l'intérieur du bassin marqué par l'influence du relief, sont telles qu'il est incorrect de représenter la moyenne des températures par celle unique de Rabat. Bien que n'ayant pas la possibilité de comparer les données de températures recueillies et les données simulées, il est tout de même important de noter que la modélisation des températures est en règle générale mieux maîtrisée et mieux représentée que celle des précipitation.

Le (Tableau 50 et la Figure 169) permettent de constater que, comparativement aux données d'évolution réelles des pluviométries constatée de 1980 à 2009, tous les modèles

numériques sous estiment la réalité, certains plus que d'autres. En effet, le modèle qui semble se rapprocher le plus de la réalité est KNMI (ECHAM 5-rm). La moyenne des précipitations prédites par ce modèle est de 476 mm contre 481 pour les valeurs observées. Les écart-types sont également très rapprochés (135 pour le modèle et 146 pour les observations). Par contre, le coefficient de corrélation de Pearson entre les modèles et les valeurs observées reste faible. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette relation n'est pas forcément linéaire. Malgré tout, le modèle KNMI (ECHAM 5-rm) présente le coefficient le plus élevé (-0,23). Le second modèle se rapprochant le plus de valeurs réelles de précipitation du bassin est le modèle OURANOSMRCC 4.2.1. Le maximum de précipitations prédites par ce dernier est presque deux fois inférieur à la réalité. Le modèle KNMI (MIROC), bien qu'ayant les mêmes moyennes de précipitation qu'OURANOSMRCC, présente des amplitudes beaucoup plus faibles. Ainsi, l'écart-type de la série des données de précipitation simulées n'est que de 68. Le dernier modèle présentant une faible corrélation apparente est CNRM-RM 5.1. ce modèle tout comme le précédent indique des simulations très en dessous de la réalité. Ainsi, la conclusion qui se dégage de la comparaison entre les modèles de simulation et la réalité des données observées est que les modèles de simulation limités à 2050 présentent beaucoup mieux la réalité station que les données de simulation allant à 2100. Ces derniers restent marqués par une plus grande prudence. Les simulations de tous les modèles présentent en revanche des variations presque similaires à la réalité.

Tableau 48 : Statistiques de comparaison entre les données de précipitation des stations et les données simulées par les modèles.

Statistiques	Données stations	OURANOSMRCC4.2.1	KNMI (ECHAM5-r3)	KNMI (MIROC)	CNRM-RM5.1
maximum	1030	522	855	505	529
minimum	298	259	189	257	123
moyenne	481	373	476	373	276
Ecart-type	146	74	135	68	100
Coef. Corr. de Pearson		-0,188	-0,233	-0,038	0,005

3.1. Evolution des précipitations et des températures jusqu'en 2050 et 2100

3.1.1. Une accentuation de la baisse des quantités pluviométriques

Annuelles.

L'ensemble des modèles prédisent des baisses importantes de quantités pluviométriques jusqu'en 2050 et 2100 (Figure 170). Selon le test de Mann-Kendal, la tendance à la baisse est certaine avec un niveau de significativité de 5% pour les modèles KNMI (ECHAM), KNMI (MIROC), CNRM et de 10% pour OURANO (OURANOSMRCC4.2.1). L'analyse de l'homogénéité des séries temporelles indique l'existence de rupture dans toutes les séries des précipitations des modèles sauf OURANO. En terme de proportion en baisse, les trois modèles sont presque unanimes. La baisse des quantités pluviométriques s'établira autour de 25%. Les baisses les plus importantes (en terme de quantité) sont fournies par le modèle ayant la plus forte liaison de similarité avec les données observées : le modèle KMI (ECHAM). Ce modèle indique une rupture dans les séries chronologiques des précipitations en 2019. La baisse des quantités de pluie après la date de rupture 2019 est de 125 mm, ce qui est une quantité énorme. Pour les modèles allant jusqu'en 2100, I (MIROC) prévoit une baisse de 92 mm et CNRM une baisse de 63 mm.

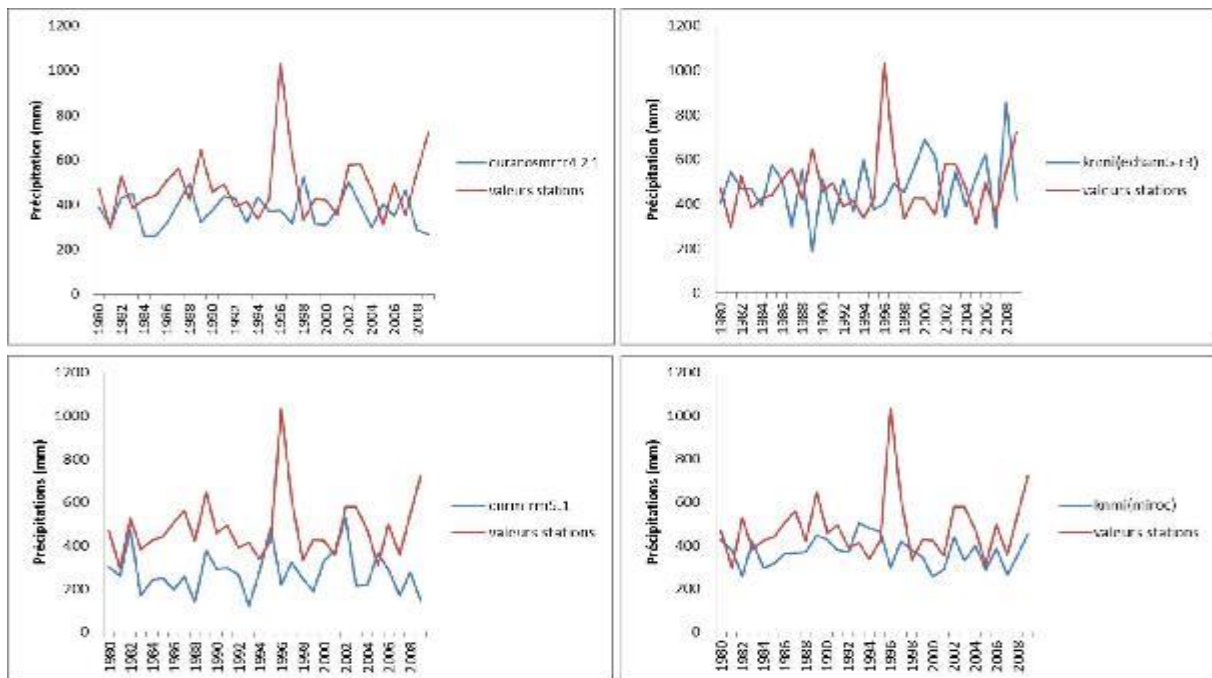


Figure 149 : Courbe d'évolution comparative des précipitations moyennes annuelles des MCR et des stations météorologiques.

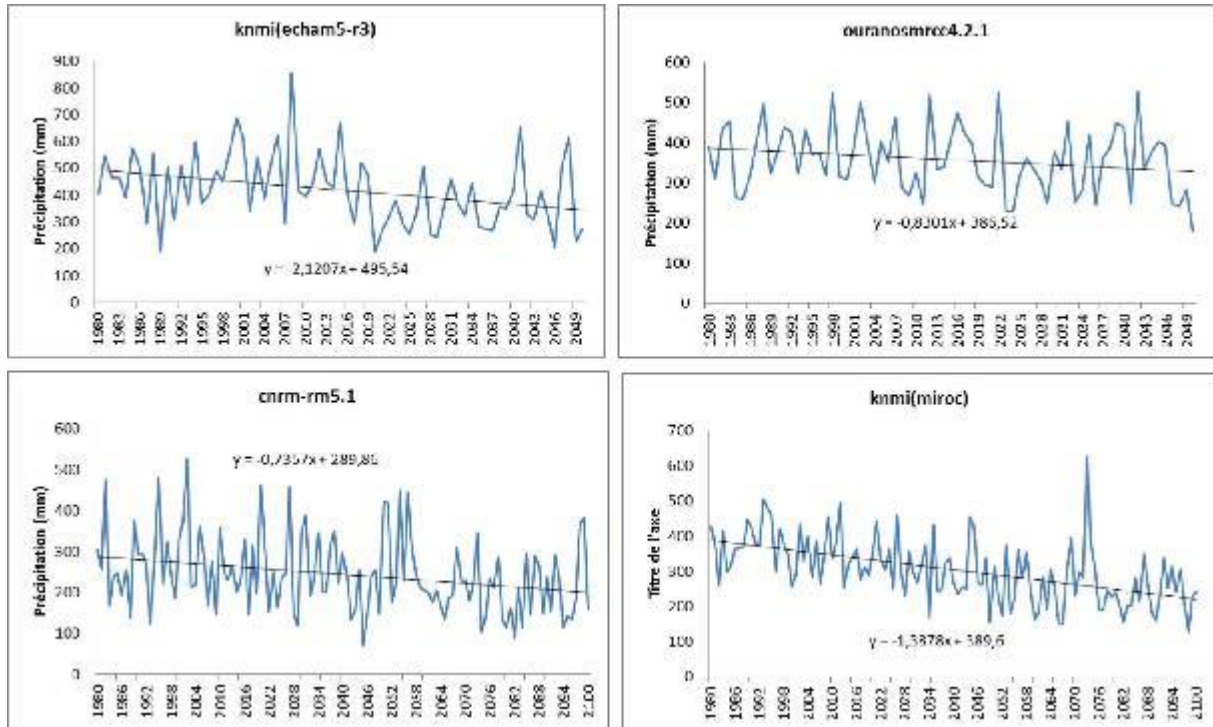


Figure 150 : Evolution interannuelle des précipitations simulées jusqu'en 2050 et 2100.

Tableau 49 : Statistique de rupture des séries pluviométriques des MCR

Statistique	OURANOSMRCC4.2.1	KNMI (ECHAM5-r3)	KNMI (MIROC)	CNRM-RM5.1
p-value	0,120	< 0,0001	< 0,0001	0,003
Date rupture	-	2019	2033	2058
Moy. avant rupture	-	474	356	267
Moy. après rupture	-	349	264	204
Quantite de la baisse (mm)	-	125	92	63
Proportion de baisse (%)	-	-26	-26	-24

3.1.2. Une augmentation continue des températures

Concernant l'évolution future des températures, les quatre modèles prédisent unanimement une tendance à la hausse, avec un degré de confiance de 99% (Figure 171). Tout comme le test de Mann-Kendall, le test de rupture de série chronologique de Pettitt indique avec un degré de confiance de 99%, l'existence de rupture dans l'évolution future des températures. Cette dynamique implique que les hausses de température déjà constatées ont s'accroître dans le bassin. Le (Tableau 52) indique que la hausse sera de 1°C jusqu'en 2050 pour les prévisions des modèles limités à cette date. Quant aux modèles allant 2100, ils indiquent d'importantes hausses des températures du bassin à partir de 2040. La hausse sera de 3°C pour le modèle KNMI (MIROC) et 2°C pour le modèle CNRM.

