



Université d'Artois

EA 2468 DYRT

Dynamique des Réseaux et des Territoires



Université Félix Houphouët Boigny  
d'Abidjan



Institut de Géographie tropicale

**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 pour l'obtention du diplôme de Doctorat d'Université en Géographie

Spécialité : Géographie Physique

Présentée et soutenue publiquement par :

**Zamblé Armand TRA BI**

Le 20 juin 2013



**Sous la direction de Yao Télésphore BROU et Bidi Jean TAPE**

MEMBRES DU JURY

**Gil MAHE**, Directeur de Recherche à l'IRD (HydroSciences Montpellier), Rapporteur

**Koffi Fernand KOUAME**, Maître de Conférence à l'Université F.H.B d'Abidjan, Rapporteur

**Sylvie COUPLEUX**, Maître de Conférence à l'Université d'Artois, Examineur

**Zuéli KOLI Bi**, Professeur à l'Université F.H.B. d'Abidjan, Examineur

**Yao Télésphore BROU**, Professeur à l'Université de la Réunion, Directeur

**Bidi Jean TAPE**, Professeur à l'Université F.H.B. d'Abidjan, Co-directeur



A ma mère, dame Zamblé Lou, décédée quand je commençais mes premiers pas au département de Géographie de l'Université FHB d'Abidjan

A mon père victime d'un AVC pendant le début de cette thèse et handicapé depuis.  
Mes pensées quotidiennes sont pour vous. Et vous me donnez la force d'avancer

# Sommaire

<b>Résumé</b> .....	<b>6</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>9</b>
1. Contexte de l'étude et motivation scientifique.....	10
1.1. Des activités agricoles et pastorales soumis à une baisse de la pluviosité .....	10
1.2. Activités agricoles – disponibilité de la ressource en eau – pression sur le milieu .....	14
1.3. Activités pastorales – dégradation du milieu physique .....	17
2. Problématique et objectif de l'étude .....	18
2.1. Problématique .....	18
2.2. Objectifs de l'étude .....	21
3. Méthodologie générale de l'étude.....	22
<b>Chapitre I : Cadre géographique de la dynamique de la végétation et de l'occupation du sol</b> .....	<b>24</b>
Introduction .....	24
1. Cadre physique du bassin versant du Bouregreg .....	25
1.1. Cadre géomorphologique (Beaudet, 1969 ; Marghich, 2004).....	25
1.2. Cadre géologique et lithologique (Moshine, 2009 ; Atlas du Maroc, 2002) .....	26
1.3. Cadre pédologique .....	26
1.4. Cadre hydro-climatique du bassin versant du Bouregreg .....	29
1.5. La couverture végétale du bassin versant du Bouregreg (Berkat et Tazi, 2004 ; Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, 1992) .....	31
1.6. Importance du cadre physique du bassin versant du Bouregreg dans la dynamique de la végétation .....	33
2. Impact du cadre politique et économique local sur la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg (Michel et Ruellan, 1967 ; Bouderbala, 1999).....	33
2.1. Les modes de faire-valoir .....	34
2.2. La répartition de la propriété.....	35
2.3. Un calendrier agricole axé sur la céréaliculture et l'élevage extensif .....	36
<b>Chapitre II : Dynamique saisonnière et pluriannuelle de la végétation de 1980 à 2009 à partir d'images de basses résolution spatiale</b> .....	<b>40</b>
Introduction .....	40
1. Données et techniques d'analyse de la dynamique de la couverture végétale .....	41
1.1. Données.....	41
1.2. Techniques d'analyse de l'évolution de la végétation.....	42
2. Détection et suivi des saisons culturales : analyse par maille .....	49
2.1. Dynamique pluriannuelle globale de la productivité végétale .....	49
2.2. Une baisse de l'activité végétale en période estivale .....	51
Conclusion.....	72
<b>Chapitre III : Vulnérabilité de la végétation et des sols en relation avec les variabilités climatiques et les activités agropastorales</b> .....	<b>74</b>

Introduction .....	74
1. Techniques d'analyse de l'évolution de l'occupation du sol dans sa relation avec la variabilité climatique et les activités agropastorales.....	75
1.1. Exploration et spatialisation des données pluviométriques .....	75
1.2. Elaboration de la carte d'occupation du sol .....	78
1.3. Cartographie de la dégradation des sols par analyse des indices spectraux .....	82
2. Les facteurs climatiques de la dynamique de la végétation .....	87
2.1. Dynamique spatiotemporelle des précipitations de 1980 à 2009 .....	87
2.2. Analyse de l'impact de la variabilité climatique sur le dynamisme de la végétation dans le bassin versant du Bouregreg.....	93
3. Les facteurs anthropiques de la dynamique de la végétation .....	114
3.1. Elaboration de la carte d'occupation du sol .....	114
3.2. Une pression démographique de plus en plus importante sur le littoral et les espaces agricoles ...	120
3.3. Les transformations des paysages végétaux .....	125
4. La dégradation des sols : une résultante de la combinaison des facteurs climatiques et anthropiques ...	136
4.1. Des sols fragiles .....	136
4.2. Un bassin marqué par d'importantes dégradations des sols de 1980 à 2009.....	138
4.3. L'aval du bassin versant du bouregreg, une exemple des pressions anthropiques et climatiques ..	144
<b>Chapitre IV : Risques et scénarios futurs de dégradation du bassin versant du Bouregreg, horizon 2050 et 2100 .....</b>	<b>147</b>
Introduction .....	147
1. Analyse du risque de dégradation des terres à moyen terme.....	148
1.1. Une méthodologie SIG inspirée du projet MEDALUS (Mediterranean Desertification and Land Use) .....	148
1.2. L'indice de la qualité du sol (IQS) .....	149
1.3. L'Indice de la Qualité de la Végétation.....	149
1.4. L'Indice de la Qualité du Climat (IQC) .....	151
2. Analyse des scénarios de changement climatique du bassin et impact potentiel sur l'agriculture.....	157
2.1. Les modèles climatiques régionaux utilisés : ALADIN, CRCM, RACMO .....	157
2.2. Comparaison entre les données des modèles et les données observées.....	159
2.3. Evolution des précipitations et des températures jusqu'en 2050 et 2100 .....	160
2.4. Evolution bioclimatique (2050, 2100) du bassin du Bouregreg .....	163
<b>Conclusion générale et perspective.....</b>	<b>170</b>
Références bibliographiques .....	173
<b>Table des matières.....</b>	<b>183</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>186</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>187</b>

## REMERCIEMENT

Cette thèse a été pour moi l'occasion de découvrir avec un agréable plaisir le monde de la coopération universitaire en matière de recherche scientifique. Ce travail est ainsi le fruit d'une coopération Sud – Sud et Nord – Sud qui a été facilitée par le soutien de certaines personnes et de certaines institutions que je tiens à remercier.

Lorsque j'arrivais en France dans le cadre de ma thèse en cotutelle avec l'Université d'Artois, je travaillais déjà sur un sujet de recherche relatif à la géographie de la santé à Abidjan. Mais lorsque la proposition m'a été faite par le Professeur Brou Yao Télesphore, alors en service au laboratoire DYRT du département de Géographie, d'intégrer le projet SIGMED, je n'ai pas hésité un instant parce que je savais qu'auprès de lui j'apprendrais énormément. Plus qu'un encadrant, il a été un grand frère pour moi en France. Je tenais à travers ces quelques lignes à lui témoigner toute ma reconnaissance car il reste pour moi un modèle. A lui et à son épouse je dis merci !

Mes arguments de géographe ont été forgés auprès de grands maîtres de la géographie tropicale à Institut de Géographie tropicale de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan. Parmi ceux-ci, je voudrais être reconnaissant particulièrement à mon codirecteur de thèse, le Professeur TAPE Bidi Jean, qui, depuis mes premiers pas au département, m'a marqué comme un exemple de rigueur dans l'analyse géographique. Ces conseils avisés m'ont certainement permis d'aller au bout de ce travail. Qu'il en soit remercié.

A l'IGT, l'on ne peut pas parler, penser analyser et réfléchir « géographie physique » sans penser au Responsable de la discipline, le Directeur du laboratoire des milieux naturels tropicaux (LAMINAT), le Professeur KOLI Bi Zuéli. Cet homme m'a donné les armes nécessaires à l'analyse et à la compréhension de la discipline. L'on ne peut pas être géographe physicien au département s'en s'identifier à lui. Je voudrais lui dire, à lui et son épouse, infiniment merci !

Cette thèse a bénéficié du soutien financier, administratif et scientifique de l'Institut de la Recherche pour le Développement (IRD). Je voudrais en cela remercier le Directeur de l'Unité de Recherche HydroSciences de Montpellier, M. SERVAT Eric, qui a soutenu ma candidature lorsque je postulais pour la bourse de l'Institut. Sur le plan pratique de mes recherches, j'ai bénéficié de plusieurs séjours au Maroc pendant lesquels j'ai eu droit au soutien administratif et surtout au soutien scientifique de mon troisième encadreur véritable, M. MAHE Gil, responsable du projet SIGMED. La question que je me suis souvent posé était de savoir à quel moment prenait-il du repos ?, car pour moi c'est un chercheur infatigable. Je tiens à lui être particulièrement reconnaissant pour ces conseils et surtout pour le rythme de travail acharné qu'il m'a imposé. A travers lui, je voudrais remercier les autres membres du projet. Ma reconnaissance va particulièrement à l'endroit de DIEULIN Claudine, Géomaticienne à l'IRD et chargé de la gestion de la base de donnée du projet SIGMED. Mon séjour depuis le premier jour au Maroc a été facilité par le Professeur EMRAN Anas de l'Institut Scientifique de Rabat. Il m'a ouvert les portes de l'Institut, mais il m'a surtout permis de me former en télédétection et SIG au Centre Régional Africain des Sciences et Technologies de l'Espace en Langue Française (CRASTE-LF, affilié à l'ONU). La formation

dans ce centre a d'ailleurs été couronnée par un Master. Je tiens à lui dire « *choukrane* » de tout cœur. Mes sorties sur le terrain d'étude ont souvent été possibles grâce à l'aide des Enseignants et Chercheurs du département de géographie de l'Université Mohammed V de Rabat. Je tiens à leur témoigner ma gratitude pour leur disponibilité et leur aide combien importante.

A mon épouse, je voudrais être reconnaissant pour sa patience et son soutien moral pendant ces années de recherche où le travail a souvent pris le dessus sur la vie de famille. Merci Yasmine !

A mes frères et sœurs je dis aussi merci pour leur soutien moral.

## Résumé

Le bassin versant du Bouregreg est situé dans le centre Nord-ouest du Maroc. C'est un bassin semi-aride de la partie humide de ce royaume. L'agriculture constitue un pilier essentiel de l'économie marocaine. Cependant, la surface agricole utile du pays reste très limitée à cause de conditions climatiques défavorables. Cette surface agricole utile, localisée principalement dans les régions humides, ne représente qu'environ 20% du territoire national, d'où un intérêt particulier pour les espaces agricoles favorables comme le bassin versant du Bouregreg. En outre, bien que le Maroc ait entrepris d'importants investissements en matière d'irrigation depuis l'indépendance, certains espaces comme le bassin du Bouregreg sont restés en marge de cette politique pour des raisons liées à leur fragilité naturelle. Paradoxalement, malgré l'attention particulière accordée à l'agriculture irriguée dans les différentes politiques de développement agricole depuis l'indépendance, l'agriculture pluviale reste la principale source de production agricole, surtout céréalière. Ainsi, cette agriculture pluviale, associée à un important élevage extensif, se concentre de plus en plus sur des espaces climatiquement favorables comme le bassin du Bouregreg, sans tenir compte de la fragilité des sols et du couvert végétal naturel de ces espaces. L'étude présente, menée avec le soutien du projet SIGMED (approche Spatialisée de l'Impact des activités agricoles au Maghreb sur les transports solides et les ressources en Eau Des grands bassins versants), met en relief la dynamique spatiale et temporelle de la végétation et des sols du bassin du Bouregreg sous l'action combinée de pressions anthropiques et climatiques défavorables de 1980 à 2009. Cette étude fait appel à l'outil de télédétection, de statistique et de SIG. L'analyse de télédétection est faite à partir d'échelles multiples, de la basse résolution à la très haute résolution spatiale. Il en est de même de l'analyse temporelle où sont exploitées, à la fois, des images de très grande répétitivité temporelle (NOAA et MODIS) et des images de basse résolution temporelle (LANDSAT et SPOT 5). L'exploitation de ces images combine la télédétection et les analyses statistiques de série chronologiques et de corrélation. L'analyse des interactions diverses entre la dynamique des facteurs naturels, notamment climatiques, et celle des facteurs anthropiques est réalisée par système d'information géographique. Pour pousser la réflexion dans le domaine de la prospective géographique quant au devenir de ce bassin dans un environnement climatique de plus en plus défavorable, des analyses climatiques ont été faites à partir de projection de modèles climatiques régionaux pour les horizons 2050 et 2100. Les principaux résultats de cette étude indiquent une baisse marquée de la productivité végétale due à une dégradation de plus en plus importante du milieu sous actions agropastorales et climatiques. Sur la base des projections des modèles climatiques, cette dynamique est amenée à se poursuivre, si bien qu'au-delà de 2050, le système de production agricole pluvial sera amené à disparaître, d'où l'importance de la question de l'adaptation du bassin aux conditions d'un changement climatique.

## Abstract

The Bouregreg watershed is located in the Northwest central Morocco. It's a semi-arid basin of the humid part of the kingdom. Agriculture is a key pillar of the Moroccan economy. However, the agricultural area of the country is limited due to adverse climate conditions. This agricultural, area located in humid regions is only 20% of the national territory, hence a particular interest in favorable agricultural areas as Bouregreg watershed. Furthermore, although Morocco has undertaken major investments in irrigation, some areas such as the Bouregreg basin remained on the sidelines of this policy for reasons related to their natural fragility. Paradoxically, despite the attention given to irrigated agriculture in the various agricultural development policies of the country since independence, rainfed agriculture remains the main source of agricultural production, especially grain. Well, this rainfed agriculture associated with a significant ranching, focuses more on climatically favorable areas such as the Bouregreg basin, without taking into account the fragility of the soil and natural vegetation of these areas. The present study, conducted with the support of the SIGMED project, highlights the spatial and temporal dynamics of vegetation and soil of the Bouregreg basin under the combined action of adverse anthropogenic and climatic pressures from 1980 to 2009. This study uses the tool of remote sensing, GIS and statistical. Analysis of remote sensing is made from multiple scales from low resolution to high spatial resolution. It is the same for the temporal analysis, where are used both images of high temporal repetitiveness (NOAA and MODIS) and low temporal resolution (LANDSAT AND SPOT 5). Exploitation of these images combines remote sensing and statistical time series analysis and correlation. Analysis of various interactions between the dynamics of natural factors, including climate, and the anthropogenic factors, is carried out by GIS. For further reflection in the field of geographical prospective about the future of the basin in a climate environment increasingly unfavorable, climate analyzes were made from projections of regional climate models for 2050 and 2100 horizons. The main results of this study showed a significant decrease in plant productivity due to more increasing degradation caused by farming and climate actions. Based on the projections of climate models, this dynamics is likely to continue, so that beyond 2050, the system of rainfed production will have to disappear. As for forest formation, they should suffer as result more pressure which should lead to their disappearance. If an effective backup policy is not implemented. This dynamics to be highlights the importance of the issue of adaptation basin conditions of climate change.

## **SIGLES ET ABREVIATIONS**

ACP : Analyse en Composante Principale

ASTER: Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

CERGEO: Centre d'Etudes et de Recherches Géographiques

CN : Compte Numérique

DMN : Direction de la Météorologie Nationale

FAO: Food and Agriculture Organization

GDEM: Global Digital Elevation Map

GIEC: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GIMMS: Global Inventory Modeling and Mapping Studies

GLIPHA: Global Livestock Production and Health Atlas

GPS: Global Positioning System

MAGICC: Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change

MCG: Modèle de Circulation Générale

MCR: Modèles Climatique Régionaux

MVC : Maximum Value Composite

MVR : Méthode du Vecteur Régional

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

ORSTOM: Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer

PIB : Produit Intérieur Brut

PIBA : Produit Intérieur Brut Agricole

PNABV : Plan National d'Aménagement des Bassin Versants

RGA : Recensement Général de l'Agriculture

SAVI : Soil Adjusted Végétation Index

SIG : Système d'Information Géographique

SIGMED : approche Spatialisée de l'Impact des activités agricoles au Maghreb sur les transports solides et les ressources en Eau Des grands bassins versants

TCI : Température Condition Index

UGB : Unité de Gros Bétail

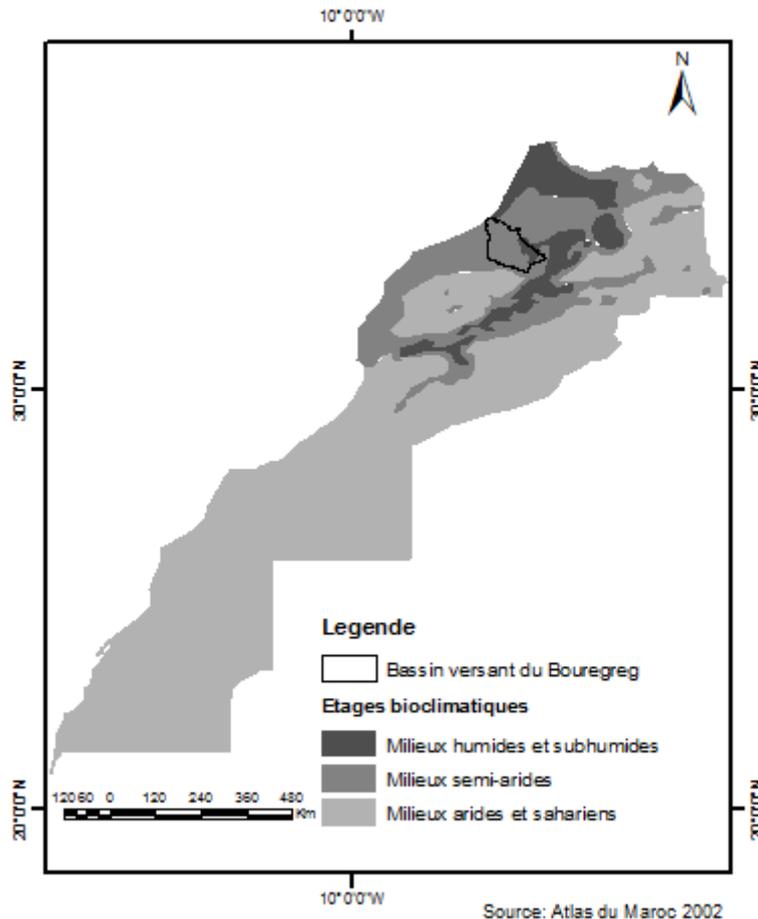
UF : Unité Fourragère

VCI : Végétation Condition Index

# **Introduction générale**

## 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 1). Cette répartition spatiale bioclimatique constitue la base de l'ensemble des problématiques liées à la dynamique agro-sylvo-pastorale du pays.



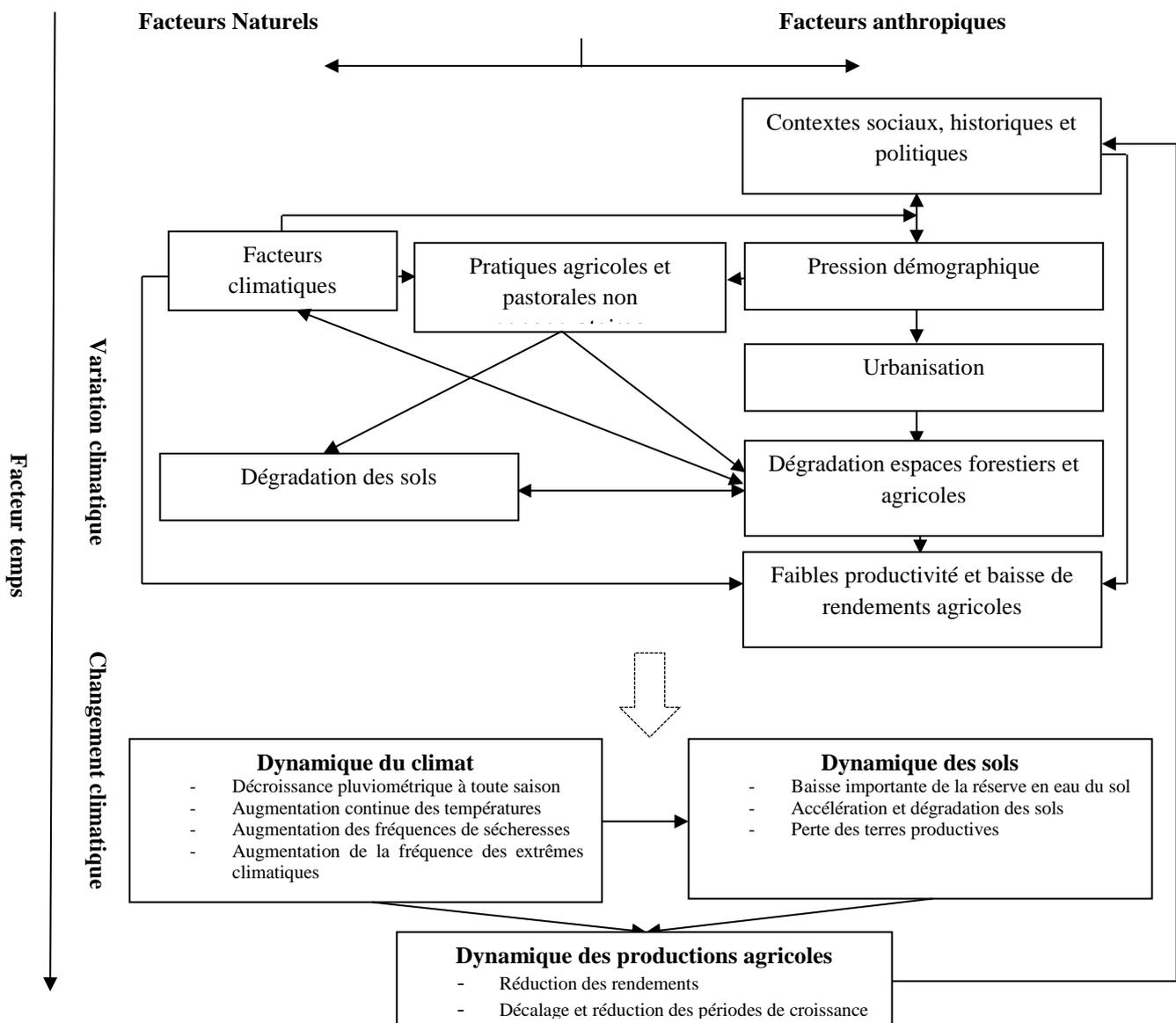
**Fig.1 :** Localisation du bassin versant du Bouregreg

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 (figure 2).

### 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 à 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. Au niveau saisonnier, en plus de

la baisse constatée des précipitations d'hiver, les débuts et fins de saison pluvieuses (septembre à mai ou automne à printemps) connaissent des perturbations importantes. Laouina et al. (2004), travaillant sur la dynamique de l'eau et la gestion des terres dans le bassin versant du Bouregreg, aboutissent à la remarque qu'à Rabat, par exemple, le début de la saison des pluies (saison d'automne) comporte la plus grande variabilité notamment au cours des mois de novembre et décembre (les journées sont sèches dans 50% des cas). Par contre Zeggaf et al. (2002), étudiant la relation entre cette variation du climat et la production de céréale à petites graines au niveau national, constatent que les déficits de fin de cycle caractérisent toutes les stations de l'étage aride et semi-aride marocain. Blinda et Thivet (2009) confortent cette thèse et expliquent que les déficits pluviométriques annuelles seraient liés à un déficit d'apport (précipitation) d'hiver et de printemps et/ou une amplitude et une longueur de sécheresse estivale plus accentuée.

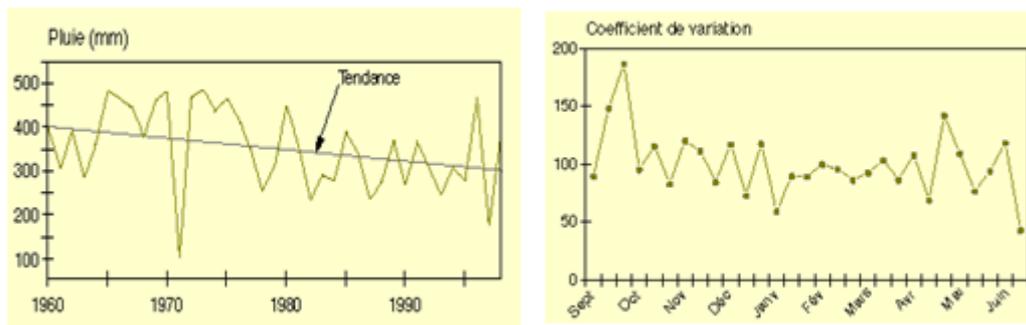


**Fig. 2:** Processus de dégradations des espaces agricoles et forestiers dans le bassin versant du Bouregreg

L'évolution saisonnière des températures connaît aussi des variations notables. Les températures minimales et maximales d'été sont marquées par des tendances à la hausse. Quant aux températures minimales d'hiver, elles montrent une tendance à la baisse (Agoumi et Debbarh, 2006).

Pour résumer ces variations, moussa et al. (2009) conclut à une diminution de l'importance du printemps et de l'automne. Le climat marocain tend vers un climat bi-saison : hiver-été.

L'analyse de l'évolution interannuelle du climat du Maroc (figure 3) obéit à l'évolution générale constatée du climat africain : celui d'une baisse substantielle des précipitations depuis les années 1970 ou 1980 et d'une hausse des températures



**Fig. 3:** Evolution temporelle des précipitations de la zone semi-aride du Maroc (Benseddik et Benabdelli, 2000)

Différentes études de l'évolution temporelle des précipitations et des températures réalisées par la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc et reprises par plusieurs auteurs, indiquent des ruptures dans les séries pluviométriques nationales à deux principales dates : le début des années 1970 ou la fin des années 1970.

Ainsi, l'analyse de l'évolution des indices pluviométriques par Benassi (2001) indique une tendance à l'assèchement à partir de 1971. Pour la période 1971-2000, il observe une baisse de 15% des apports pluviométriques par rapport à l'épisode 1960-1971. Cette analyse est proche de celles faites par Agoumi et Debbarh (2006), moussa et al. (2009), qui divisent la période 1961-2004 en une première période pluvieuse et normale de 1961 à 1972 et une période très peu pluvieuse entre 1972 et 2004 avec deux périodes sèches, longues et critiques : 1972-1995 et 1997-2004.

Par contre, Bahir et Mennani (2002), Barakat et Handoufe (1998), Zeggaf et al. (2002), Mahé et al., 2011, marquent la rupture dans la série interannuelle des précipitations à partir de 1978. A cet effet, la période 1978-1994 cumule 30% de pluviométrie en moins par rapport aux années 1961-1977. Sebbar et al. (2011) évalue la baisse de la pluviométrie dans le bassin versant du Bouregreg à 5 à 15%. La caractéristique la plus marquante de la dynamique à la baisse de la pluviosité est une hausse de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. Celles-ci ont souvent été considérées comme un élément conjoncturel du climat marocain. Cependant, à partir des années 1970 et 1980, les sécheresses, par leur occurrence et leur intensité se sont imposées comme un élément structurel de ce climat (Le Houerou, 1995 ; Barakat et Handoufe, 1998 ; Laouina, 2003 ; Stour et Agoumi, 2008 ; Sebbar et al., 2011). L'étude des sécheresses météorologiques (moteur des autres types de sécheresse) au cours du siècle dernier révèle que le Maroc, dans son ensemble, a connu 11 épisodes de sécheresses dont 5 entre 1980 et 2000 (Alibou, 2000 ; Bzioui, 2004 ; Balaghi et al., 2007). Sur les 11 années de la période 1991-2002, Doukkali (2006) constate que 9 années se situent en dessous

de la moyenne annuelle de l'indice pluviométrique entre 1961-2002. La sécheresse agricole qui permet de transposer cette réalité météorologique sur l'évolution phénologique des espèces végétales, est encore plus expressive. Le Maroc est passé, en effet, de 5 années de sécheresse sur 40 de 1940 à 1979, à 6 années sur 16 entre 1980 et 1995, puis à 4 années sur 7 entre 1996 et 2002 (Barakat et Handoufe, 1998). En plus de la récurrence de ces années sèches, leur intensité est de plus en plus importante. A cet effet, se basant sur les productions céréalières (production principalement pluviale), Barakat et Handoufe affirment que l'intensité des sécheresses qui ont touchées les zones semi arides comme le bassin du Bouregreg depuis 1980 est généralement supérieure à 30% avec un record de 60% en 1995. Ce phénomène climatique devient donc important à la fois quantitativement et qualitativement

La dynamique temporelle des températures présente la même situation que celles des précipitations à savoir un changement d'une marge de 2°C selon que l'on fixe le début de la rupture en 1978 et de 1°C selon qu'on la fixe en 1972.

Le constat qui se dégage de ces études est que le Maroc connaît d'importantes variations climatiques. Les différences constatées dans la fixation du début de ces variations sont dues à la longueur des séries temporelles, et aux types d'analyse : certaines études se basant sur l'étude de la sécheresse agricole et hydrologique, d'autres sur la sécheresse climatique.

Dans l'hypothèse d'un changement climatique à long terme dans les régions méditerranéennes Sud et au Maroc en particulier, les modèles de simulation du climat prévoient une accentuation des problèmes hydriques déjà constatés. En effet, les projections des modèles climatiques sur la région méditerranéenne Sud en générale et sur le Maroc en particulier, bien que souffrant d'imperfections comme tout autre modèle de prévision à moyen et long terme (Watson, 2001 ; Ambrosi et Courtois, 2004), sont unanimes quant à l'évolution future de la pluviométrie et des températures.

Au niveau de la Méditerranée Sud, Rozenzweig et Tubiello (1997), bien que reconnaissant ce peu de précision dans les prévisions relatives à l'évolution future des précipitations, soutiennent que les pays au sud de la Méditerranée connaîtront à terme une réduction importante de la disponibilité de l'eau pendant les saisons culturales. Arrus et Rousset (2007) indiquent à cet effet que les sorties du Modèle de Circulation Générale (MCG) MAGICC (Modele for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) prévoient une baisse des précipitations annuelles de l'ordre de 10 à 30% d'ici 2050 et de 20 à 50% en 2100. Ce changement de la pluviosité serait caractérisé par une augmentation de la fréquence des extrêmes climatiques, une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses ainsi que de la concentration des épisodes pluvieux sur un faible nombre de jours (les conditions climatiques défavorables de ces dernières décennies devenant la norme). Utilisant quant à eux le modèle HadCM3 pour des scénarios de changement climatiques A2 et B2<sup>1</sup> aux horizons 2030 et 2060, Giannakopoulos et al. (2009), indiquent également que les totaux pluviométriques annuels connaîtront une décroissance importante avec toutefois une variation spatiale relativement faible (inférieure à 10%) dans les zones subhumides et semi arides.

---

<sup>1</sup> **Scénario A<sub>2</sub>** = 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 écorégionales.

**Scénario B<sub>2</sub>** = 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 A<sub>2</sub>. Il s'agit des niveaux intermédiaires de développement et les progrès technologiques sont plus lents et plus variés.

Au niveau national, Van Dijck et al. (2006) travaillant sur la désertification dans la partie Nord du Maroc, ont utilisé le modèle climatique de circulation générale (MUGCM) réduit (MM5) sur la région des Sehoul (région avale et centre du bassin versant du Bouregreg) pour mettre en relief les changements attendus en 2050, dans le cadre des effets du changement climatique sur le Maroc à cette date. Ainsi, ce modèle climatique indique une baisse des précipitations affectant toutes les saisons en 2050 comparativement à 1990, et une plus grande variabilité des précipitations en saison automnale. Aussi, les précipitations connaîtront-elles une décroissance à toute saison, mais plus significativement au printemps et en été, respectivement de 0,2 à 0,3 mm/jour. En outre, la modélisation de la réserve en eau du sol indique que la recharge annuelle du sol par les précipitations connaîtra une baisse dans une proportion de 40 à 68% de 1990 à 2050.

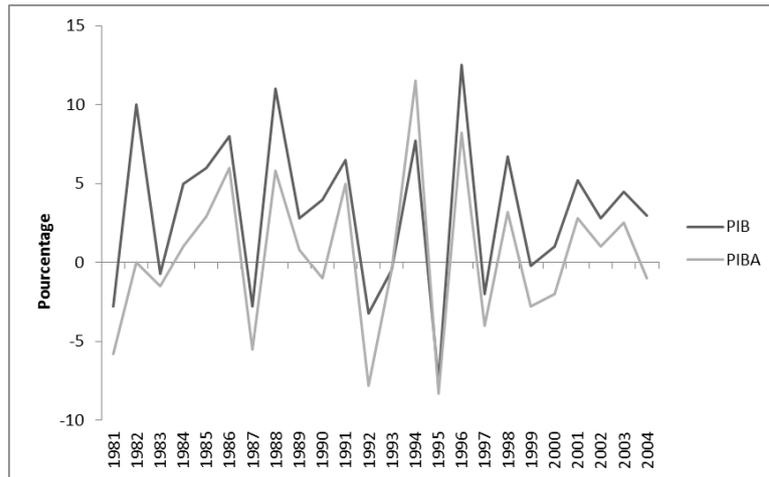
La dynamique future des températures, quel que soit le scénario utilisé est nettement à la hausse avec un degré de confiance plus élevé.

A cet effet, Rozenzweig et Tubiello (1997) estiment cette augmentation future des températures dans la zone méditerranéenne sud entre 0.3 et 5.5°C, dans l'hypothèse d'un doublement de la quantité de CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone). Pour l'horizon 2030 et 2060, l'augmentation des températures dans cette zone est estimée entre 1,8 et 2,2°C (Giannakopoulos et al. 2009). Arrus et Rousset (2007) prévoit une augmentation continue de ces températures de 2000 à 2100 (1°C entre 2000 et 2020, 3°C jusqu'en 2050 et plus de 5°C au-delà de 2100). Au niveau du bassin du Bouregreg, selon les modèles, les températures connaîtront en 2050, une augmentation de 2,4 kelvins en hiver, au printemps et en été. En Automne, cette augmentation est estimée à 1,7 kelvins (Van Dijck et al., 2006 ; Gommes et al., 2009). Les changements climatiques auront pour effet d'amplifier les mutations déjà observées au niveau agricole au Maroc. « *L'augmentation des températures, la diminution des précipitations et l'augmentation de leur variabilité implique un décalage et une réduction des périodes de croissance, ainsi qu'une accélération de la dégradation des sols et de la perte des terres productives* » (Arrus et Rousset, 2007). Une réduction importante des rendements agricoles est donc attendue. Toutefois, les proportions de cette réduction restent diversement appréhendées. Pour Arrus et Rousset (2007), les cultures pluviales et les céréales en particulier connaîtront, au Maroc, une baisse de 10% en année normale à près de 50% en année sèche d'ici 2020 (sur la base du modèle de prévision agroclimatique CropWat du FAO (Food and Agriculture Organization). Par contre, dans la zone agro-écologique couvrant le bassin du Bouregreg, Gommes et al. (2009), avancent que de manière générale, les rendements agricoles resteront plus ou moins stables jusqu'en 2030, puis connaîtront une baisse assez rapide au-delà de cette date.

Les changements climatiques devraient donc avoir pour effet principale sur les cultures, une baisse considérable des rendements, même si dans l'hypothèse d'une augmentation de l'irrigation couplée à une hausse des températures un effet contraire serait attendu (Gommes et al., 2009).

## **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 (figure 4), les productions agricoles étant elles même très influencées par la variation des quantités pluviométriques.



Source : Narjisse (2005)

**Fig. 4 : Dépendance du PIB des aléas de la production agricole**

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. C'est la politique des barrages visant à atteindre le million d'hectare irrigué en 2000. Cette politique lancée officiellement en mars 1967, s'est appuyée sur les caractéristiques physiques des régions agro-écologiques du Maroc (régions présentant une certaine homogénéité en termes de forme de relief, sols et substrats, précipitations et périodes végétatives). Ainsi, le bassin versant du Bouregreg appartient à la zone agro-écologique de la Mamora et du plateau central marocain. Cependant, à la différence des bassins versant avoisinants appartenant à la même zone agro-écologique (Chaouia et Sebou par exemple), le bassin versant du Bouregreg restera en marge de cette politique d'irrigation, compte tenu de ses caractéristiques hydrogéologiques défavorables. Ainsi, les périmètres irrigués vont concentrer toute l'attention des politiques en matière d'investissement et donc de modernisation agricole (Akesbi, 2005). Sont nées alors des disparités à la fois spatiales (au niveau des investissements de l'état dans le secteur agricole) et culturelle. Des terres de moindre qualité (manque d'eau ou d'autres contraintes physiques ou chimiques) ont donc été affectées à l'agriculture pluviale, à la foresterie ou au développement de l'élevage extensif (Badraoui, 2006). Force est de constater qu'aujourd'hui, l'agriculture pluviale demeure de loin la plus pratiquée au Maroc. Seulement moins de 5% des terres cultivables du Maroc ont bénéficié de la quasi-totalité des investissements agricoles dans le cadre de la politique du "million d'hectares irrigués" (objectif atteint en 2001). L'agriculture pluviale couvre ainsi près de 90% de la Surface Agricole Utile (SAU) du Royaume et est dominée à environ 70% par la céréaliculture. Elle occupe 82% de la population rurale (Jouve et al., 1995 ; Royaume du Maroc, 2006 ; Narjisse, 2006). Le bassin versant du Bouregreg est de fait destiné principalement à une agriculture pluviale. Une étude du FAO en 1975, cité par le Rapport sur l'Etat de l'Environnement du Maroc (REEM, 1998) avait déterminée, pour le bassin du Bouregreg / Chaouia, 54% de terre à ne pas cultiver compte tenue de la dégradation que cela engendrerait au niveau des sols. Cependant, aujourd'hui, cet espace est intensément mis en valeur au niveau agricole et pastorale.