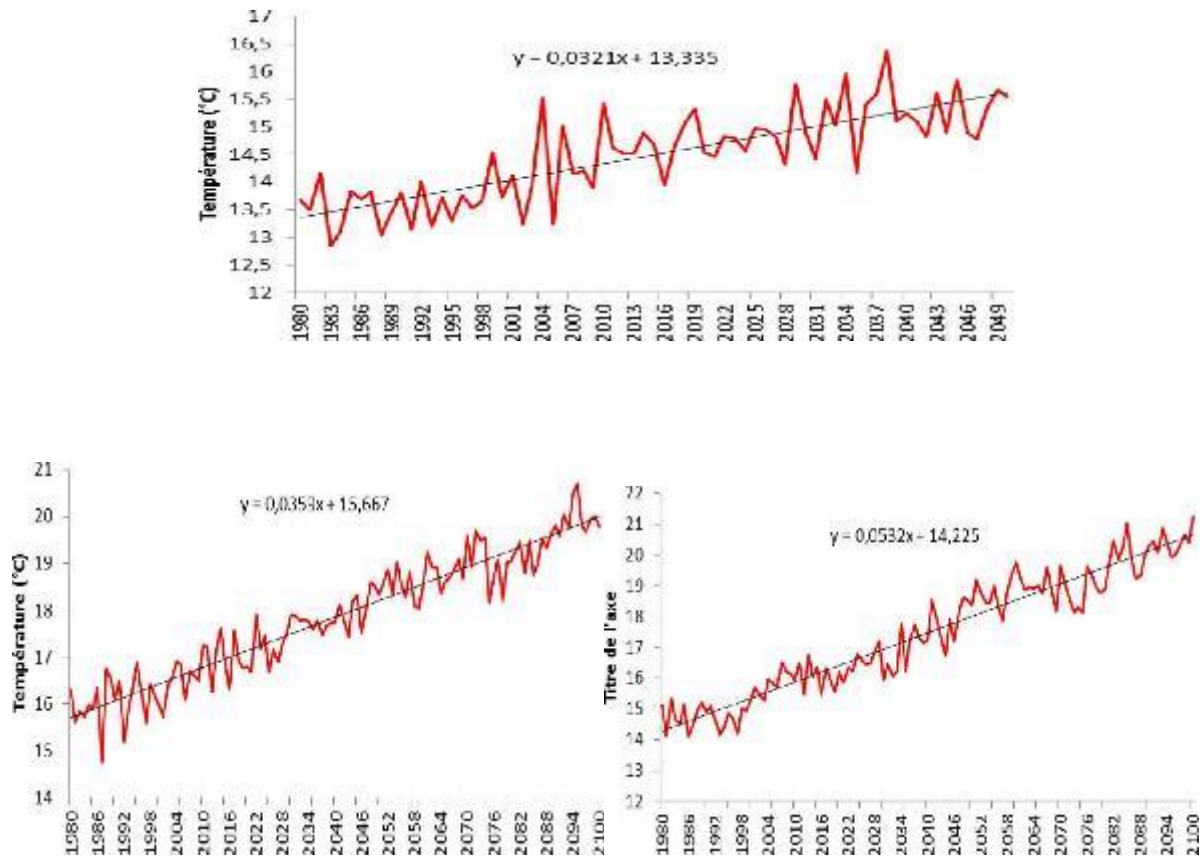


Figure 151 : Evolution des températures moyennes annuelles simulées jusqu'en 2050 et 2100.

4. EVOLUTION BIOCLIMATIQUE (2050-2100) DU BASSIN BOUREGREG

4.1. Changement interannuel futur du climat dans le bassin versant du Bourereg

Le climat du bassin versant du Bouregreg sera marqué, selon les modèles numériques de simulation, par une baisse des précipitations d'environ 25% et une hausse des températures de plus de 1°C. Cette dynamique amène à s'interroger sur l'évolution future du climat semi aride de ce bassin. L'analyse des données de température et de précipitation, à travers l'indice d'aridité de De Martone (Lebourgeois et Piedallu, 2005), permet d'avoir une connaissance des changements à venir. Cet indice s'exprime par la formule où :

I= indice d'aridité de De Martone

P= précipitation totale annuelle

T= température moyenne annuelle Il indique différentes classes d'aridité que sont :

< 5 = climat hyper aride

5 –10 = climat aride

10 –20 = Climat semis aride

Le (Tableau 51) confirme le climat semi-aride existant dans le bassin versant du Bouregreg avant les dates de rupture prévues par les MCR. Le climat du bassin devrait rester inchangé jusqu'en 2050, selon les modèles limités à cette date. Ce pendant, le niveau d'humidité devrait connaître des baisses significatives. Ainsi, la proportion d'années arides (selon les modèles numériques), devrait se situer entre 10 et 23% jusqu'en 2050. Les mêmes analyses, à partir des modèles pour l'horizon 2100, sont moins optimistes. Selon ce groupe de modèle, le climat devrait passer d'un climat semi-aride à un climat aride à partir de 2033 (KNMI-MIROC) et 2058 (CNRM). Les changements les plus marqués sont prédits par le modèle KNMI (MIROC) où la proportion d'années marquées par l'aridité passerait de 4% avant 2033 à 58% après. Tout contre fait, les modèles prévoient tous une évolution vers des climats de plus en plus arides pour le bassin (Figure 172).

Tableau 50 : Récapitulatif de l'évolution de l'indice de sécheresse de De Martone (1980- 2050 et 2100).

Rabat	Regression NDVI-P	fevrier	mars	avril	juin	juillet	Novembre
	coef. Correlation	0,44807344	0,4896485	0,45464192	0,14453911	0,14833991	0,35458292
	coef. Determination	0,20076981	0,23975566	0,20669927	0,02089155	0,02200473	0,12572905
	Erreur standard	15,479866	7,84909439	7,99600684	0,40350922	0,27617908	6,07803853
Ifrane	Regression NDVI-P	fevrier	mars	avril	juin	juillet	Novembre
	coef. Correlation	0,34580856	0,65572031	0,55046923	0,43379938	0,29976904	0,06867276
	coef. Determination	0,11958356	0,42996913	0,30301637	0,1881819	0,08986147	0,00471595
	Erreur standard	0,07016954	0,05516654	0,05965532	0,03167486	0,02325278	0,054906
Kasba Tadla	Regression NDVI-P	Fevrier	mars	avril	juin	juillet	Novembre
	coef. Correlation	0,3640373	0,50390019	0,3900231	0,22401146	0,19949716	0,34633194
	coef. Determination	0,13252316	0,2539154	0,15211802	0,05018114	0,03979912	0,11994581
	Erreur standard	10,8203653	10,4858683	9,34437749	3,16178593	0,02194853	0,03470815

4.2. Une agriculture pluviale amenée à disparaître.

Bien qu'ayant utilisé uniquement des données mensuelles de MCR, il est possible d'analyser l'impact global de l'évolution future du climat sur l'agriculture du bassin, et par voie de conséquence sur l'élevage. L'agriculture pluviale, dominée par les céréales se pratique entre les mois d'Octobre et début Juillet. Mais les périodes les plus sensibles aux changements climatiques (levée, croissance et maturation) sont situées dans la mi-Novembre à la fin du mois de Mai. En croisant les conditions de pluviométrie et de température fournies par l'ensemble des modèles, il apparaît que le cadre climatique de pratique de l'agriculture pluviale devrait devenir de plus en plus difficile après 2020. N'ayant pas travaillé sur l'évapotranspiration et la réserve utile en eau des sols, il est prudent d'admettre que malgré cette difficulté, la pratique de l'agriculture pluviale devrait se maintenir jusqu'en 2050. En

effet, avant cette date, les périodes de culture les plus menacées sont les périodes de maturité des céréales (à partir de Mai). Par contre, au-delà de 2050, les modèles prévoient une presque impossibilité de pratique d'une agriculture pluviale sans apport de l'irrigation. En effet, selon les modèles de projection pour 2100, les mois secs de fin de saison agricole commenceront, pour CNRM, dès Février, et pour KNMI (MIROC) dès Mars, ce qui rend impossible la constitution de grains et la maturation de ceux-ci (la réserve utile en eau des sols déviant s'épuiser rapidement).

En début de saison agricole, la levée des céréales devrait devenir beaucoup plus difficile hydriquement, selon les prévisions de certains modèles comme CNRM où les mois de novembre et décembre deviendraient secs après 2036. Pour mettre en relief l'évolution spatiale des conditions défavorables de production végétale future, une analyse est faite à partir d'images de température de surface de MODIS (image de 1 km de résolution spatiale). L'activité chlorophyllienne étant fortement corrélée aux températures de surface (Benslimane et al., 2008), il est possible de déterminer des classes de température selon le type d'occupation de sol dans le bassin (Tableau 55). Les formations végétales de forêt dense ainsi que les surfaces en eau présentent les plus basses températures de surface au contraire des sols de culture céréalière. Partant de ce principe, les moyennes d'évolution des températures de surface à l'horizon 2050 et 2100 sont additionnées aux valeurs des températures des images MODIS de la période 2000-2009. Une nouvelle segmentation des images est alors faite pour 2050 et 2100, en fonction des valeurs des températures obtenues. S'il est important de faire remarquer que dans la réalité les espaces n'évoluent pas aux mêmes rythmes, il ne demeure pas moins vrai que face aux changements climatiques tous les espaces subiront des mutations ou des pressions. D'ailleurs, les prévisions des modèles restent, dans le cas de cette étude, en dessous de la réalité. Pour illustrer les changements futurs de la végétation en 2050 et 2100, la technique décrite précédemment est appliquée au MCR CNRM (ce modèle est choisi sans toute autre condition). La comparaison des températures de surface fournies par le modèle et celle de l'image de MODIS (moyenne de la période 2000-2009) indique qu'au mois de novembre la différence de température est de 9°C. Cette différence est de 14°C au mois de mars. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en dehors d'un autre aspect technique de modélisation, la zone couverte par le MCR est sensiblement plus large que le bassin. Or, des zones voisines du bassin du Bouregreg comme les zones de montagne de l'Est sont souvent enneigées ou ont des températures très basses. Ainsi, l'observation générale qui se dégage de l'évolution future de la couverture végétale est que les formations forestières denses de l'amont et les forêts de

chêne liège de l'aval du bassin sont amenées à disparaître ou à se dégrader considérablement (Figure 173). Ce schéma est le même en début (novembre) tout comme en fin de saison agricole (mars). Le rythme de dégradation est faible jusqu'en 2050. En 2100, les températures de surface anciennement caractéristique de forêts ne devraient plus qu'être des îlots résiduels, ce qui donne un paysage de forêt dégradé dans un environnement de matorraux sous pression agricole et pastorale.

Tableau 51 : Seuillage des températures de surface d'image MODIS en fonction des types d'occupation du sol du bassin du Bouregreg (2000 -2009).

Type d'occupation de sol	Classe de température surface En novembre (°C)	Classe de température surface En mars (°C)
Foret dense, eau et bati	16 - 21,5	15 - 25,4
Mélange foret, matorral et culture	21,5 – 24	25,4 – 28
Culture et matorral	24 - 29	28 - 34

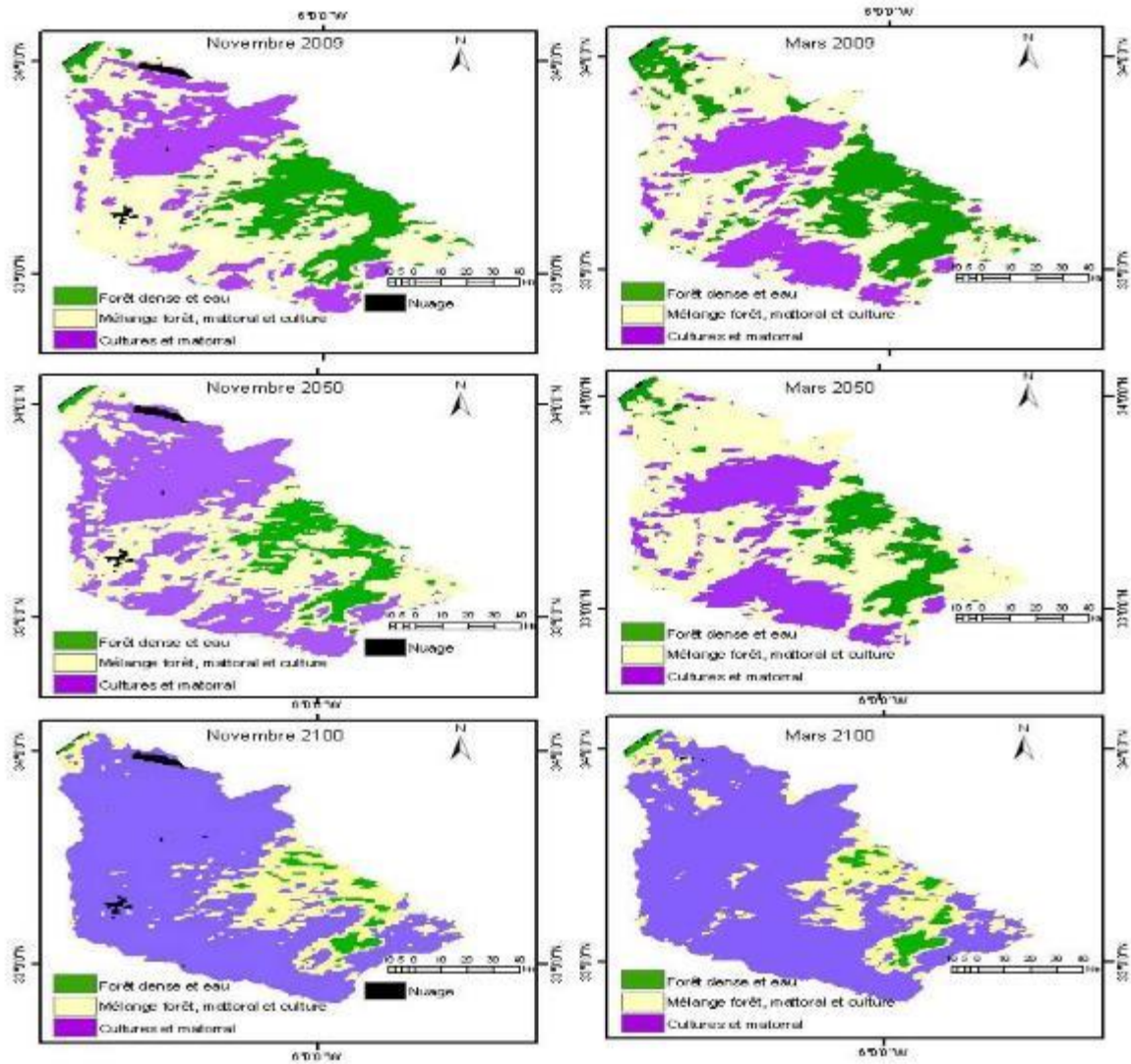


Figure 152 : Evolution de la végétation déterminée à partir des températures de surface des images MODIS et du MCR-CNRM (SIGMED, 2012)

*Conclusion générale
et perspectives*

L'analyse du risque de dégradation du milieu physique du bassin, à partir de la dynamique observée des facteurs anthropiques et naturels, confirment que le bassin versant du Bouregreg demeure un espace fragile. A cet effet, la qualité des sols est généralement mauvaise à moyenne sur un support topographique souvent accidenté. Quant à la qualité du climat, seule la partie amont du bassin présente de bonnes conditions hydriques. Aussi, les conditions de développement de la végétation sont-elles moyennes à mauvaises, surtout dans les espaces agricoles. Ainsi, la forte pression liée à l'urbanisation et à l'élevage dans ce milieu naturel fait peser des risques importants de dégradation du bassin dans ses parties amonts, aval sud et dans les zones forestières. L'analyse de la dynamique future de ce bassin, dans des conditions de changement climatique prévu par les MCR, fait ressortir que ces risques de dégradation constatés par l'interaction entre facteurs anthropiques et milieu physique vont être accentué par l'évolution du climat. En effet, les MCR prévoient des baisses importantes de quantité pluviométrique après 2050. Ces baisses s'accompagnent d'une hausse des températures de plus de 3°C à l'horizon 2100. Ce changement climatique sera caractérisé, au niveau saisonnier, par un raccourcissement de la saison humide, surtout en fin de saison. Ainsi, après 2050, les mois de février à mai, ainsi que les mois de novembre et décembre devraient changer de comportement hydrique pour devenir plus secs. Mises en relation avec les conditions naturelles de pratique de l'agriculture pluviale, les productions céréalières devraient être sinistrées sans apport d'eau d'irrigation. D'ailleurs, l'analyse de l'évolution futures des températures de surface fait apparaître que, dans un tel schéma de changement climatique, la recherche de terres pour combler le déficit de productivité agricole, devrait conduire à une disparition progressive des formations forestières.

Pour mettre en relief l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, l'étude présente fait appel à la pluridisciplinarité. Ce choix méthodologique s'explique par la volonté de compréhension générale de l'ensemble des facteurs humains et naturels qui interagissent entre eux et qui impactent sur le paysage du bassin versant du Bouregreg. Dans l'optique donc de partir d'analyses globales à des analyses de détails (des analyses localisés), **les principaux outils méthodologiques utilisés ont été la télédétection, la statistique et les SIG.** Ainsi, à échelle globale ont été utilisées **des images de NOAA et de MODIS (NDVI et température de surface)** pour comprendre l'évolution de la végétation de 1980 à 2009. A l'échelle locale, **les statistiques agricoles et de population** ainsi que **l'exploitation des images LANDSAT et SPOT 5** ont permis la compréhension de la **corrélation entre l'évolution de la végétation, la dynamique du climat et les pression anthropiques.** **Quatre principaux acquis** peuvent se dégager de **cette thèse.**

❖ **Une approche méthodologique qui comble un manque.**

Le bassin versant du Bouregreg a une dimension d'environ 9700 km². L'étude du bassin d'une telle dimension au Maroc s'est généralement basé sur des espaces échantillonnés ou des sous bassins, pour tenter de comprendre les mutations des paysages ou du milieu. Ce type d'approche pouvait avoir du mal à mettre en relief les connexions plus larges entre différents facteurs explicatifs des changements d'un milieu. Cette thèse permet, par utilisation conjointe de la télédétection, de la statistique et des SIG de pouvoir cerner les changements globaux et locaux de ce type d'espace. En plus de pouvoir répondre à la question de l'approche méthodologique de l'analyse de bassin de grande taille, cette étude a aussi répondu aux questions généralement posées des évolutions futures des milieux semi arides fragiles comme le bassin versant du Bouregreg. La connaissance spatialisée et quantifiée de l'évolution de la végétation du bassin du Bouregreg de 1980 à 2009. Les analyses statistiques faites, à partir de mailles de 8 km² équivalant à la taille des pixels des images de NOAA, ont permis d'observer que l'activité végétale du bassin s'est fortement dégradée pendant la saison sèche. En outre, en début et fin de saison humides, cette propension à la dégradation de la végétation tend à s'exprimer. Les espaces les plus affectés par la dynamique à la baisse de l'activité végétale sont aussi bien les espaces de culture céréalière que les formations forestières pendant l'été, et dans une moindre proportion, en début et fin de saison humide. Deux principales hypothèses pouvaient être émises pour expliquer cette évolution de la végétation : les activités humaines notamment l'agriculture et l'élevage ou l'impact de l'évolution récente du climat ou une action combinée de ces deux facteurs. La vérification de ces hypothèses a été l'objet du deuxième acquis de cette thèse.

❖ **Une identification spatialisée des causes de la dégradation des sols et de la végétation**

L'analyse de l'évolution du climat de la période de 1980 à 2009 a permis de constater une baisse substantielle des précipitations. Cependant, cette baisse ne s'exprime par en tendances significatives pendant l'été (la saison sèche) pour expliquer l'évolution constatée à la baisse de la productivité végétale. L'analyse, à partir des statistiques de l'évolution de la population humaine ainsi que du cheptel et des productions agricoles d'une part, et l'étude de la dynamique de l'occupation du sol à partir des images LANDSAT, SPOT 5 et des enquêtes de terrain d'autre part, a permis de comprendre que les pressions anthropiques expliquaient la baisse importante de la végétation en saison sèche. Par contre, bien que les baisses de

pluviométrie ne soient pas marquées pendant les saisons humides, c'est surtout la qualité de leur distribution saisonnière qui impacte de plus en plus sur les plantes cultivées, notamment les céréales. En effet, les variations pluviométriques en début et fin de saison humides connaissent une évolution telle que les conditions hydriques de développement des cultures sont devenues aléatoires pendant des périodes. L'expression en termes de production agricole est que, depuis les années 1990, la fréquence et l'intensité des sécheresses agricoles sont devenues de plus en plus importantes. L'analyse de l'action combinée des activités agropastorales et du climat sur l'évolution de la végétation abouti à la mise en relief de dégradations marquées sur les sols du bassin, en particulier dans les espaces de forte densité de cheptel (Sud-est du bassin) et dans les espaces climatiques favorables en terme de pluviométrie (l'aval du bassin). Cette action combinée du climat et des activités agropastorales sur le bassin a conduit, dans un schéma prospectiviste, à l'analyse des risques futurs de dégradation de ce bassin.

Une connaissance de l'impact à moyen et long terme de l'évolution du climat et des activités anthropiques sur la dégradation de la végétation et des sols du bassin. L'analyse du risque de dégradation à moyen terme de la végétation et des sols du bassin s'est basée sur la mise en relation, à travers un SIG, de l'ensemble des couches d'informations obtenues par analyse de l'action anthropique et des conditions naturelles, notamment climatiques. Cette analyse du devenir de cet espace a été également faite dans l'hypothèse d'un changement climatique, à partir d'analyse statistique des résultats de Modèles Climatiques Régionaux (MCR). Ces analyses aboutissent, d'une part à l'existence de forts risques de dégradation des sols et de la végétation des espaces pastoraux ainsi que des formations forestières, notamment les forêts les mieux conservées jusqu'à maintenant (forêt de chêne vert et de chêne liège de l'amont du bassin). Ces risques sont aussi importants à l'aval de ce bassin sous pression de la croissance urbaine. L'analyse climatique pour le long terme soulève la question d'une adaptation urgente du bassin aux effets des changements climatiques. En effet, l'analyse à partir des MCR abouti à la conclusion d'une dégradation continue des conditions hydriques du bassin jusqu'en 2100. Ainsi, au-delà de 2050 déjà, ces analyses prévoient une difficulté ou une impossibilité de pratique de l'agriculture en bour (agriculture pluviale). Un des effets induits de ce changement climatique sera la disparition progressive des forêts sous l'action humaine, à moins d'une politique forte d'adaptation et d'atténuation des effets du changement prévu.