Une seconde contrainte humaine sur l'espace agricole du bassin s'explique par l'histoire coloniale du pays et les statuts juridiques des terres. Une étude menée sur le pays Sehoul (aval et centre du bassin) par Laouina (2003) ; Laouina et al. (2004) indique que pendant la période

coloniale (1912-1956), une grande partie des terres fertiles fut accaparée par les colons. Ce schéma s'est conservé après l'indépendance avec le remplacement de ces colons par la bourgeoisie urbaine. Le glissement des populations locales vers les terres de faibles aptitudes agricoles est à l'origine de dégradations importantes du sol (érosion) mais aussi de pressions agro-pastorales sur les espaces forestiers. Cette pression sur ces espaces agricoles et forestiers est accentuée au niveau du littoral par l'urbanisation croissante. La population urbaine du littoral est passée de 19,4% en 1936 à 54% en l'an 2000. Les deux agglomérations de Casablanca et de Rabat – Salé – Zemmour – Zaer (dont appartient le bassin du Bouregreg) accumulent près de 62% de la population urbaine littorale nationale (Berraho et al., 2006 ; Bessaoud et Montaigne, 2009). La pression humaine sur l'espace agricole réduit le temps de jachère qui a tendance à passer d'une jachère biennale à une jachère annuelle (Laouina, 2003). En outre, la pression démographique réduit considérablement la taille des exploitations agricoles. La superficie cultivée par habitant a diminué de moitié en 40 ans passant de 0,46 ha/habitant en 1965 à 0,25 ha/habitant en 2003. 70% de ces exploitations ont moins de 5 ha et sont excessivement morcelées. D'autres contraintes relatives au foncier agricole marocain (extension de l'indivision (45% des exploitations), la multiplicité des statuts fonciers (melk privé (propriété privée), collectif (propriété collective), guich (propriété de l'état), habous (propriété des habous publics)) ne garantissent pas des conditions de sécurité et de stabilité, et amènent souvent à des stratégies de contournement. Ce qui aboutit enfin à une dégradation de l'espace rurale (Abaab et al., 1995 ; Driouchi, 1995 ; Daoudi, 2011 ; Jouve et Napoléone, 2011).

La dynamique de dégradation de l'environnement rurale déjà entamée par l'action humaine est accélérée par des conditions climatiques de plus en plus défavorables (Haut-commissariat au Plan, 2006). La saison automnale qui correspond au début de la saison culturale et pendant laquelle les terrains agricoles sont nus et préparés pour les cultures annuelles (céréales et légumineuses principalement), est la période de plus grande dégradation liée à l'érosion des sols. Il existe, selon le FAO, (BM, 2003), 5 causes de dégradation des terres en milieu rural marocain : la déforestation, le surpâturage, l'activité agricole, la surexploitation de la biomasse et l'activité industrielle. Aussi, 19% des terres au Maroc subissent-elles une dégradation sévère à très sévère (8,7 millions d'hectare). 100% de ces dégradations sévères<sup>2</sup> le sont ainsi par le fait de l'activité agricole et pastorale. L'expression agronomique de l'évolution de la dégradation des terres sous l'action combinée des activités anthropiques et du climat est la baisse des rendements agricoles, surtout céréaliers (Akesbi, 2006). Laouina (2003) affirme à cet effet que le maintien des rendements agricoles au même niveau, dans les régions en voie de dégradation, malgré les apports chimiques et la sélection des grains est significatif d'une perte en sol non négligeable. Cette analyse est confortée par l'étude de la Banque mondiale (2003) et par Pintus (2009) qui constatent une décélération des rendements des cultures céréalières. La production céréalière a ainsi connu, un taux de croissance annuelle moyen insignifiant de l'ordre de 0,52% essentiellement du fait d'une augmentation des superficies. Benseddik et Benabdelli (2000) analysant l'impact du risque climatique sur le rendement du blé dur en zone semi-aride au sud de la méditerranée constatent que le rendement moyen de cette céréale en 1871 et 1875 est analogue de celui de 1991-1995, soit 6 à 8 quintaux/hectare. Cette analyse est semblable à celle faite par Akesbi (2006) lorsqu'il constate qu'en ce qui concerne les céréales (qui couvrent tout de même plus des deux tiers des

---

<sup>2</sup> « Une classe « sévère » correspond à plusieurs combinaisons de degré et d'étendue de la dégradation. On peut en tirer les combinaisons suivantes :

- Soit que 10 à 25% de l'étendue des terres subissent une dégradation forte ;
- Soit que 25 à 50% de l'étendue des terres subissent une dégradation modérée ;
- Soit que 50 à 100% de l'étendue des terres subissent une dégradation légère » (Banque Mondiale, 2003)

surfaces cultivées du Maroc), les rendements tout au long de la décennie 90 se sont élevés en moyenne à 10,3 quintaux par hectare seulement, ce qui dépasse d'à peine deux quintaux le niveau atteint durant les années cinquante, voire les années 30.

L'interaction dynamique entre activités agricoles et conditions naturels de mise en valeur abouti, dans le bassin du Bouregreg, à une importante dégradation des qualités agronomiques des sols par érosion et perte des qualités physico-chimiques de ceux-ci. Ce qui conduit en définitive à une stagnation, voire à une baisse importante des rendements de certaines cultures comme les céréales et les légumineuses.

### **1.3. Activités pastorales – dégradation du milieu physique**

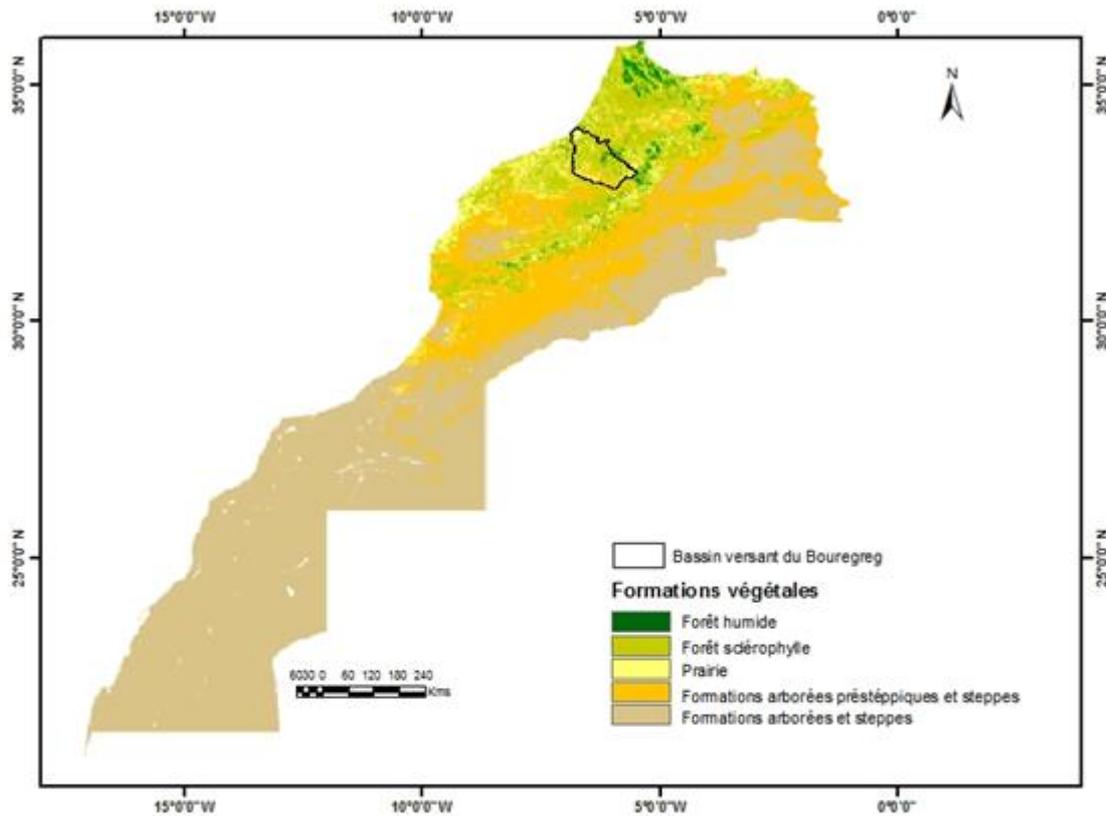
Les terrains de parcours au Maroc couvrent une superficie globale de 53 million d'hectares dont 21 million de parcours de steppe (figure 5). Ils assurent 30% des besoins alimentaires du cheptel national. 32 millions de ces parcours sont permanents. Les espaces forestiers représentent une part importante de ces parcours permanents. Les forêts contribuent pour 17% des besoins alimentaires du cheptel (Benbrahim et al., 2004 ; Balaghi et al., 2007). Ainsi, « l'écart entre les prélèvements des Unités Fourragères (UF) par les bovins, ovins et caprins et la production potentielle en UF par les milieux naturels implique un déficit de production de 23%. Ce déficit est prélevé par les populations sur le capital végétal régénérateur et provoque des déficits d'ébranchage, d'écimage et enfin la disparition de la végétation naturelle » (REEM, 2001). De par sa position géographique, le bassin versant du Bouregreg bénéficie d'une relative abondance de pâturage. Cependant, le déficit de satisfaction des besoins du cheptel reste malgré tout important. En effet, les surfaces de parcours représentent 43% (425859 ha) de la superficie du bassin (tableau 1). L'ensemble des productions fourragères ne satisfait que 43% des besoins alimentaires du cheptel. Les espaces favorables au pâturage permanent que sont les forêts connaissent de fait un surpâturage de plus en plus croissant. Les espaces de jachère et de forêt subissent de très fortes charges animales. Cette charge animale dans les régions forestières, en l'occurrence les forêts du bassin du Bouregreg, sont 4 à 5 fois supérieures à la normale. Ces pressions sur les espaces forestiers sont accentuées pendant les périodes de sécheresses sévères. Selon Berraho (2006), ce sont près de 10 millions de tête qui pâturent dans les domaines forestiers marocains. Ces domaines accusent un déficit dépassant les 30% sous une pression 200 à 300 fois ses possibilités herbagères. Ce qui représente une des principales causes de dégradation des écosystèmes forestiers. En outre, les terres de parcours collectifs sont surexploitées du fait du non-respect des réglementations coutumières (Abaab et al., 1995 ; Bourbouze et Donadieu, 1987 ; Laouina, 2003).

Les parcours connaissent ainsi une dégradation importante qui est la conjugaison de Facteurs climatiques (sécheresses récurrentes et agressivité climatique) et anthropiques (défrichement, émondage, surpâturage, exploitation irrationnelle de certaines espèces pastorales à des fins domestiques ou industrielles). Sur 32 millions d'hectares de parcours permanents que compte le royaume, 8 millions d'hectares sont fortement dégradés, et seuls 4 millions sont faiblement dégradés (Berraho, 2006). En somme, la pression sur les terres de parcours conduit à une dégradation de la végétation pérenne et à une apparition de sols dénudés sujettes à l'érosion. Ce qui a pour résultat final un manque à gagner important pour les pasteurs.

**Tableau 1 : Besoins fourrager du cheptel dans le bassin versant du Bouregreg**

Bassin versant	Superficie Km <sup>2</sup>	Surface parcours ha	Besoins fourragers en 1000 UF	Production fourragère des parcours en 1000UF	UF des Cultures en 1000UF	Total	Production/ besoins
Bouregreg	9800	425859	325033	52168	86260	138428	43%

Source : PNABV, Eaux et Forêts



Source: Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS)

**Fig. 5: Les grands ensembles biogéographiques du Maroc**

## 2. Problématique et objectif de l'étude

### 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 spatial 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. Les études menées par Laouina et al., (2010), Aderghal et al., (2011) par exemple ont pris pour cadre géographique un espace socioculturel (le pays Sehoul). Aussi,

bien que cet espace soit homogène, au niveau culturel, les recherches qui y sont menées sont difficilement généralisables à l'ensemble du bassin car les réalités physiques (au niveau hydro-climatologique, pédologique et topographique) et socioculturelles diffèrent souvent considérablement. Les études menées dans ces espaces beaucoup plus réduits comme dans les sous bassins ou des espaces culturels homogènes répondent aux soucis de travailler sur un territoire suffisamment homogène soit au niveau physique, soit au niveau humain. Ceci d'autant plus que les méthodes de télédétection et de SIG destinées à mettre en relief la dégradation d'un milieu donné à partir de la dynamique temporelle de l'interaction milieu physique-activités anthropiques produisent des résultats beaucoup plus satisfaisants sur des espaces homogènes que sur de grandes régions hétérogènes. C'est le cas des modèles destinés à étudier l'érosion des sols et qui intègrent des variables liées à la fois au milieu physique mais aussi aux activités anthropiques (Wischmeier, 1976 ; Bonn, 1998 ; El Garouani et al., 2008). En outre, ces études ce sont, dans beaucoup de cas, intéressées à des sites prioritaires nécessitant une intervention d'urgence, ou à des sites présentant une topographie suffisamment accidentée (Banque Mondiale, 2003 ; Sadiki et al, 2004 ; Bannari et al, 2007 ; Chikhaoui et al., 2007 ; El Garouani et al., 2008). Le bassin versant du Bouregreg est au niveau topographique constitué de plaines et de plateaux moyennement accidentés (figure 6 et 7). Aussi, l'étude de la dégradation du milieu naturel du fait de l'action combinée des activités humaines et de la dynamique naturelle du milieu physique à l'échelle de l'unité géographique du bassin versant du Bouregreg tout entier n'a jamais été réalisée. En outre, quand bien même, au niveau régional, le bassin versant du Bouregreg soit dans le même espace climatique que d'autres bassins humides comme celui du Sebou et pour lequel certaines études régionales les classent dans la même unité agro-climatique (Kosmas et al., 1999 ; Sobrino et Raissouni, 2000 ; Balaghi et al., 2008 ; Gomes et al., 2009 ; Höpfner et Scherer, 2011), le bassin du Bouregreg reste défavorisé par ses conditions hydrogéologiques (bassin constitué de formations imperméables d'âge primaires). Cette structure géologique ne favorise pas le développement d'une agriculture irriguée. Ainsi, les études réalisées au niveau du bassin versant du Bouregreg, dans l'optique de faire un diagnostic de l'interaction entre les activités agricoles et leur cadre physique dans l'environnement social, historique et culturel du bassin, ont fait très peu attention à la prise en compte de l'imbrication de plusieurs niveaux spatiaux. La compréhension de l'ensemble des interactions entre les activités anthropiques et le climat et leurs impacts matérialisés par le paysage du bassin nécessite, en effet, une approche multiscalaire allant d'une vue éloignée pour se rapprocher de la surface de la terre (du global au local) (Richard, 1989 ; Filleron, 1998 et 2005 ; Lacoste, 2001, Dauphine, 2001 ; Bailly et Ferras, 2006 ; Mercier, 2010). La télédétection et les Systèmes d'information Géographiques (SIG) offrent cette capacité de prise en compte des différentes échelles spatiales mais aussi temporelles

En effet, la plupart des études sur ce bassin se sont appuyées sur des images de haute résolution spatiale, en l'occurrence sur les images LANDSAT ou ASTER. Ces images ont le désavantage d'être de basse résolution temporelle (faible répétitivité temporelle) et donc moins adaptées à un suivi régulier de l'état de l'environnement. Il apparaît de ce fait que, pour l'étude de « l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols » dans le bassin versant du Bouregreg (environ 10 000 km<sup>2</sup>), il est important d'adopter une approche multi-échelle en utilisant des images de résolution spatiale et temporelle différentes (Höpfner et Scherer, 2011). Cette approche multi-échelle concerne à la fois l'étude de la dynamique du milieu physique que celle des activités humaines. Il s'agit d'appréhender le milieu naturel et le milieu anthropisé comme des éléments d'un système dynamique à, plusieurs échelles (échelles spatiales et échelles temporelles).

Comment l'interaction dynamique entre activités agro-pastorales et variabilités climatiques a-t-elle impactée sur l'état de surface dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009 ? Comment s'exprime spatialement la dynamique temporelle de cette interaction ?

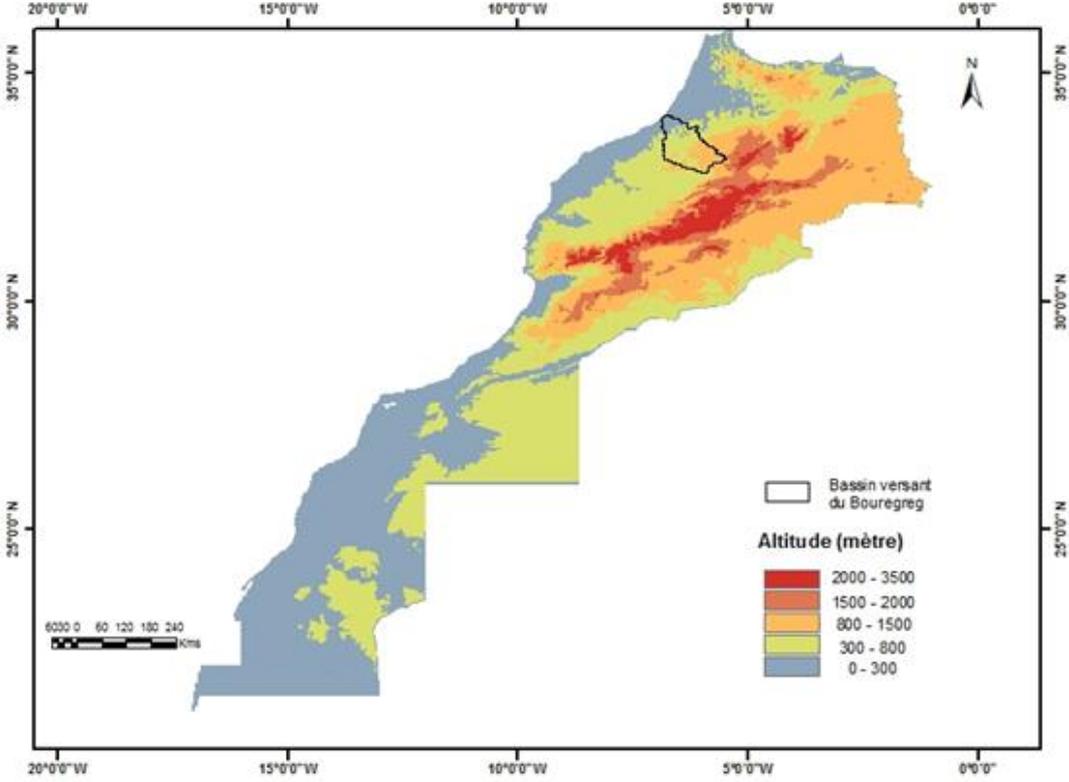


Fig.6: Les grands ensembles de relief du Maroc

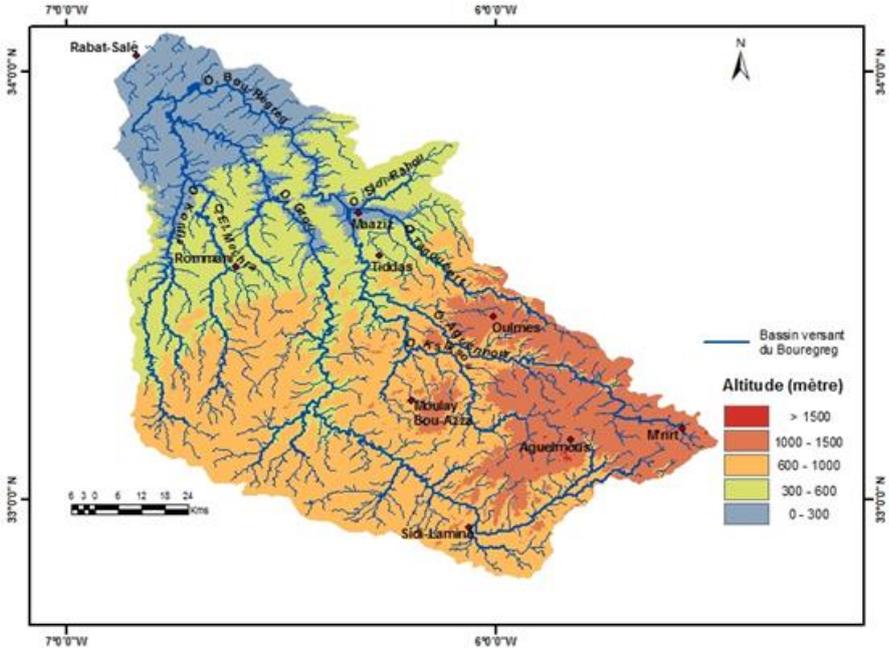


Fig.7: Carte hypsométrique du bassin versant du Bouregreg

## 2.2. Objectifs de l'étude

Cette étude vise à mettre en relief l'intensité et l'ampleur de l'impact des activités agricoles et pastorales, en lien avec la variabilité climatique, sur l'état de surface du bassin versant du Bouregreg. Il s'agit, à travers l'analyse spatialisée (télédétection et Système d'Information Géographique) et quantifiée (statistiques) de l'évolution des variables physiques (climat, sol, végétation) et socio-économiques et démographique (dynamique des activités agropastorales, impact socioculturel sur les itinéraires techniques et les parcours), d'étudier le rythme de dégradation des espaces agropastoraux dans un contexte climatique de plus en plus défavorable.

### 2.2.1. Objectifs spécifiques

Cet Objectif générale se scinde en trois sous objectifs :

- **Analyser la dynamique de la productivité végétale (végétation naturelle et végétation cultivée) en relation avec les variations climatiques de 1980 à 2009**

La biomasse est influencée par deux facteurs principaux que sont les activités humaines et le climat. Ce dernier est à l'origine de la répartition géographique des espèces végétales à la surface terrestre. La phénologie des végétaux est ainsi corrélée aux variations saisonnières et interannuelles du climat, en l'occurrence à la variabilité pluviométrique et thermique des espaces terrestres (Lambin, 1996). Il s'agit à travers cet objectif spécifique d'analyser les variations spatio-temporelles de la végétation du bassin, selon les ensembles biogéographiques, et cela en relation avec la variabilité pluviométrique.

- **Analyser l'impact des activités agropastorales sur la dégradation de la végétation et des sols**

Le bassin versant du Bouregreg est caractérisé par une agriculture essentiellement pluviale dominée par la céréaliculture. Cette agriculture est fortement corrélée à la répartition saisonnière de la pluviométrie. Cette dépendance aux précipitations cause problème depuis les années 70 – 80 où les saisons culturales sont soumises à des aléas climatiques, en l'occurrence à des sécheresses agricoles fréquentes. Certains choix techniques opérés par les agriculteurs pour atténuer les effets des variabilités climatiques sont souvent à l'origine de pertes importantes de sols arables. En outre, le bassin du Bouregreg connaît une charge pastorale importante qui agit également en élément déclencheur de processus de déstructuration des sols fragiles dans leur ensemble.

Il est ainsi question, à travers la télédétection et les SIG de quantifier et de spatialiser la dynamique de l'état des sols.

- **Analyser les risques et les scénarios futurs (2050 – 2100) de dégradation du milieu physique liés au climat ainsi que leurs impacts potentiels sur l'espace agricole et pastoral**

Les évolutions passées et actuelles du climat et des activités agropastorales ont affecté l'espace rural du bassin du Bouregreg. Cette dynamique pourrait se poursuivre dans un futur proche ou lointain. Différents scénarios d'évolution futur du climat, à partir de modèle de circulation atmosphérique, prévoient à cet effet, sur le Maroc en général et sur ses espaces

humides en particulier, une dégradation des conditions de productivité agricole et pastorale liée au climat.

Cet objectif spécifique vise à étudier :

- d'une part les risques de dégradation future du milieu physique liés au climat et aux pressions actuels sur les espaces agricoles et pastoraux ;
- 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. Méthodologie générale de l'étude***

Les détails méthodologiques de cette étude seront abordés au début de chaque chapitre. L'étude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols peut être abordée sous forme de système à trois d'entrées :

- Une entrée socio-économique ;
- 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 (figure 8).

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 10000 km<sup>2</sup>. 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 (MODERateresolution 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 :

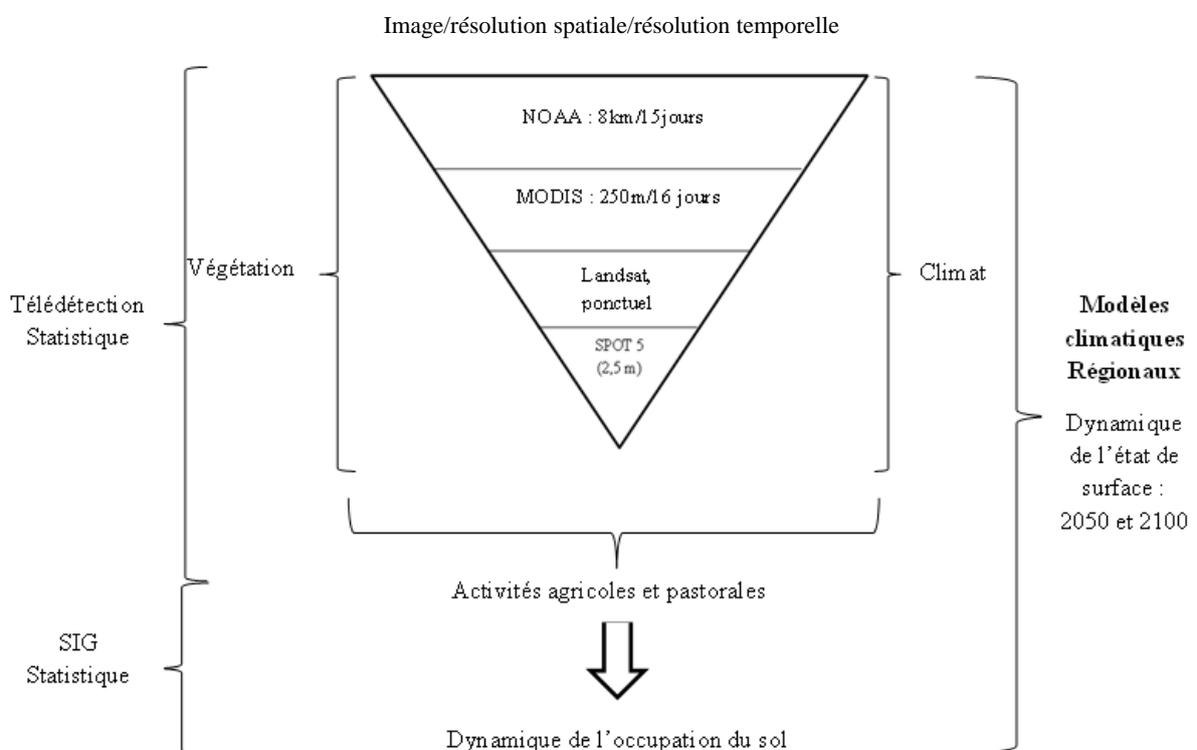
- l'analyse des images de haute résolution temporelles que sont les images de NOAA et de MODIS, mais aussi les statistiques agricoles et climatiques ;
- et les analyses ponctuelles à partir des images de basse résolution temporelle (Landsat et SPOT 5).

Le traitement et l'analyse des images, selon les différents ordres de grandeur énoncés précédemment, permet d'atteindre chacun des trois objectifs spécifiques.

Ainsi, pour comprendre la dynamique de la productivité végétale en relation avec les variations climatiques, les images de NOAA et de MODIS sont d'abord analysées par des méthodes statistiques et cartographiques, ce qui permet de connaître les différentes évolutions spatio-temporelles de la productivité végétale. Ces tendances évolutives sont ensuite mises en relation avec la dynamique de la pluviométrie du bassin, par analyse de régression.

Pour cerner l'impact des activités agricoles et pastorales sur la dégradation de la végétation et des sols, les images de LANDSAT et de SPOT 5 font l'objet de traitement par classification, ce qui permet une cartographie détaillée des changements d'occupation du sol. La mise en relation de ces changements, par méthodes statistiques et par SIG avec les données de statistiques agricoles et de population, permet de comprendre les relations entre ces activités anthropiques et la nature des changements de l'état de surface.

L'analyse des risques et des scénarios futurs de dégradation du bassin est faite, d'une part, par la croisement de toutes les couches d'information issues du traitement des deux premiers objectifs, et d'autre part par l'analyse statistique de paramètres climatiques (précipitation, température et albédo) issus des sorties de modèles numériques de simulation du climat. Les scénarios d'évolution future, à travers l'analyse de ces paramètres climatiques, permettent d'envisager les risques à venir pour les productions agricoles et pastorales du bassin dans un système de production pluvial.



**Fig.8 : Schéma méthodologique général**

# Chapitre I : Cadre géographique de la dynamique de la végétation et de l'occupation du sol

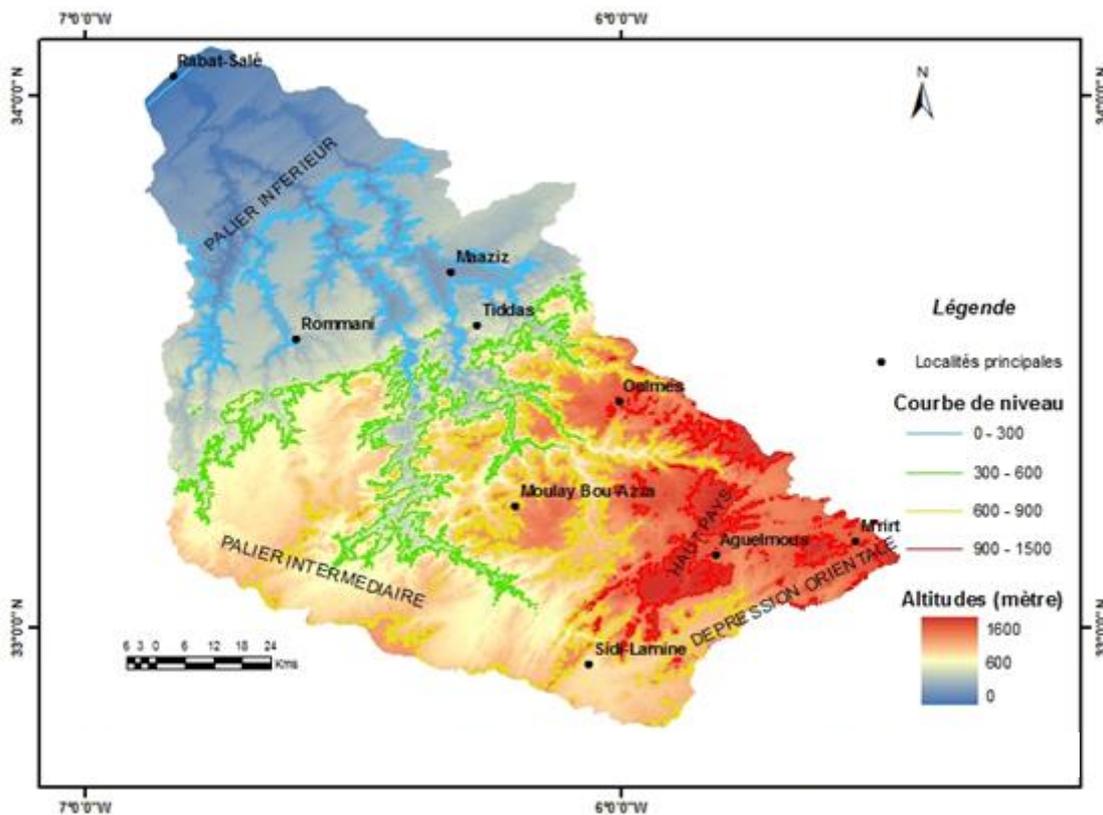
## Introduction

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 km<sup>2</sup>, 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 Bou-Regreg, l'oued Grou et l'oued Korifla. Au niveau climatique, le bassin est localisé en milieu semi-aride. C'est un bassin privilégié sur ce plan, comparativement à l'ensemble du territoire marocain. Cependant, il reste fragile pour une mise en valeur agricole et pastorale. Les différentes politiques agricoles et pastorales, les systèmes d'exploitation économiques, les pressions démographiques, l'approche sociologique de l'espace par les populations et la dynamique récente du climat permettent de comprendre l'état actuel et future du bassin du Bouregreg. Ce chapitre présente le cadre géographique général indispensable à cette compréhension des interactions entre le milieu physique du bassin, sa mise en valeur agricole et pastorale et les conséquences environnementales potentielles pouvant en découler.

## 1. Cadre physique du bassin versant du Bouregreg

### 1.1. Cadre géomorphologique (Beudet, 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-quadernaires. Les altitudes décroissent de l'Est (1600 mètres) vers l'Ouest (0 mètre). 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 (figure 9).



**Fig. 9:** unités géomorphologiques du bassin versant du Bouregreg : les paliers sont limités par les courbes de niveau sur la figure (Beudet 1969)

La dépression orientale est une dépression cloisonnée entre deux murailles que sont le rebord du moyen Atlas occidental au SE et le haut pays au NW. A l'intérieur de la présente dépression s'étalent de larges plaines limitées par des crêtes aiguës et parfois entaillées par les grands oueds qui les traversent (oued Grou, oued Aguenour).

Le haut pays se caractérise par son altitude soutenue et l'encaissement de ses vallées. Il se compose des éléments suivants :

- des crêtes culminants allant de l'Est d'Aguelmous au Nord-est jusqu'au coude du haut Grou, près de Sidi Lamine au Sud-ouest avec des altitudes oscillantes entre 1050 et 1350 mètre ;
- le plateau du Fourhal au Sud-ouest constitue l'unité principale du haut pays qui joue le rôle d'interfluve entre l'oued Grou, au sud, et au nord l'oued Ksiksou, affluent du haut Bouregreg ;

- le plateau de telt qui culmine à 1340 mètre et s'allonge entre l'oued Aguenour (haut Bouregreg) au Sud, et l'oued beht, au Nord suivant la direction générale SE-NW.

Le palier intermédiaire est une zone entre le haut pays, au SE et la basse meseta, au Nord-ouest. Elle s'étale entre 600 mètres et 900 mètre d'altitude et se présente sous forme d'une série de plateaux interrompus de dépression et entaillés par le moyen Grou et les affluents des oueds Korifla et Mechra.

Le palier inférieur constitue le bas pays du Bouregreg. Il se compose d'une série de plateaux et de plaines où la topographie ondule légèrement vers la côte Atlantique avec une décroissance lente des altitudes qui passent de 450 m près de Rommani à des dizaines de mètre près de Rabat.

## 1.2. Cadre géologique et lithologique (Moshine, 2009 ; Atlas du Maroc, 2002)

Le bassin versant du Bouregreg est formé, au plan géologique, de séries paléozoïques généralement d'origine sédimentaire dominées par les flyschs, les quartzites et les pélites (tableau 2 et figure 10). Ces roches ont été traversées par d'importantes masses de roches magmatiques plutoniques ou volcaniques de composition chimique différente. Les dépôts secondaires et néogènes sont moins développés. Ils sont essentiellement localisés dans les parties basses du bassin. Le socle paléozoïque de la meseta marocaine est décrit par Lecointre et Termier cités par Moshine (2009) comme une formation constituée de couches sédimentaires s'étageant du Cambrien au Carbonifère inférieur et recouverte en discordance par les assises variées du Trias, du Crétacé, du Miocène, du Pliocène et près du littoral par des dépôts Quaternaires.