❖ **Les Atouts où les potentialités:**

1- Le bassin versant dispose d'un potentiel très important en terme de diversification et développement des actions agronomiques, pastorales, forestières :

2- Le bassin versant bénéficie d'une tranche pluviométrique annuelle allant de 400 à 800 mm et se caractérise par des étages bioclimatiques allant du semi aride au sub humide. Cet atout climatique est constaté au niveau de la diversification des spéculations agricoles pratiquées et de la biodiversité rencontrée dans les terrains de parcours, les forêts naturelles ou artificielles et les matorrals.

3- Le bassin versant est riche en eaux de surface avec des possibilités de mobilisation très intéressantes. Les eaux sont, en générale, de bonne qualité.

Avec près de 60% de la superficie du bassin qui présente une pente inférieure à 15%, le bassin versant peu être considéré comme une zone de pentes relativement douces favorables à l'intensification des cultures nécessitant une mécanisation et l'utilisation des technologies de pointe.

4- Sur le plan lithologique le bassin versant présente une diversité de roches mères donnant naissance à des faciès constitués de matériaux qui offrent des possibilités importantes de développement de sols de valeur agronomique élevée.

5- L'arsenal des sols dont dispose le bassin est varié et riche en terme de potentialité de production. Les sols se caractérisent par des vocations assez larges permettant une diversification des spéculations et des utilisations.

6- Le bassin se caractérise par une diversité biologique remarquable par la présence d'une gamme importante d'espèces végétales et animales. Les forêts de chêne liège, de chêne vert, de genévriers, de thuya et de matorrals ajoutées à l'existence de deux Sites d'Intérêt Biologique et Ecologique (SIBE) témoignent de cette importance.

❖ **Les Contraintes majeures :**

7- La zone du bassin est en général bien arrosée. Néanmoins, la répartition irrégulière temporelle et spatiale des pluies, ajoutée aux périodes de sécheresses répétées, engendre momentanément des déficits importants dans le bilan hydrique des sols. Il est à souligner, également, que l'intensité des précipitations journalières maximales enregistrées dans le bassin sont très élevés et font que le risque d'érosion et de crues présente une menace potentielle permanente à l'échelle du bassin versant.

8- Si les possibilités des eaux de surface sont importantes, en revanche les eaux souterraines sont très limitées. Le contexte hydrogéologique défavorable du bassin, constitué essentiellement de formations géologiques imperméables, fait que les nappes d'eau souterraines sont limitées ou quasiment absentes dans certaines zones. Cette déficience entrave certainement le développement socioéconomique et agricole du milieu rural dont les besoins en eau sont sans cesse en augmentation. Pour remédier à cette situation l'Agence Hydraulique de Bouregreg et zones côtières envisage la réalisation d'un programme de mobilisation des Eaux de surface à travers la construction d'un certain nombre de lacs collinaires. Ces derniers ont pour objectifs d'assurer l'alimentation en eau potable des douars, de garantir l'irrigation des terrains irrigués et l'abreuvement du cheptel.

9- 40% de la zone d'étude est placé dans un relief de pentes dépassant 15%. Cette partie du bassin, généralement occupée par des formations forestières dégradées, constitue un milieu favorable à l'érosion hydrique et à l'accentuation des crues. Donc, sources de sédiments et de production des crues qui menacent la pérennité du barrage et la stabilité des zones aval.

10- Malgré la diversité, les sols du bassin présentent une forte prédisposition à l'érosion compte tenu de la dominance des sols friables et très friable. Ces sols présentent une forte prédisposition à l'érosion et donc une source potentielle de sédiments. L'abondance des sols peu évolués d'érosion dans la zone d'étude (40% de la superficie du bassin) est le résultat direct de cette situation. Ces sols nécessitent certainement des mesures préventives et curatives pour limiter le processus de leur dégradation.

11- Quoique que le bassin présente un taux de boisement assez élevé, la protection du sol contre les effets érosifs de la pluie et du ruissellement reste non satisfaisante en raison du faible taux de recouvrement des formations forestières et de l'abondance des terrains de cultures. En effet, plus de 70 % de la superficie de la zone présente une qualité de protection faible du couvert contre l'érosion. C'est une conséquence directe de la pression exercée sur les ressources forestières et pastorales dont les causes sont multiples.

-Les limites de l'étude :

L'étude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols souffre, ici, d'un certain nombre de limites. Ces limites sont, d'abord, dues au fait qu'il est impossible pour tout chercheur ou même équipe de recherche d'aborder toutes les relations de causalité contenues dans cette recherche. Ensuite, ces insuffisances sont liées aux données disponibles et aux données qu'il est possible de collecter sur le terrain. En effet, cette recherche se fait dans un espace rural où il m'est difficile de mener des enquêtes par questionnaire sur le terrain. Ceci pour des difficultés de culture. Or, la perception paysanne de l'espace rural, la gestion de cet espace par les populations locales reste, un volet important, sinon essentiel, de la dynamique du milieu. Aussi, les enquêtes de terrain ne sont limitées qu'à des observations et quelques interviews. Cette limite est aussi due à un problème d'harmonisation des échelles d'analyse entre les données empiriques scientifiques disponibles. A cet effet, l'harmonisation des échelles d'analyse, en occurrence entre les données satellitaires basses résolution spatiales (15 jours de résolution temporelle) et les données climatiques (précipitation essentiellement et qui sont à un mois de résolution temporelle) biaise ou fait perdre certains détails au niveau du rythme des changements de la couverture du sol. En outre, sur les 91 stations pluviométriques de la zone dont les données s'étendent sur la période 1982 à 2009, seule quelques stations synoptiques (4 stations) couvrent tout l'intervalle de 1982-2009. Enfin, les statistiques agricoles disponibles pour cette étude couvrent, pour l'essentiel, au niveau spatial, des zones administratives plus larges (les provinces) faisant perdre le détail statistique des dynamiques spatiales au niveau communal.

❖ Perspective de recherche:

Cette thèse laisse en suspend certaines questions fondamentales de l'évolution de l'espace rural du bassin versant du Bouregreg sous influence climatique et humaine. Il s'agit en premier lieu de la perception paysanne de l'évolution du climat et des stratégies adoptées pour faire face aux variations climatiques. Cet aspect de l'étude est d'autant plus important qu'il permet de mieux cerner les causes de la dégradation de l'espace mais aussi de mieux orienter les politiques et stratégies d'atténuation des effets induits du climat. Une deuxième question importante de l'étude est la quantification du phénomène d'érosion hydrique dans le bassin versant du Bouregreg. Sa taille et son hétérogénéité ne permettant pas l'utilisation d'équations de pertes en sol sur l'ensemble du bassin. Il est important d'utiliser d'autres méthodes pour évaluer ces pertes. La connaissance et la quantification des pertes en sol permettront ainsi de mieux orienter les politiques de lutttes contre la dégradation des sols arables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ☞ **Abaab A., Bedrani S., Bourbouze A., Chiche, J. (1995).** Les politiques agricoles et la dynamique des systèmes agro-pastoraux au Maghreb in “ les agricultures maghrébines à l’aube de l’an 2000”, Options Médit. n° 14, 139-165.
- ☞ **Aderghal M., Laouina A., Chaker M.et Machouri N., (2011).** Evaluation des projets de lutte contre la dégradation des terres, la commune des Sehoul, Maroc.Communication au séminaire "Politiques, programmes et projets de lutte contre la désertification, quelles évaluations?"CSFD, 29-30 juin 2011, Montpellier 01-22
- ☞ **Agoumi, A. (2003).** Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques. Sustainable Development International Institute.
- ☞ **Agoumi, A., et Debbarh, A. (2006).** Ressources en eau et bassins versants du Maroc rapport thématique, 50 ans de développement humain au Maroc et perspectives pour 2025.
- ☞ **Akesbi, N. (2006).** Evolution et perspectives de l’agriculture marocaine rapport thématique, 50 ans de développement humain au Maroc et perspectives pour 2025 GT3 <http://doc.abhatoo.net.ma/doc/IMG/pdf/GT3-3.pdf> [Accessed 5 February 2013].
- ☞ **Arrus, R., & Rousset, N. (2007).** L'agriculture du Maghreb au défi du changement climatique: Quelles stratégies d'adaptation face à la raréfaction des ressources hydriques?
- ☞ **Badraoui M.,(2006)** Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc rapport thématique, 50 ans de développement humain au Maroc et perspectives pour 2025 GT8-3
http://www.cndwebzine.hcp.ma/cnd_sii/IMG/pdf/connaissance_et_utilisation_des_ressources_en_sol_au_maroc.pdf .
- ☞ **Balaghi, R., Jlibene, M., Tychon, B., & Mrabet, R. (2007).** Gestion du risque de sécheresse agricole au Maroc. Science et changements planétaires/Sécheresse, 18(3), 169-176.
- ☞ **Balaghi R., Tychon B., Eerens H., Jlibene M. (2008).** Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain

yields in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10, 438–452.

- ☞ **Balaghi R., Jlibene M., Benaouda H., Kamil H., Debbarh Y. (2011).** Intégration du changement climatique dans la mise en œuvre du plan maroc vert, Étude de l'impact environnemental et social p91 Bamouh, A. (1998). Gestion de la contrainte pluviométrique pour l'amélioration de la production végétale et de l'efficacité d'utilisation de l'eau. Vulgarisation agricole, transfert de technologie en agriculture, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.
- ☞ **Banque mondiale, (2003).** Evaluation du coup de la dégradation de l'environnement, rapport n°25992-MOR
- ☞ **Barakat, F., Handoufe, A., (1998).** Approche agro-climatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse* 9, 201–208
- ☞ **Beaudet, G. (1969).** Le plateau central marocain et ses bordures: étude géomorphologique. Rabat: Imprimeries françaises et marocaines.
- ☞ **Benabdellouahad, S. (2006).** Structure, dynamique et typologies physico-chimiques et phytoplanctoniques de l'estuaire du Bou Regreg (Côte Atlantique Marocaine). These de doctorat, Université Mohammed V Agdal.
- ☞ **Benassi, M. (2008).** Drought and climate change in Morocco. Analysis of precipitation field and water supply. *Drought Management: Scientific and Technological Innovations. Options Méditerranéennes: Série A (80)*. A. Lopez-Francos, ed, 83-86.
- ☞ **Benbrahim, K. F., Ismaili, M., Benbrahim, S. F., & Tribak, A. (2004).** Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation: impact du phénomène au Maroc. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(4), 307-320.
- ☞ **Benseddik, B., & Benabdelli, K. (2000).** Impact du risque climatique sur le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) en zone semi-aride: approche éco-physiologique. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 11(1), 45-51.
- ☞ **Berraho A., (2006).** Biodiversité et équilibre écologique rapport thématique, 50 ans de développement humain au Maroc et perspectives pour 2025 GT8-
<http://www.svt.ac-aix->

marseille.fr/eedd/coopint/bibliogr/biodiversitequilibresecologiques.pdf [Accessed 5 February 2013].

- ☞ **Blinda M. et Thivet G., (2009).** Ressources et demandes en eau en Méditerranée : situation et perspectives. *Sécheresse*. 20 (1), 9-16. DOI : 10.1684/sec.2009.0162.
- ☞ **Bonn, F. (1998).** La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: possibilités, erreurs et limites. *Science et changements planétaires/Sécheresse* 9(3), 185-0.
- ☞ **Caloz R. et Collet C. (2001).** Précis de télédétection vol. 3: traitement numérique d'image de Télédétection Presse Universitaire du Quebec et AUPELF-UREF.
- ☞ **Calvet, C., Legoff, Y. (1977).** Classification des types de temps au Maroc.
- ☞ **Chaouche K., Neppel L., Dieulin C., Pujol N., Ladouche B., Martin E., Salas D., et Caballero Y. (2010).** Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change *C.R. Geosciences* 342, 234.
- CNRF, (2016).** Etudes et Documents du Centre National de la Recherche Forestière.
- ☞ **Chikhaoui, M., Bonn, F., Merzouk, A., Lacaze, B., & Mejjati, A. M. (2007).** «Cartographie de la dégradation des sols à l'aide des approches du Spectral Angle Mapper et des indices spectraux en utilisant des données ASTER». *Revue Télédétection*, 7(1-2-3-4), 343-357. Chiles, J. P., & Matheron, G. (1975, November). Interpolation optimale et cartographie. In *Annales des mines* (pp. 19-26).
- ☞ **CID, (2007).** Conseils d'Ingénierie et Développement.
- ☞ **CIBS, (2019).** 23ème Colloque Internationale des Bassins Sédimentaires .Thème: « La géologie au service du développement durable » Fès, 21-23 Novembre 2019
- ☞ **Devineau, JL. (1988).** Propriété spectrale de la végétation, communication journées télédétection de bondy: «images satellites et milieux terrestres en regions arides et tropicales»
- ☞ **DH, (2012).** Département Hydraulique : «www.water.gov.ma»
- ☞ **DREFNO, (2016).** Département des Eaux et Forêt : Rapport d'Aménagement du Bassin Versant du Bouregerg. «PNABV» Plan National d'Aménagement des Bassins Versants.

- DRPE, (2012).** Etudes de la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau.
- ☞ **Douguedroit, A., Durbiano, C., Messaoudi, A., & Aït Hamza, M. (1998).** Précipitations et rendements du blé dur et de l'orge en culture «bour» dans le Maroc du Centre-ouest. *Méditerranée*, 88(1), 39-44.
- ☞ **Doukkali, R. (2006).** Évolution des performances du secteur agricole: résultats d'une expérience. In IAV Hassan II, Conférence du jeudi (Vol. 9).
- ☞ **Driouech, F. (2010).** Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique: descente d'échelle et incertitudes. Thèse INP Toulouse.
- ☞ **Egis Bceom International / IAU-IDF / BRGM, (2011).** Adaptation au changement climatique et aux désastres naturels des villes côtières d'Afrique du Nord: Phase 1 : Évaluation des risques en situation actuelle et à l'horizon 2030 pour la vallée du Bouregreg rapport final p135.
- ☞ **El Garouani, A., Chen, H., Lewis, L., Tribak, A., & Abharour, M. (2008).** cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du sig idrisi au nord-est du maroc. *Téledétection*, 8(3), 193-201.
- ☞ **Escadafal, R. & Huete, (1999).** Assessment of biophysical soil properties through spectral decomposition techniques. *Remote Sensing of Environment*. 35: 149-159
- FAO, (1998). Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements -FAO Irrigation and drainage paper 56.
- ☞ **GIEC., (2008).** Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse. Girard M.C. & Girard C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, pp.529.
- ☞ **GIEC., (2013).** Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. GIEC, Suisse, 34 p.
- ☞ **Girard M.C. & Girard C.M., (2010).** Traitement des données de télédétection: environnement et ressources naturelles, 2eed. DUNOD pp.576.
- ☞ **Giannakopoulos, C., Le Sager, P., Bindi, M., Moriondo, M., Kostopoulou, E., & Goodess, C. M. (2009).** Climatic changes and associated impacts in the

Mediterranean resulting from a 2 C global warming. *Global and Planetary Change*, 68(3), 209-224. Coudé-Gaussen, G. &

- ☞ **Gommes R., El Hairech T., Rosillon D., Balaghi R. (2009).** Impact of climate change on agricultural yields in Morocco. World Bank-Morocco study on the impact of climate change on the agricultural sector. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Roma, Italy.105p.
- ☞ **Gratton, Y. (2002).** Le krigeage: la méthode optimale d'interpolation spatiale.
- ☞ **Les Articles de l'Institut d'Analyse Géographique , H AUT-COMMISSARIAT au PLAN, (2004).** Population et développement au Maroc: dix après la conférence internationale sur la population et le développement (CIPD, 1994) HAUT-COMMISSARIAT au PLAN, (2006).
- ☞ **Khomsî K., Mahe G., Sinan M., et al. (2011).** Evolution des événements chauds Rares et très Rares dans les Bassins Versants de Tensift et Bouregreg (Maroc) et identification des Types des temps synoptiques Associés. *From prediction to prevention of hydrological risk in Mediterranean countries. Proceedings of the MED-FRIEND International WorkShop on Hydrological Extremes, held At University of Calabria, Cosenza (Italy), September 15 – 17, 2011.*
- ☞ **Khomsî, K., Mahe, G., Sinan, M. & Snoussi, M. (2013).** Hydro-climatic variability in two Moroccan basins: A comparative analysis of temperature, rainfall and runoff regimes. In: *Climate and Land Surface Changes in Hydrology (Proceedings of IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013).* IAHS Publ. 362. IAHS Press, Wallingford, UK.
- ☞ **Knippertz et al. (2003).** Methodology of spatio- temporal regionalization for analysis of rainfall (1961-1992): application to Morocco Atlantic.
- ☞ **Jlibene M., Balaghi R. , (2009).** Le risque sécheresse en agriculture pluviale. Bulletin mensuel de liaison et d'information du Programme National de Transfert de Technologie 181.
- ☞ **Laouina, A., Nafaa, R., & Watfeh, A. (1997).** Occupation des sols et dégradation des terres, le cas de la Mamora et de ses bordures. *Méditerranée*,86(1-2), 45-51.
- ☞ **Laouina, A., Coelho, C., Ritsema, C., Chaker, M., Nafaa, R., Fenjiro, I., & Van Dijck, S. (2004).** Dynamique de l'eau et gestion des terres dans le contexte du

changement global, dans le bassin du Bouregreg (Maroc). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(1), 65-77
<http://ressources.ciheam.org/om/pdf/a57/04001965.pdf> [Accessed 5 February 2013].

- ☞ **Laouina, A., Aderghal, M., Al Karkouri, J., Chaker, M., Machmachi, I., Machouri, N., & Sfa, M. (2010).** Utilisation des sols, ruissellement et dégradation des terres: le cas du secteur Sehou, région atlantique (Maroc). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 21(4), 309-316.
- ☞ **Lambin, (1996).** The surface temperature- vegetation index space for land cover and land-cover change analysis. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 17, 1996 – Issue 3. 1996
- ☞ **Mahé, G., Emran, A., Brou, Y.T. & Tra Bi, A. Z. (2012b).** Impact de la variabilité climatique sur l'état de surface du bassin versant du Bouregreg (Maroc). *European J. Sci. Res.* 84(3), 417–425
- ☞ **Mahé, G., et al., (2013).** Evolution des débits liquides et solides du Bouregreg. CERGéo-FLSH, UM5-Rabat, 28 mai 2013. Edité par ARGDT, Maroc, ISBN978-9954-33-482-9,21-36.
- ☞ **Marghich, A. (2004).** Le bassin versant de Bou Regreg (Maroc Central): Etudes hydrologique, hydrogéologique et hydrochimie des eaux. Thèse d'état, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah.
- ☞ **MENA-RDMS, (2018).** Système régional de gestion de la sécheresse pour le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord. –International Center for Biosaline Agriculture (ICBA) à Dubaï aux Emirats Arabes Uni. 25-26/09/2018.
- ☞ **Morgeo, (2020).** Geospatial Intelligence: Solutions and New Challenges” Casablanca, 15 and 16 April ; 2020.
- ☞ **Ouharba, E. H., (2011).** Effet des Fluctuations Climatiques sur la phénologie, la croissance et la production agricole à Rommani , Region de Rabat. Mémoire de Master, Université Mohammed V- Rabat, FSR, 83 p.
- ☞ **SINAN M., M. BOUSSETTA et A. EL RHERARI (2009).** Changements climatiques : causes et conséquences sur le climat et les ressources en eau. *Revue HTE*, 142, 21-30.

- ☞ **SIGMED, (2012).** Approche Spatialisée de l'impact des activités agricoles au Maghreb sur les transports solides et les ressources en Eau De grands bassins versants.
- ☞ **Trabi Zamblé A., (2013).** Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). Thèse de Doctorat de Géographie, Hydrosociétés Montpellier UMR 5569 CNRS, IRD, UM1, UM2.
- ☞ **IPCC, (2014).** Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- ☞ **IPCC, (2018).** Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- IPCC, (2022).** AR6 Climate Change : Impacts, Adaptation and Vulnerability.
- ☞ **INGEMA, (2007).** L'étude du Plan Directeur D'Aménagement Intégré des Ressources en Eau du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia (PDAIRE).
- ☞ **Hiez, G. Cochonneau, G. (2020).** Prospective «Maroc 2030» : Gestion durable des ressources naturelles et de la biodiversité au Maroc, p.118
- REEM, (1998).** Land degradation in Morocco due to agricultural activities. National State of the Environment Report in Morocco. 57 pages, 1998.
- ☞ **Voltaire A., Sanchez-Gomez E., et al. (2012).** The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation.
- ☞ **WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN, (2018).** The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017 - No.14 | 22 November 2018.

☞ **Quelques sites utilisés :**

<http://www.cgiar-csi.org/>

<http://kids.fao.org/glipha/>

<http://glcf.umd.edu/data/gimms/>

<http://www.water.gov.ma/>

<http://www.cru.uea.uk/cru/info/modelcc/>

<http://www.ensembles-eu.org/>

[www.CropSyst – Agro-meteorology and Agricultural Modeling Tools.](http://www.CropSyst.com)

www.ipcc.ch

www.wmo.ch/web/arep/lib1/libfr/greenhs.html

www.climatechangesolutions.com/french/individuals/opportunities/residential/activity.htm

www.inra.org.ma

www.worldclim.org/node/1

www.worldclim.org/futurdown.htm

ftp://extftp.fao.org/SD/Reserved/Agromet/WB_FAO_morocco_CC_yield_impact/WB_Morocco_20090603.pdf