**Tableau 2:** Résultats du planimétrage des formations lithologiques du bassin versant du Bouregreg

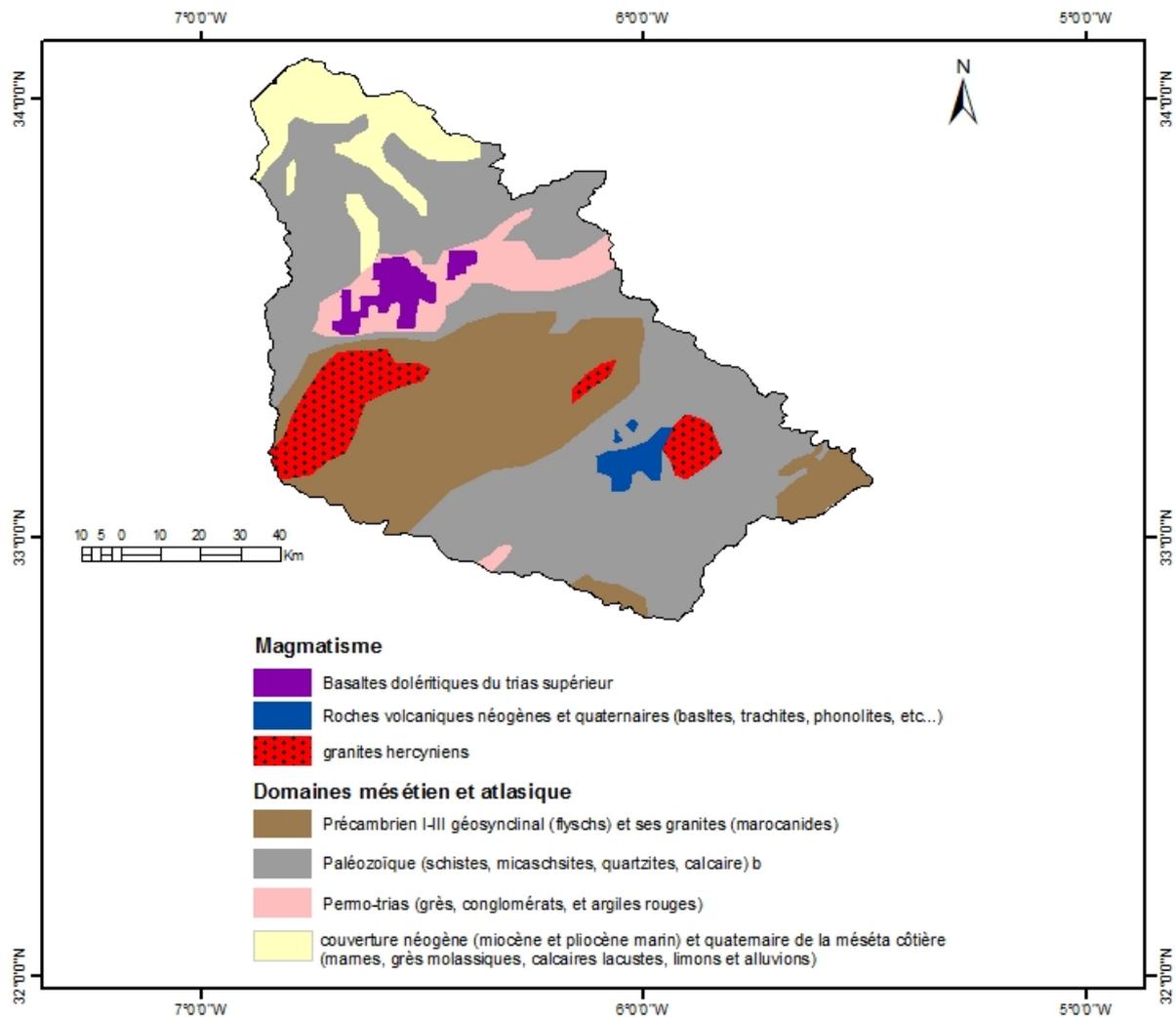
Formations lithologiques	Superficie en km <sup>2</sup>	Pourcentage
Schiste	7066	72,1
Quartzite	942	9,6
Grès et Calcaires	502	5,1
Granites	470	4,8
Argiles et basaltes	413	4,3
Marnes	407	4,1

Source : Ben Mohammadi (1991) cité par Moshine (2009)

## 1.3. 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 Zaërs, 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

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, 2002 (Atlas du



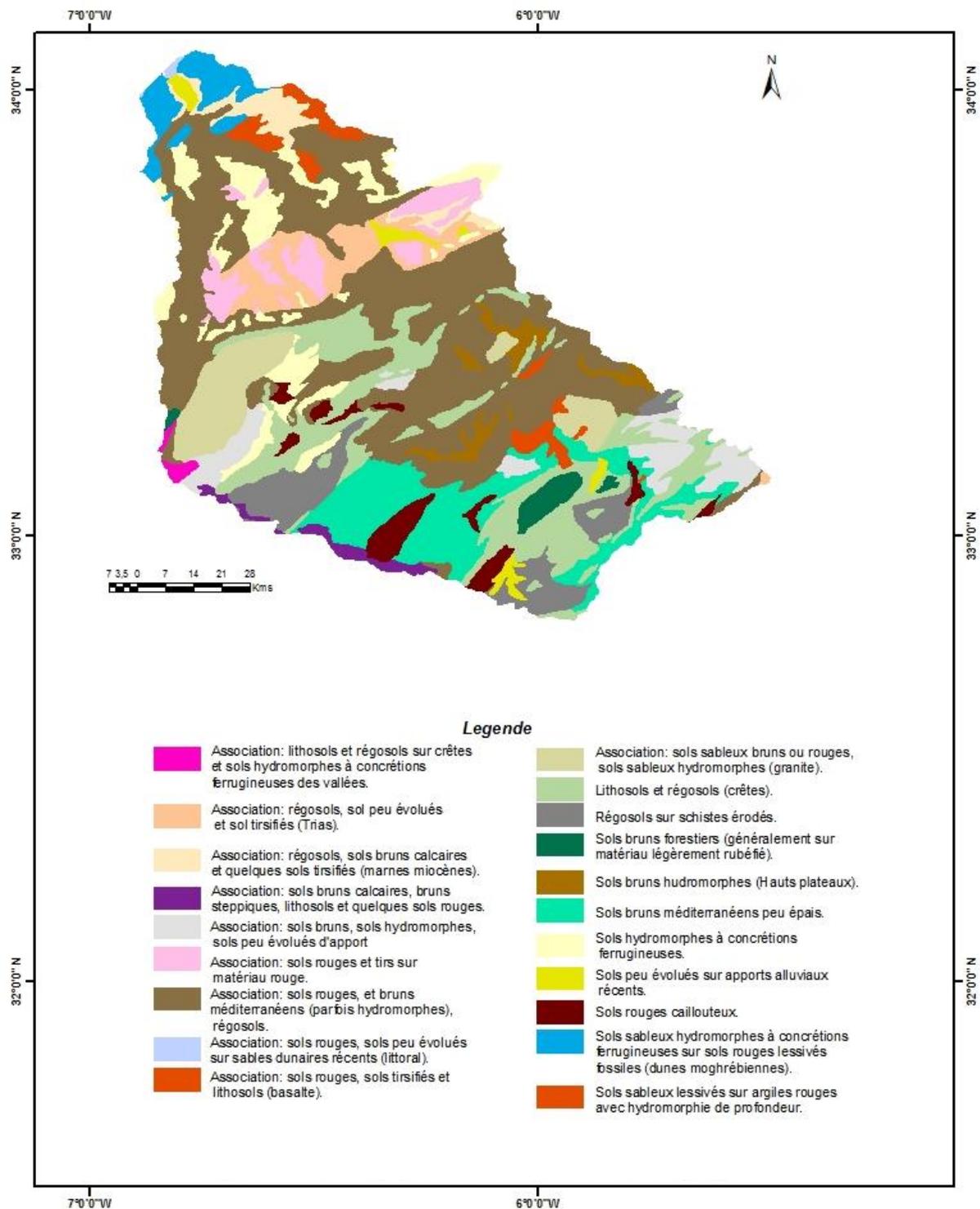
Source : Ministère de l'Énergie et des Mines

**Fig. 10:** Structure géologique du bassin versant du Bouregreg

Maroc). Selon les toposéquences, le bassin du Bouregreg présente certaines caractéristiques. En effet, les entailles du plateau laissent apparaître les formations primaires (schiste et quartzite) ou permo-triasiques. Sur les premiers se développent des sols bruns forestiers (versants humides-Nord) et des sols peu évolués sur les versants plus secs (exposés au Sud). Sur les formations permo-triasiques, on trouve généralement des sols calcimagnésiques (rendzines) ou minéraux bruts en haut de pente. A mi-pente se développe des sols vertiques et en bas de pente des vertisols (tirs). En plus de ces toposéquences, il faut noter la présence des lithosols ou sols squelettiques sur les crêtes quartzitiques du pays zaër (zone de Rommani). Dans cette zone, les pertes en sols sont par endroit très importantes, que cela soit par érosion hydrique hivernale sur les versants et entailles des plateaux ou l'érosion estivale des sols sableux près du littoral.

Le bassin versant du Bouregreg offre une gamme variée de sols reflétant la diversité lithologique, avec une dominance de sols rouges et bruns méditerranéens (figure 11). 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 dominant, au climat et à

l'évolution pédologique elle-même (bénabdellouahad, 2006). Ainsi, les principaux types de sols sont par ordre d'importance croissante : les sols isohumiques, les sols calcimagnésiques, les sols fersiallitiques, les sols hydromorphes et les vertisols.



Source : CERCEO

**Fig. 11:** Carte pédologique du bassin versant du Bouregreg

## 1.4. Cadre hydro-climatique du bassin versant du Bouregreg

### 1.4.1. Cadre hydrologique (Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, [www.water.gov.ma](http://www.water.gov.ma))

Le bassin versant du Bouregreg est drainé par trois principaux oueds hydrographiques : l'oued Bouregreg, l'oued Grou, et l'oued Korifla (figure 4). 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 km<sup>2</sup>. 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 km<sup>2</sup> et circule dans des formations quaternaires et miocènes, constituées d'alluvions et sables d'épaisseur variable entre 5 m au bordure et 20 m 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.

### 1.4.2. Un bassin soumis à un climat méditerranéen semi-aride

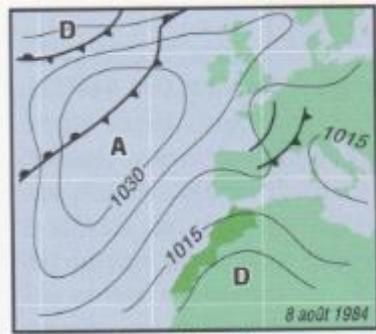
Le Maroc est au niveau de sa dynamique climatique, le lieu de confrontation de masses d'air polaires et tropicales. Les masses d'air polaires peuvent être plus ou moins froides et humides, d'où la diversité des situations hivernales, situation de calme anticyclonique ou situation perturbée d'ouest, de sud-ouest ou de nord-ouest (figure 12). 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. Les précipitations qui y tombent sont estimées, en moyenne, à 440 mm. Généralement, les pluies diminuent, avec la latitude, selon un gradient faible (figure 13). Par ailleurs, l'altitude est à l'origine d'un contraste très important entre les parties Nord-est du bassin où la pluviométrie culmine à 760 mm/an et la partie Sud-ouest où elle chute en dessous de 350 mm/an (Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, [www.water.gov.ma](http://www.water.gov.ma)).

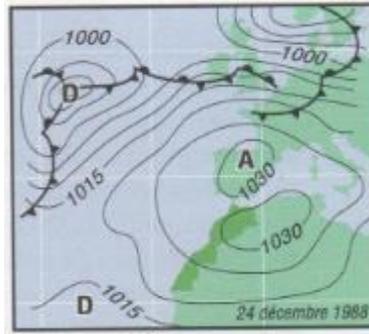
La répartition moyenne des précipitations mensuelles montre l'existence d'un régime pluviométrique uni-modale :

- Une saison humide allant du mois d'octobre à avril où a lieu la quasi-totalité des épisodes pluvieux (86 à 92% de la pluviométrie annuelle) ;

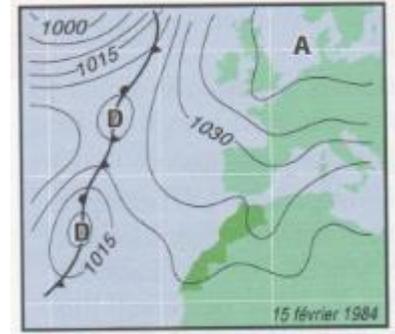
- Une saison sèche s'étendant du mois de mai à septembre avec seulement 8 à 14% de la pluie annuelle.



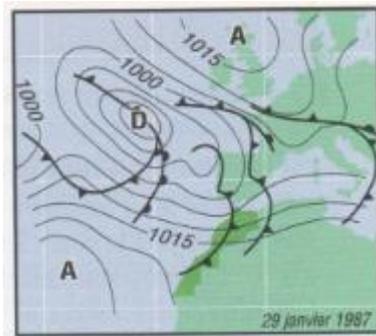
Dépression saharienne (chergui) : températures très élevées



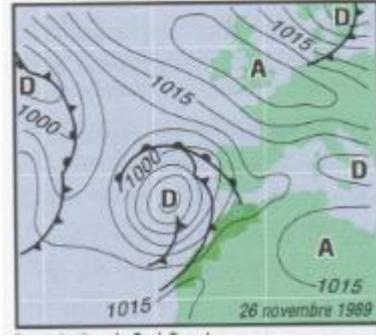
Anticyclone sur le Maroc : beau temps d'hivers



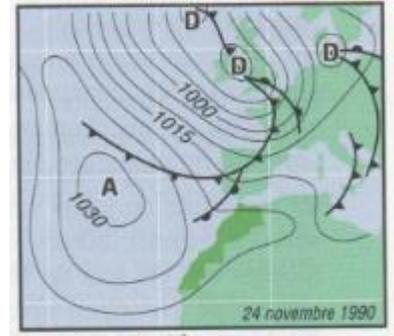
Temps très froid du Nord-est



Perturbations d'ouest : succession de perturbations pluvieuses



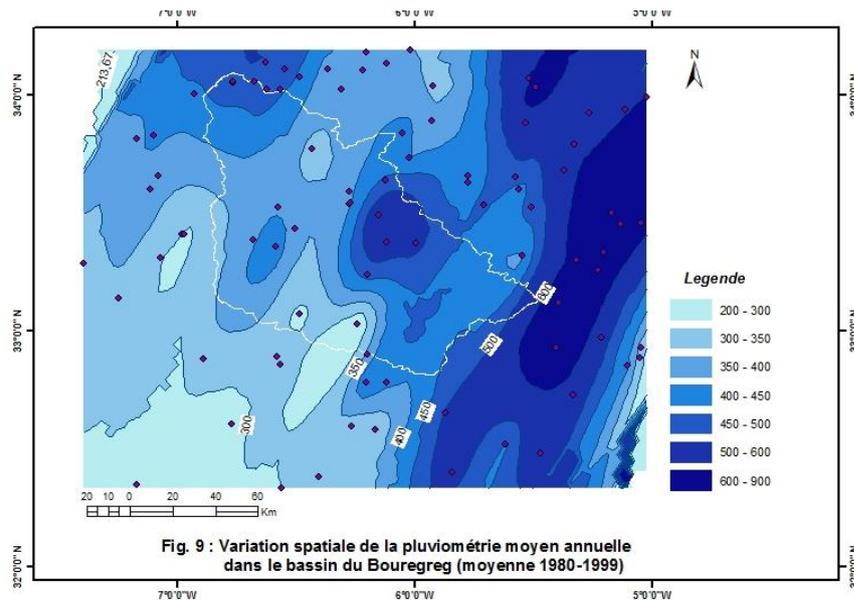
Perturbation du Sud-ouest



Perturbation du Nord-ouest

Source : Atlas du Maroc, 2002

**Fig.12 :** Position des masses d'air au Maroc



**Fig. 9 :** Variation spatiale de la pluviométrie moyen annuelle dans le bassin du Bouregreg (moyenne 1980-1999)

Source : Direction de la Météorologie Nationale et FAO

**Fig.13:** Variation spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin du Bouregreg (moyenne de 1980 à 1999)

Le climat du bassin du Bouregreg comprend des variantes locales liées à l'altitude, à la continentalité et à la latitude. Ainsi, la zone de Rabat connaît un climat subhumide à hiver chaud. La vallée du moyen Bouregreg et du Grou subissent un climat semi-aride à subhumide à hiver tempéré à frais. La vallée de l'oued Grou est aussi soumise, par endroit, à un climat semi-aride à hiver tempéré à chaud. Enfin le haut pays est fait l'objet d'un climat subhumide à hiver frais.

Les températures présentent également un régime unimodal. La saison chaude correspond à la période comprise entre avril et octobre. Alors que la saison froide se situe entre novembre et mars. La zone de montagne enregistre des températures extrêmes avec plus de 33,8°C l'été et moins de 3°C l'hiver. La zone côtière reste modérée avec une température moyenne qui ne descend pas en dessous de 12°C l'hiver et qui n'excède pas les 24°C l'été (Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, [www.water.gov.ma](http://www.water.gov.ma)). Selon le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire (1992), quatre domaines, concernant les températures dans le bassin, peuvent être définis :

- Un domaine océanique au niveau de Rabat où les moyennes sont de 12°C pour le mois le plus froid, 23°C pour le plus chaud. L'amplitude thermique varie entre de 9°C à 10°C et le gel est presque inconnu ;
- Un domaine semi-continental qui s'étend vers l'intérieur. Les températures moyennes sont de 10° à 11°C pour le mois le plus froid et 27°C pour le plus chaud. Les maximas moyens se situe entre 30°C et 37°C ;
- Un domaine continental au Sud-est où les maximas dépassent 39°C ;
- Un domaine de moyenne montagne où les températures du mois le plus chaud sont entre 25°C et 26°C. et celles du mois le plus froid entre 7 et 8°C. l'amplitude thermique est de 12°C. on compte en moyenne 11 jours de gel à Oulmes (Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, 1992)

L'évaporation est forte dans l'ensemble du bassin du Bouregreg. Il est selon le Ministère de l'Energie, des Mines, de l'eau et de l'Environnement ([www.water.gov.ma](http://www.water.gov.ma)) de 1600mm/an dans la zone côtière de Rabat-Salé et de 800 mm/an dans le haut Bouregreg. Selon Ghanem cité par Moshine (2009), l'évaporation induit au niveau du palier inférieur un déficit hydrique de plus de 350 mm/an au minimum. Et l'évapotranspiration calculée selon Thornthwaite indique que le déficit moyen annuel est partout supérieur à 250 mm soit : 269 mm dans les hauts plateaux, 435 mm dans les bas plateaux, 400 mm à 450 mm dans la zone littorale.

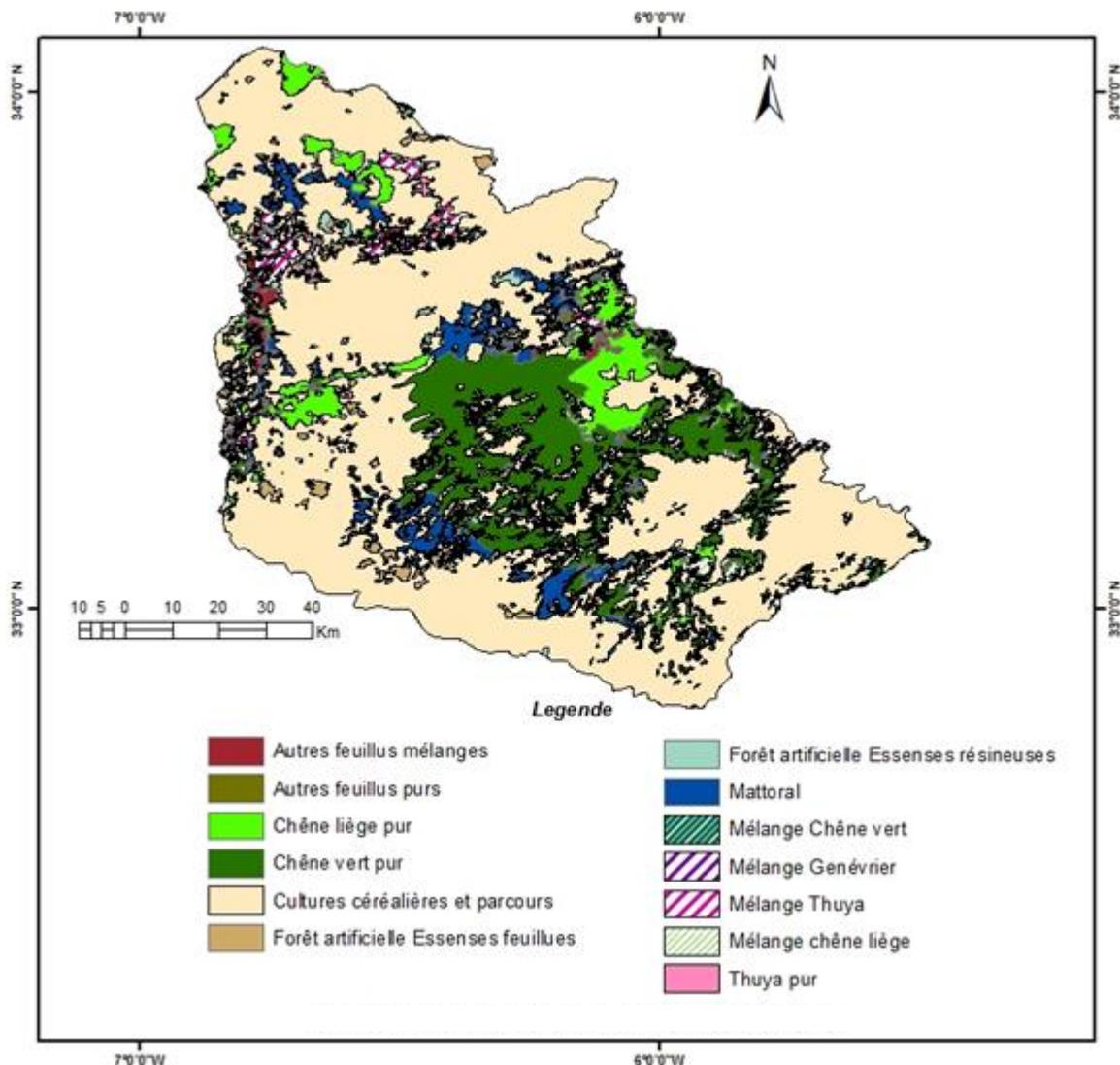
### **1.5. La couverture végétale du bassin versant du Bouregreg (Berkat et Tazi, 2004 ; Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, 1992)**

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 14). 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 *Pinusspp.* 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. Les herbacées annuelles sont plus abondantes et contribuent le plus à la productivité des pâturages de la Mamora. La forêt de chêne liège occupe l'arrière-pays, au niveau des vallées moyennes

duGrou et du Bouregreg, sur substrat siliceux non sableux. Le chêne liège est associé à *Cistus* spp. (ciste de Montpellier), *Lavandulastoechas* ou *Lavandulapedunculata* (lavande), *Sanguisorbaminor* (pimprenelle), *Chamaecytisusalbidus* (genêts), *Rhuspentaphyllum* (sumac), *Centaureapullata* (centaurée), *Leontodontuberosus* (liondent), *Festucacaerulescens* (fétuque), *Hyparrheniahirta* (plante herbacée en touffe) etc.

Le chêne liège occupe cet espace du palier inférieur du bassin du Bouregreg avec des formations de forêts claires ou dense et de matorrals de densité variable. Ces matorrals sont en mosaïque avec les cultures céréalières et des faciès très dégradés à *Chamaerops humilis* (palmier nain), *Urgineamaritima* (oignon marin), *Asphodelusmicrocarpus* (Asphodèles) et parfois *Ferulacommunis* (plante non appétable par le cheptel). Les principales plantes de cette zone sont constituées de *Juniperusphoenicea* (genévrier), *Pistacialentiscus* (pistachier lentisque), *Oléaeuropea* (olivier), *Phillyreaangustifolia* (famille des oléacées), *Cistus* spp. (Ciste de Montpellier), *Bromusspp.* (graminée), *Dactylis glomerata* (plante fourragère).

Le palier intermédiaire et le haut pays sont colonisés par une végétation claire à dense de *Quercus rotundifolia* (chêne vert) avec des îlots de chêne liège et de matorrals.



Source : CERCEO

Fig.14: Principales végétations du Bassin du Bouregreg

## **1.6. Importance du cadre physique du bassin versant du Bouregreg dans la dynamique de la végétation**

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). Dans l'une ou l'autre des subdivisions, l'espace végétal du bassin du Bouregreg connaît une dynamique spatio-temporelle importante qui aboutit aujourd'hui à une stagnation ou une baisse marquée de la productivité végétale. Cette baisse est liée aux conditions naturelles (climat, sol, topographie) d'exploitation et surtout aux itinéraires techniques.

En effet, au niveau des conditions naturelles, le climat est responsable de cette baisse à deux niveaux : l'agressivité de ses épisodes pluvieux avec des pluies torrentiels et au niveau de la récurrence des épisodes de sécheresse. « La saison sèche peut durer et se poursuivre en automne (début de la saison végétative) ou au contraire débiter tôt au printemps (fin de la saison végétative) » Laouina (2002). Aussi, au niveau hydrique, l'agriculture est très dépendante des aléas climatiques compte tenu du fait qu'elle est essentiellement pluviale.

Au niveau pédologique, les sols de ce bassin sont fragiles par leur structure mais aussi du fait d'une mise en valeur importante de pentes favorables à l'érosion hydrique. En outre, l'exposition des versants joue un rôle important dans l'évolution de la couverture végétale dans cet espace à relief peu accidenté à fortement accidenté. A cet effet, les versants exposés au sud sont plus chauds et moins humides que ceux orientés vers le nord. Ce qui discrimine naturellement la répartition spatiale de la végétation dans les espaces de plateau et de montagne.

Ainsi, le cadre physique de ce bassin versant semi-aride est caractérisé par des épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents qui augmentent la pression sur le capital forestier et le capital sol. Le domaine forestier demeure la principale réserve de pâturage. Aussi, la charge animale sur le sol contribue-t-elle à déstructurer d'avantage des sols déjà fragiles dans un environnement topographique défavorable. Neboit, (1991) affirme à cet effet, que les mécanismes de transport de matière sur les versants sont soumis à une stricte subordination vis-à-vis de la végétation.

## ***2. Impact du cadre politique et économique local sur la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg (Michel et Ruellan, 1967 ; Bouderbala, 1999)***

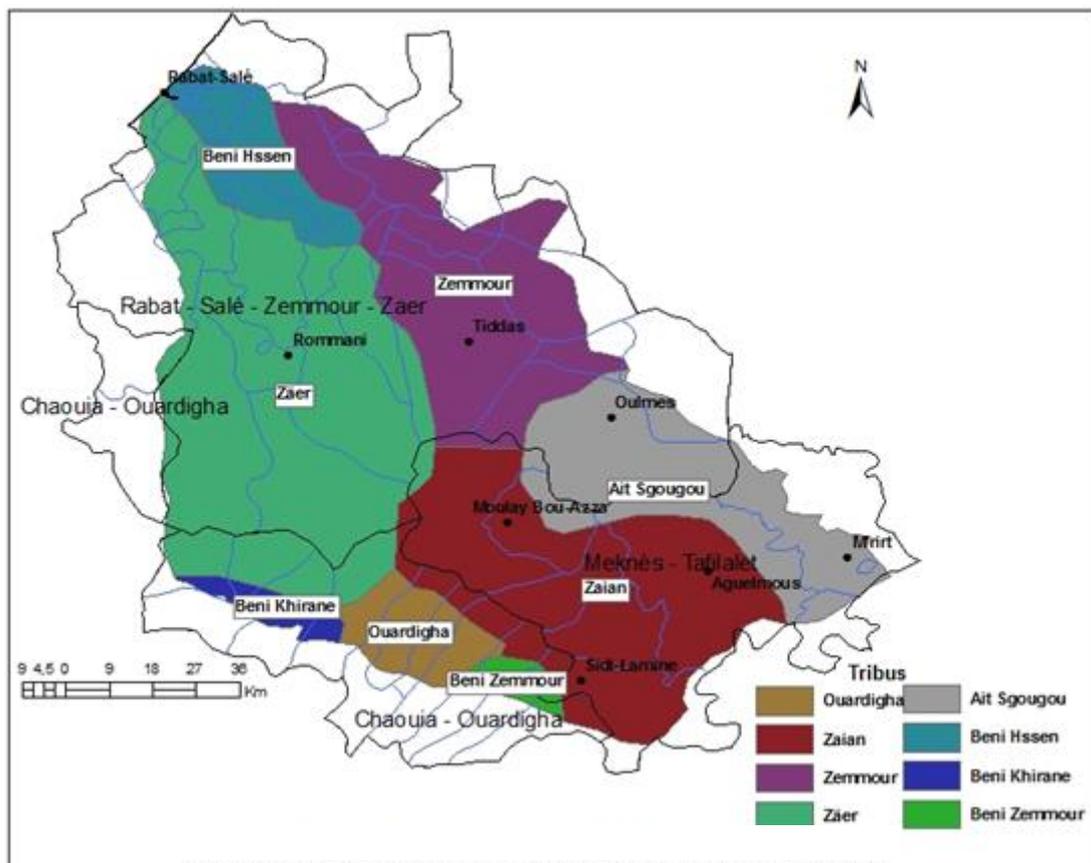
Le bassin du Bouregreg s'étend sur trois régions administratives qui sont la région Chaoui-Ouardigha ; la région de Meknès-Tafilalet ; la région de Rabat-Salé-Zemmour-Zaër. Au niveau de ce bassin, ces régions englobent sept préfectures et provinces (figure 14). Bien que les structures administratives décentralisées aient une importance dans la gestion et la conservation des espaces, le paysage du bassin du Bouregreg est plus marqué au niveau agropastoral par l'emprunte des tribus (figure 15) qui y vivent. Bien que ces tribus aient été soit des pasteurs, soit des agriculteurs dans leur histoire, aujourd'hui, le paysage agricole est marqué par un système agropastoral important. Ce système se pratique dans un environnement foncier complexe. En effet, pendant la période coloniale, une part importante

des bonnes terres agricoles a été accaparée par les colons. Ce qui a conduit les populations autochtones, en particuliers celles du bassin versant du Bouregreg à souvent occuper des espaces marginales sur les versants des vallées. Aussi, une réforme agraire a-t-elle été jugée nécessaire dès 1972. Cependant, la mise en œuvre de cette réforme n'a pas changé fondamentalement la structure agraire des espaces ruraux. Au terme de l'opération en 1983, la redistribution des terres de colonisation au Maroc n'a bénéficié qu'à moins de 2% de la population des exploitants agricoles, maintenant de faite un schéma favorable à la dégradation de l'espace agricole. Cette dégradation est aussi favorisée par le régime juridique d'exploitation des terres.

## 2.1. Les modes de faire-valoir

Le régime d'exploitation des terres est assez complexe et comporte trois modes principaux de faire-valoir :

- Le faire-valoir direct : le propriétaire du sol gère directement sa propriété, seul ou avec l'aide d'ouvriers salariés ;
- Les baux à ferme : en dehors des terrains loués à des fellahs (paysans), par des agriculteurs du secteur moderne, ce système d'exploitation concerne principalement les terrains appartenant au domaine de l'état ou appartenant aux habous (communautés religieuses), les biens séquestrés et les biens privés ;



Source : <http://tribusdumaroc.free.fr/>

**Fig. 15:** Division administrative et tribale du Maroc

- L'association : dans ce mode de faire-valoir, le preneur cultive le fond affermé sous condition de partage avec le bailleur. Ce type de contrat est très répandu au Maroc, car

il permet de répartir les risques de la culture, risques dus aux conditions climatiques ou à certains fléaux comme les invasions de sauterelles, les attaques de rouille etc. Il est également engendré par la petitesse de la plupart des propriétés, qui pousse les exploitants à s'associer pour mettre en commun les différents facteurs de production (sol, semence, attelage, travail et frais de culture). Les associations sont très diverses : parfois les deux associés se répartissent les facteurs de production, parfois l'un des associés ne fournit que le terrain, parfois encore deux paysans peuvent s'associer pour cultiver les terres d'un troisième.

Les campagnes traditionnelles marocaines connaissent donc des catégories socioprofessionnelles très variées : des grands propriétaires résident souvent dans les villes et faisant travailler leurs terres, des propriétaires habitants les douars mais faisant également travailler leurs biens, des propriétaires exploitant ayant une superficie suffisante pour vivre convenablement, des petits propriétaires qui n'ayant pas assez de terres, pratique souvent l'association, et enfin de très nombreux paysans sans terre, deviennent obligatoirement khammès (métayers), ouvriers agricoles ou chômeurs.

## 2.2. La répartition de la propriété

Le régime juridique des terres est également complexe. Celles-ci ne sont pas toujours des propriétés privées dans les campagnes. Le régime juridique comprend :

- les terres melks : ce sont des biens privés acquis par achat ou par héritage. Ce régime désigne la propriété immobilière régie par le droit musulman de rite malékite. Celle-ci est assimilée le plus souvent, par opposition à la propriété de l'Etat ou des tribus, à la propriété privée de droit romain (*usus, abusus, fructus*), celle qui est le plus souvent présentée comme inséparable de l'apparition et du développement du capitalisme. Ce statut qui était très peu important en surface avant 1912, regroupe aujourd'hui 74,2% de la superficie agricole du Maroc et 88,5% des exploitants (Bouderbala, 1999) ;
- les terres collectives : elles appartiennent aux groupements ethniques (tribus, fractions, douar) et sont gérées par des *jmaâ* (assemblée représentative des chefs de famille). Constituées de terres de parcours et de terres cultivées, elles sont partagées périodiquement. Ces terres représentent 14% de la surface agricole marocaine et 13,1% des exploitations.
- Les terres guich : elles appartiennent à l'Etat. Leur usage fut autrefois octroyé à des tribus qui devaient en échange le service militaire. Elles sont en général très mal exploitées, les règles de partage étant les mêmes que celles des terres collectives (les attributaires ne pouvant ni planter d'arbres, ni « vivifier » la terre). On les trouve, le plus souvent, en zones de protection autour des villes impériales : Meknès, Fès, Marrakech, Rabat ;
- Les terres habous : ce sont des biens légués à des mosquées ou à des institutions religieuses et qui sont cultivés par des locataires. Leur mode de gestion est le même que celui des collectifs, mais la périodicité des partages est différente, la jouissance d'un lot étant en général assurée à vie à son bénéficiaire. L'exploitation de ces terres est donc meilleure.
- les terres domaniales : elles appartiennent à l'Etat et sont constituées de forêts, de *merja*, de broussailles, en général incultivables.

L'origine juridique des terres exerce une profonde influence sur leur mode d'exploitation. Quand il s'agit de terres melk, l'exploitant, possédant de façon effective le sol, accepte d'entreprendre des travaux destinés à améliorer la production, établit des plantations pérennes et exploite le sol de façon rationnelle pour en conserver la valeur. Il n'en est pas de même des

terres collectives, des guich et même des habous dont le régime juridique constitue un obstacle à la mise en valeur. En outre les terres de parcours restent dans leur ensemble, au niveau des zones marginales, soumises au régime foncier collectif. Or ce régime, à cet effet souffre d'une imprécision en matière réglementation du droit et des conditions d'usage des pâturages, autant d'éléments contribuant à une surcharge ou une mauvaise gestion des parcours (Abaab, 1995).

### **2.3. Un 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 16). 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 16).

La dynamique saisonnière globale des plantes cultivées est ainsi dominée par la culture du blé. Les périodes de grande variabilité de l'état de la couverture de surface restent les périodes de semis et de récolte des cultures. Il s'agit, pour le bassin du Bouregreg, des périodes de la seconde moitié de novembre, du mois de décembre et de la période de la deuxième moitié de juin à la mi-juillet. Les périodes comprises entre ces intervalles, si elles sont objet de variation trop importante à la baisse, expriment une saison agricole de faible production. Il existe un décalage pouvant aller jusqu'à deux semaines entre l'aval et l'amont du bassin, les activités agricoles saisonnières commençant par l'aval.

L'activité pastorale est très importante dans le bassin du Bouregreg où la charge pastorale est 5 fois supérieure à la normale. Le calendrier pastoral concerne deux catégories d'animaux : les bovins et les ovins et caprins.

Au niveau des bovins, le système d'élevage connaît, au Maroc, trois variantes : l'élevage laitier en zone irriguée ; le système mixte et l'élevage bovin de boucherie (Berkat et Tazi, 2004). Le bassin versant du Bouregreg est concerné par les deux derniers systèmes et principalement le système d'élevage bovin de boucherie. Le système d'élevage mixte se caractérise par l'absence (ou l'apport très limité) de cultures fourragères irriguées. Ce système est aussi caractérisé par la commercialisation du lait. Quant au système d'élevage bovin de boucherie, le lait est destiné à la consommation familiale. Le calendrier alimentaire du bovin dans le système mixte se caractérise par :

- Le recours au chaume de juin à août ;
- L'emploi de paille de septembre à mars, parfois couplé à l'emploi de foin d'avoine ;
- Pâturage de l'orge en vert de janvier à février ;

- Emploi de concentré comme les sons, les résidus de betterave sucrière, les molasses de canne à sucre, l'orge en grain, particulièrement en automne et en hiver.

Le calendrier alimentaire du système d'élevage bovin de boucherie est fondé sur les produits de récolte et de ce fait fortement soumis aux aléas climatiques. Ce calendrier est caractérisé par :

- Le recours au chaume de juin à octobre ;
- Le recours au foin et à la paille de blé et d'orge de septembre à mars ;
- Le pâturage léger de l'orge en vert de janvier à février (figure 17) ;
- L'utilisation de mauvaises herbes ramassées dans les champs ;
- Le pâturage des jachères de janvier à mai.

L'élevage extensif des petits ruminants (ovins et caprins) est le type dominant d'élevage dans le bassin du Bouregreg. Le bassin connaît, à cet effet, un système agropastoral dans son ensemble. Dans une moindre mesure, dans les hauts plateaux, existe un système pastoral. L'élevage des ovins et caprins se caractérise, de façon générale, au niveau du calendrier alimentaire, par une part importante accordée aux pâtures sur parcours arbustifs ou sur les jachères (figure 18). 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.

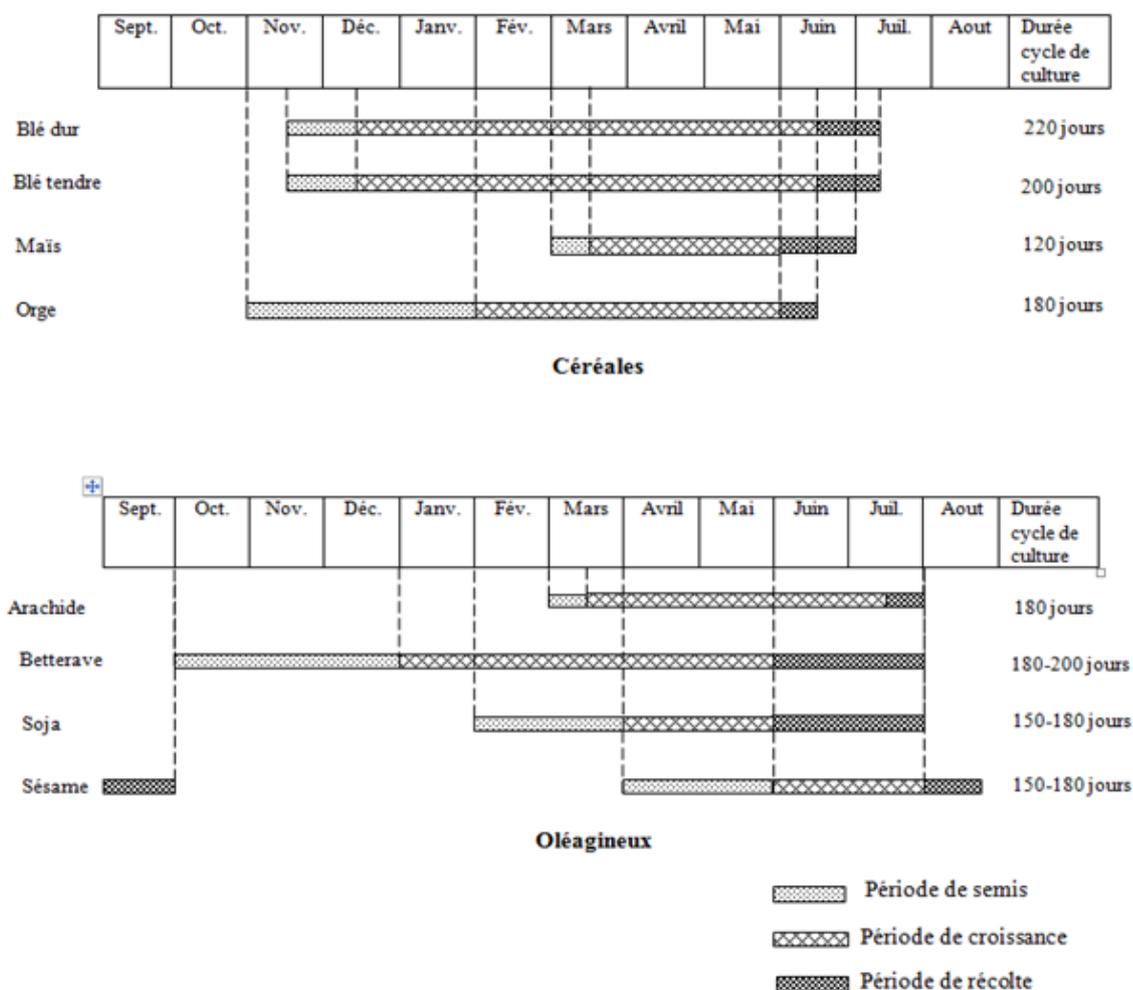


Fig. 16: Calendrier culturel du bassin versant du Bouregreg



**Fig.17:** Pâturage de l'orge de vaches à lait (Maaziz)



**Fig. 18:** Pâturage sur jachère d'un troupeau d'ovin, caprins et bovin au printemps (Maaziz)

La pâture de l'orge, dans certains espaces, est aussi pratiquée. De l'agencement des calendriers agricoles et pastoraux du bassin du Bouregreg, il ressort une organisation complémentaire. Les périodes de récolte (à partir de juin) voient une extension des zones de pâturage par le chaume. La plaine saison estivale ainsi que les périodes de culture se caractérisent par un accroissement de la charge pastorale du bétail sur les jachères et surtout sur les forêts de chêne, de genévrier et de frêne.