fr.wikipedia.org/wiki/sécurité_alimentaire

<http://free.vgt.vito.be>

<http://www.vgt4africa.org/VGTExtract.do>

http://veimages.gsfc.nasa.gov/673/modis_morocco_lrg.jpg

http://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table

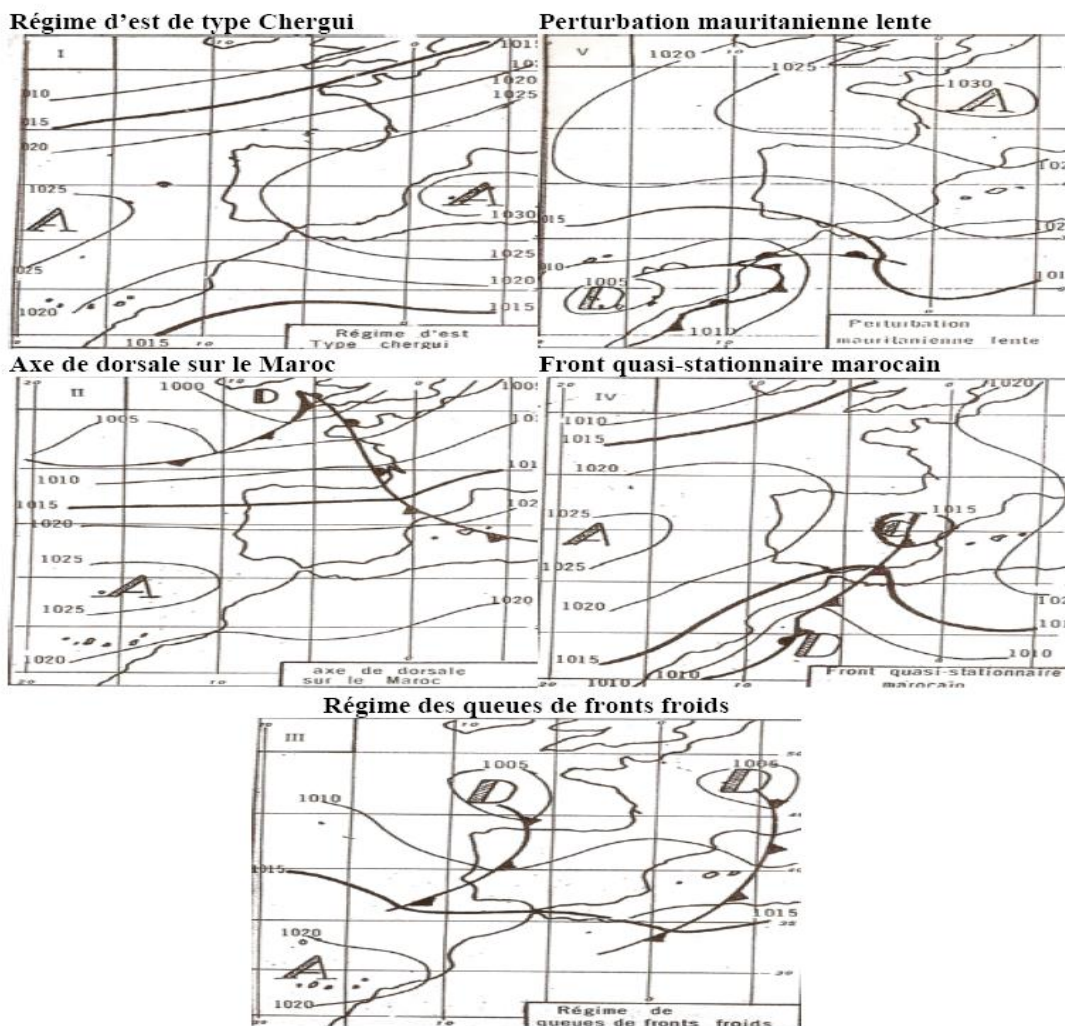
<http://modis.gsfc.nasa.gov/>

<http://www.fao.org/giews/french/windsip/windsip.htm>

ANNEXES

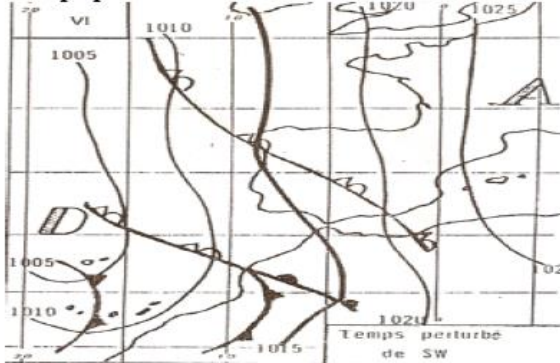
Annexes 1

Annexe 1 : Cartes SLP correspondant aux 16 types de temps sur le Maroc (Calvet et Legoff, 1977).

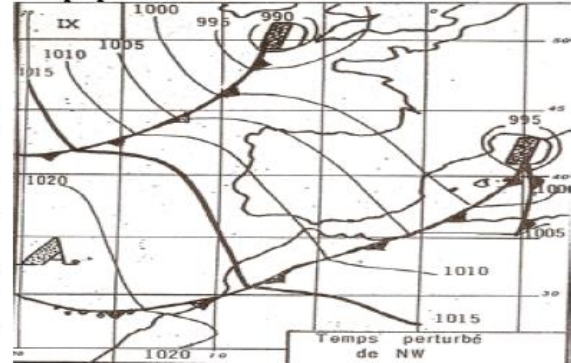


Les types de temps correspondant à la circulation d'été et des périodes voisines : le régime d'est de types Chergui, la perturbation mauritanienne lente, l'axe de dorsale sur le Maroc, le front quasi-stationnaire marocain et le régime des queues de fronts froids (Calvet et Legoff, 1977).

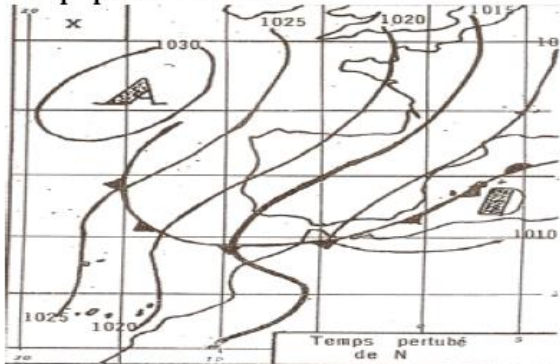
Temps perturbé de SW



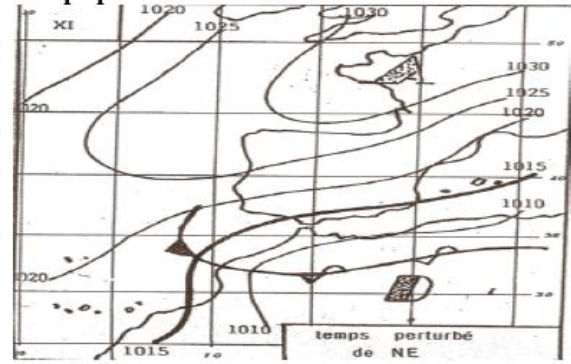
Temps perturbé de NW



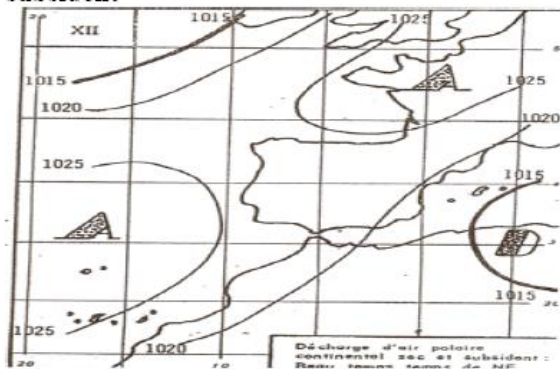
Temps perturbé de nord



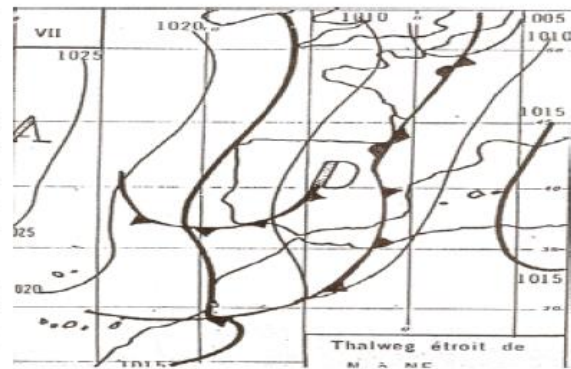
Temps perturbé de NE



Décharge d'air polaire continental sec et subsident



Talweg étroit de N à NE



Perturbation d'ouest accélérée

Cyclogénèse sur le SW de l'Espagne (perturbation de nord)

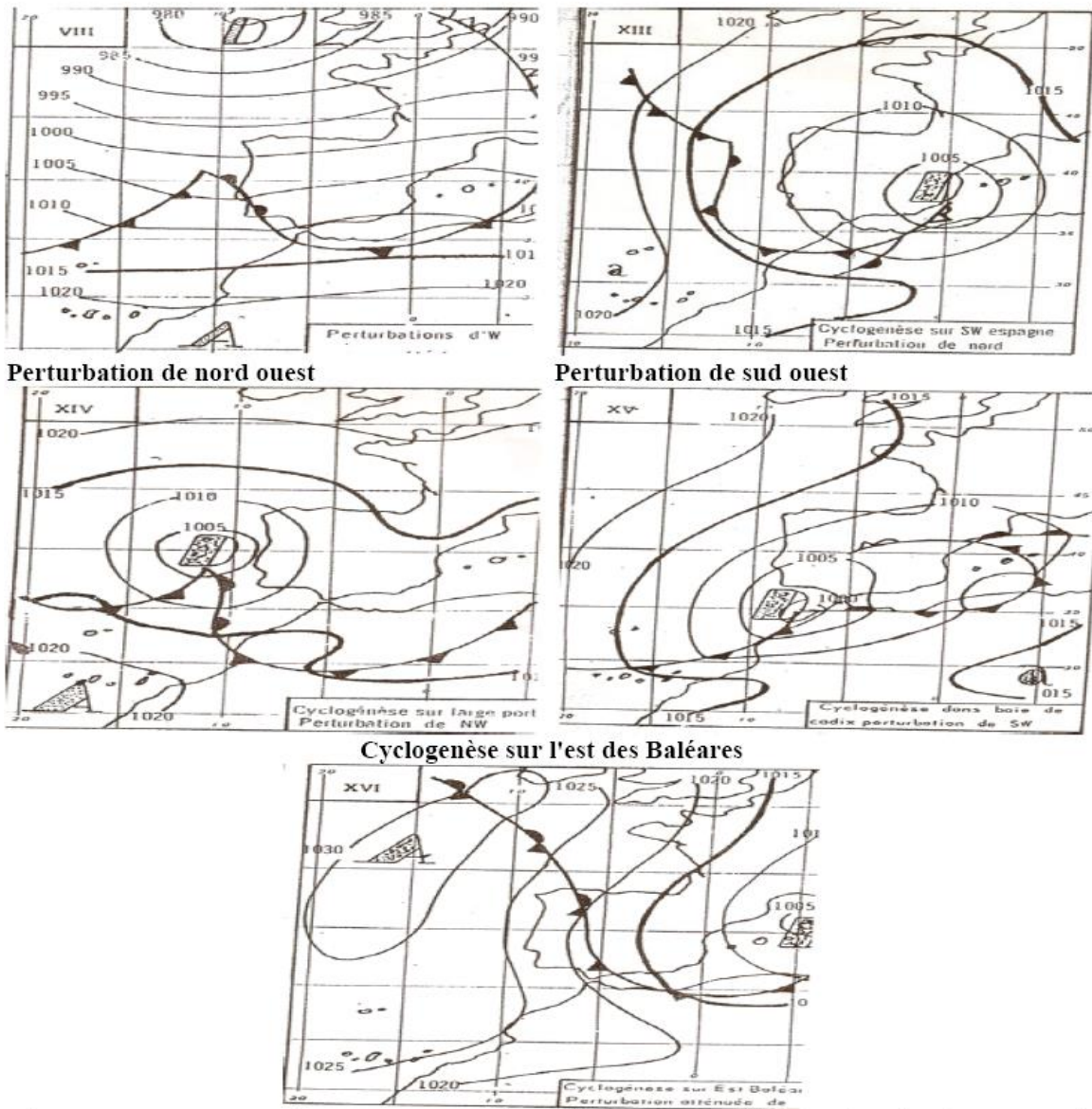


Figure 1 Les types de temps correspondant à la circulation d'hiver et des périodes voisines le temps perturbé de SW, le temps perturbé de NW, le temps perturbé de nord, le temps perturbé de NE, la décharge d'air polaire continental sec et subsident, le talweg étroit de N à NE, la perturbation d'ouest accélérée, la cyclogénèse sur le SW de l'Espagne (perturbation de nord), la perturbation de nord ouest, la perturbation de sud ouest et la cyclogénèse sur l'est des Baléares (Calvet et Legoff, 1977).