## 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 – activités agricoles et pastorales au niveau de ce bassin d'environ 10000 km<sup>2</sup> 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.

## **Chapitre II : Dynamique saisonnière et pluriannuelle de la végétation de 1980 à 2009 à partir d'images de basses résolution spatiale**

### **Introduction**

Les études récentes de l'évolution de la végétation au Maroc indiquent de fortes pressions anthropiques sur cette ressource. Les végétations forestières, par exemple, demeurent les principales réserves de pâturage pour un cheptel de plus en plus important. A cet effet, la pression pastorale est cinq fois au-dessus de la normale. Cela constitue de fait un frein à la régénération et au développement du capital forestier. En outre, les activités agricoles se sont développées parfois sur des espaces marginaux et par conséquent fragiles. Il en résulte des risques importants de dégradation de la végétation. 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. Il s'agit, à travers l'utilisation de statistiques descriptives ainsi que de tests de tendances et de rupture sur les données images d'indice de végétation, d'identifier et de quantifier les variations de la biomasse du bassin du Bouregreg. Les images de moyenne résolution que sont les images MODIS sont utilisées pour analyser le détail de cette dynamique de 2000 à 2009.

## ***1. Données et techniques d'analyse de la dynamique de la couverture végétale***

### **1.1. Données**

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. Elles sont issues du programme GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies). La série s'étend, dans le cas présent, de 1982 à 2006, soit 600 images. Les séries satellitaires NOAA-7 (1981-1985), NOAA-9 (1985-1988), NOAA-11 (1988-1994), NOAA-9 (1994-1995), NOAA-14 (1995-2000), NOAA-16 (2000-2003), NOAA-17 (2004 à maintenant) ont été utilisées pour la constitution de cette série d'images. Un certain nombre de traitement a été fait sur ces images. En effet, la résolution spatiale de base de ces images est de 1 km. Toutefois, ces données étant discontinues, les images ont été portées, par échantillonnage, à des résolutions de 4 km. Ces dernières images sont utilisées pour la création des images NDVI GIMMS de 8 km de résolution spatiale. Les données NDVI du GIMMS sont corrigées pour :

- La dégradation résiduelle et les différences d'inter calibration des capteurs ;
- Les distorsions causées par la persistance de la couverture nuageuse du globe terrestre ;
- L'angle zénithal solaire et les effets d'angle de prise de vue dues à la dérive du satellite ;
- Les aérosols volcaniques ;
- Les données manquantes dans l'hémisphère nord pendant l'hiver en utilisant une interpolation ;
- Les faibles bruits du signal dus à la contamination nuageuse et à la vapeur d'eau.

Outre ces corrections, la création des images de NDVI de NOAA utilise la technique du MVC (Maximum Value Composite) qui consiste, d'abord, à sélectionner les pixels acquis dans un mode proche du nadir avec un minimum d'effet atmosphérique. Ensuite, pour chaque série temporelle (15 jours par exemple) sont choisies les valeurs maximales de chaque pixel (Holben, 1986 ; Roy, 1997).

Les images téléchargées sont dans un système de projection géographique longitude / latitude. Les valeurs des pixels sont multipliées par un facteur d'échelle de 10000. Les valeurs d'eau sont de -10000, les masques correspondent à -5000 et les données manquantes à -2000.

Bien que les données de NDVI du radiomètre AVHRR fassent objet d'utilisation importante pour les études des dynamiques végétales des milieux naturels, les instruments n'avaient pas, à l'origine, été conçus à cette fin (les indices de végétation n'étant pas connus à l'origine) (Tucker et al., 2005).

Les données MODIS utilisées pour cette étude sont de deux types :

- des images de NDVI de 250 m de résolution de pixel et de 16 jours de résolution temporelle ;
- des images de température de surface de jour de 1 km de résolution spatiale et de 8 jours de résolution temporelle.

Les données de NDVI de MODIS diffèrent souvent de celles de NOAA pour plusieurs raisons. En effet, de nouveaux algorithmes améliorés de correction atmosphérique sont introduits. A cela s'ajoute certaines corrections comme les effets d'ombre d'arrière-plan de la canopée. Aussi, l'étrécissement de la largeur spectrale des bandes de MODIS permet-elle d'éliminer la zone d'absorption spectrale liée à l'eau dans le proche infrarouge, zone rendant également la bande rouge beaucoup plus sensible à l'absorption chlorophyllienne (Alfredo et al., 1999). Aussi, les erreurs dues à la réflectance du sol sur les espaces à très faible couverture végétale sont souvent importantes dans les données NDVI GIMMS. Toutefois, les tests sur des sites ont montré une concordance raisonnable de la variation du NDVI du GIMMS avec d'autres mesures de la végétation. Il en est de même de la comparaison des paramètres climatiques et des données NDVI du GIMMS (Tucker et al, 2005).

## 1.2. 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. La figure 19 présente l'articulation générale de l'étude de la dynamique de la végétation ainsi que de l'occupation du sol.

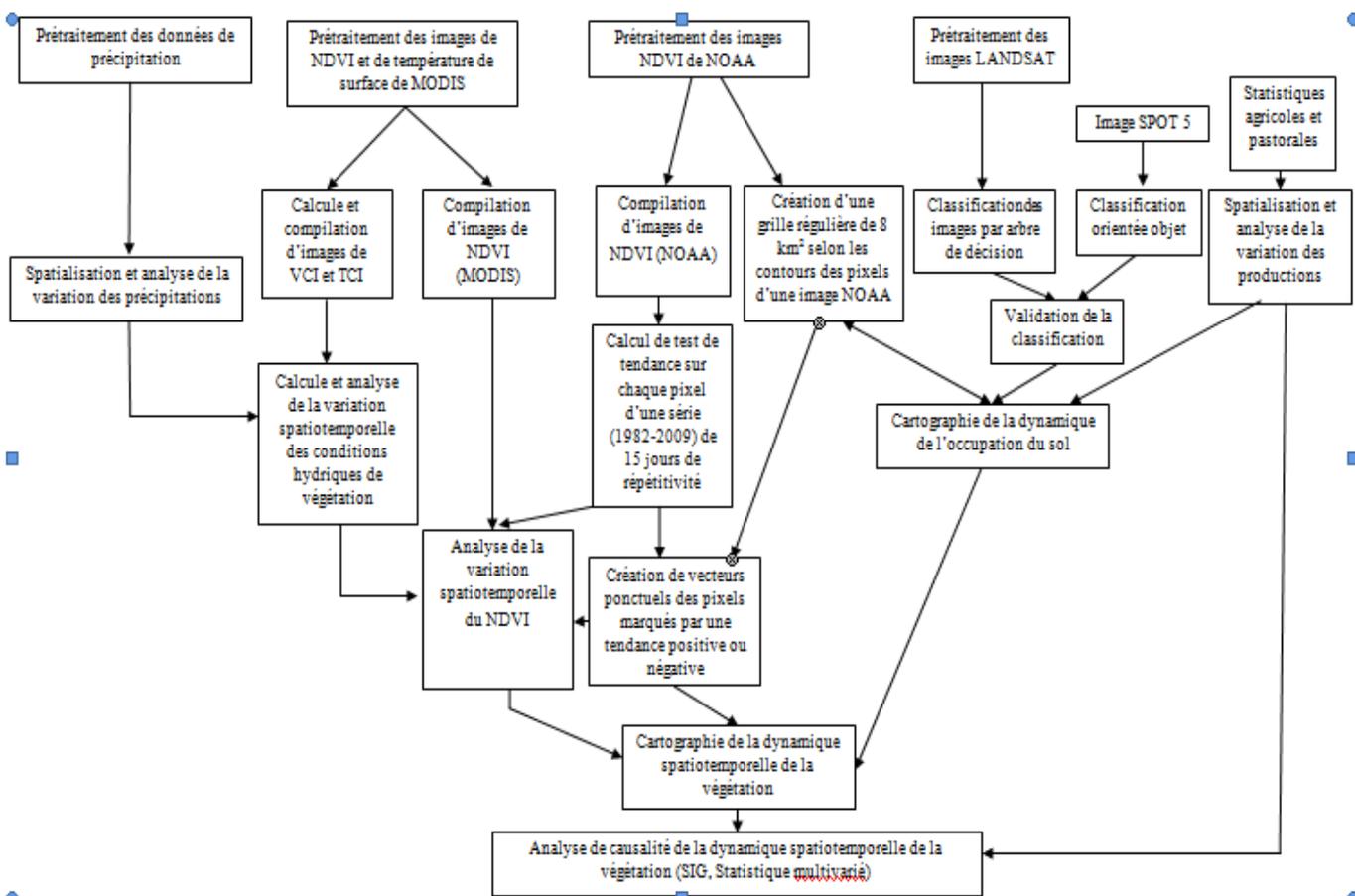


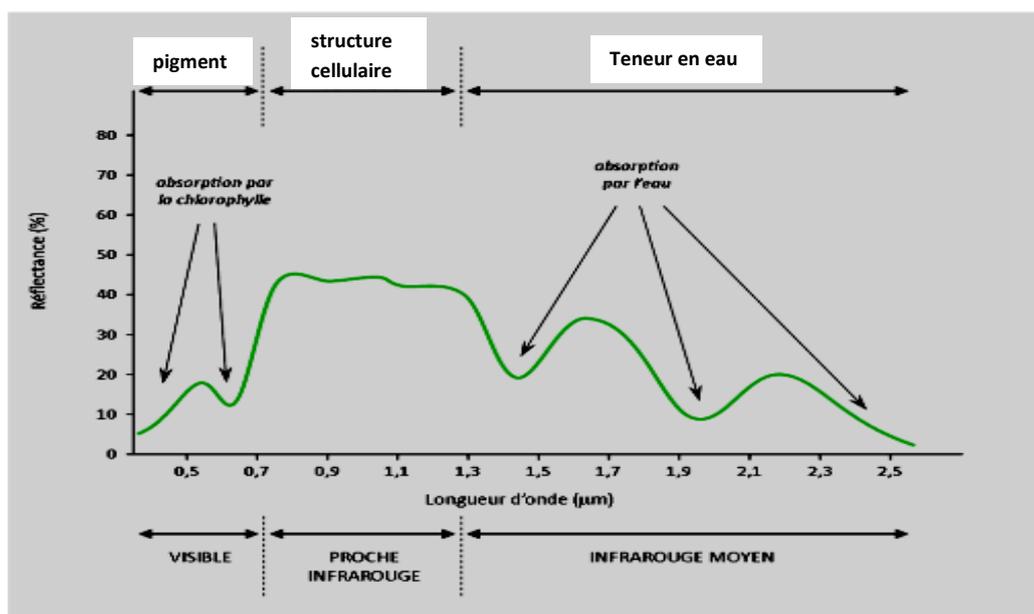
Fig. 19 : Schéma méthodologique général

### 1.2.1. Traitements des images de basse résolution spatiale : les indices de végétation

Avant leur analyse, les données images téléchargées 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. Cette manipulation vise uniquement à compléter la série des données NOAA de la période 2006 à 2009. Aussi, d'autres images MODIS ont-elles été compilées sans modification de la résolution spatiale, dans le but de faire des analyses localisées à moyenne résolution (250 m). Cette étude localisée permet de mieux comprendre les dynamiques exprimées à travers l'analyse des images NOAA. La deuxième étape des modifications apportées aux images MODIS a consisté à changer les projections des images de la projection sinusoidale à la projection géographique longitude/latitude (datum wgs84). Pour la troisième étape, les images destinées à compléter la série des images NOAA ont connu une harmonisation de facteur d'échelle mais aussi de dimension d'images.

L'analyse des images NOAA complétées par 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 (figure 20).



Source : Devineau (1988)

Fig. 20 : Spectre de réflectance d'une feuille verte

L'utilisation de l'indice de végétation vise plusieurs objectifs :

- L'estimation de la masse végétale verte couvrant le sol ;
- La description de l'état phénologiques de la couverture végétale ;
- La prévision des récoltes ;
- L'inventaire des cultures par segmentation de l'indice ;
- L'évolution de la couverture végétale à l'échelle continentale (Caloz et Collet, 2001 ; Girard et Girard, 2010).

L'analyse de la dynamique de l'indice de végétation NDVI, dans cette étude, vise à comprendre les variations spatiotemporelles de la végétation dans l'espace du bassin du Bouregreg ainsi que les ces dynamiques végétales.

L'indice de végétation NDVI est le rapport :

$$PIR / R \quad (1)$$

où

*PIR* = la bande du proche infrarouge

*R* = la bande du rouge

La normalisation de ce rapport où

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R) \quad (2)$$

Le NDVI évolue entre -1 et 1. Les valeurs d'eau sont négatives, les valeurs des sols nus et presque nus sont proches de zéro et les valeurs de végétation dense et verte sont voisines de 0,8.

Le NDVI est ainsi l'expression de l'activité chlorophyllienne, de la densité de feuillage et aussi expression indirect du stress hydrique d'une couverture végétale. Il exprime l'évolution des paramètres phénologiques des végétaux et est corrélé aux variations saisonnières et interannuelles du climat, aux changements climatiques à long terme et aux perturbations humaines et naturelles (Lambin, 1996).

Le NDVI représente deux facteurs environnementaux : L'écosystème, qui explique les changements dans la végétation à long terme (changements causés par le climat, les sols, le type de végétation, la topographie, etc...) et le temps à court terme, expliquant les variations intra et interannuelle de chaque écosystème en réponse aux fluctuations climatiques. Parce que la composante temps est plus petite que la composante écosystème, 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 :

$$VCI_j = \left( \frac{NDVI_j - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right) * 100 \quad (3)$$

où  $NDVI_{max}$  et  $NDVI_{min}$  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 différents degré de sévérité de la sécheresse. Les valeurs de VCI proches de 0 marquent une période très sèche.

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

Le traitement statistique de la variabilité temporel 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 constitué 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. Le choix d'un test de tendance est fonction de plusieurs critères dont la

taille de l'échantillon, la distribution de la variable analysée et la nature des tendances espérées (Chaouche et al., 2010). Le test de Mann-Kendall (avec saisonnalité) a été choisi pour sa robustesse prouvée d'une part (Kundzewicz et Robson, 2004 ; Yue et Pilon, 2004 ; Chaouche et al., 2010 ; Lopez et Leynet, 2011) et d'autre part parce qu'il est non paramétrique (il ne fait aucune hypothèse sur la distribution sous-jacente des données). Le test de Mann-Kendall avec saisonnalité tient compte du caractère saisonnier de la série. Autrement dit pour des données mensuelles ayant une saisonnalité de 12 mois, on ne va pas chercher à savoir s'il y a une croissance au global sur la série, mais simplement si d'un mois de janvier à l'autre, d'un mois de février à l'autre, et ainsi de suite, il y a une tendance.

L'hypothèse nulle  $H_0$  du test est qu'il n'y a pas de tendance. Les trois hypothèses alternatives de tendance négative, non nulle ou positive peuvent être choisies. Les tests de Mann-Kendall s'appuient sur le calcul du tau de Kendall mesurant l'association entre deux échantillons et lui-même basé sur les rangs à l'intérieur des échantillons. La statistique  $S$  de Kendall et sa variance sont données par :

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

Où  $n$  est le nombre de données de la série, et les  $x_i$  ( $i=1 \dots n$ ) sont les observations, supposées indépendantes.

La détection de rupture dans la série s'est faite par l'intermédiaire du test de Pettitt sur la base du même critère de choix que celui de Kendall (Lubnès-Niel et al., 1998). Le test de Pettitt est un test non paramétrique ne nécessitant aucune hypothèse quant à la distribution des données. Le test de Pettitt est une adaptation du test de Mann-Whitney basé sur les rangs, permettant d'identifier le temps auquel se produit un changement. L'hypothèse nulle, dans le cas présent est que les  $T$  variables suivent une même distribution  $F$ , et l'hypothèse alternative est qu'à un temps  $t$  se produit un changement de distribution.

La statistique du test de Pettitt est calculée comme suit :

$$\text{On pose } D_{ij} = -1 \text{ si } (x_i - x_j) > 0 ; D_{ij} = 0 \text{ si } (x_i - x_j) = 0 ; D_{ij} = 1 \text{ si } (x_i - x_j) < 0 \quad (6)$$

On définit ensuite

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T D_{ij}$$

La statistique de Pettitt correspondant à chacune des hypothèses alternatives est définie par :

$K_T = \max_{1 \leq t < T} |U_{t,T}|$ , pour le test bilatéral ( $H_a$  : il existe un temps  $\tau$  à partir duquel les variables changent de paramètre de position)

$K_T^+ = \max_{1 \leq t < T} U_{t,T}$ , pour le test unilatéral à gauche ( $H_a$  : il existe un temps  $\tau$  à partir duquel le paramètre de position des variables diminue de  $\Delta$ )

$K_T^- = -\min_{1 \leq t < T} U_{t,T}$ , pour le test unilatéral à droite ( $H_a$  : il existe un temps  $t$  à partir duquel le paramètre de position des variables augmente de  $\Delta$ )

De façon pratique, le traitement pour l'analyse temporelle des données NDVI de NOAA consiste à transformer les fichiers images en fichier texte et à les exporter sous excel afin de

calculer le test de tendance de Mann-Kendall. Compte tenu de la dimension des tableaux (184 pixels par image), il n'est pas pratique d'afficher les tableaux de traitement statistique ni dans le document présent ni dans l'annexe du document. Toutefois, un échantillon de ces tableaux est présenté ci-contre (tableau 3). Les coordonnées du pixel sont données dans le système de projection géographique lon/lat (première et deuxième ligne du tableau). Les bandes (B1 par exemple sur la première colonne) représentent les valeurs de NDVI du pixel à une date donnée (B1 équivaut ici à l'année 1982 et B28 représente l'année 2009). Les résultats du test de tendance de Mann-Kendall sont donnés dans les colonnes entre les lignes en gras. Dans cet exemple, apparaît des tendances positives indiquées en rouge par les valeurs de p-value. L'interprétation pour la colonne de la position 182 (P182) par exemple est la suivante :

**Tableau 3:** Echantillon d'une image NDVI de NOAA en format texte exporté sous excel

X	-5,99568987	-5,9229626	-5,99568987	-5,9229626	
Y	32,8956435	32,8956435	32,8229162	32,8229162	
	P181	P182	P183	P184	
B1	0,184	0,121	0,184	0,121	
B2	0,27899999	0,25099999	0,27899998	0,25099999	
B3	0,28799999	0,26199999	0,28799999	0,26199999	
B4	0,25400001	0,23800001	0,25400001	0,23800001	
B5	0,17899999	0,184	0,17899999	0,184	
B6	0,18200001	0,18799999	0,18200001	0,18799999	
B7	0,30500001	0,32000002	0,30500001	0,32000002	
B8	0,148	0,186	0,148	0,186	
B9	0,40199998	0,34600002	0,40199998	0,34600002	
B10	0,29100001	0,23900001	0,29100001	0,23900001	
B11	0,296	0,20300001	0,296	0,20300001	
B12	0,24700001	0,211	0,24700001	0,211	
B13	0,22600001	0,30700001	0,22600001	0,30700001	
B14	0,26800001	0,171	0,26800001	0,171	
B15	0,233	0,25	0,233	0,25	
B16	0,222	0,24499999	0,222	0,24499999	
B17	0,39700001	0,477	0,39700001	0,477	
B18	0,206	0,208	0,206	0,208	
B19	0,289	0,25599998	0,289	0,25599998	
B20	0,31099999	0,228	0,31099999	0,228	
B21	0,18799999	0,127	0,18799999	0,127	
B22	0,35500002	0,33500001	0,35500002	0,33500001	
B23	0,32200003	0,317	0,32200003	0,317	
B24	0,36500001	0,33899999	0,36500001	0,33899999	
B25	0,27599999	0,26800001	0,27599999	0,26800001	
B26	0,3624	0,4377	0,1749	0,1501	
B27	0,499	0,5376	0,3842	0,4268	
B28	0,3723	0,4919	0,3396	0,4697	
	Tau de Kend	0,344	0,381	0,212	0,259
	S	130,000	144,000	80,000	98,000
	Var(S)	0,000	0,000	0,000	0,000
	p-value (bila	0,010	0,004	0,120	0,055
	alpha	0,05	0,05	0,05	0,05

H0 : Il n'y a pas de tendance dans la série

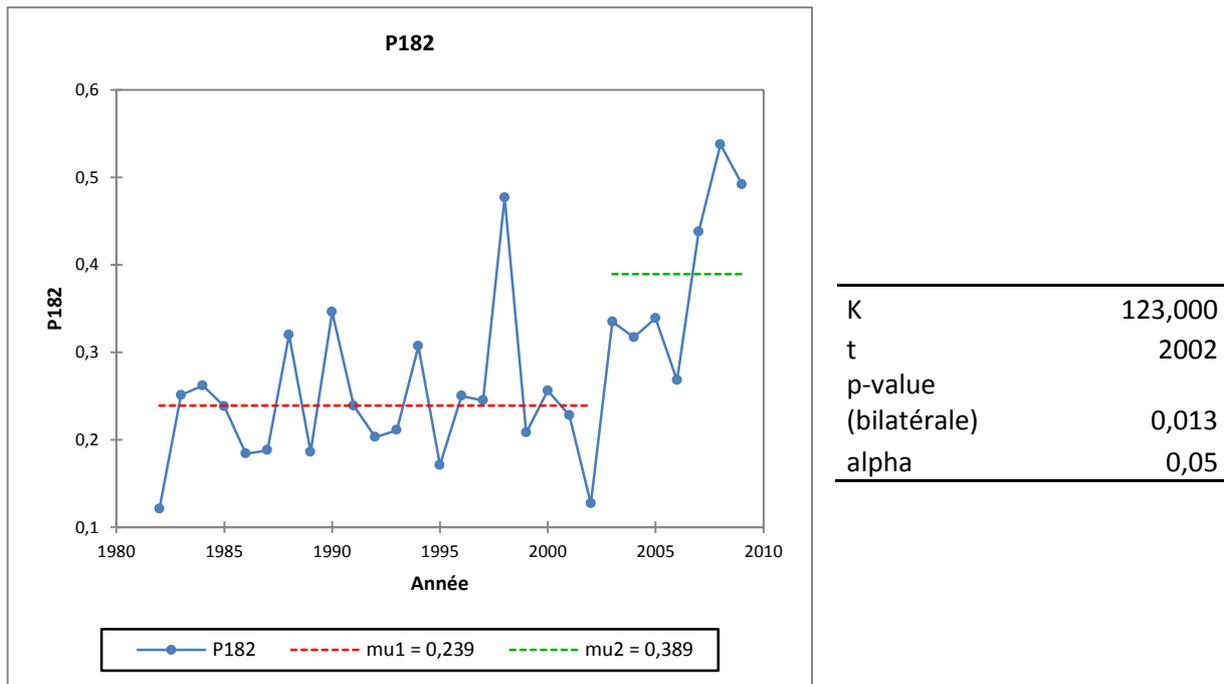
Ha : Il existe une tendance dans la série

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification  $\alpha = 0,05$ , on doit rejeter l'hypothèse nulle H0, et retenir l'hypothèse alternative Ha. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 0,40%. Le test de Pettitt appliqué à la même colonne donne le résultat exprimé par la figure 21 :

H0 : Les données sont homogènes

Ha : Il y a une date à partir de laquelle il y a un changement dans les données

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification  $\alpha = 0,05$ , on doit rejeter l'hypothèse nulle H0, et retenir l'hypothèse alternative Ha. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 1,34%.



**Fig.21:** Résultat du test d'homogénéité de Pettitt appliqué au pixel de la position 182

Selon ce test de rupture pour cet exemple, l'année 2002 est considérée comme une date de rupture dans la série de NDVI.

L'analyse spatiale de la dynamique de la végétation à partir de ces images de NDVI s'appuie sur l'étude temporelle précédemment énoncée. En effet, tous les pixels de chaque chronique marquée par une tendance significative (à la baisse ou à la hausse) sont mis sous forme de vecteurs ponctuels. Une grille vectorielle composée d'éléments de 8 km<sup>2</sup> est construite à partir d'une image NOAA. Pour se faire, il est simplement extrait, sous forme de vecteur, les contours des pixels d'une image NDVI de NOAA. Ces pixels sont suffisamment grands pour une extraction automatique. Toutefois, une correction de la grille est nécessaire car certains pixels contigus ont des valeurs radiométriques qui peuvent être similaires. Ce qui ne permet pas au logiciel (Arc GIS) de les séparer correctement (figure 22).

Ainsi, les vecteurs ponctuels construits sur la base de test de tendance sont superposés à la grille afin pour cartographie et analyse.

L'analyse spatio-temporelle des images NDVI de MODIS (250 m de résolution spatiale) comprend deux parties :

- La première partie consiste à faire une analyse statistique descriptive (analyse de position et de variation) des valeurs des pixels des images. Ainsi sont calculé sous forme image la somme, la moyenne et l'écart-type de chaque série d'image (par exemple les statistiques des 16 premiers jours de chaque mois de janvier de 2000 à 2009). Les formules utilisées s'expriment ainsi :

$$Sum = \sum_{j=1}^N x_j \quad (7)$$

$$moyenne = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \quad (8)$$

$$variance = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2 \quad (9)$$

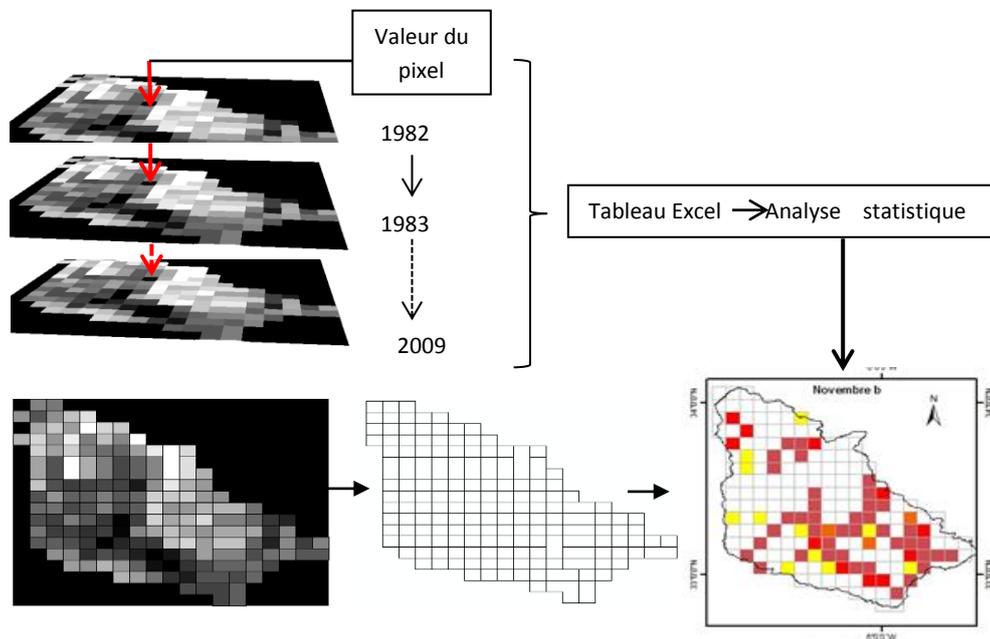
où

$x_j = \text{valeur du pixel}$

$N = \text{nombre de bande qui correspond dans le cas présent aux images de 16 jours (soit 227 bandes pour l'étude de la dynamique interannuelle de 2000 à 2009)}$

Ces formules de base permettent de calculer l'écart-type et par conséquent le coefficient de variation spatiotemporel des pixels (figure 23a).

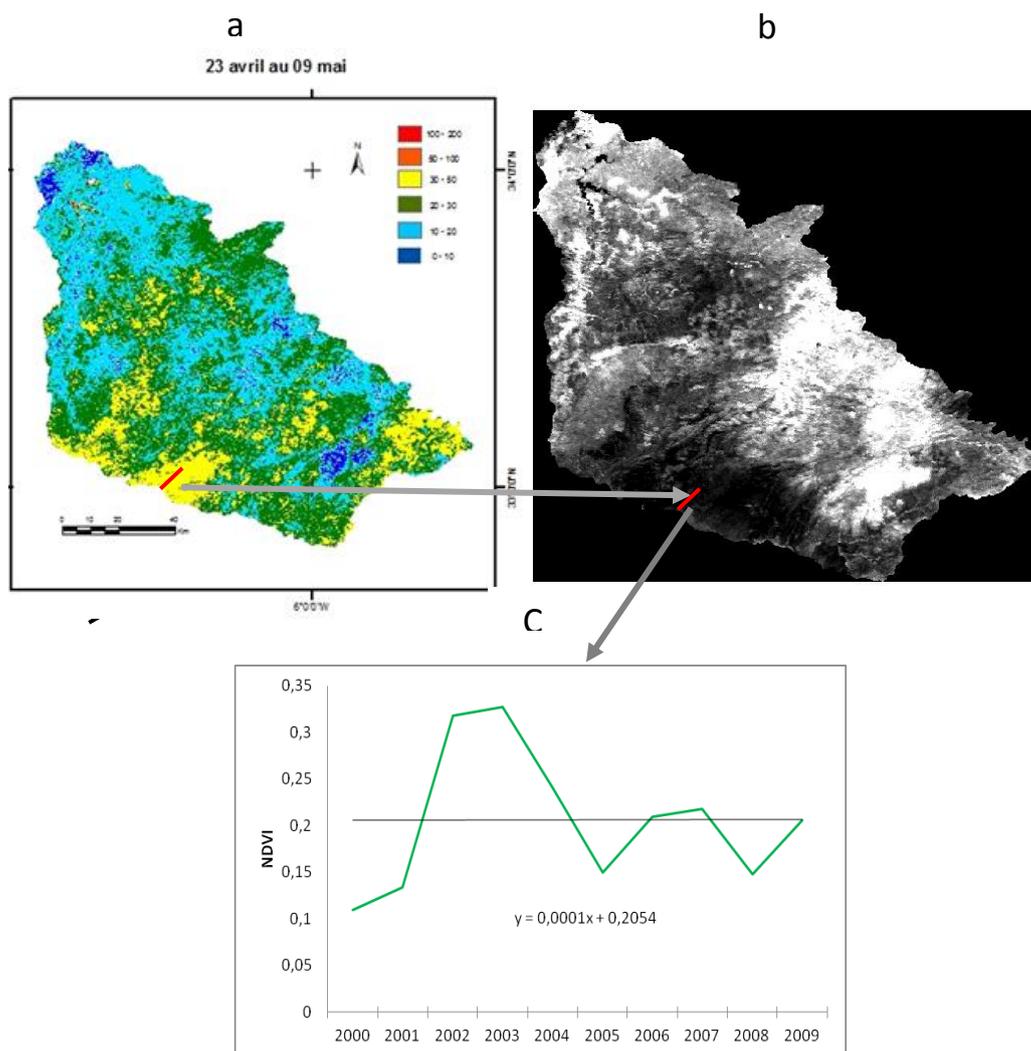
- La deuxième partie de l'analyse des données MODIS consiste à tracer des transect spatiaux dans un certain nombre d'espaces dont la variation porte à intérêt (figure 23). Ces transect ont également un caractère temporel d'autant plus qu'ils permettent de relever les valeurs d'un même groupe de pixel de 2000 à 2009 et de les analyser par la suite par statistique. La figure 23c par exemple présente la courbe d'évolution d'un transect.



**Fig.22:** Schéma méthodologique d'analyse des images de NDVI de NOAA du bassin du Bouregreg

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 CERCEO (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.



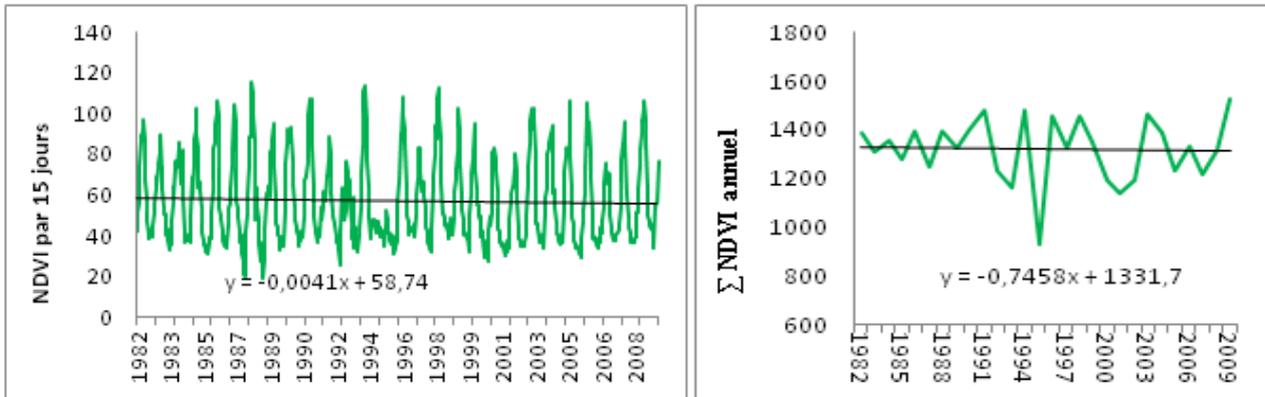
**Fig.23:** Etapes d'analyse des images NDVI de MODIS : l'image (a) représente le coefficient de variation interannuel du NDVI pour les dates du 23 avril au 10 mai de la période de 2000 à 2009 ; l'image (b) indique trait rouge un transect tracé sur un zone d'intérêt repérée sur la figure (a) (zone à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

## 2. Détection et suivi des saisons culturales : analyse par maille

### 2.1. Dynamique pluriannuelle globale de la productivité végétale

L'évolution interannuelle de la végétation de 1982 à 2009 montre, de façon générale, une stagnation de l'activité végétale globale, avec toutefois une pente légèrement négative (figure 24). La dynamique de la végétation sur cette période, lorsqu'elle est analysée par intervalle temporelle de 15 jours confirme, à travers le test de Mann-Kendall, qu'il n'existe pas de tendance significative dans la série. Pour un niveau de significativité de 0,05 (5%), le test indique que le risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie est de 46,72%. Le Tau de Kendall de -0,029 confirme un solde général négatif entre année à indice positif et année à indice négatif. Le coefficient de variation interannuelle moyen dans ce cas est de 37%. La même analyse faite à partir de la somme annuelle du NDVI des

images de 15 jours exprime une même réalité quant à l'évolution de la végétation : il n'existe pas de tendance dans la série temporelle de la somme annuelle des NDVI, ceci avec une certitude de 87,96%. Le coefficient de variation moyen d'une année à l'autre est alors d'environ 10%. Le minimum de la série se situe en 1995 et le maximum en 2009. 11 années sur 28 (39%) sont situées en dessous de la normale de la série et laissent apparaître une grande variabilité de la production végétale d'une année à l'autre : une année de très faible production peut être encadrée par deux années de très bonne production (l'année 1995 par exemple).

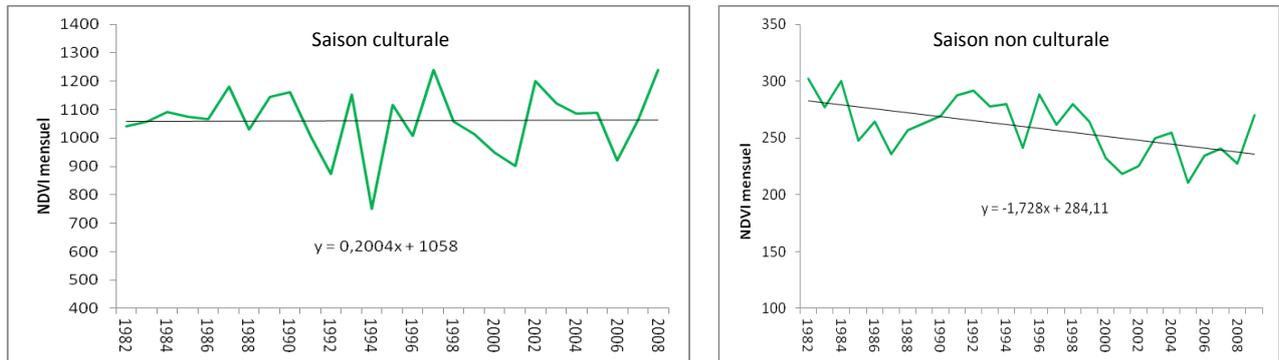


**Fig.24:** Evolution interannuelle de la végétation du bassin du Bouregreg de 1982 à 2009 (somme de l'ensemble des pixels des mages de NDVI par année ou par 15 jours)

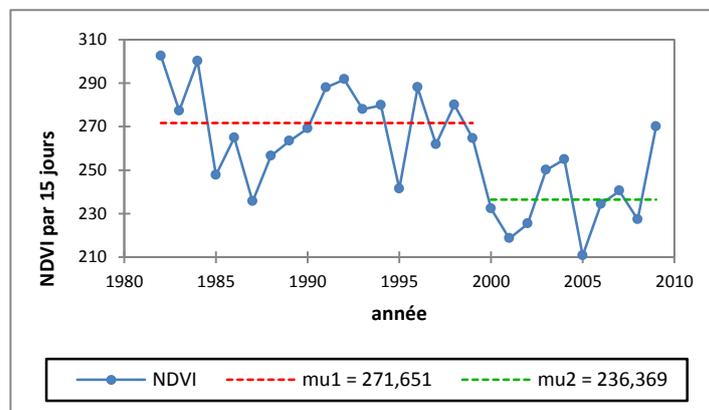
Cette dynamique générale de la masse végétale cache une dynamique intra-annuelle contrastée. L'année peut être en effet organisée en saison végétative correspondant en une succession de saison humide (septembre à mai) et de saison sèche (juin à aout). Ainsi l'analyse de la dynamique générale de la végétation d'une saison culturale à l'autre fait apparaître une stagnation de l'activité végétale, avec toutefois une pente légèrement positive (figure 25). Le rythme d'évolution est presque semblable à celui de la dynamique interannuelle globale de la végétation. Le test de tendance indique à 96,71% qu'il n'existe pas de tendance dans la série chronologique du NDVI. Le coefficient de variation moyen de la végétale des saisons humides de 1982 à 2009 est d'environ 11%. Les variations entre des saisons culturales successives peuvent être importantes. La saison culturale de plus faible activité végétale de la série est l'année 1994-1995. Celle-ci contraste avec l'année 1997-1998 (année de plus forte activité végétale de la série) dans un écart de 60,52%. Les saisons sèches qui sont des périodes de transition entre deux saisons culturales successives présentent une dynamique temporelle très différente de celles des saisons humides de 1982 à 2009 (figure 25). La pente d'évolution temporelle de la végétation sur la période est en effet négative. Cette évolution de la végétation à la baisse est confirmée par le test de tendance de Mann-Kendall : il existe une tendance négative avec une confirmation de 99%. Le coefficient de variation interannuel moyen de la végétation reste toutefois sensiblement proche de celui de la saison hydrologique. Il est de 9,70%. L'année de plus basse activité végétale est, à cet effet, l'année 2005. A l'opposé, le début de la série (1982) reste l'année de la plus forte activité végétale de cette série. Ce qui exprime une baisse importante dans le temps de la couverture végétale du bassin du Bouregreg en période estivale.

Le calcul du test d'homogénéité de Pettitt sur la série chronologique du NDVI des saisons sèches fait ressortir qu'il existe une rupture dans la série. A 99% selon le test, une rupture est intervenue en 1999 dans la série (figure 26). La baisse est évaluée à 13% entre les séries de 1982-1999 et 1999-2009. La dynamique saisonnière de la végétation est le reflet des évolutions temporelles fine de celle-ci. Aussi, l'analyse de l'évolution du NDVI à une échelle

temporelle de 15 jours de 1982 à 2009, révèle une dynamique spatio-temporelle différente à l'intérieur de ce bassin.



**Fig.25:** Evolution interannuelle de la végétation du bassin du Bouregreg selon les saisons culturelles



**Fig. 26:** Graphique du test de rupture de la série chronologique du NDVI des saisons sèches

## 2.2. Une baisse de l'activité végétale en période estivale

Cette analyse est réalisée à partir d'une maille de 8 km de côté. Cette maille correspond à la taille du pixel des images de NOAA.

### 2.2.1. Le 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 (tableau 4) 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. Elles connaissent

cependant, tout comme les moyennes, une augmentation substantielle de la première quinzaine de septembre à la deuxième quinzaine de décembre (0,147 à 0,211 de NDVI). Les maxima de végétation des quinzaines de septembre à décembre pour la période de 1982 à 2009 se sont produits à la même date : 2009.

**Tableau 4:** Tableau statistique récapitulatif de l'évolution temporelle du NDVI par quinzaine

Stat	Sept		Oct		Nov b		Déc		Jan		Fév	
Moyenne	0,207	0,202	0,205	0,208	0,244	0,274	0,312	0,348	0,387	0,416	0,446	
Min	0,147	0,112	0,103	0,151	0,14	0,185	0,211	0,231	0,213	0,236	0,228	
Max	0,27	0,257	0,321	0,319	0,344	0,382	0,446	0,513	0,531	0,569	0,59	
Coef. var	13,32	15	20,97	19,51	18,82	18,55	23,26	20,6	19,77	19,97	20,86	
Tau de Kend.	0,034	0,09	0,228	0,254	0,286	0,116	0,169	0,233	0,233	0,302	0,222	
S	13	34	86	96	108	44	64	88	88	114	84	
P-value	0,87	0,659	0,261	0,212	0,145	0,568	0,415	0,234	0,242	0,129	0,264	

Stat	Mar		Avr		Mai		Juin		Juil		Août	
Moyenne	0,472	0,477	0,468	0,436	0,385	0,337	0,289	0,254	0,235	0,219	0,215	0,207
Min	0,229	0,2	0,19	0,251	0,262	0,235	0,203	0,196	0,187	0,184	0,149	0,171
Max	0,629	0,62	0,611	0,577	0,584	0,472	0,448	0,319	0,281	0,254	0,322	0,26
Coef. var	20,45	19,59	20,57	19	22,81	18,99	16,74	12,85	10,57	8,73	14,96	11,09
Tau de Kend.	0,074	0,005	-0,085	-0,095	-0,249	-0,423	-0,423	-0,434	-0,344	-0,058	0,026	0,106
S	28	2	-32	-36	-94	-160	-160	-164	-130	-22	10	40
P-value	0,716	0,989	0,669	0,629	0,2	0,028	0,032	0,027	0,081	0,778	0,905	0,595

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 27) : 0,2% de la première quinzaine de septembre à la première quinzaine de décembre et 0,3% à la deuxième quinzaine de décembre. L'analyse détaillée de l'évolution de la végétation au cours de cette période de l'année permet toutefois d'observer différentes séquences à l'intérieur de ces courbes d'évolution. Ainsi, quatre dynamiques peuvent être constatées : celle de la première quinzaine de septembre ; celle de la deuxième quinzaine de septembre à la deuxième quinzaine d'octobre ; celle du mois de novembre et celle du mois de décembre (figure 27). La première quinzaine de septembre présente une dynamique temporelle qui se subdivise en quatre séquences bien distinctes marquant des baisses et des hausses successives de l'activité végétale. Cette activité végétale connaît en effet une baisse de 17% entre 1982 et 1987. La baisse est comblée par une importante hausse de 43% entre 1987 et 1994. Une deuxième séquence de baisse de 23% intervient entre 1994 et 2005. La fin de la série voit une reprise à la hausse de l'activité végétale de 35%. La période de la deuxième quinzaine de septembre à la deuxième quinzaine d'octobre est marquée par une dynamique temporelle en deux séquences : une période de baisse de l'activité végétale de 1982 à 1988 et une période de regain de cette activité végétale de 1988 à 2009. A titre illustratif, la première séquence de la première moitié d'octobre connaît une baisse de végétation de 27% et la deuxième séquence de cette quinzaine est marquée par une hausse de la même proportion (27%). Au mois de novembre, aucune séquence nette n'apparaît dans l'évolution de l'activité de la végétation de 1982 à 2009. La courbe d'évolution présente une allure en zigzag. Enfin, au mois de décembre, la courbe d'évolution de la végétation présente deux séquences : une baisse de l'activité végétale de 1982 à 1995 (-9% pour la première quinzaine et -5% pour la deuxième quinzaine) et une hausse de cette activité végétale de 1995 à 2009 (11% à la première quinzaine et 13% à la deuxième quinzaine). Les différentes

dynamiques successives à la baisse ou à la hausse de la végétation expliquent d'ailleurs le fait que bien que la pente générale d'évolution soit positive, elle reste presque nulle.

L'analyse de séries chronologiques à travers le test de Mann Kendall confirme cette observation. Les taux de Kendall et les soldes des séries sont positifs (tableau 4). Par contre, les p-values indiquent tous l'inexistence de tendance significative pour un niveau de significativité alpha de 0,05. A titre d'exemple, le test de Mann Kendall indique l'inexistence de tendance dans la série chronologique de la première quinzaine de septembre avec une certitude de 72%. En outre, les coefficients de variation de la couverture végétale d'une année à l'autre semblent faibles sur l'ensemble des séries. Si ce coefficient reste inférieur à 15% en septembre, il est en moyenne de 20% d'octobre à décembre. Ce qui cache en réalité les changements importants de l'activité végétale de deux années successives.

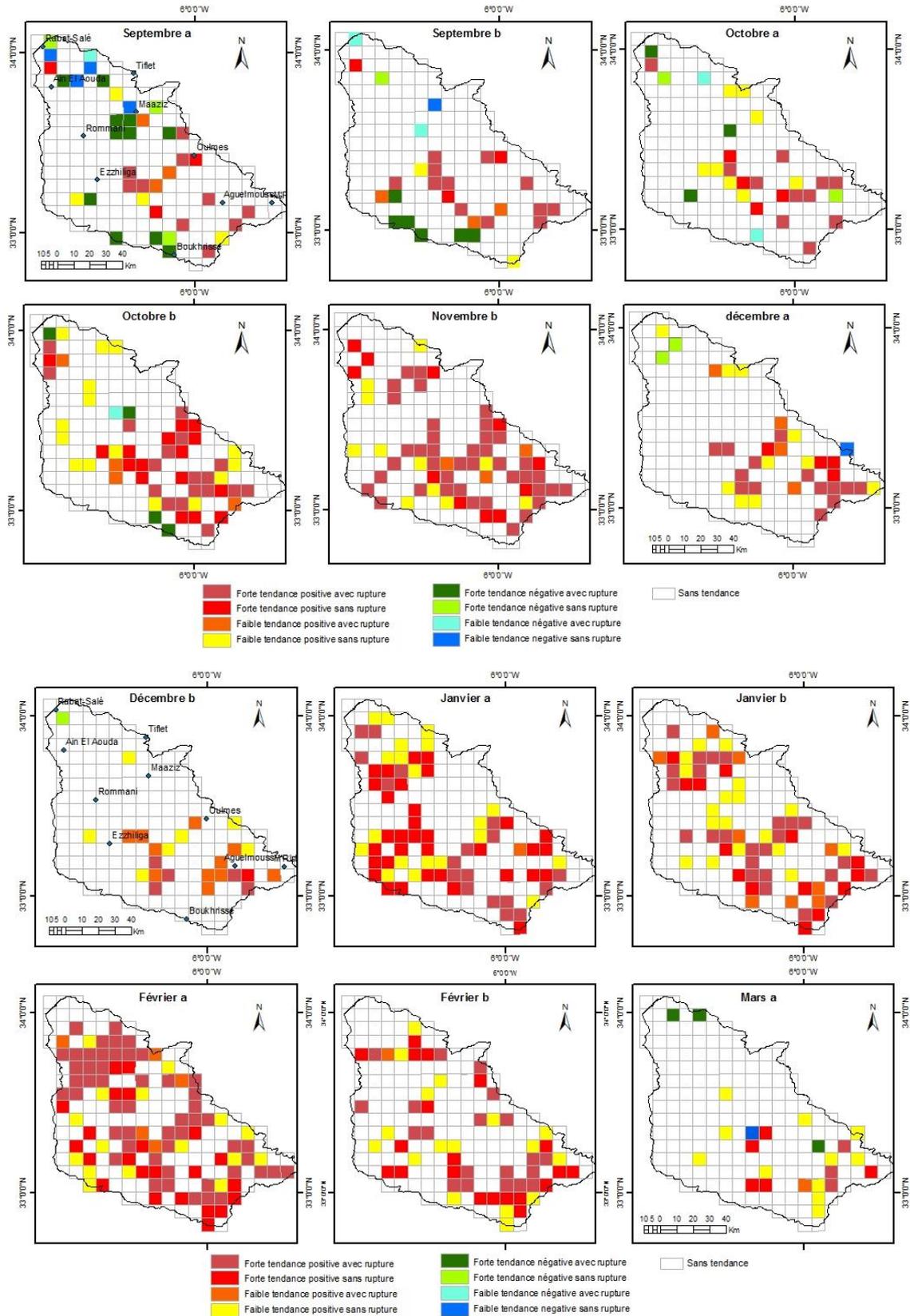
L'analyse spatio-temporelle de la végétation par maille de 8 km<sup>2</sup> fait ressortir des dynamiques particulières dans certains espaces, contrastant avec la dynamique générale de l'espace du bassin tout entier (figure 28 et 29). En effet, à la première quinzaine de septembre, il existe un certain équilibre entre les espaces marqués par des tendances négatives (aval, centre et Sud du bassin) et les espaces marqués par des tendances positives (amont Nord du bassin). Les tendances négatives faibles de l'activité végétale sont localisées à la périphérie de la zone urbaine de Rabat-Salé. Quant aux tendances négatives fortes marquées par des ruptures, elles se situent dans les zones agricoles et de matorral au Sud de Maaziz (centre du bassin) et au Nord de Boukhrisse (Sud-Est du bassin). Les ruptures dans les séries chronologiques de ces tendances négatives interviennent en 1998 (avec plus ou moins une année). Au contraire de ces espaces à dynamique végétale négative, l'intérieur des forêts de chêne liège et de chêne vert situées sur les hauts plateaux en amont du bassin connaît des tendances positives avec par endroit des ruptures positives en 1990-1992. Au mois d'octobre, se produit un renforcement des gains de tendance positive de l'activité végétale dans les zones précédemment marquées à l'amont du bassin. Le Sud-Est garde toujours une tendance négative d'évolution de la végétation à la première quinzaine d'octobre. A la deuxième quinzaine d'octobre, c'est la généralisation des tendances positives de l'évolution de l'activité végétale à l'ensemble du bassin. Les fortes tendances positives avec rupture sont observées à l'amont du bassin mais également à l'aval, autour de la localité de Ain El Aouda. Le centre du bassin reste marqué par des tendances positives faibles. Le mois de novembre apparaît comme le mois du début de la saison agricole qui a le plus gagné en dynamique positive de l'activité végétale. En effet, la majeure partie du bassin est marquée par de fortes tendances à la hausse de l'activité végétale avec des ruptures positives dans les séries chronologiques de chaque maille de 8 km<sup>2</sup>. Ces ruptures interviennent, selon le test de Pettitt, à divers dates entre 1993 et 2002 pour les espaces agricoles et forestiers des hauts plateaux de l'amont du bassin, et en 1995 ou 1996 pour le reste du bassin. Au mois de décembre, la dynamique temporelle de la végétation est marquée, en grande partie, par l'inexistence de tendances significatives dans les séries chronologiques de chaque espace de 8 km<sup>2</sup>, exception faite de quelques espaces agricoles et forestiers de l'amont du bassin. L'analyse, en termes de superficies marquées par des tendances (positives ou non) et de proportions du bassin affecté par ces différentes tendances (figure 30), indique une baisse régulière des espaces à tendance négative de la première quinzaine de septembre à la deuxième quinzaine de décembre au détriment d'une dynamique positive de plus en plus importante. Au mois de septembre, le rapport entre les espaces à évolution positive de la végétation et ceux à évolution négative est équilibré : 9% du bassin sont marqués soit par des tendances positives (101 477 ha) et 9% également par des tendances négatives (95 508ha). A la première quinzaine d'octobre, les espaces à dynamique négative sont divisés par deux à savoir 41 785 ha (4% du bassin) contre 137 292 ha (13% du bassin) pour les espaces à gain de végétation. Au mois de novembre, les espaces caractérisés par des

gains d'activité végétale sont évalués à 388 000 ha (36% du bassin) avec une inexistence d'espace à tendance négative. A la deuxième quinzaine de décembre, la proportion du bassin marquée par des tendances végétale positives est de 13% (191 015 ha) contre 1% (17 908 ha) pour les tendances négatives.

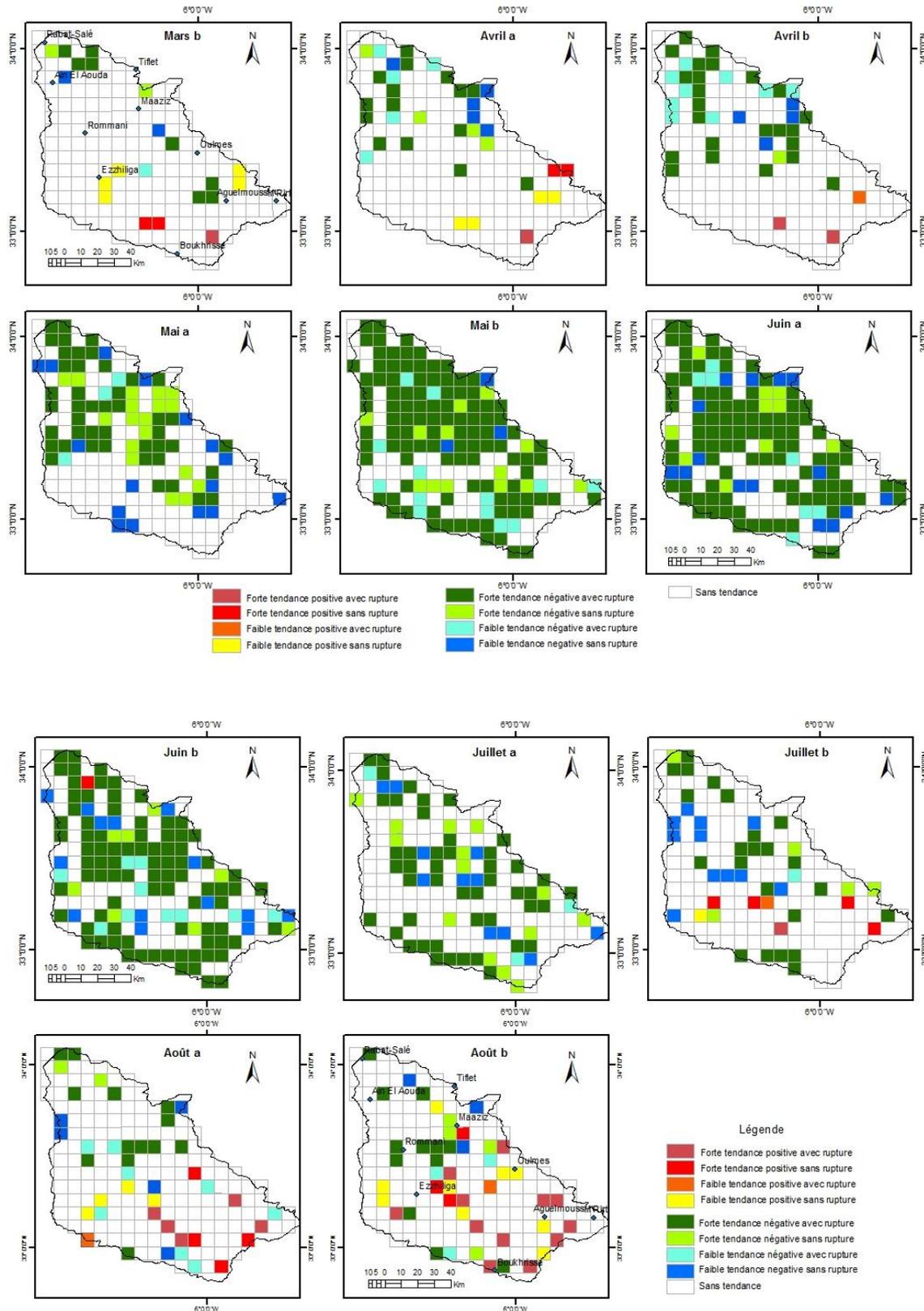
L'analyse de la variation spatiotemporelle de la végétation à partir des images de NDVI de MODIS (période de 2000-2009) permet d'avoir une idée détaillée de la dynamique observée entre 1982 et 2009 à partir des images NOAA. Ces images permettent également de mettre en relief la dynamique de l'occupation du sol. Ainsi, pendant la première quinzaine du mois de septembre, les variations de la végétation restent faibles sur l'ensemble du bassin. Les activités végétales les plus importantes (coefficient de variation supérieur à 15%) sont observées principalement dans les zones de forêt, les zones agricoles étant pour la plupart encore nues (figure 31 et 32). Les variations de l'activité végétale deviennent de plus en plus importantes au fur et à mesure de la progression dans la saison agricole. Ainsi, elles sont logiquement plus importantes au mois d'octobre qu'à celui de septembre. A la première moitié d'octobre, les espaces de variation modérée à forte (coefficient de variation supérieur à 35%) de la végétation d'une année à l'autre, sont situés dans quelques espaces agricoles de l'aval Nord du bassin et des plateaux de l'amont. A la deuxième moitié, presque toutes les zones agricoles en amont et en aval sont marquées par des variations importantes. Seul le centre du bassin et les zones forestières connaissent de faibles variations temporelles de la végétation (inférieur à 15% de coefficient). Au mois de novembre, les variations spatiotemporelles de la couverture végétale d'une année à l'autre sont importantes et s'étendent progressivement à l'ensemble des espaces agricoles. Ces variations sont fortes à très fortes (supérieur à 25 ou 35% de coefficient). En décembre, les zones agricoles peuvent nettement être distinguées sur les cartes car elles ont toutes des coefficients de variation de la couverture végétale qui sont très forts. Ainsi, en référence au calendrier agricole (figure 24) et aux cartes d'occupation du sol (figure 32), une explication logique peut être donnée à la dynamique spatiotemporelle de la végétation observée à la fois sur les images de NOAA que de MODIS. Au mois de septembre et d'octobre, les sols sont nus et préparés pour les cultures céréalières. Au mois de novembre et décembre, l'activité agricole couplée aux variations importantes du climat observées en début de saison culturale conduit à de fortes variations de l'activité végétale d'une année à l'autre. En outre, les gains de végétation observés sur les images de NOAA, d'abord à l'amont puis à l'aval du bassin, semble être dus d'une part à la céréaliculture et d'autre part à des conditions d'humidité plus favorables sur les plateaux amont du bassin. Mais cette évolution de l'activité végétale s'expliquerait par la croissance naturelle des forêts de chêne de l'amont du bassin de 1982 à 2009.



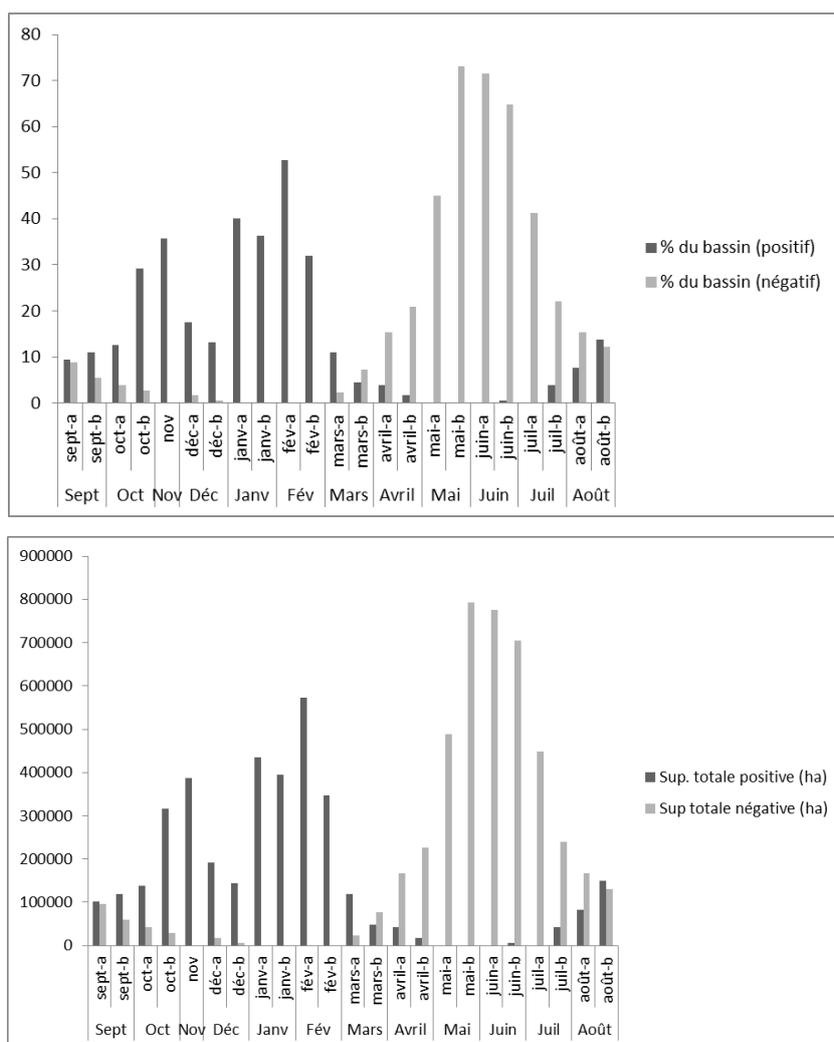
**Fig. 27:** Courbe d'évolution mensuelle interannuelle du NDVI (moyenne annuelle de l'ensemble des pixels) : (a) correspond à la première moitié d'un mois donné et (b) correspond à la deuxième moitié de ce mois



**Fig. 28:** Evolution spatio-temporelle de la végétation de la première moitié du mois de septembre à la première moitié du mois de mars (NOAA 1982-2009)



**Fig. 29:** Evolution spatio-temporelle de la végétation de la deuxième moitié du mois de mars à la deuxième moitié du mois d'août (NOAA 1982-2009)



**Fig.30:** Tendence évolutive de la végétation dans le bassin versant du Bouregreg de 1982 à 2009

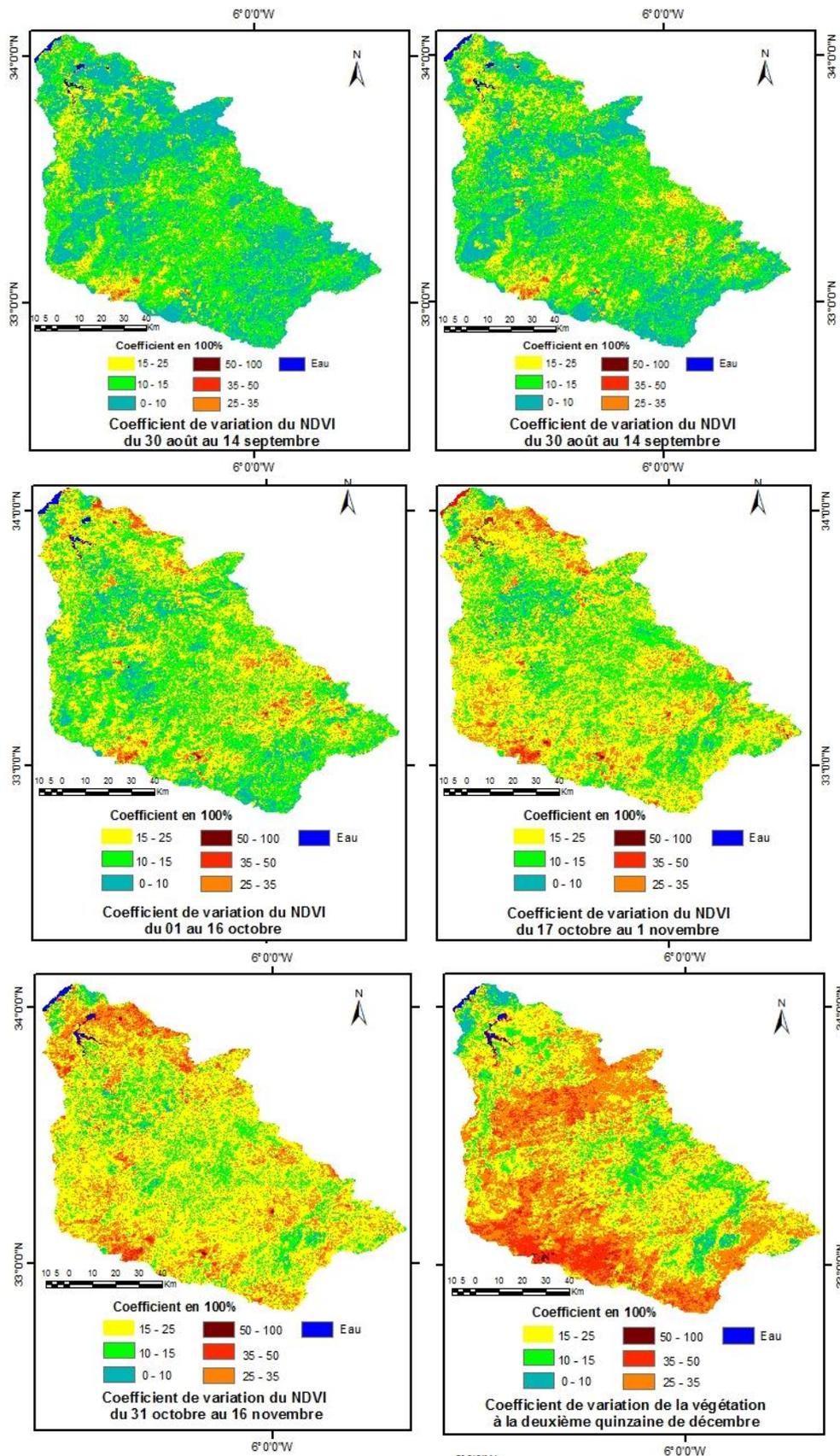
### 2.2.1. Le milieu de la saison agricole : janvier et février

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 33 et tableau 5). 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

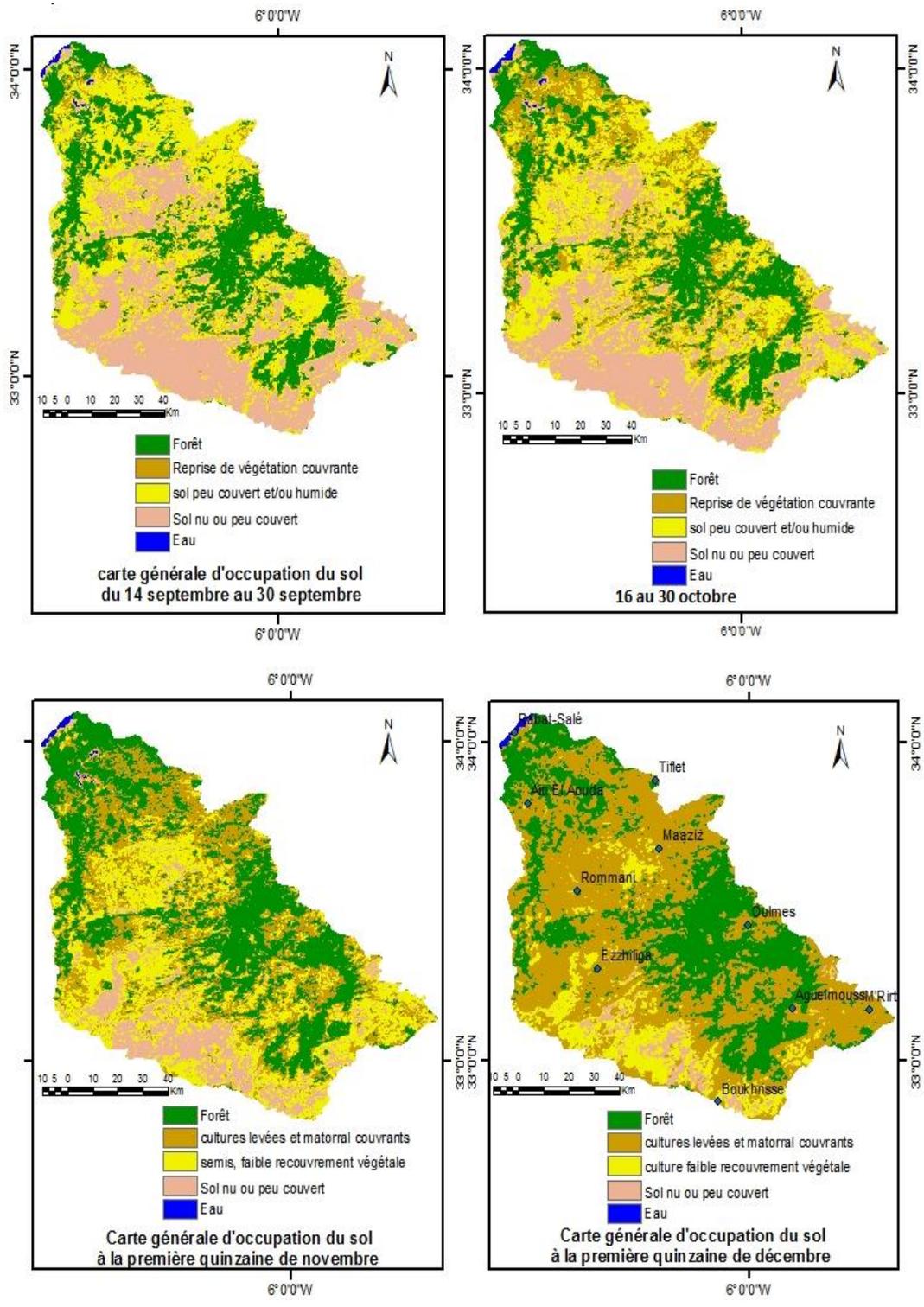
l'activité végétale caractérisant la séquence 1995-2009 sont de 9% à la première moitié de janvier, de 19% à la seconde moitié, de 21% pour la première quinzaine de février et de 25% pour la deuxième quinzaine (tableau 5). Au niveau statistique, les mois de janvier et de février présentent au cours de la série 1982-2009, des coefficients de variation temporelle interannuelle de l'activité végétale assez semblables. Ce coefficient est de 21% à la première moitié de janvier et de 20% à la deuxième moitié. Il est de 20% pour la première quinzaine de février et de 21% pour la deuxième quinzaine. Les minima d'activité végétale enregistrés aux mois de janvier et février correspondent aux dates de 1982 pour la première quinzaine de janvier et de 1995 pour les autres quinzaines. Pour les maxima de la série à cette période, ils se sont établis aux dates de 1998 pour les quinzaines constituant les bornes des mois de janvier et février (première quinzaine de janvier et deuxième quinzaine de février) et de 2009 pour les quinzaines situées à l'intérieur des dates. L'évolution croissante des moyennes de l'activité végétale en janvier et février est l'expression de la croissance des plantes cultivées ainsi que de l'importante humidité des sols à cette période de l'année. Bien que le bassin du Bouregreg soit marqué par des gains importants de l'activité végétale en janvier et en février, l'analyse du test de tendance de Mann-Kendall indique une inexistence de tendance notable dans l'évolution moyenne annuelle de la végétation. L'analyse de la dynamique spatiotemporelle de cette végétation par maille de 8 km<sup>2</sup> sur la période 1982-2009, fait ressortir, de façon générale, des tendances positives importantes dans de nombreux espaces (figure 28). Le gain d'activité végétale qui était localisé sur les plateaux amont du bassin pendant les mois précédents s'est élargi. Un second pôle de dynamique positive se situe à l'aval du bassin. Les espaces d'évolution positive de la végétation sont majoritairement localisés dans les zones de végétation forestière. A la première quinzaine de janvier, 40% de la superficie du bassin (435 754 ha) sont marqués par d'importantes évolutions positives. Cette proportion est de 36% (393 969 ha) à la deuxième quinzaine. Le mois de février est celui où les espaces forestiers et agricoles du bassin ont connu les plus fortes dynamiques positives de l'activité végétale. En effet, la moitié du bassin (53% représentant 573 046 hectares) est marquée par un gain important de végétation. Cette quinzaine représente le pic des gains positifs de la dynamique interannuelle de la végétation. La proportion d'espace à dynamique positive chute à 32% (346 215 ha) à la deuxième quinzaine. Ces gains positifs de végétation à cette période de la série sont marqués par des ruptures dans le sens positif. A la première quinzaine de janvier, ces ruptures sont surtout localisées en amont dans les espaces de forêt de chêne vert. Quelques espaces forestiers en aval connaissent aussi ce phénomène. Ces espaces positifs de rupture s'élargissent ainsi de la première quinzaine de janvier à la deuxième quinzaine de février où l'espace aval à l'intérieur du polygone formé par les communes d'Ain El Aouda-Tiflet-Maaziz et Rommani est assez caractéristique de cette dynamique. Le centre du bassin (espace entièrement agricole) reste la zone la moins marquée par ces ruptures. Le tableau 6 résume les dates de rupture de série dans la dynamique temporelle de la végétation dans le bassin en janvier et en février. Ces ruptures tournent, généralement autour des années 1996, 1999 et 2002.