Annexes 2

Fiche de relevé phénologique

Observateur :

Nom de la parcelle :

Stades phénologiques

- 1. Semis**
- 2. Levée**
- 3. Troisième feuille**
- 4. Tallage**
- 5. Montaison**
- 6. Epiaison**
- 7. Floraison**
- 8. Maturation**
- 9. Maturité**

Entourez les stades correspondants aux dates d'observations dans le tableau ci-dessous.

Dates d'observation	Semis	Levée	Tallage	Montaison	Epiaison	Floraison	Maturation	Maturité

Annexes 3

Station Agrométéorologique

Fiche Quotidienne n°		Date	
Jour de la semaine		Heure	
Observateur			

ÉTAT DU SOL :			
0	Surface du sol sec		
1	Surface du sol humide		
2	Surface du sol mouillée		
3	Surface du sol nue et gelée		
4	Sol est couvert de verglas		
5	Glace, neige fondue ou neige couvrant moins de la moitié du sol		
6	Glace, neige fondue ou neige couvrant plus de la moitié du sol		
7	Glace, neige fondue ou neige couvrant complètement le sol		
8	Neige sèche poudreuse couvrant plus de la moitié de la surface du sol		
9	Neige sèche poudreuse couvrant complètement la surface du sol		

HAUTEUR DE NEIGE EN CENTIMÈTRES :					
1.	2.	3.	4.	5.	Moyenne

VISIBILITÉ :	
1	Brouillard épais 100 mètres
2	Brouillard dense 500 mètres
3	Brumeux
4	Bonne visibilité

COUVERTURE NUAGEUSE : (code de nébulosité)	
0	Aucun nuage (ciel serein)
1	1/8 du ciel couvert (ciel quasi serein)
2	2/8 du ciel couvert (ciel peu nuageux)
3	3/8 du ciel couvert (ciel assez nuageux)
4	4/8 du ciel couvert (ciel nuageux)
5	5/8 du ciel couvert (ciel fort nuageux)
6	6/8 du ciel couvert (ciel très nuageux)
7	7/8 du ciel couvert (ciel quasi bouché)
8	8/8 du ciel couvert (ciel bouché)
9	Ciel invisible

TYPE DE NUAGE :		
0	Pas de nuage	
Nuages bas	Nuages moyens	Nuages hauts
1 Stratus	5 Altostratus	8 Cirrus
2 Stratocumulus	6 Nimbostratus	9 Cirrostratus
3 Cumulus	7 Altocumulus	10 Cirrocumulus
4 Cumulonimbus		

THERMOMETRE :	
T° au sol	T° mini <input type="text"/> °C
	T° instant <input type="text"/> °C
T° dans le sol	
	1 2 cm <input type="text"/> °C
	2 5 cm <input type="text"/> °C
	3 10 cm <input type="text"/> °C
	4 20 cm <input type="text"/> °C
	5 50 cm <input type="text"/> °C
	6 100 cm <input type="text"/> °C

SOUS ABRI :	
T° sèche <input type="text"/>	T° maxi <input type="text"/> °C
T° humide <input type="text"/>	T° mini <input type="text"/> °C
Piche <input type="text"/> mm	T° instant <input type="text"/> °C

PLUVIOMETRIE :	
Pluviomètre (contenu en eau)	<input type="text"/> ml
Nivomètre (contenu en neige fondue)	<input type="text"/> ml

EVAPORATION BAC :	
hauteur d'eau	<input type="text"/> mm
T° maxi eau	<input type="text"/> °C
T° mini eau	<input type="text"/> °C

ANEMOMETRIE
Anémomètre à 2 m <input type="text"/> km

RAYONNEMENT GLOBAL :	<input type="text"/> 10 ^{W/m²}
-----------------------------	---









TENSION HYDRIQUE DU SOL :		
Profondeur: 15 cm	Mesure haute (cm Hg)	Mesure basse (cm Hg)
Profondeur: 30 cm	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Profondeur: 60 cm	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Profondeur: 90 cm	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Profondeur: 150 cm	<input type="text"/>	<input type="text"/>

PRESSION ATMOSPHERIQUE :	<input type="text"/> hPa
---------------------------------	--------------------------

REMARQUES :	
- Temps présent :	
- Temps passé :	
- Instruments :	
- Autres :	

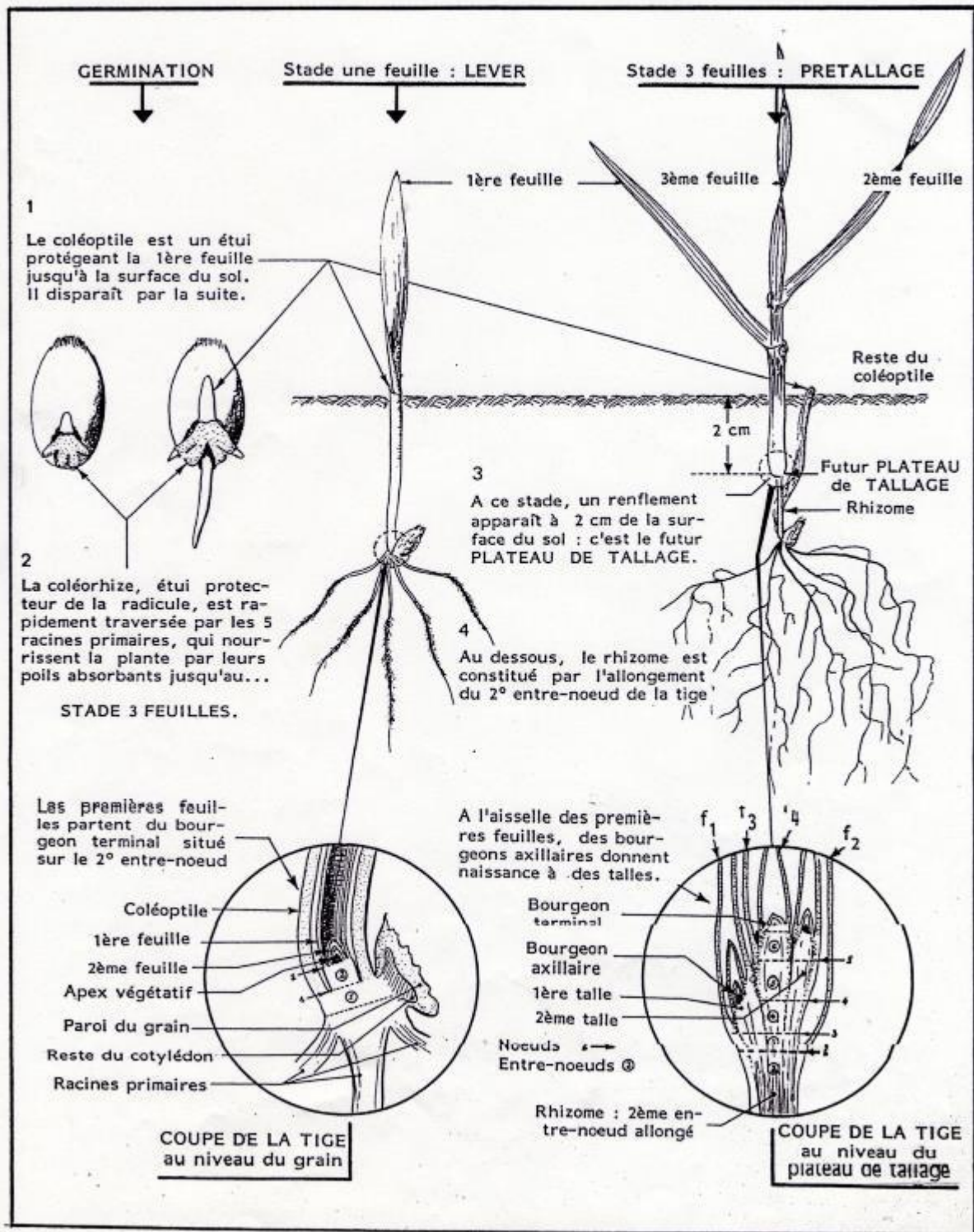
Annexes 4

Les Diverses Echelles de Notation des Stades du Blé (d'après SOLTNER, 1986)