**Tableau 5:** Les séquences d'évolution temporelle de la végétation de 1982 à 2009 pour les mois de janvier et de février

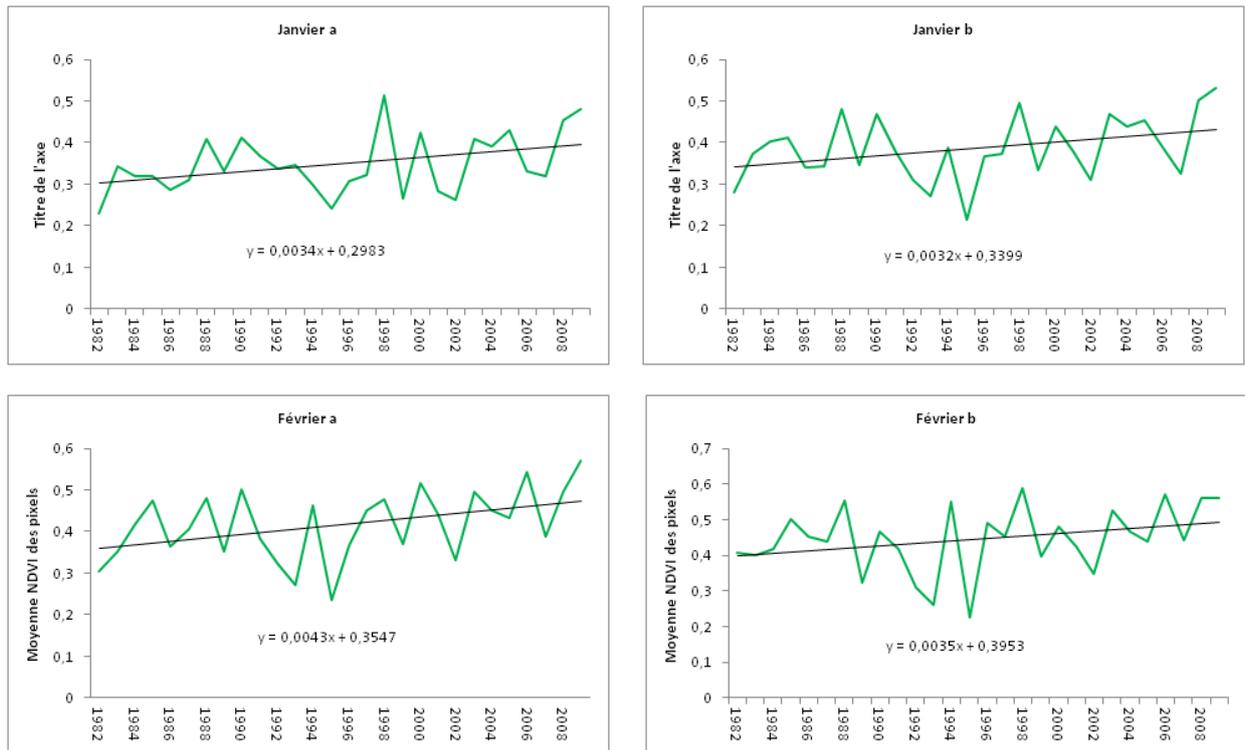
Pourcentage d'évolution de la végétation	Janvier a	Janvier b	Févier a	Févier b
Séquence 1 (1982-90)	47,86	40,81	37,20	9,49
Séquence 2 (1990-1995)	1,25	-11,71	-10,76	-15,49
Séquence 3 (1995-2009)	8,76	18,65	20,81	25,08



**Fig. 31:** Variation de la couverture végétale du bassin du Bouregreg en début de saison agricole (MODIS 2000-2009)



**Fig.32:** Carte d'occupation du sol en début de saison agricole (MODIS 2000-2009)



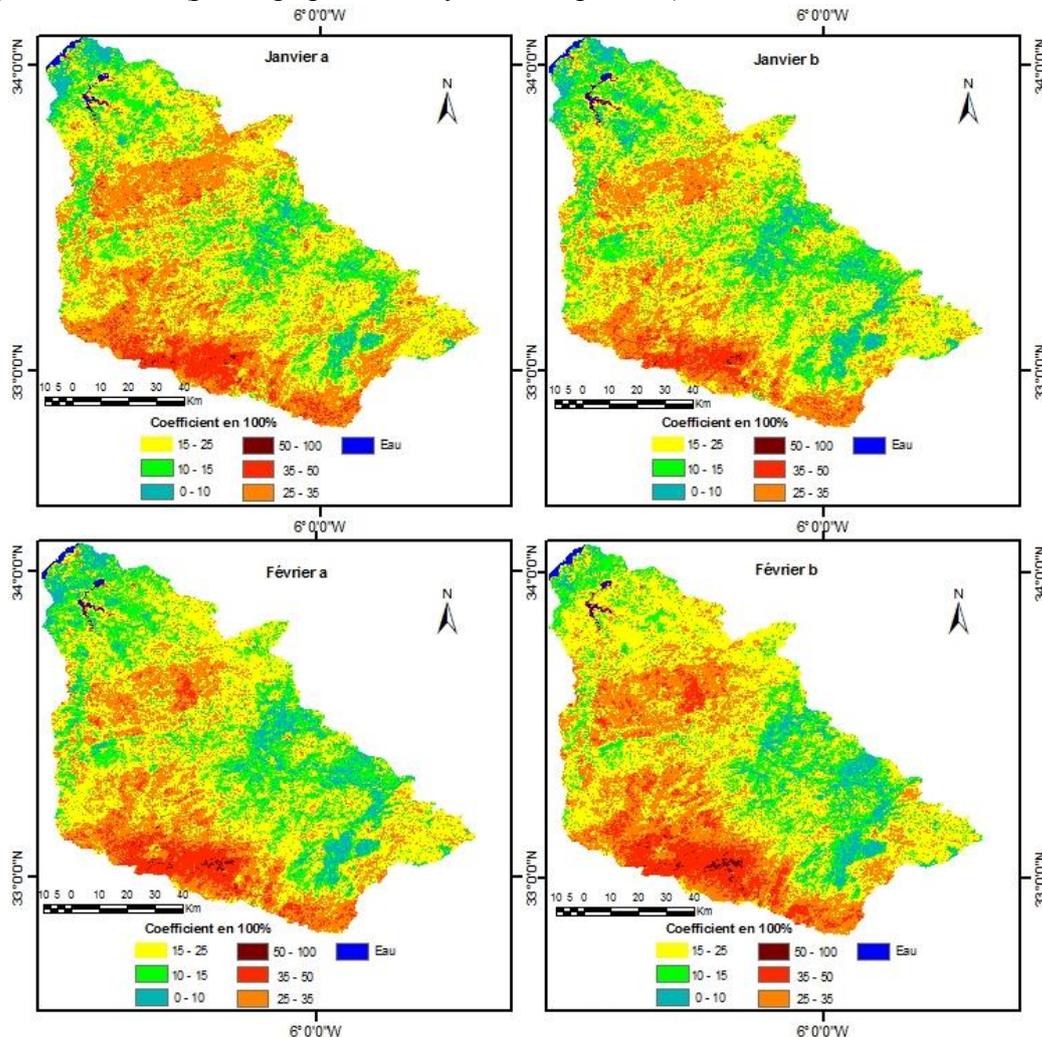
**Fig.33:** Courbe d'évolution du NDVI : moyenne annuelle de l'ensemble des pixels aux mois de janvier et février

**Tableau 6:** Dates de rupture des séries chronologiques au mois de janvier et février

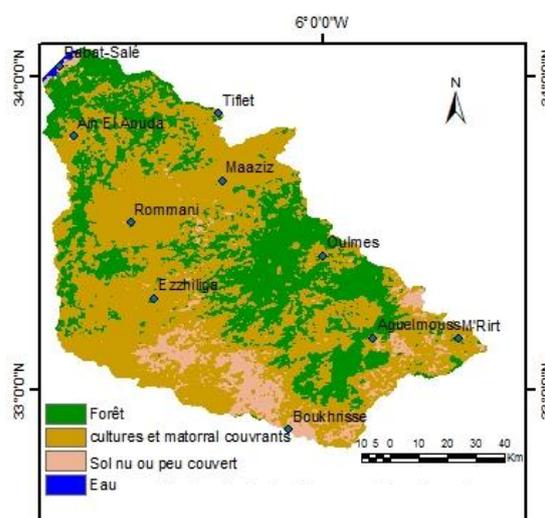
	Années de rupture	
	Amont	aval
<b>Janvier a</b>	2002	1997
<b>Janvier b</b>	1996 ; 1997 ; 2002	1997 ; 1999
<b>Février a</b>	1996 ; 1997 ; 2002	1997 ; 1999
<b>Février b</b>	1995-2002	1995 ; 1996 ; 2002

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 (figure 34 et 35), 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. Ces espaces sont des lieux de culture et des matorrals. La dynamique spatio-temporelle de la végétation au mois de janvier et de février ouvre certaines pistes de réflexion quant aux causes de cette dynamique positive. Ainsi, le gain important d'activité végétale peut être lié aux améliorations techniques au niveau agronomique, à une concentration de l'activité agricole, à moins de pression pastorale sur la végétation à cette époque de l'année (pâturage plus verdoyant et disponible).



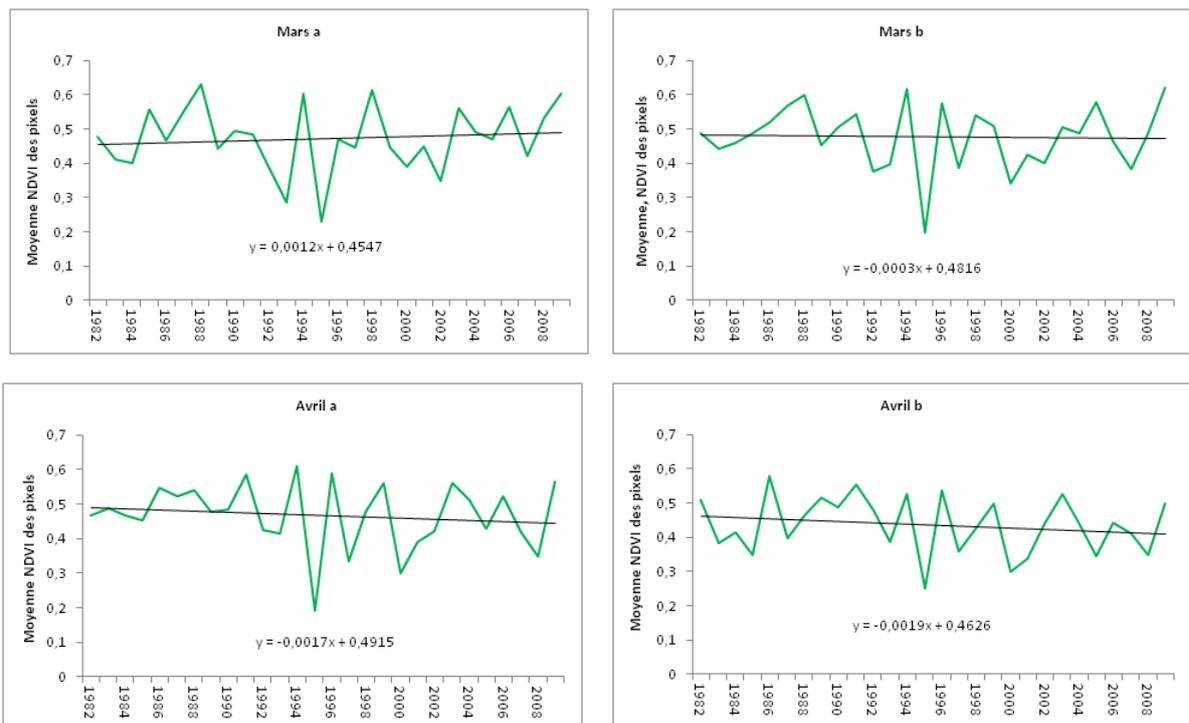
**Fig. 34:** Variation de la couverture végétale du bassin du Bouregreg en milieu de saison agricole (MODIS 2000-2009)



**Fig. 35:** Carte générale d'occupation du sol à la première moitié de janvier

### 2.2.1. Pendant la période de maturité des céréales : mars et avril

Le mois de mars correspond au pic de l'activité végétale pendant la saison culturale. 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 36). Dès la deuxième moitié de mars, la pente d'évolution temporelle de la végétation entre 1982 et 2009 devient négative. Cette dynamique laisse entrevoir une évolution temporelle négative de la végétation dans certains espaces du bassin. Au niveau statistique, la moyenne de l'indice de végétation indique le niveau le plus élevé de l'activité végétale au cours d'une année (tableau 4). Les minima de végétation pendant les mois de mars et avril de la série 1982-2009 correspondent à l'année 1995. Quant aux maxima, ils divergent : 1988 pour mars a ; 2009 pour mars b ; 1994 pour avril a ; 1986 pour avril b. l'évolution vers une baisse de l'activité végétale à cette période de l'année s'exprime statistiquement par un tau de Kendall négatif pour le mois d'avril, bien que les coefficients de variation restent sensiblement les mêmes (autour de 20%). Cependant l'analyse par le test de tendance de Mann-Kendall indique que cette évolution temporelle n'est pas encore assez prononcée pour exprimer à une tendance significative.



**Fig.36:** Courbe d'évolution du NDVI : moyenne annuelle de l'ensemble des pixels aux mois de mars et avril

L'analyse spatio-temporelle de la végétation par maille de 8 km<sup>2</sup> indique que les espaces dont la dynamique végétale est marquée par des tendances négatives se localisent d'abord dans les forêts de chêne liège au Nord-Est de Rabat-Salé (Mars a). Ces espaces à évolution négative deviennent de plus en plus importants et s'étendent à l'aval du bassin (mars a et avril b) et au centre (avril b) du bassin. L'amont du bassin reste relativement épargné. Ces espaces correspondent majoritairement aux domaines forestiers aval du bassin. A la seconde moitié

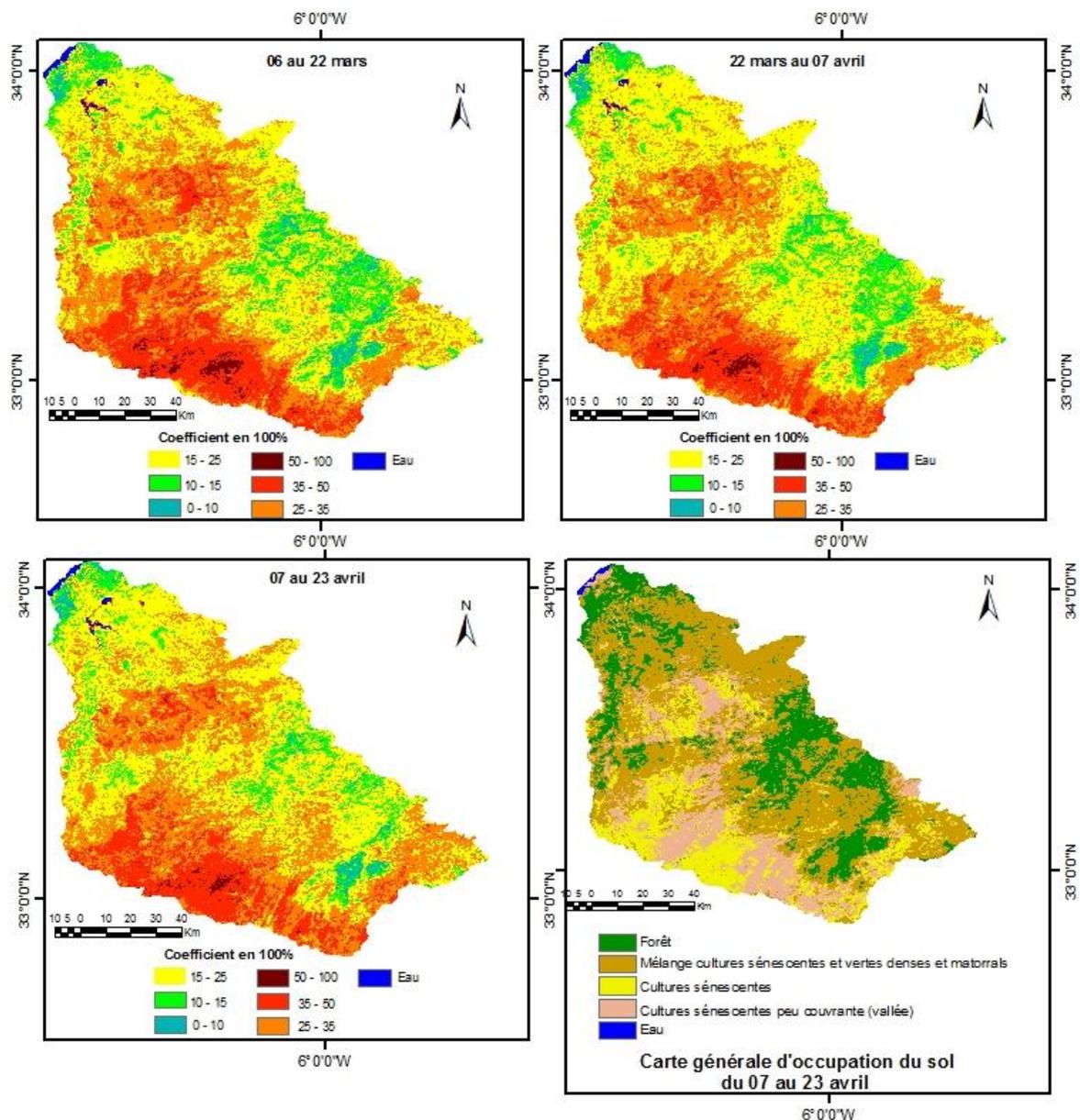
d'avril, les espaces négatifs touchent les forêts de chêne dans la zone d'Oulmes (les plateaux amont du bassin). A l'opposé de cette dynamique négative, les espaces à progression végétale positive ne se résument plus qu'à quelques évolutions faibles dans les zones amont du bassin. Ces espaces disparaissent progressivement entre la première quinzaine de mars et la deuxième quinzaine d'avril. Ainsi, la superficie des espaces tendant à perdre une part importante de l'activité végétale entre 1982 et 2009 est de 23 877 hectares (2% du bassin) en mars a, 77600 hectares en mars b (7%), 167 138 hectares à la première quinzaine d'avril (15%) et 226 831 hectares (21%) à la deuxième quinzaine. Les espaces végétaux à tendance positive régressent de 119 385 hectares (11%) à la première moitié de mars à 47 754 hectares (4%) à la deuxième moitié, 41 785 hectares (4%) à la première quinzaine d'avril pour atteindre 17 908 hectares (2%) à la deuxième quinzaine d'avril (figure 28, 29 et 30). La recherche de rupture dans les séries chronologiques de chaque espace de 8 km<sup>2</sup> indique que les espaces marqués par des tendances d'évolution négative de la végétation connaissent, dans la plupart des cas, des ruptures négatives de série. Au mois de mars, la rupture s'opère en 1994 pour les espaces de la zone de Rabat-Salé. Dans les espaces plus proches du centre du bassin, cette rupture est marquée à partir de 1996. A la première quinzaine d'Avril, les dates de rupture sont de 1991 et de 1994 pour l'extrême aval du bassin et de 1994 pour les espaces situés vers le centre. A la deuxième moitié d'Avril, les dates de rupture correspondent aux années 1992 et 1994 pour l'extrême aval (Rabat) et 1994 et 1996 pour le reste du bassin.

La variation spatio-temporelle de la végétation à partir des images MODIS (figure 37), pour la période de 2000 à 2009, reste assez semblable à celle des mois de janvier et février. Toutefois, à l'exception des forêts de chêne liège au Sud-Est de Rabat et de chêne vert à l'extrême amont du bassin, tous les espaces forestiers connaissent une augmentation progressive de la variation de l'activité végétale de mars à avril. En effet, de variation très faible (inférieure à 10%), ces espaces végétaux passent progressivement à des variations comprises entre 10% et 25%. Le tracé de transect sur ces espaces afin d'identifier la nature de la variation n'aboutit pas à des conclusions solides. En effet, ces espaces présentent à la fois des tendances contraires d'évolution végétale. Les espaces agricoles gardent, quant à eux, le même schéma de variation de l'activité végétale. Ces variations sont de forte à très forte dans le centre et le sud du bassin. Ces variations de l'espace agricole liées à la production agricole sont marquées par des tendances temporelles positives. Les cultures légumineuses et quelques oléagineux sont en phase d'être récoltés tandis que les cultures céréalières ont atteint leur maximum de croissance. Ces variations de l'activité végétale semblent être liées avant tout aux variations du climat de l'année 2000 à l'année 2009. Cependant, comparé à la dynamique spatio-temporelle de la végétation de 1982 à 2009, il se dégage une seconde hypothèse selon laquelle les variations de l'activité végétale constatées dans les espaces forestiers peuvent être le fait de pressions pastorales ou anthropiques.

### *2.2.2. La fin de la saison agricole : mai-juin-juillet-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 38). 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. La pente d'évolution de la végétation pendant la période de 1982 à 2009 (figure 38) indique une dynamique proche de zéro. Par rapport au début de la série (1982), l'activité végétale n'a connu qu'une baisse de 3% à la première quinzaine d'août et de 1% à la deuxième quinzaine. Les minima observés dans la série de 1982 à 2009 correspondent aux dates de 1988 (mai a), 2001 (mai b), 2005 (juin a à juillet b), 1988 (août a) et 1987 (août b). Les maxima de la série quant à eux correspondent aux dates de 1991 (mai a), 1982 (mai b), 1984 (juin a et b), 1983 (juillet a) et 1992 (juillet b). En dehors de la première quinzaine du mois de mai, les autres quinzaines des mois caractéristiques de la baisse de végétation dans le bassin (mai, juin et juillet) sont caractérisés par des maxima survenus avant 1985 dans la série temporelle d'indice de végétation. Quant aux minima, ils sont situés majoritairement dans les années 2000. Cela confirme l'évolution à la baisse de plus en plus importante de l'activité végétale de 1982 à 2009 au cours des mois de mai à fin juillet. Les maxima du mois d'août sont survenus en 1993 et 1994 respectivement pour la première et deuxième quinzaine du mois. La dynamique



**Fig.37:** Variation de la couverture végétale en fonction de la nature de l'occupation du sol aux mois de mars et avril (MODIS 2000-2009)

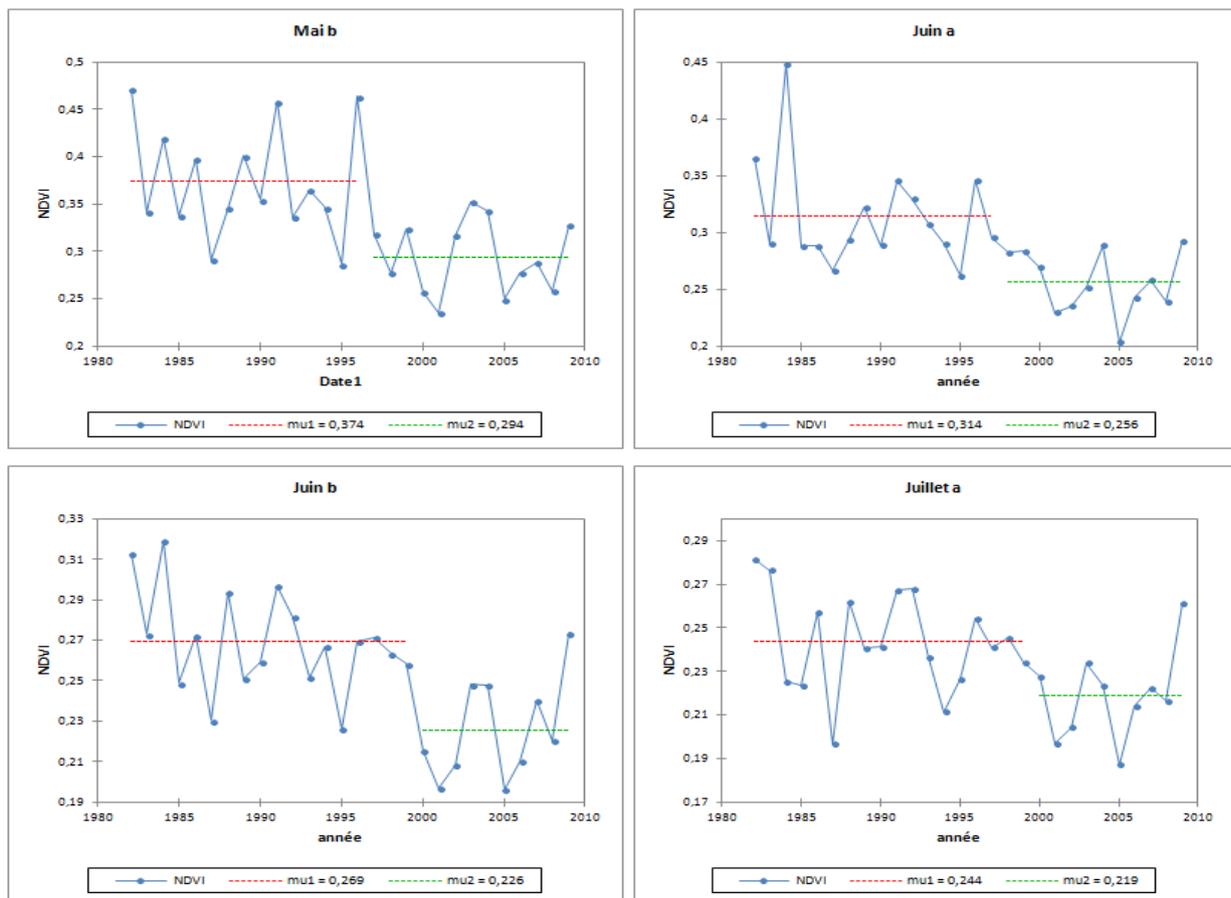


**Fig.38:** Courbe d'évolution interannuelle du NDVI en fin de saison agricole

temporelle de la végétation de mai à juillet contraste avec le coefficient de variation interannuel de cette végétation au cours de la série temporelle. En effet, en dehors de la première quinzaine de mai, les coefficients de variation (tableau 4) restent les plus bas de toutes les quinzaines de l'année. Ces coefficients évoluent de 19% à la deuxième quinzaine de

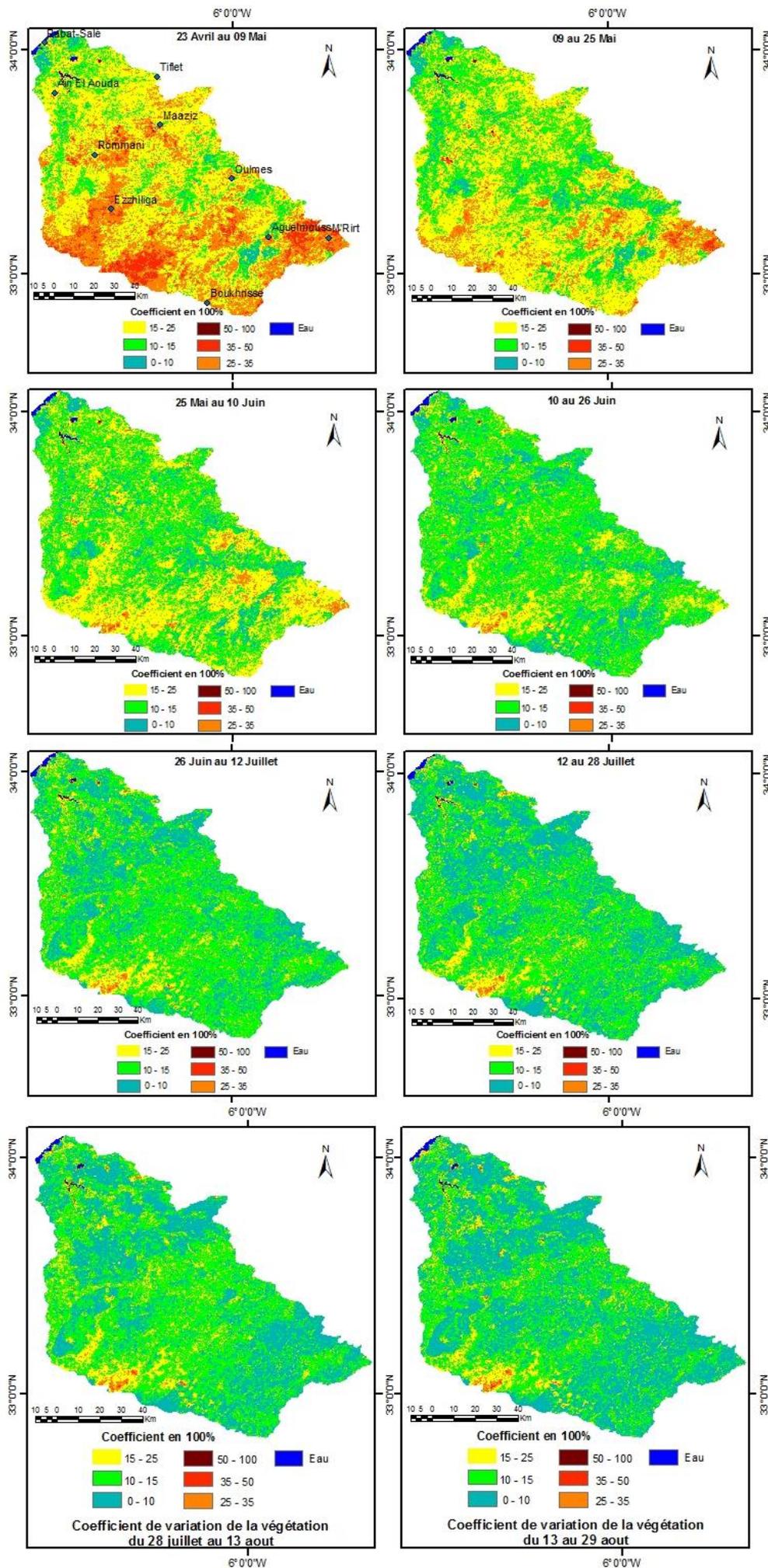
mai à 9% à la deuxième quinzaine de juillet. Ainsi, bien que l'activité végétale à cette époque de l'année ne soit pas importante et varie faiblement, force est de constater qu'au final, l'impact de ses variations est la plus importante quant à la baisse de la végétation au cours de la série de 1982 à 2009. La variation moyenne interannuelle de la végétation reste relativement faible au mois d'août. Il est de 15% pour la première quinzaine et de 11% pour la deuxième quinzaine de ce mois. L'analyse du test de tendance de Mann-Kendall appliqué à la série pendant les quinzaines 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%) (tableau 4). La recherche de rupture dans ces tendances significatives (figure 39) 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 km<sup>2</sup> 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 29). A partir de la première quinzaine du mois de juillet, la tendance négative d'évolution de la végétation commence à se réduire, même si le phénomène reste dispersé dans tout le bassin. A la deuxième quinzaine du mois de juillet, quelques espaces forestiers en amont du bassin connaissent des tendances contraires, savoir un regain d'activité végétale, ce qui annonce la période de transition que constitue le mois d'août. Toutefois, le bassin reste encore majoritairement marqué par des espaces à évolution négative. Au niveau statistique, les superficies des espaces marquées par des pertes notables d'activité végétale (figure 30) sont de 489477 hectares pour mai a (45% du bassin), 793908 hectares pour mai b (73%), 776000 hectares pour juin a (71%), 704369 hectares pour juin b (65%), 447692 hectares pour juillet a (41%), 238769 hectares pour juillet b (22%), 167138 hectares (15%) pour août a et 131323 hectares (12%) pour août b.

L'analyse détaillée de la variation spatio-temporelle de la végétation à partir d'images MODIS indique que le bassin passe d'une situation de forte variation spatio-temporelle à une situation contraire de mai à août (figure 40 et 41). En effet, la variation interannuelle de la végétation passe, dans la majorité du bassin, à des coefficients de variation inférieurs à 15%. Ce qui est en harmonie avec le coefficient de variation interannuel de cette végétation au cours de la série temporelle 1982 à 2009. Au mois de mai, le centre du bassin qui appartient à l'un des deux espaces à plus forte variation de la végétation commence à être au même niveau de dynamique que les espaces environnants. De mai à la fin août, cet espace centre va même devenir la zone ayant le plus faible niveau de variation spatio-temporelle de la végétation (inférieur à 10% de coefficient de variation). Le deuxième espace à forte variation de la végétation qu'est le Sud du bassin gardera, quant à lui, la même logique de mai à août avec, toutefois, des coefficients à la baisse (inférieurs à 25%) et une réduction très forte des espaces touchés par cette variation importante de l'activité végétale. Les espaces forestiers, qui pendant les quinzaines précédentes connaissaient, dans leur majorité, des coefficients de variation inférieurs à 10%, deviennent à cette période de l'année les espaces à plus forte variation de l'activité végétale. Les coefficients de variation sont compris entre 10 et 15%.

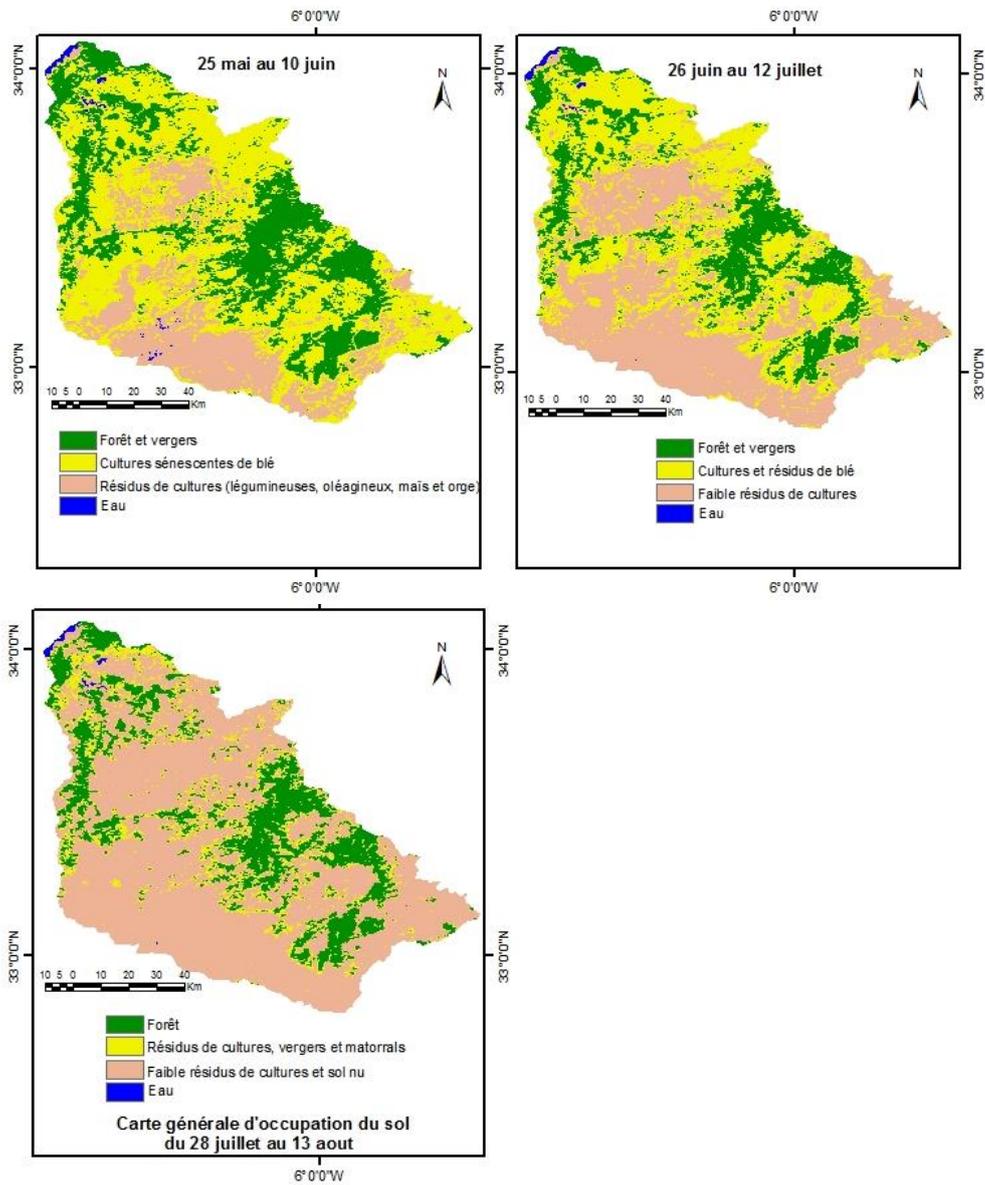


**Fig. 39:** Résultat du test de rupture de Pettitt pour les séries de NDVI des quinze jours de mai à juillet

Relativement au calendrier agricole de mai à août, plusieurs facteurs expliquent la dynamique de la végétation de 1982 à 2009. Les mois de mai et juin correspondent aux périodes de récolte des cultures céréalières et autres. C'est la fin véritable de la saison culturale, d'où les très fortes variations de l'activité végétale constatées dans les espaces agricoles pendant les quinze jours précédant le mois de mai et pendant le mois de mai lui-même. La fin des principales activités agricoles à la mi-juin conduit à des faibles variations de la végétation dans ces espaces. En outre, il apparaît (figure 41) que les espaces agricoles passent rapidement à des espaces à sol nu ou presque à partir du mois de juillet. Aussi, les fortes tendances à la baisse de l'activité végétale de 1982 à 2009 au cours de la période estivale seraient liées à ce phénomène d'épuisement rapide des résidus agricoles couvrant les sols. Cette situation trouverait son origine dans l'accroissement du cheptel, au cours de la période 1982 à 2009. En outre, le calendrier pastoral de ce bassin fait recours au pâturage forestier de plus en plus important au cours de l'été. Cela expliquerait d'ailleurs les fortes variations de l'activité végétale observées dans les espaces forestiers du bassin. Ces hypothèses n'excluent pas la possibilité d'une évolution à la baisse de l'activité végétale due à la variabilité pluviométrique.



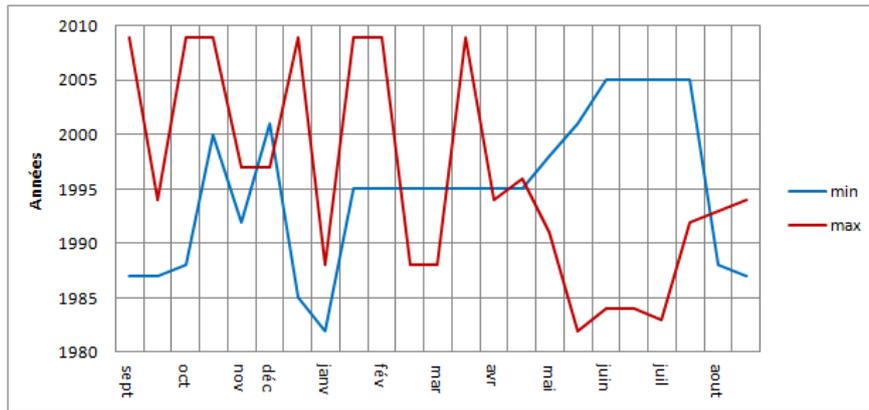
**Fig.40:** Variation de la couverture végétale dans le bassin versant du Bouregreg de mai à juillet (MODIS 2000-2009)



**Figure 41:** Carte générale d'occupation du sol en fin de saison agricole (MODIS 2000 à 2009)

## Conclusion

De façon générale, le bassin versant du Bouregreg connaît une baisse de végétation au cours de la série temporelle 1982-2009. La dynamique spatio-temporelle de la végétation permet de regrouper les mois de l'année, selon des dynamiques homogènes. Ainsi, certains mois sont marqués par un gain important de végétation. Il s'agit des mois d'octobre-novembre et janvier-février. D'autres par contre connaissent une situation inverse. Ce sont les mois de la période de la fin du printemps et de la pleine saison estivale (mai à fin juillet). Les mois d'août-septembre et mars-avril connaissent des situations de transition. Les mois de mars et avril évoluent vers une dynamique négative de la végétation, surtout au centre et à l'aval du bassin. Toutefois, globalement, cette dynamique négative n'est pas encore insuffisante pour conclure à une tendance générale négative de l'évolution temporelle de cette végétation. Les mois d'août et septembre sont marqués par un certain équilibre entre les gains de végétation dans certains espaces forestiers en amont du bassin et des pertes de végétation dans les espaces agricoles au centre et les espaces forestiers à l'aval du bassin. Globalement, les espaces forestiers (espace de chêne vert) à amont du bassin sont relativement moins marqués par des dynamiques d'évolution à la baisse de la végétation que les espaces agricoles et forestiers au centre et à l'aval du bassin. L'analyse de l'évolution de la dynamique des minima et des maxima de végétation au cours de la série de 1982 à 2009 permet de conclure que l'année de plus grande production végétale est l'année 2009. Quant à l'année de la plus petite activité végétale, elle correspond à 1995. En outre, la figure 42 permet de comprendre que les mois à tendance évolutive négative ont des maxima situés, pour la plupart, avant 1995 et des minima situés après cette date. Quant au mois de la pleine saison culturale, ils ont des maxima situés, pour la plupart, après 1995 et des minima avant l'an 2000. Le mois de décembre apparaît comme un cas particulier et n'appartient à aucun groupe de dynamique temporelle de la végétation. Il apparaît, en effet, comme le mois où la végétation a connu peu de changement au cours de la série temporelle. En référence à la littérature concernant l'évolution temporelle de la pluviométrie dans cette région (évolution pluviométrique marquée par des baisses importantes), certaines hypothèses solides peuvent être émises quant aux causes de cette dynamique de la végétation. En effet, les mois caractérisés par des gains positifs apparaissent comme liés à des progrès au niveau agronomique. Les activités culturales semblent être, de plus en plus, sécurisées sur un intervalle assez humide pour éviter des risques de sécheresse agricole. Les bornes de la saison culturale, connaissent une évolution de certains espaces vers des dynamiques végétales négatives. Bien que les tendances évolutives générales de ces mois ne soient pas encore assez significatives, les conséquences des évolutions à la baisse de la végétation ont des répercussions plus grandes sur la production agricole finale d'une saison. Les mois de la période de fin de récolte céréalière (juin) et de la pleine saison estivale, caractérisés par des dynamiques spatio-temporelles négatives importantes, semblent être liés à une pression pastorale grandissante qui épuise assez rapidement les résidus de cultures pour accroître la pression sur les pâturages permanents (forêts et matorrals). Les mois de la pleine saison culturale sont caractérisés par des coefficients de variation interannuels importants par rapport à ceux des mois de la saison estivale. Le rapport est souvent le double de la variation en été. Ce qui conduit à l'hypothèse d'une variabilité interannuelle importante de la pluviométrie pendant la saison culturale. La vérification de ces hypothèses nécessite une analyse multivariée de cette dynamique végétale avec les facteurs explicatifs anthropiques et climatiques.



**Fig. 42** : Courbe représentant les maxima et minima de chaque série temporelle de la période 1982-

# **Chapitre III : Vulnérabilité de la végétation et des sols en relation avec les variabilités climatiques et les activités agropastorales**

## **Introduction**

Le bassin versant du Bouregreg est un espace d'agriculture pluviale. Cette caractéristique agricole du bassin relève de la politique agricole mise en place après les indépendances. Certaines zones du Maroc ont, en effet, bénéficié de la politique d'irrigation au détriment d'autres zones, comme celle à laquelle appartient le bassin versant du Bouregreg. Bien que les zones d'agriculture pluviale n'aient pas connu d'investissements importants en matière d'irrigation, elles demeurent aujourd'hui les principales productrices agricoles du royaume. Cependant, la dynamique des précipitations, depuis les années 1970, rend de plus en plus aléatoire cette agriculture pluviale. Des stratégies sont mises en place par les paysans pour atténuer les effets des aléas climatiques. Mais ces stratégies conduisent souvent à des dégradations de la végétation et des sols. Cette dynamique du milieu vers une dégradation marquée est amplifiée par les pressions agricoles, pastorales et démographiques. L'expression visible de l'interaction entre des conditions pluviales de plus en plus défavorables et les activités anthropiques est une baisse ou une stagnation des productions agricoles, principalement céréalière. Ce qui également tend à confirmer l'hypothèse d'une baisse de capacité de productivité des sols. A travers ce chapitre, il est ainsi question, dans une première partie d'analyser l'évolution de la pluviométrie et les conditions d'humidité des sols dans le bassin du Bouregreg, afin de mieux cerner son impact sur les productions végétales. Dans une deuxième partie, il est mis en relief les pressions anthropiques qui s'exercent sur la végétation et les sols du bassin. Enfin, dans une troisième partie, il est question de faire un bilan de l'action combinée de l'évolution du climat et des activités agricoles et pastorales sur le paysage du bassin. Pour atteindre ces objectifs, des méthodes géostatistiques, de télédétection et de SIG sont utilisées afin d'analyser, d'une part l'évolution du climat et de l'occupation du sol (1980 – 2009), et d'autre part pour détecter les corrélations entre le climat, les activités anthropiques et les changements observés au niveau du milieu.

## ***1. Techniques d'analyse de l'évolution de l'occupation du sol dans sa relation avec la variabilité climatique et les activités agropastorales***

L'analyse de la dynamique du climat et de son action directe et indirecte sur les productions végétales est faite ici au travers de l'outil statistique d'une part, et d'autre part, par la télédétection et les SIG.

En effet, il s'agit premièrement d'analyser statistiquement l'évolution des conditions hydriques dans le bassin. Cette analyse statistique est faite à partir des données pluviométriques d'une part, mais aussi à partir d'indices de végétation et des températures de surface d'images NOAA et MODIS. Une analyse de corrélation entre l'évolution de ces conditions hydriques et la dynamique de la production végétale de 1980 à 2009 permet, dans un deuxième temps, de mettre en relief l'impact de la variabilité climatique sur la végétation. Enfin troisièmement, cette étude d'impact est affinée par une analyse de télédétection et de SIG à partir du croisement d'informations extraites d'images Landsat et Spot 5, de statistiques agricoles et pastorales et d'enquêtes de terrain.

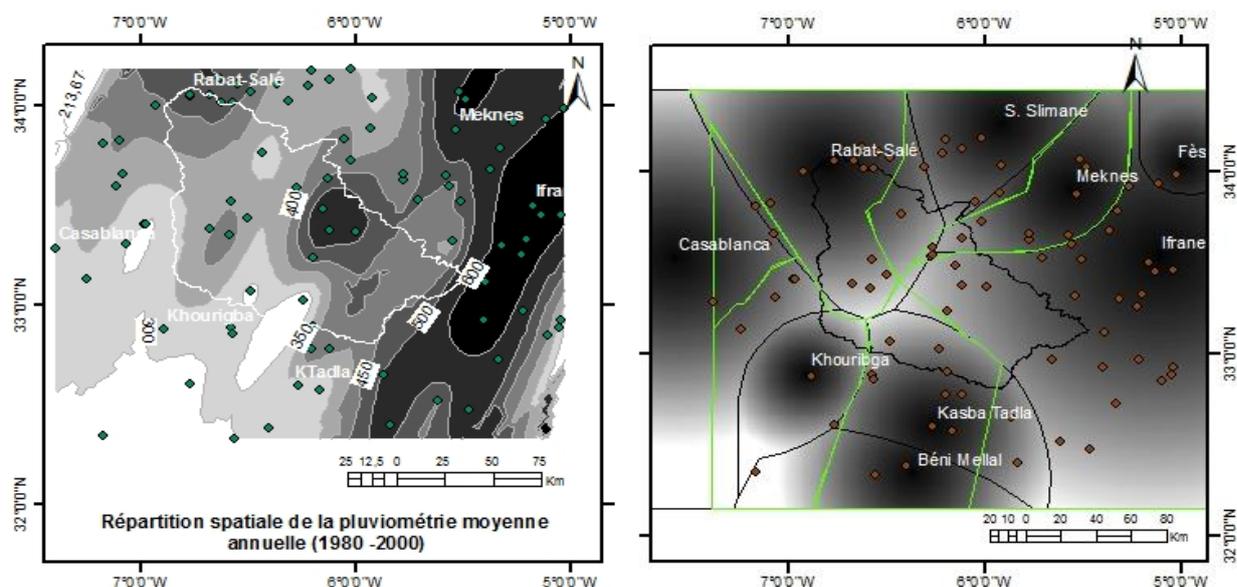
### **1.1. Exploration et spatialisation des données pluviométriques**

L'utilisation des données pluviométriques requiert certaines précautions d'avant usage. Certaines données sont soit manquantes soit erronées pour divers raisons : modification de l'environnement du site, modification de la surface réceptrice ou défaut de calibrage, erreur de mesure et d'enregistrement, erreur de transmission, d'archivage. Il est donc important de procéder à une critique de ces données avant utilisation. Plusieurs méthodes permettent ainsi de combler les lacunes et d'améliorer la qualité des données. Celle retenue pour cette étude est la Méthode du Vecteur Régional (MVR). la Méthode du vecteur Régional est « un modèle simple qui permet de représenter les informations pluviométriques d'une station par une séquence d'indices annuels, représentatifs des précipitations dans cette région, et par des coefficients caractéristiques de chaque poste d'observation » (Hiez et al., 1992). La MVR consiste à élaborer à partir de l'ensemble de l'information disponible une espèce de station fictive qui soit représentative de toute la zone d'étude. Pour chaque station est calculé un indice qui sera supérieur à 1 lorsque l'année est excédentaire, et inférieur à 1 lorsque l'année sera déficitaire. C'est cette série d'indice annuel qui est appelé vecteur régional, puisqu'il prend en compte l'information d'une région supposée climatiquement homogène (Mahé et Hôte, 1992 ; Diello et al., 2003). Deux méthodes courantes sont utilisées pour appliquer le vecteur régional : la méthode de G. Hiez et celle de Y. Brunet Moret. La méthode de G. Hiez est basée sur le calcul du mode (valeur la plus fréquente), alors que celle de Y. Brunet Moret est basée sur la moyenne, toute en éliminant les valeurs trop éloignées de la moyenne pour éviter de trop contaminer les estimations par des données manifestement erronées. Dans le cas de la critique de données pluviométriques des stations du bassin du Bouregreg, la méthode de Brunet Moret a été retenue car une moyenne reste un bien meilleur estimateur.

Dans le cadre de l'amélioration de la qualité des données pluviométrique du bassin du Bouregreg, en tenant compte la répartition climatique connue et des facteurs physiques comme la proximité de l'océan ou le relief, il a été jugé opportun de diviser les stations de l'étude en unités climatiques homogènes (figure 43). Ces unités climatiques sont délimitées par un croisement entre la spatialisation des données pluviométriques par krigeage et le diagramme de Voronoï (polygones de Thiessen). Le diagramme de Voronoï est le diagramme de minimisation d'un ensemble fini de fonctions continues, chacune de ces fonctions étant une fonction distance à un objet. Le diagramme de Voronoï partitionne l'espace de définition en régions, chacune d'entre elle réunissant les points qui sont plus proches d'un objet que de tous les autres (Wormser, 2008). La figure 43 présente en ligne verte les unités climatiques

délimitées manuellement sur fond du diagramme de Voronoi (polygone de Thiessen) en grisé, ainsi que de la méthode de krigeage.

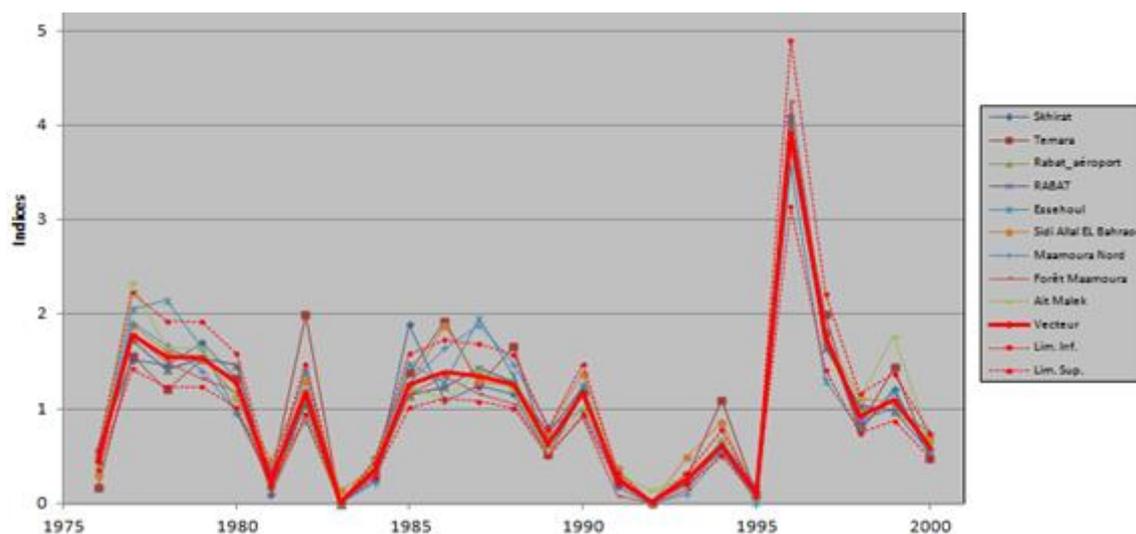
Le tableau 7 et la figure 44 présentent un exemple d'application de cette méthode pour les stations ouest (zone de Rabat) au mois de janvier. Il ressort du tableau que le mois de janvier (milieu de saison culturale) est marqué par une très forte variation dans toutes les stations (supérieur à 70%). Toutefois pour cette partie du bassin, il existe une homogénéité très grande entre les stations si bien que les indices des stations restent dans l'ensemble dans les limites du vecteur régional. Seul le segment compris entre 1985 et 1989 présente quelques problèmes de qualité (figure 44). Les deux dernières colonnes de tableau 7 confirment la relative bonne qualité des données des stations de cette partie du bassin (niveau de qualité globalement au-dessus de la moyenne). Les corrections à apporter dans cette partie des données sont donc minimes.



**Fig. 43:** Unités climatiques du bassin versant du Bouregreg (en vert sur la carte de droite les unités modifiées à partir de celui de Thiessen en noir : les unités de Casablanca et S. Slimane ont été fusionnée aux autres)

**Tableau 7:** Tableau récapitulatif des résultats de la méthode du vecteur régional des stations de la zone de Rabat (mois de janvier 1982-2000)

Id Station	Nb Années	E.T. Obs.	Coef. Variati	Moy. Obs.	Moy. Calculé	Moy. Ecart	E.T. Ecart	Homogénéit	Corré. /Vect	Lin. a priori	Lin. a post.	Proportional	Qualité(/10)	Evaluation(/10)
Skhirat	25	61,3	0,887	69,1	69,9	-0,011	0,176	0,979	0,979	0,36	0,3	0,2292	4,5	3,6
Temara	25	54,7	0,814	67,2	62,8	0,07	0,271	0,265	0,952	0,49	0,33	0,1764	6,3	6
Rabat_aérop	25	70,9	0,846	83,9	84,4	-0,006	0,092	0,654	0,994	0,33	0,13	0,0892	8,9	8,8
RABAT	25	71,3	0,854	83,5	84,3	-0,01	0,091	0,613	0,994	0,35	0,14	0,0814	9,1	9
Essehoul	25	71,9	0,83	86,7	84,9	0,021	0,242	0,092	0,957	0,32	0,21	0,1167	8,2	8,2
Sidi Allal EL E	25	58	0,746	77,8	72,7	0,07	0,161	0,543	0,984	0,38	0,28	0,1903	5,8	5,8
Maamoura N	25	68,1	0,845	80,7	80,4	0,004	0,182	0,207	0,976	0,33	0,37	0,1863	5,9	5,9
Forêt Maame	25	82,6	0,955	86,5	93,1	-0,071	0,14	0,023	0,992	0,29	0,27	0,1196	8,1	8,1
Ait Malek	25	61,7	0,823	75	72,3	0,036	0,207	0,062	0,97	0,34	0,25	0,1527	7	7



**Fig.44:** Indice du vecteur et des stations du mois de janvier (méthode Brunet Moret)

Les données pluviométriques corrigées, pour être utilisées dans le SIG raster, doivent faire l'objet de spatialisation. Parmi les méthodes existantes en la matière, celle du krigeage a été retenue. Il existe trois types de krigeage : le krigeage simple (la moyenne est constante et connue), le krigeage ordinaire (la moyenne est constante mais inconnue) et le krigeage universel (la moyenne est non constante et inconnue). L'application et le choix du type de krigeage demande une certaine analyse préalable. En évitant d'exposer au maximum les formules mathématiques, le krigeage adopté pour cette étude est un krigeage universel avec une stationnarité d'ordre 2 (Mathéron, 1969 ; Chilès et Mathéron, 1975 ; Meylan, 1986 ; Laborde, 2000 ; Gratton, 2002). Quatre modèles (les plus courants) de répartition spatiale de la donnée ont été calculés : le modèle exponentiel, le modèle gaussien, le modèle sphérique et le modèle circulaire. Le tableau 8 présente un exemple d'application de ces quatre modèles pour le mois de janvier. L'analyse statistique indique que le modèle exponentiel présente les erreurs les plus faibles. En toute logique, ce modèle est retenu pour spatialiser les données pluviométriques des stations pour le mois de janvier. La même analyse est reprise pour tous les mois.

**Tableau 8:** statistique descriptive de l'application de la méthode de krigeage universel pour le mois de janvier

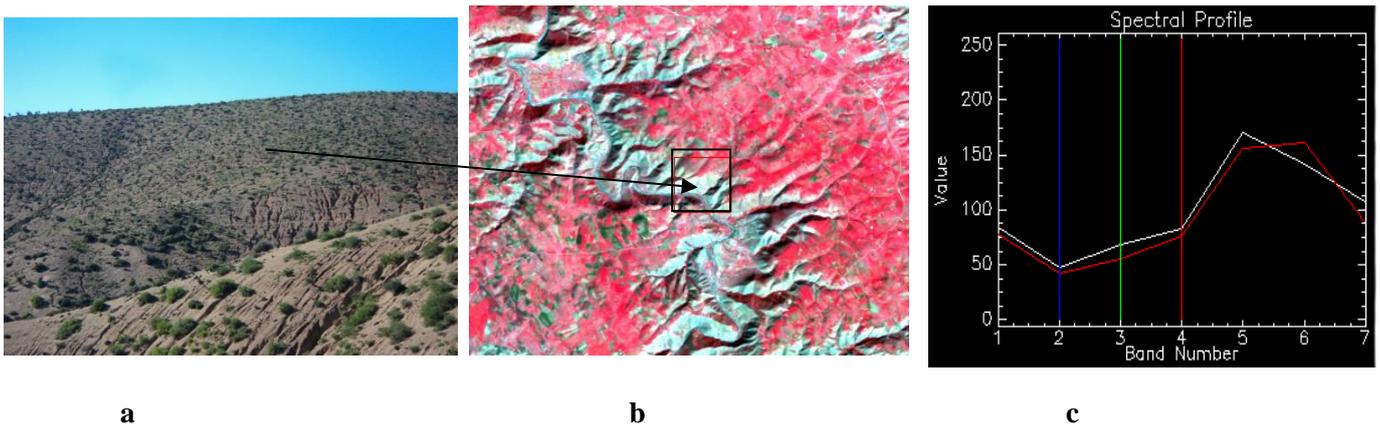
Modèles	Erreur d'estimation		
	Moyenne	Ecart-type des erreurs	Erreur maximale
Exponentiel	0,079	22,82	35
Gaussien	-1,146	28,48	97,22
Sphérique	0,61	19,31	-84,318
Circulaire	-1,14	21,26	-243,79

## 1.2. Elaboration de la carte d'occupation du sol

### 1.2.1. Prétraitement des images pour la classification par arbre de décision (LANDSAT)

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 épars dont la réflectance sur l'image satellite se confond avec les sols nus. Or le bassin est marqué par d'importants espaces où la végétation est très faible. Sur la figure 45a et 45b est visible une zone de versant exposé au Sud, (illustration de ce type d'espace). La figure 45c représente la courbe de réflectance de cet espace (courbe rouge) comparée à celle d'un sol nu sec (courbe blanche).
- La seconde raison est que la classification par arbre de décision permet de prendre en compte le facteur relief, en particulier l'exposition au sud (figure 46) 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.



**Fig. 45 :** Espace de végétation épars se confondant au sol nu sur l'image LANDSAT de printemps : a = photo ; b = image satellite composition 432 ; c = signature spectrale



**Fig. 46:** Contraste de densité de végétation sur les versants : à gauche le versant exposé au Nord, à Droite le versant exposé au Sud

La classification des images a été précédée par 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 orthorectifiées, le prétraitement a concerné la correction atmosphérique de ces images et leur réprojection dans le système local (Maroc zone 1, système Lambert conique conforme, datum Merchich).

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 classer ;
- 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 avant de les intégrer dans l'arbre de décision.

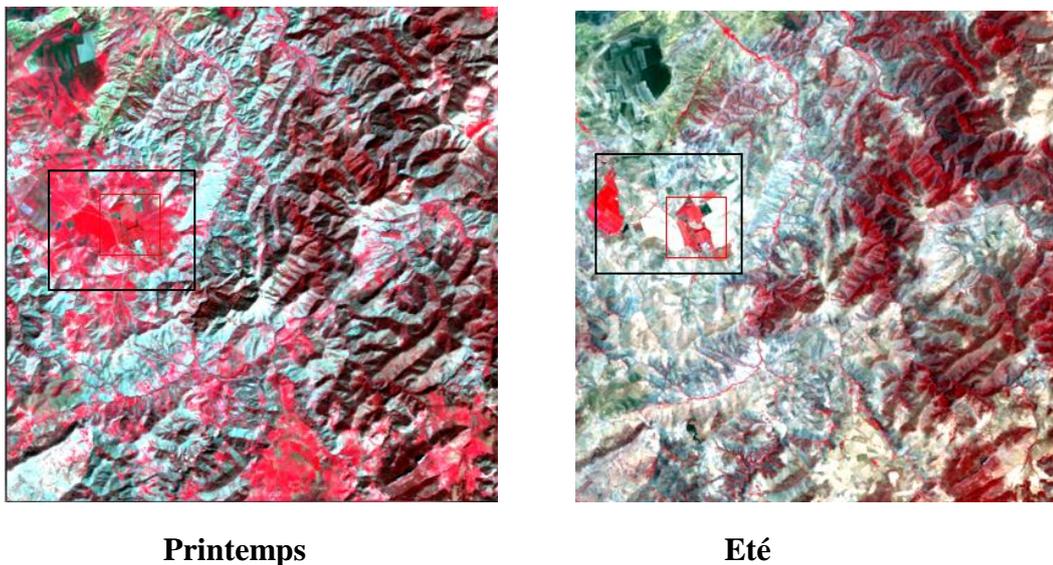
Pour l'image LANDSAT du 01 juillet 2007, il s'agit de faire une classification par maximum de vraisemblance. La classification par maximum de vraisemblance est basée sur des méthodes probabilistes. On calcule pour chaque pixel de l'image sa probabilité d'être rattaché à telle classe plutôt qu'à telle 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 (sols nus, cultures annuelles, eau et agglomérations) d'autre part. L'image d'été est choisie car comme le présente la figure 47, elle lève les confusions de la période printanière où la réflectance de cultures céréalières et du verger industriel (encadré en noir) ainsi que de certaines formations forestières sont difficilement séparables.

Il est ainsi plus aisé d'utiliser cette image d'été pour 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 (tableau 9). 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 figure 18a présente le résultat de cette classification qui a été améliorée par un filtre majoritaire 3x3. Le coefficient kappa de la classification indique 0,9383 (soit environ 94% de pixels bien classés). Toutefois, la classification par maximum de vraisemblance avec seulement deux classes reste imparfaite. Afin d'améliorer d'avantage cette classification et séparer le verger et les jachères des formations forestières, l'image raster de la classification est convertie en vecteur. Sur cette image vecteur, et en comparaison avec une carte de référence (la carte de végétation du CERCEO), sont donc supprimés les vecteurs

correspondants au verger et aux jachères ainsi qu'aux cultures pour ne conserver que les formations forestières ou l'opération inverse (pour ne conserver que le verger). Ce qui permet d'obtenir deux images en vecteur : l'une correspondant aux forêts et au matorraux et l'autre correspondant au verger et aux jachères. Sur la figure 48 les pixels de verger et de jachères ressemblant à du bruit sur la figure de droite sont supprimés. Cette image corrigée est reconvertie en image binaire raster (figure de gauche) qui sera utilisée comme entrée dans l'arbre de décision.

Le deuxième fichier image (le MNT ASTER) utilisé comme entrée de l'arbre de décision connaît aussi une correction. En effet, le MNT ASTER étant construit à partir de balayage radar, certaines zones à l'abri des ondes de ce balayage peuvent être à l'origine de vide sur l'image. Il est donc important de combler ces vides par interpolation. Après cette correction du modèle numérique de terrain, sont extraites les pentes en degré et sauvegardées sous forme image.

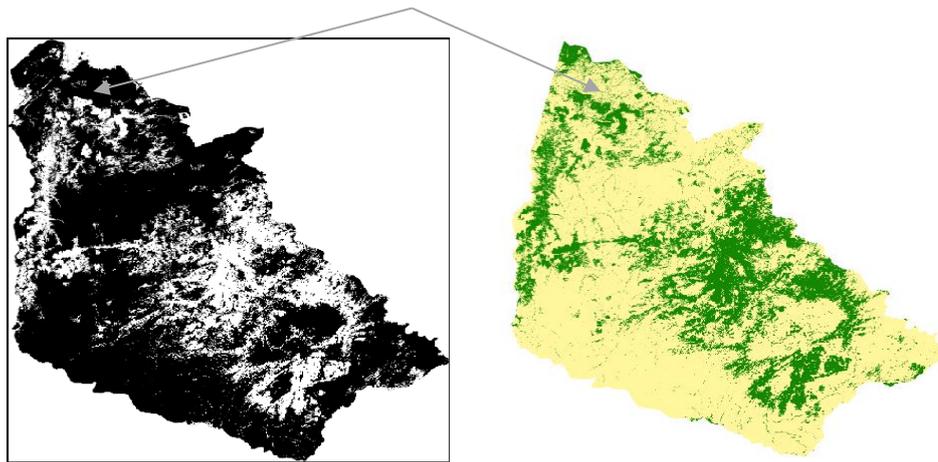
Enfin, le dernier fichier à intégrer dans cet arbre est celui délimitant les localités. Il a été réalisé par numérisation de l'ACP 4 de l'image de Landsat. Image sur laquelle, les structures linéaires (les routes) ainsi que la vérification googlemap permet de voir assez aisément les limites des localités. Sur la figure 49, par exemple, se trouve en encadré rouge la localité de Ain El Aouda.



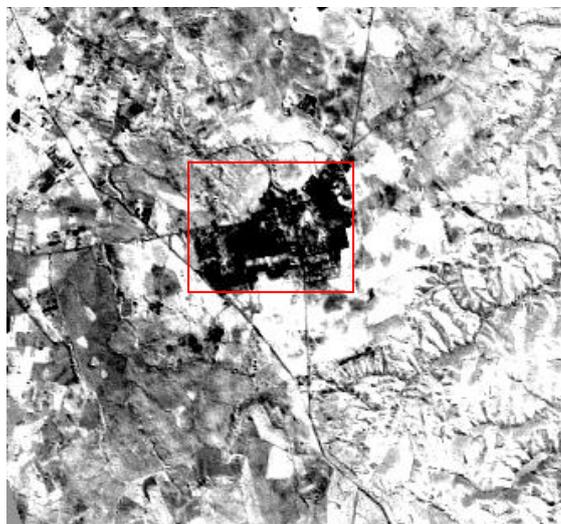
**Fig. 47:** Deux portions identiques des scènes du 11 mars et du 01 juillet 2007

**Tableau 9:** Evaluation de la séparabilité des zones d'entraînement

Classified Data	Reference Data			Row Total
	forêt	eau	sol_cultur	
forêt	99.73	0.85	5.38	1177
eau	0.00	97.75	0.00	347
sol_cultur	0.27	1.41	94.62	1045
Column Total	1118	355	1096	2569



**Fig. 48:** Délimitation des formations forestières du bassin : image classifiée binaire avec confusion de classe à droite et image corrigée à gauche



**Fig. 49 :** Localité de Ain El Aouda (image ACP4)

### 1.2.2. Construction de l'arbre de décision de la classification des images LANDSAT

La classification par arbre de décision est une classification qui permet de prendre des décisions en plusieurs étapes pour mettre en relief une classe particulière d'objet selon le comportement spectral d'une bande ou d'une transformation de bandes. Dans l'arbre de décision de la classification de l'image LANDSAT du 11 mars 2007 (figure 50), deux décisions sont communes à toutes les extrémités. Il s'agit, en premier, d'extraire de toutes les classes d'occupation du sol, celles qui sont situées sur des pentes relativement fortes (supérieure à  $10^\circ$ ), et en deuxième, il est question d'extraire de toutes les classes d'occupation du sol les localités (rurales ou urbaines) ou les agglomérations.

**Décision I :** la décision 1 vise à extraire les sols nus secs. Pour cela, la segmentation est effectuée sur la bande du moyen infrarouge 2 car les sols nus sont très réfléchis dans ce canal et contraste avec la végétation et l'eau. Sont alors considéré comme sols nus, les objets dont la réflectance est supérieure à 87.

**Décision II :** Il est question à ce niveau d'extraire la classe d'occupation correspondant à l'eau (Oued, barrage, océan). Les comptes numériques correspondant à l'eau sont très faibles dans l'infrarouge en générale. De ce fait, l'eau apparait en noir sur l'image infrarouge moyen. Les pixels correspondant à cette classe d'occupation du sol sont inférieurs à 23.

**Décision III :** la troisième décision vise à extraire les zones humides occupées par des cultures. Pour cela la même bande du moyen infrarouge est segmentée pour retenir comme espace humide le segment dont le compte numérique est compris entre 23 et 35. Une sous décision à ce niveau consiste à extraire des classes d'objets correspondant aux zones humides et dont la réflectance se confond avec certaines végétations forestières. Ainsi, a-t-il été constaté que sur l'image les pixels de confusion appartiennent aux espaces à relief accidenté. Aussi, était-il possible de les extraire à partir de l'écart-type des pixels sur l'ensemble des 6 bandes de l'image (écart-type inférieur à 44).

**Décision IV :** la décision 4 vise à extraire la classe d'occupation de sol correspondant aux formations forestières. Cette décision est rendu possible en injectant dans l'arbre le fichier image binaire correspondant aux forêts, les forêts étant codé 1.

**Décision V :** tout comme la précédente décision, il s'agit à partir du fichier image du verger d'extraire cette classe d'objet qui a été codé 1 en image binaire.

**Décision VI :** en dépit de l'utilisation de la bande du moyen infrarouge pour extraire les zones humides, certaines classe y appartenant n'ont pu être extraites. Ainsi, la décision VI vise à extraire les classes de cultures (céréale majoritairement) marquées par une forte humidité. Pour cela est calculé un indice de la teneur en eau de la végétation équivalent à la somme des bandes du visible divisée par la somme des bandes de l'infrarouge. Une sous décision à ce niveau consiste à savoir quelle est dans cette végétation (céréale) à forte humidité celle qui à un très faible recouvrement végétal. Pour le savoir, un autre indice de végétation est calculé, le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) qui a l'avantage de prendre en compte la réflectance du sol. En effet, dans le bassin versant du Bouregreg et dans les zones semi arides du Maghreb en générale, la réflectance de la couverture végétale est très influencée par celle du sol. C'est pourquoi certains chercheurs proposent l'indice de végétation SAVI qui semble plus adapté (Escadafal et Huete, 1991 ; Lecerf, 2008). La végétation très épars correspond sur l'image de l'indice SAVI à une végétation dont l'indice est presque nul (0,04).

**Décision VII :** la décision VII a pour objectif l'extraction de différentes catégories de cultures pluviales (céréaliculture) en fonction de leur densité à travers l'indice de végétation SAVI.

Ainsi, les cultures céréalières denses à très forte réflectance ont un indice supérieur à supérieur à 0,40. Les cultures à indice "normal" occupe le segment entre 0,40 et 0,04.

Cette classification conduit à un résultat meilleur d'autant plus que le coefficient kappa est très élevé, 0,91 pour l'exemple-ci.

La classification de l'image SPOT 5 est une classification orientée objet. Cette classification procède par segmentation et recherche d'objet d'intérêt sur l'image.

### **1.3.Cartographie de la dégradation des sols par analyse des indices spectraux**

#### *1.3.1. Justification du choix de la méthode*

La dégradation des sols est une perte des qualités essentielles des sols pour remplir ces fonctions naturelles de stockage de l'eau et des nutriments, de milieu de soutien des racines et des plantes, de réservoir de la biodiversité, de filtration de polluants et de séquestration du carbone. La dégradation peut avoir diverses origines : salinisation et carbonatation, engorgement, compaction par piétinement ou la motorisation, lessivage des colloïdes ou des éléments solubles dans les eaux de drainage, minéralisation et squelettisation par érosion sélective des particules fines (Roose et al., 2004). De nombreuses études ont été menées au Maroc, sur l'érosion des sols qui est un aspect de la dégradation de la couverture pédologique. Ces études se sont, dans la majorité des cas, intéressées à la quantification de l'érosion



D'ailleurs, ces équations sont, pour la plupart appliquées sans validation physique des modèles utilisés (Bonn, 1998). Une autre difficulté est que les équations de perte en sol sont difficilement généralisables à des grandes surfaces comme c'est le cas du bassin versant du Bouregreg (environ 10 000 km<sup>2</sup>), les contextes physiques étant souvent et historiques étant souvent complexes. La quantification des pertes en sol nécessiterait dans le cas présent de certainement subdiviser le bassin en sous bassin et d'avoir une base de donnée suffisante pour chaque sous espace, ce qui n'est pas le cas. Ainsi, plutôt que de travailler sur un type d'érosion sans pouvoir valider les résultats, cette étude met l'accent sur la dégradation des sols vue de façon globale. L'étude est ainsi axée sur la spatialisation de l'ensemble des phénomènes de dégradation apparente des sols. La méthode adoptée pour cette étude s'appuie sur l'analyse des indices spectraux.

### 1.3.2. *Extraction de l'information sur l'évolution des sols du bassin à partir des images Landsat*

La signature spectrale des sols varie en fonction de plusieurs paramètres, notamment la teneur en matière organique, le taux d'humidité et la composition minéralogique. Ces variables impactent sur la couleur et la brillance du sol qui reliées à ses propriétés physiques et chimiques (Bannari et al., 2007). Ainsi, les changements majeurs au niveau de l'évolution de la couverture pédologique affectent la signature spectrale des sols au niveau des images satellitaires et en l'occurrence les images de Landsat. Ces indices spectraux permettent ainsi de caractériser l'état de dégradation du sol en milieux arides et semi arides (Escadafal, 1989 ; Mathieu et al. 1998 cité par Bannari et al., 2007 ; Chikhaoui et al., 2007 ; Maimouni et al., 2011). Pour cette étude, deux indices spectraux sont utilisés : l'indice de brillance et l'indice de coloration.

L'indice de brillance permet d'identifier la réflectance globale d'une cible donnée dans le domaine du visible. Il se calcule selon la formule :

$$IB = \sqrt{PIR^2 + R^2} \quad 10$$

Où

*IB = Indice de Brillance*

*PIR = bande du Proche Infrarouge*

*R = bande du Rouge*

L'indice de coloration est le rapport normalisé des bandes dans le rouge et le bleu. Il exprime le pente du spectre du sol étudié. L'indice de coloration est d'autant plus élevé que les sols sont colorés (Escadafal et al., 1993). Sa formule est :

$$IC = R - B/R \quad 11$$

Où

*IC = Indice de Coloration*

*R = bande du Rouge*

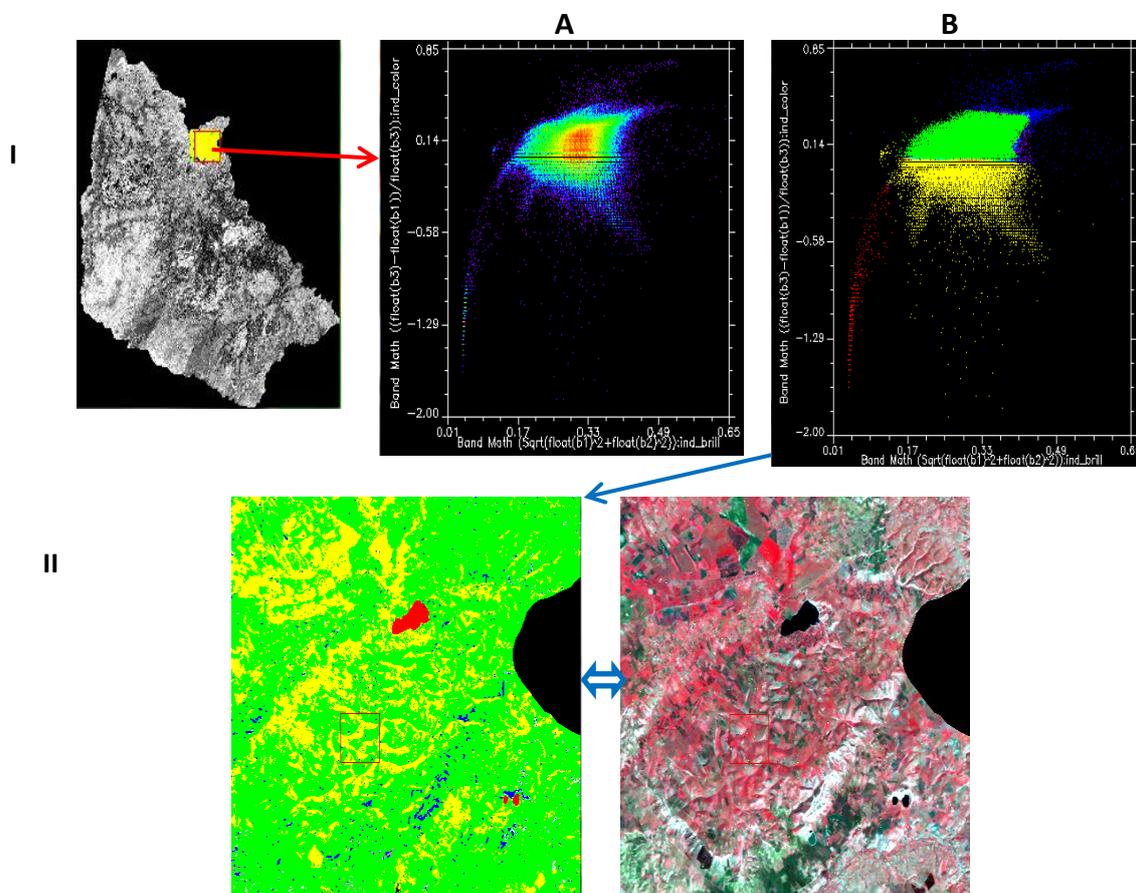
*B = bande du Bleu*

Les deux images utilisées datent du 15 avril 1985 et du 11 mars 2007. Il s'agit d'images d'image de Landsat TM du printemps. Contrairement aux analyses habituelles utilisant les images de l'été où les sols sont plus dénudés, cette étude-ci s'appuie sur des images de printemps parce qu'à cette date, la distinction entre les espaces couverts par la végétation dense et les espaces de faible couverture végétale ainsi que les sols dégradés est aisée. Ceci, d'autant plus qu'aux dates de ces deux images, la plupart des espaces sont en végétation y compris

pour les cultures de printemps. La majorité des sols du bassin étant de couleur rougeâtre, il devient de fait plus aisé de mettre en relief les espaces marqués par des dégradations notables des sols. Cette démarche méthodologique n'exclue pas totalement la possibilité d'une confusion entre des terres préparées pour une culture à cette période et des espaces marqués par une dégradation du sol.