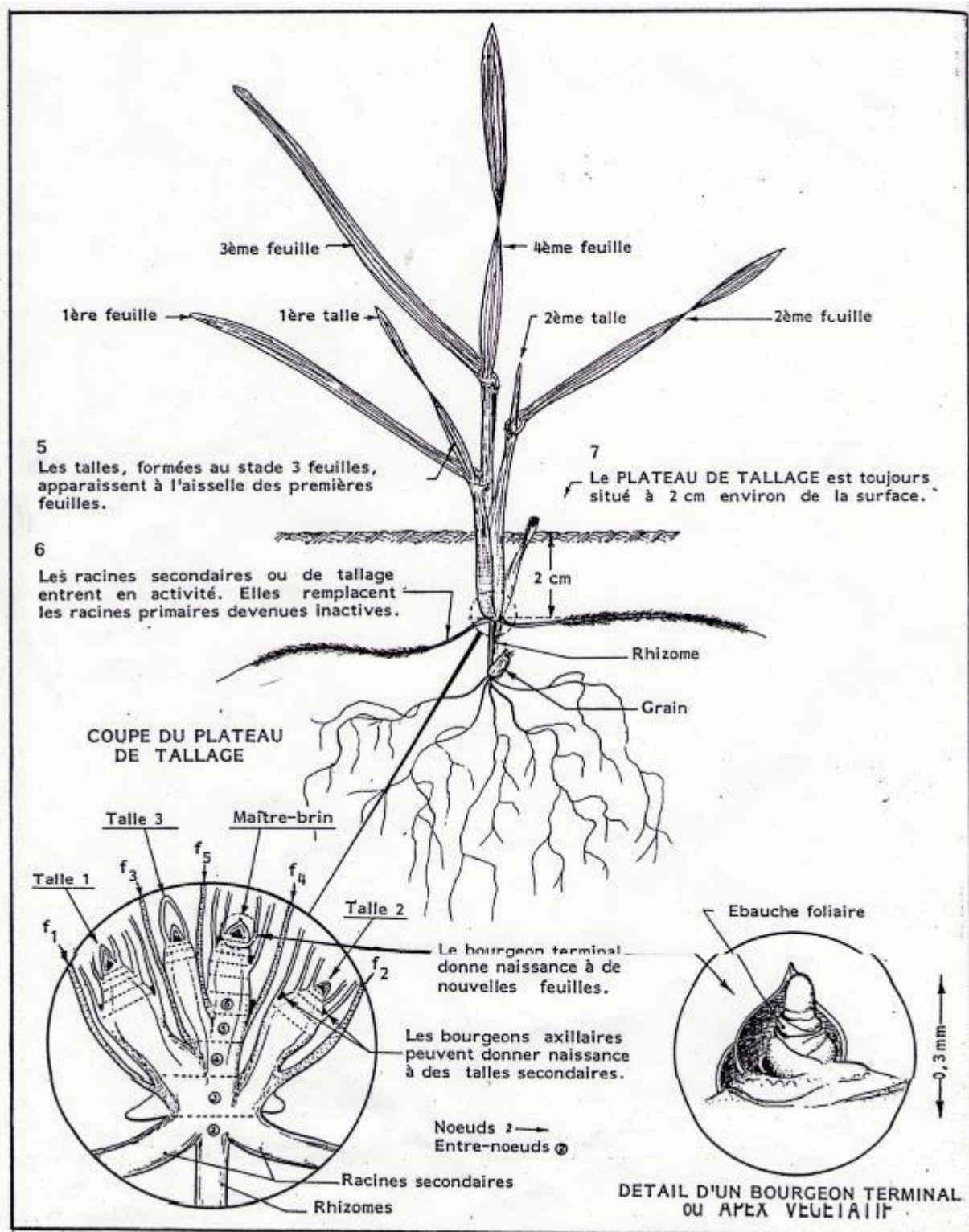
	Stade	Echelle de FEEKES	Echelle de BAGGIOLINI	Echelle de ZADOCKS	Echelle de JONARD
	LEVEE	1	A	10	
	1 FEUILLE		B	11	
	2 FEUILLES		C	12	
	3 FEUILLES		D	13	
	DEBUT TALLAGE	2	E	21 (1 talle)	A
	PLEIN TALLAGE	3	F		
	FIN TALLAGE	4	G	29 (9 talles et plus)	
	DEBUT MONTAISON (redressement)	5	H	30	B
	1 NOEUD	6	I	31	C 1
	2 NOEUDS	7	J	32	C 2
	Apparition dernière feuille	8	K	37	
	Ligule visible	9 : juste visible 10 : gaine dernière feuille sortie	L	39	D (Méiose du pollen)
	Gaine éclatée	10-1	M	40 à 49 (gonflement)	
	Epi émergé	10-2 : 1/4 épisaison 10-3 : 1/2 épisaison	N	50	
	Epi entièrement dégagé	10-4 : 3/4 épisaison 10-5 : tous les épis hors de la gaine	O	59	
	Début floraison	10-5-1 : début 10-5-2 : demi	P	60	F
	Fin floraison	10-5-3 : Floraison base de l'épi	Q	69	
	Formation du grain	10-5-4	R		
	Maturité laiteuse	11-1	S	70 à 79	Mn
	Maturité pâteuse	11,2	T	80 à 89	
	Maturité jaune	11-3	U	90	
	Maturité complète	11-4	V	à	M
	Surmaturité		W	94	

Annexes 5

Période Végétative : De la Germination Au Prétallage

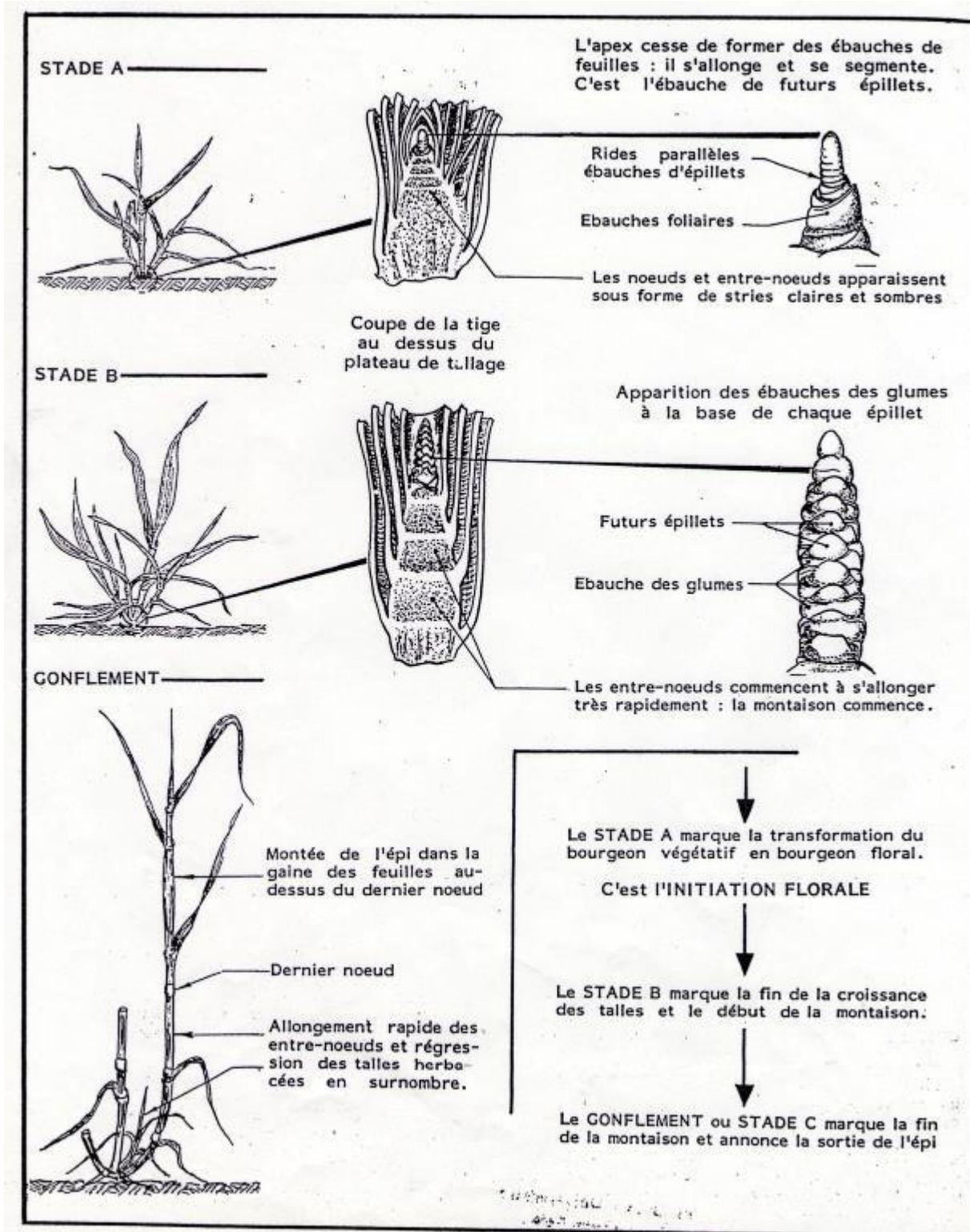


Période Végétative (suite): le Tallage Au Stade 4 Feuilles



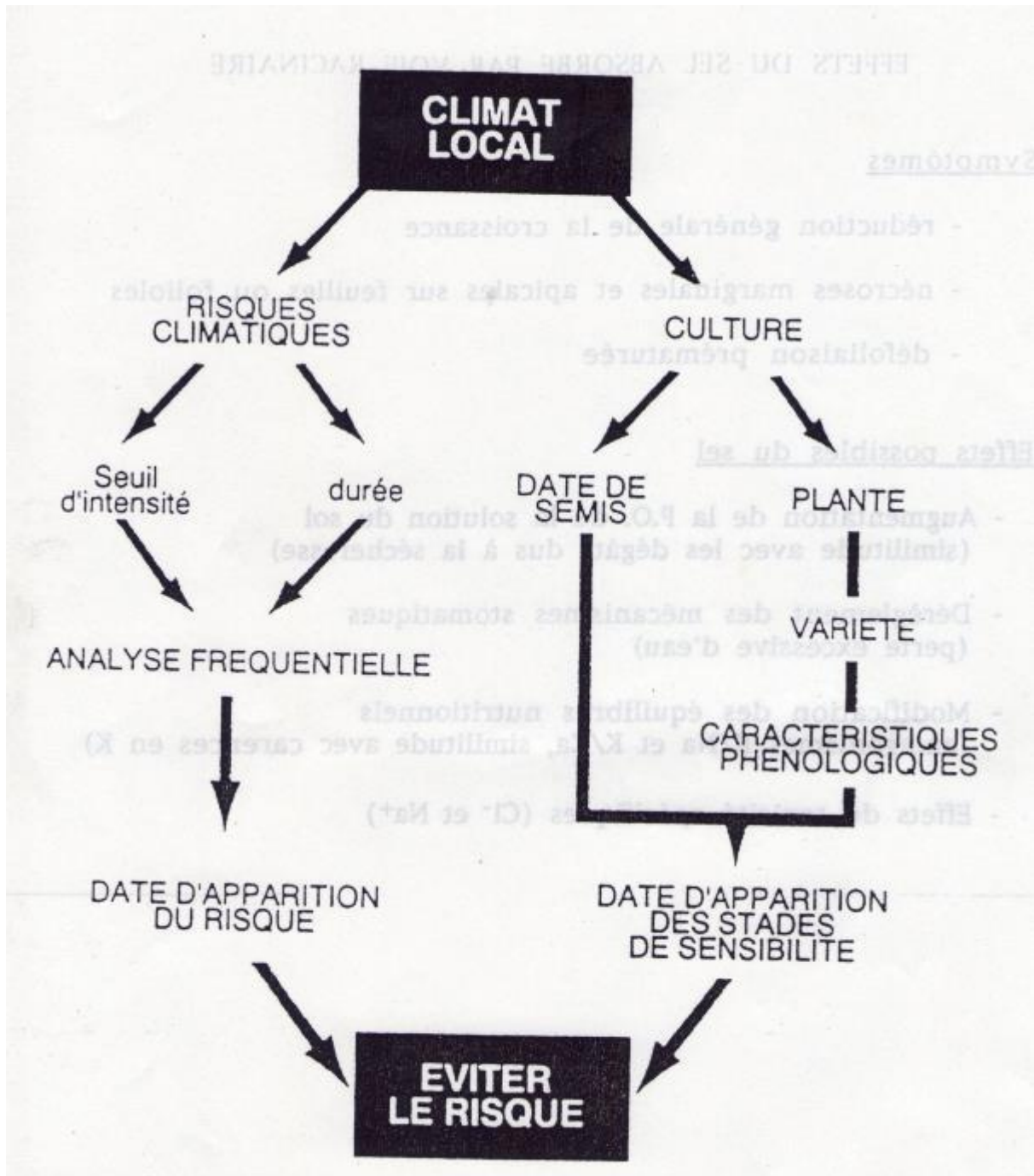
Annexes 6

Période Reproductrice : Trois Stades Repères



Annexes 7

Démarche Générale pour Eviter un Risque Climatique Encouru par une Culture dans un Milieu Donné (Maraite, 2002)



LEXIQUE DES PRINCIPAUX TERMES UTILISE

Agro-météorologie : Science d'étude de l'interaction entre agriculture (biologie) et météorologie (physique) dans le système de l'environnement «Sol –Culture– Atmosphère »

CropSyst : Modèle biophysique de la croissance de cultures

Décade : Dix Jours

Ombrothermique : Pluviothermique

Simuler : Estimer

Stress hydrique : Sécheresse ou excès d'eau

Pédologie : Sciences du sol