Au niveau pratique, les images utilisées ont d'abord fait l'objet de prétraitement consistant en une calibration, la correction atmosphérique et géométrique des images. Les deux indices sont calculés à partir des valeurs de réflectance des bandes des images et non à partir des comptes numériques. Pour se faire, les CN (Compte Numériques) ont été converti en radiance puis en réflectance.

La classification des images de Landsat a été précédé de plusieurs visites sur le terrain afin d'identifier les sols dégradés. Des échantillons de parcelles ont été relevés à l'aide d'un GPS. Ces polygones facilitent la lecture et l'identification des signatures des différents sols dégradés. En outre, ils permettent de valider la classification. Pour classifier les images, les indices de coloration et de brillance sont présentés dans un diagramme bidimensionnel avec en abscisse l'indice de brillance et en ordonnée l'indice de coloration. La classification par maximum de vraisemblance s'effectue à partir de cette à partir de ces diagrammes et des connaissances à priori du terrain (l'échantillonnage des parcelles d'entraînement est réalisé sur les diagrammes). Quatre classes d'objet peuvent être facilement séparé sur ces diagrammes. Ce sont les classes représentant l'eau, les sols peu dégradés, les sols modérément dégradés et les sols très dégradés (figure 51 A et B). La classe de l'eau se détache du nuage de point et est caractérisé par un indice de brillance ainsi qu'un indice de coloration très faible. C'est les plus faibles valeurs de la droite des sols (nuage coloré en rouge dans le diagramme bidimensionnel (Figure 51 B). Au-delà de ces pixels d'eau, (dans le sens d'une augmentation des valeurs de réflectance), les surfaces recouvertes par une bonne couverture végétale



**Fig. 51:** les étapes de la classification : I/ échantillonnage pour la classification et diagramme (bidimensionnel de l'échantillon (A) et classes de l'échantillon (B) : eau (rouge), Jaune (non dégradé), vert modérément dégradé ; II/ Résultats de la sélection

masquant le sol (sol peu dégradé) ont des valeurs de également faibles d'indice de coloration. Le nuage de point représentant cette classe d'objet (en jaune sur la figure 51 B et C) se détache de celui des sols modérément dégradés (coloré en vert sur le figure 51 B et C). les sols fortement dégradés ont des indices de coloration et de brillance élevés. Ce sont en majorité des sols de couleur rougeâtre. Le nuage de point les représentants a été coloré en bleu (figure 51 B et C). Ces classes d'objets distinguées à travers le nuage de point et exprimé en parcelles d'entraînement sont utilisées comme référence pour une généralisation à toute l'image (classification). La validation des classifications fait ressortir des coefficients kappa de 0,86 (86% de pixels bien classifiés) pour l'image de 1985 et de 0,83 pour l'image de 2007 (Tableau 10). Certaines confusions subsistent entre des sols modérément dégradés et des sols très dégradés en 1985. En 2007, le même constat se répète, en plus d'une confusion entre des sols peu dégradés et des sols modérément dégradés.

**Tableau 10:** Matrice de confusion des classifications de 1985 et 2007

**1985**

Overall Accuracy = (3351/3709) 90.3478%						
Kappa Coefficient = 0.8625						
Ground Truth (Pixels)						
Class	Eau [Green]	5Sol très dégr	Sol modérémen	Sol peu dégra	Total	
Eau [Red] 855	441	0	0	0	441	
Sol très dégr	0	539	55	2	596	
Sol modérémen	0	190	864	2	1056	
Sol peu dégra	97	0	12	1507	1616	
Total	538	729	931	1511	3709	
Ground Truth (Percent)						
Class	Eau [Green]	5Sol très dégr	Sol modérémen	Sol peu dégra	Total	
Eau [Red] 855	81.97	0.00	0.00	0.00	11.89	
Sol très dégr	0.00	73.94	5.91	0.13	16.07	
Sol modérémen	0.00	26.06	92.80	0.13	28.47	
Sol peu dégra	18.03	0.00	1.29	99.74	43.57	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
Commission Omission Commission Omission						
Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)		
Eau [Red] 855	0.00	18.03	0/441	37/538		
Sol très dégr	9.56	26.06	57/596	190/729		
Sol modérémen	18.18	7.20	192/1056	67/931		
Sol peu dégra	6.75	0.26	109/1616	4/1511		
Prod. Acc. User Acc. Prod. Acc. User Acc.						
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)		
Eau [Red] 855	81.97	100.00	441/538	441/441		
Sol très dégr	73.94	90.44	539/729	539/596		
Sol modérémen	92.80	81.82	864/931	864/1056		
Sol peu dégra	99.74	93.25	1507/1511	1507/1616		

**2007**

Overall Accuracy = (2291/2602) 88.0477%						
Kappa Coefficient = 0.8334						
Ground Truth (Pixels)						
Class	sol très dégr	Eau [Green]	2sol modérémen	Sol peu dégra	Total	
Sol très dégr	711	0	9	0	720	
Eau [Red] 729	0	248	0	0	248	
Sol modérémen	140	0	740	5	885	
Sol peu dégra	0	15	142	592	749	
Total	851	263	891	597	2602	
Ground Truth (Percent)						
Class	sol très dégr	Eau [Green]	2sol modérémen	Sol peu dégra	Total	
Sol très dégr	83.55	0.00	1.01	0.00	27.67	
Eau [Red] 729	0.00	94.30	0.00	0.00	9.53	
Sol modérémen	16.45	0.00	83.05	0.84	34.01	
Sol peu dégra	0.00	5.70	15.94	99.16	28.79	
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
Commission Omission Commission Omission						
Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)		
Sol très dégr	1.25	16.45	9/720	140/851		
Eau [Red] 729	0.00	5.70	0/248	15/263		
Sol modérémen	16.38	16.95	145/885	151/891		
Sol peu dégra	20.96	0.84	157/749	5/597		
Prod. Acc. User Acc. Prod. Acc. User Acc.						
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)		
Sol très dégr	83.55	98.75	711/851	711/720		
Eau [Red] 729	94.30	100.00	248/263	248/248		
Sol modérémen	83.05	83.62	740/891	740/885		
Sol peu dégra	99.16	79.04	592/597	592/749		

## ***2. Les facteurs climatiques de la dynamique de la végétation***

### **2.1. Dynamique spatiotemporelle des précipitations de 1980 à 2009**

#### ***2.1.1. 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 (figure 52) ;
- 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 inférieure au niveau de significativité fixé au départ du calcul (ce niveau est ici de 5%). Ainsi, les valeurs du test de Mann-Kendall (S) sur la recherche des tendances significatives dans ces séries chronologiques confirment cette observation générale de l'évolution interannuelle de la pluviométrie (tableau 11). 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%, seules 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 (figure 52 et tableau 11). 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%.

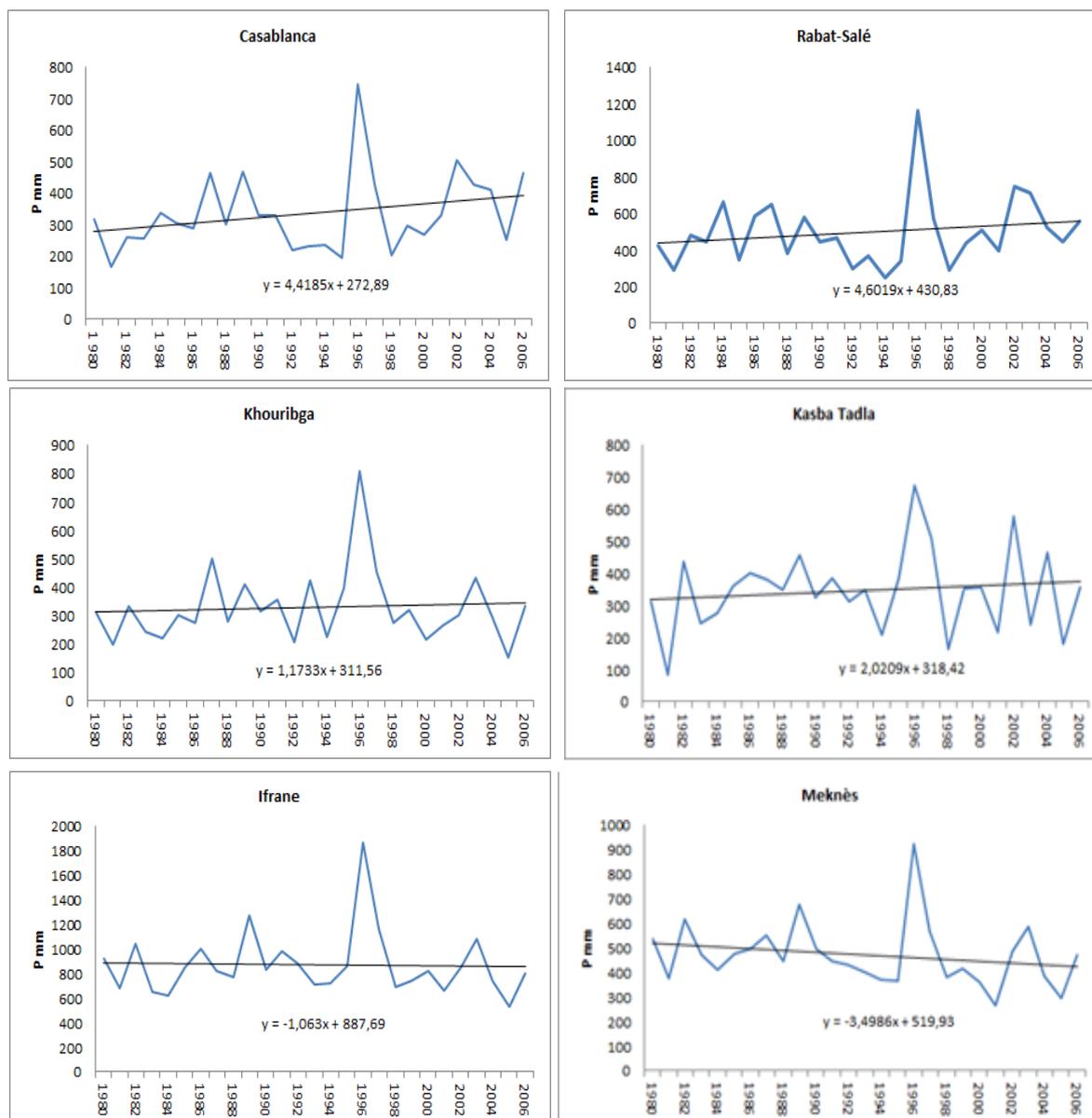
### 2.1.2. Evolution saisonnière de la pluviométrie

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 53 et 54). L'espace N et ouest du bassin (station d'Ifrane, Meknès 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) enregistre, 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 53).

**Tableau 11:** Récapitulatives de l'évolution interannuelle de la pluviométrie de 1980 à 2006

	Casablanca	Khouribga	Rabat	K.Tadla	Meknes	Ifrane	Total
<b>Min</b>	165,1	154,8	249,6	84,4	264,3	529,6	298,1
<b>Année min</b>	1981	2005	1994	1991	2001	2005	1981
<b>Max</b>	744,6	809,1	1164	674,4	923,9	1866	1030
<b>Année max</b>	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996
<b>Moyenne</b>	334,7	328	495,3	346,7	471	872,8	474,7
<b>Mediane</b>	306,6	302	444,9	354,2	445,8	821,4	441,1
<b>Ecartype</b>	123,9	128,4	188,3	127,8	131,8	262,1	143,7
<b>Coefficient de variation</b>	37,0182253	39,1463415	38,0173632	36,8618402	27,9830149	30,0297892	30,2717506
<b>Valeur test Mann-Kendall (S)</b>	53	21	35	19	-83	-27	9
<b>p-value</b>	0,139	0,338	0,239	0,354	0,0437	0,294	0,434



**Fig. 52:** 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'importante 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 que sont les mois de février, mars, avril et mai (figure 54 et tau de Kendall);
- 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 tient 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.

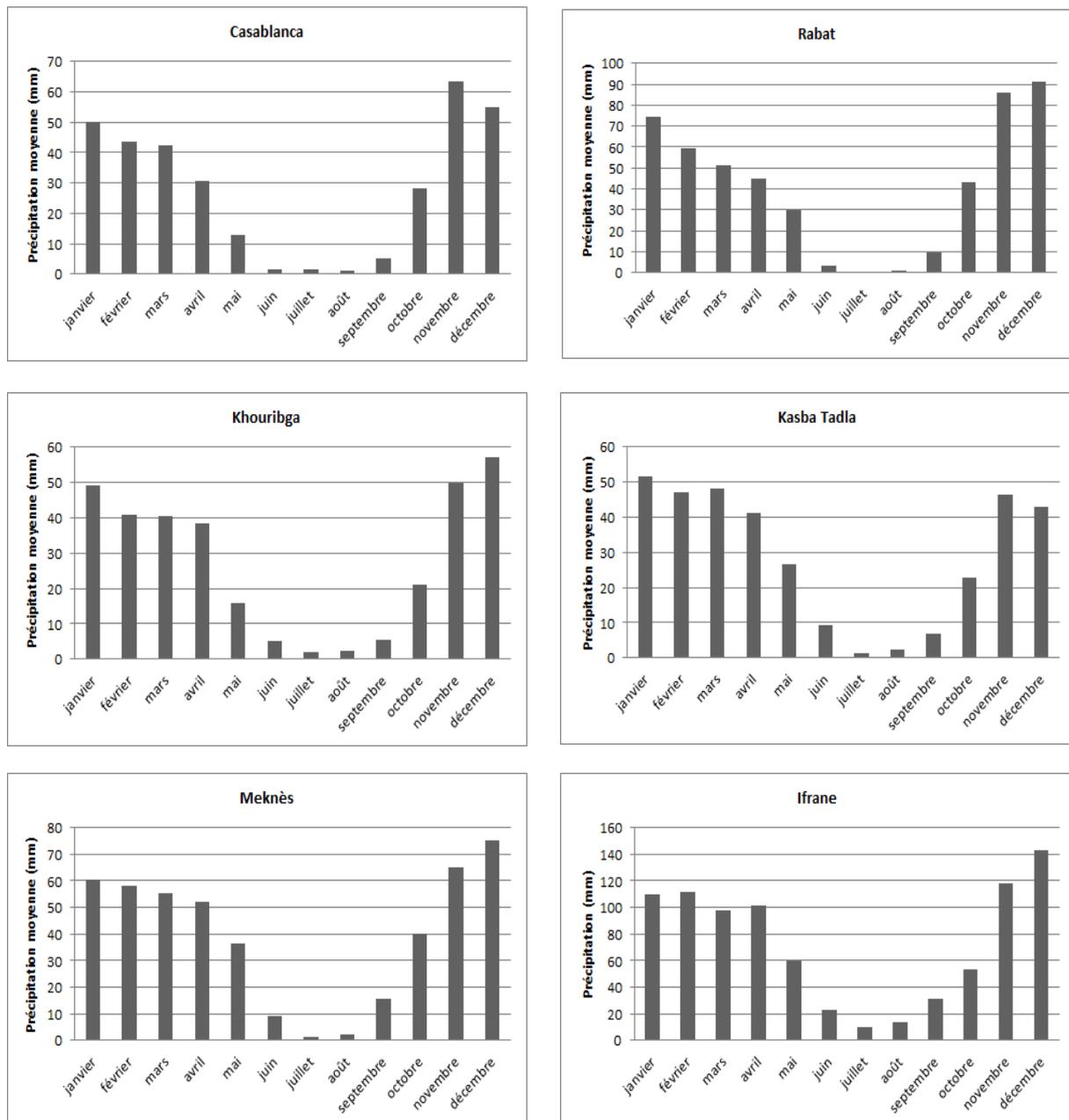
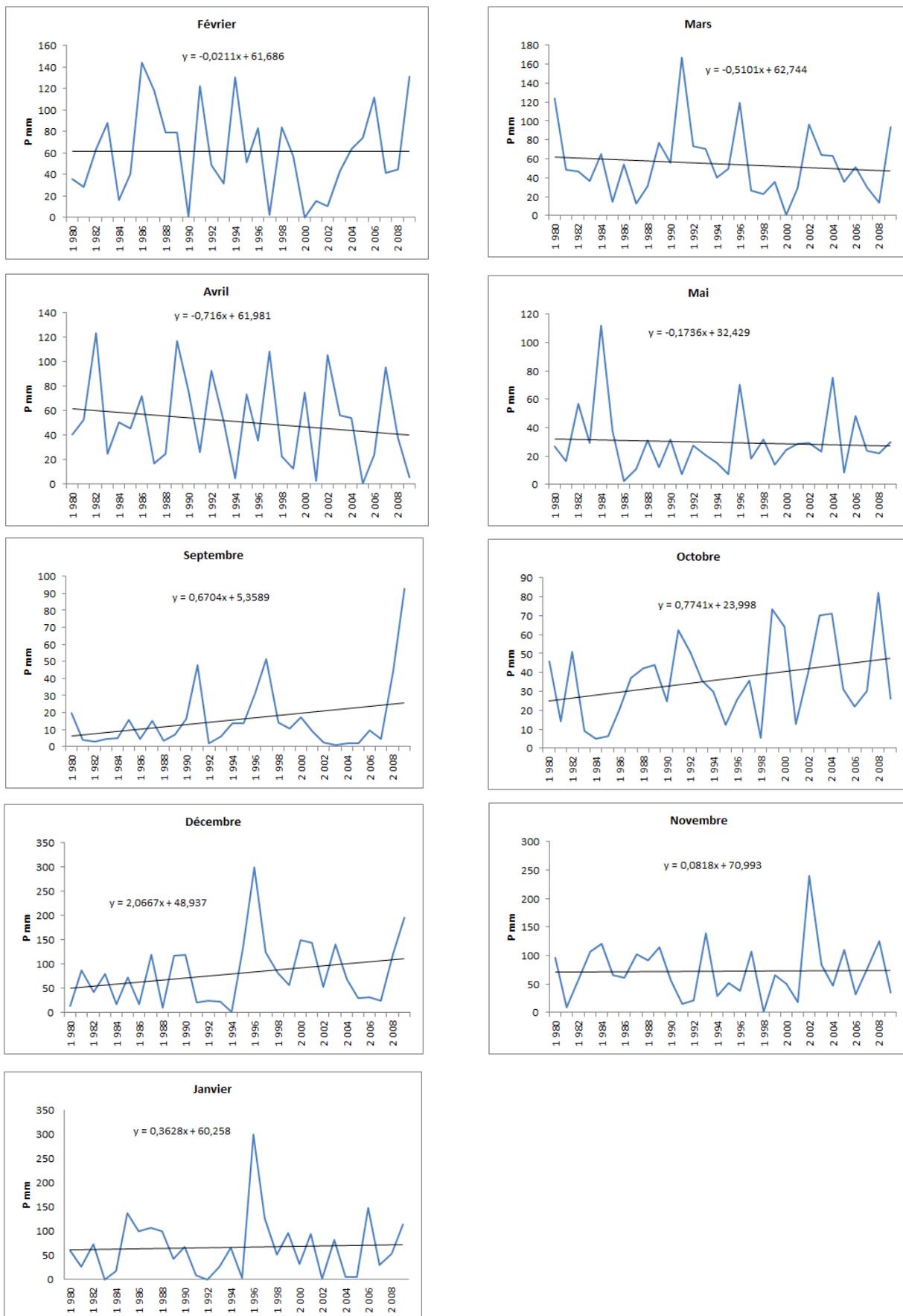


Fig. 53: Régime pluviométrique de l'espace du bassin du Bouregreg



**Fig.54:** Evolution interannuelle des précipitations mensuelles dans le bassin du Bouregg

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 confirmé avec un degré de confiance de 95% pour toutes les stations, exceptées 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 55). 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 obeissent 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.

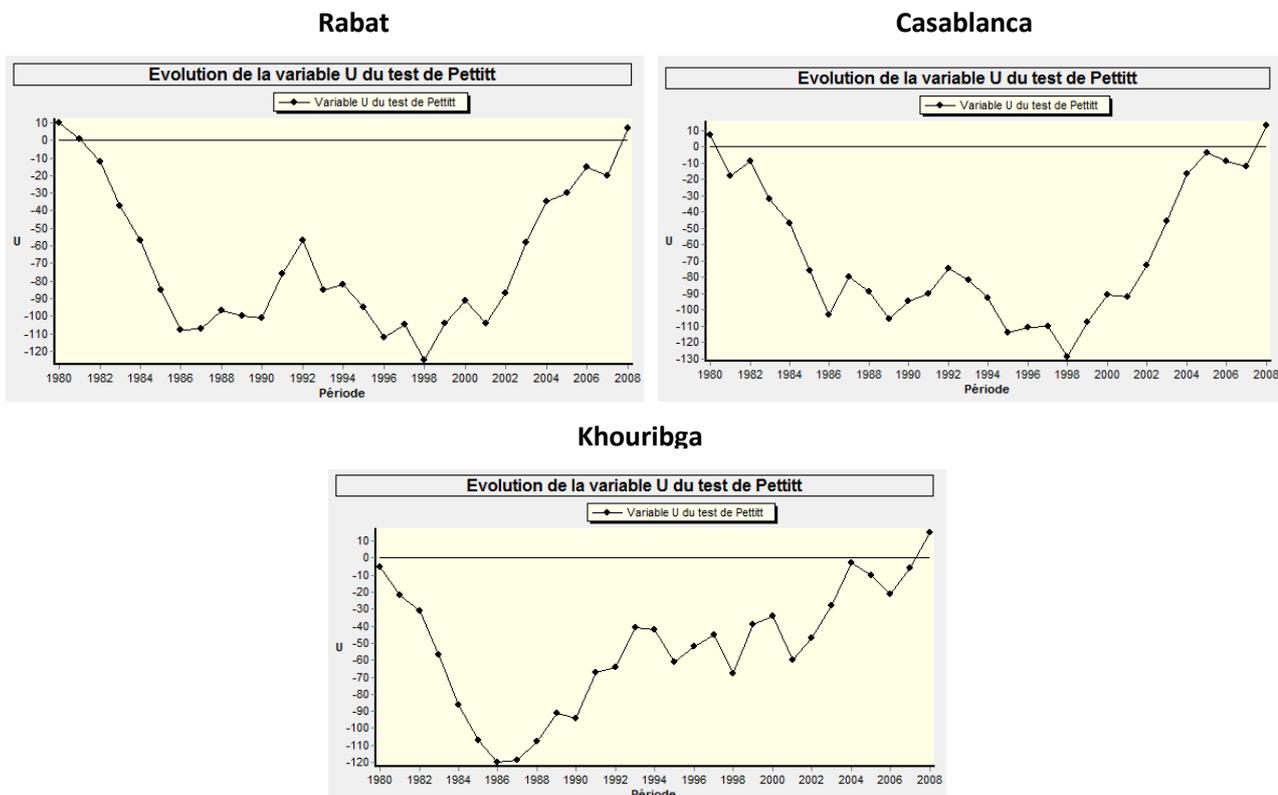


Fig. 55: Test d'homogénéité de Pettitt au mois d'octobre

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).

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

### 2.2.1. Caractérisation générale de la dynamique de l'humidité annuelle

La période de 1980 à 2009 est une période déficitaire au niveau pluviométrique par rapport aux décennies précédentes. L'identification du caractère humide ou sec d'une année peut se faire à travers l'Indice Pluviométrique Standardisé (IPS). Cet indice est une moyenne des cumuls pluviométriques saisonniers centrés et réduits calculés en chaque station pour une saison donnée. Les principales stations utilisées pour calculer l'IPS au niveau du bassin du Bouregreg appartiennent, dans le cas présent, à des régions climatiques souvent très différentes. Aussi, pour éviter que l'indice calculé pour caractériser l'évolution des conditions d'humidité du bassin ne soit erroné, le choix a été fait de regrouper les stations pluviométriques en unités climatiques homogènes.

En considérant la répartition des stations pluviométriques par unité climatique, la trop faible représentativité des stations de Casablanca, et Béni Mellal, ainsi que leur faible influence sur le bassin, conduit à la suppression de ces unités climatiques. De même l'unité climatique de Sidi Slimane a été répartie entre Rabat et Meknès pour faciliter la suite des analyses de corrélation avec la végétation. L'IPS est ainsi calculé selon la formule adoptée par Ali et al., (2008) et adapté au cas présent :

$$I_u^i = \frac{P_u^i - \bar{P}_u}{\sigma_u} \quad (12)$$

où :

$I_u^i$  = indice pluviométrique par unité climatique d'une série  $i$

$P_u^i$  = pluie moyenne annuelle par unité de l'année  $i$

$\bar{P}_u$  = moyenne interannuelle de la pluie de chaque unité climatique

$\sigma_u$  = écart-type de  $P_u$

L'IPS a été calculé sur la période de 1980 à 2000 où les données des 90 stations pluviométriques sont disponibles. Cet intervalle permet d'avoir une idée de l'évolution temporelle de l'humidité au niveau du bassin. L'intervalle de temps de 2000 à 2009 est l'objet d'analyse plus détaillée concernant l'humidité du sol à partir des images MODIS.

Ainsi, la partie aval du bassin, sous influence de l'unité climatique de Rabat connaît au cours de ces 21 années, 4 années humides ( $IPS > 0,5$ ), soit 19% (figure 56). Bien que certaines années présentent des baisses de quantités pluviométriques, l'IPS indique une absence d'années véritablement sèche ( $IPS < -0,5$ ). La partie sud du bassin, sous influence climatique

de Khouribga, présente à peu de choses près, les mêmes proportions d'années humides (5 années sur 21). Cependant, la majorité de ces années humides (4/5) se situent après 1990. Ce qui est conforme à la tendance d'évolution générale des précipitations dans cette partie du bassin. L'extrême sud-est du bassin (unité climatique de Kasba Tadla) présente une situation différente. Les années déficitaires au niveau pluviométrique sont plus importantes (6/21). Seules trois années ont des caractéristiques humides (1991-1993). L'observation de l'allure générale de l'IPS indique une zone qui tend vers de déficits pluviométriques au contraire de l'observation générale de la dynamique pluviométrique. L'espace Nord-Est du bassin reste la zone la plus humide avec une absence d'années sèches (zone d'Ifrane). Toutefois, l'analyse de la dynamique interannuelle de la pluviométrie dans cet espace permet de comprendre que ce caractère humide est de plus en plus menacé, compte tenu des baisses importantes de précipitation. Enfin, la partie Nord du bassin, sous influence de Meknès, est un exemple caractéristique de l'évolution vers des années moins humides de cette partie du bassin. A cet effet, dans cette unité climatique, 3 années sur 21 sont humides et se localisent avant 1986, les autres années restant dans la normale ou très faiblement déficitaires.

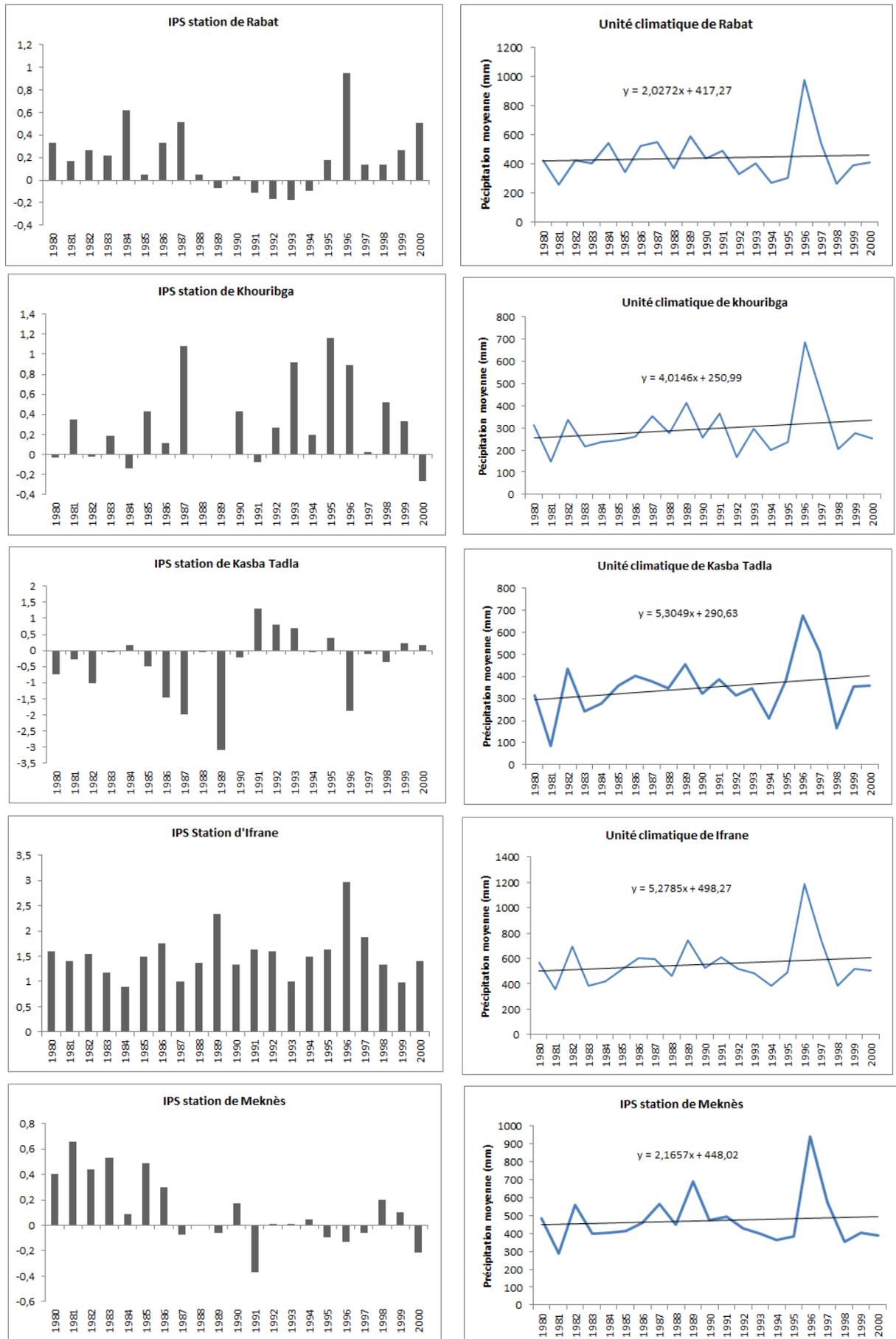
### *2.2.2. Evolution saisonnière pluriannuelle de l'humidité du sol dans le bassin*

#### *2.2.2.1. Evolution saisonnière des conditions de végétation : 1980 – 2000*

Selon la méthode proposée par le FAO (FAO, 1997), l'analyse de la saison humide nécessaire à la croissance des cultures peut se baser sur la différence entre l'ETP et la pluviométrie (bilan hydrique). En effet, la période de croissance des plantes saisonnières débute lorsque la pluviométrie devient supérieure à la moitié de l'ETP. Cette période humide prend fin dans le cas contraire ( $1/2 \text{ ETP} > P$ ). Cette relation ETP-Pluviométrie permet de positionner les cultures dans la saison agricole en tenant compte des risques de stress hydrique (Bamouh, 1998 ; Jlibene et Balaghi, 2009). L'analyse de la période humide dans le cas présent ne tient pas compte des risques de sécheresse selon le type de plante (cultivée ou non). D'autres analyses à suivre seront plus axées sur les cultures.

L'évolution du comportement des mois de début et de fin de saison humide est caractéristique des observations au niveau de l'humidité des sols. Dans le bassin du Bouregreg, les mois d'octobre (préparation des terres), de novembre (semis de céréales), de mars et d'avril (maturité des céréales) sont, dans le cas échéant étudiés dans le détail. Le mois de janvier (pleine saison humide) est également analysé. La distribution spatiale des conditions d'humidité de végétation permet de subdiviser l'espace du bassin en trois entités :

- La partie aval du bassin (espace climatique de Rabat) qui reste une des parties les plus humides ;
- La partie amont du bassin (espace climatique d'Ifrane) qui est la plus humide de tout le bassin ;
- La partie centrale et sud du bassin (espace de Kasba Tadla) qui est la moins humide du bassin (figure 57).



**Fig. 56 :** Caractérisation de l'évolution interannuelle des précipitations à travers l'Indice Pluviométrique Standardisé

Aussi, est-il constaté que les espaces où la végétation est la plus abondante (végétation forestière surtout) sont localisés dans les deux pôles les plus humides du bassin. Au mois d'octobre, il est constaté une hausse générale de l'humidité dans le bassin de 1980 à 2000 conformément à l'évolution générale de la pluviométrie. Ces hausses ne se traduisent pas en tendances significatives statistiquement (figure 57). De façon générale, seule 23% des années sur la période de 1980-2000, au mois d'octobre, gardent un caractère humide. Ce qui représente un risque élevé pour les semis à cette période. Cette situation s'inverse au mois de novembre où la majorité des années garde un caractère humide favorable aux semis des cultures céréalières. Dans l'espace d'Ifrane et de Rabat, la proportion d'années favorables est de 81% contre 71% dans la partie sud du bassin (figure 58). La tendance favorable au niveau hydrique au mois de novembre justifie le choix de ce mois pour les semis des céréales. Cependant, il est constaté une dynamique temporelle à la baisse des conditions d'humidité pendant ce mois de 1980 à 2000, constituant ainsi une menace importante de stress hydrique pour les cultures céréalières. Cette tendance à la baisse, bien que plus importante dans l'espace le plus humide du bassin, reste dans l'ensemble statistiquement non significative. L'évolution de l'humidité au mois de janvier permet de comprendre que les saisons humides (où les précipitations sont supérieures à l'ETP) connaissent fréquemment des épisodes de rupture (la sévérité de ces stress et leurs effets sur les productions céréalières sont étudiées dans la partie suivante du chapitre). A titre indicatif, sur la seule base de ce bilan hydrique, 47% des années sont marquées par des ruptures d'humidité de saison à Rabat (figure 59). En fin de saison humide, le mois de mars se caractérise par des proportions importantes de baisse de l'humidité (57% dans l'espace de Rabat, 47% dans celui d'Ifrane et 62% à Kasba Tadla). Par contre la fin de la saison humide n'intervient véritablement qu'au mois d'avril (figure 60 et 61). Tout comme en début de saison (mois de novembre), cette dynamique ne dessine pas de tendance significative au niveau statistique.

Ainsi, le constat général est que le bassin versant du Bouregreg connaît une baisse des conditions d'humidité favorable au développement des cultures en début et fin de saison humides. Les mois de la pleine saison culturale connaissent aussi des périodes non négligeables de stress hydrique.

#### ***1.1.1.1. Evolution des conditions hydriques de végétation : 2000 – 2009***

Les conditions hydriques de végétation de la période de 2000 à 2009 sont analysées à travers l'indice des conditions de végétation (VCI) et les températures de surface. Le VCI est un indice fortement lié aux conditions météorologiques et particulièrement la pluviométrie. Exprimé en pourcentage, il indique différent degré de sévérité de la sécheresse (Ramesh et al, 2003 ; Kogan 1996, 1997, 2003).

L'analyse de la variation du VCI en octobre fait apparaître des niveaux faibles de conditions de végétation (inférieurs à 30% de moyenne généralement) dans l'espace agricole du bassin. Les espaces forestiers (surtout à l'amont du bassin) conservent de bien meilleurs conditions de végétation (entre 50 et 70% en moyenne, figure 62). L'évolution interannuelle du VCI indique de très fortes variations de ces conditions de végétation d'une année à l'autre. Dans certains espaces, de culture de l'amont du bassin, ces conditions peuvent varier de plus de 100%. Plusieurs transect tracés sur des espaces d'intérêt permettent de connaître l'évolution temporelle de ces conditions de végétation (figure 63). Ainsi, dans les espaces à coefficient de variation du VCI supérieur à 100%, les conditions de végétation (par rapport au maximum historique de la série de 2000 à 2009) sont inférieures à 20%, soit des espaces presque dénudés. L'année 2009 (exceptionnellement humide) permet de comprendre que cette dynamique des conditions de végétation est étroitement liée à la pluviométrie.

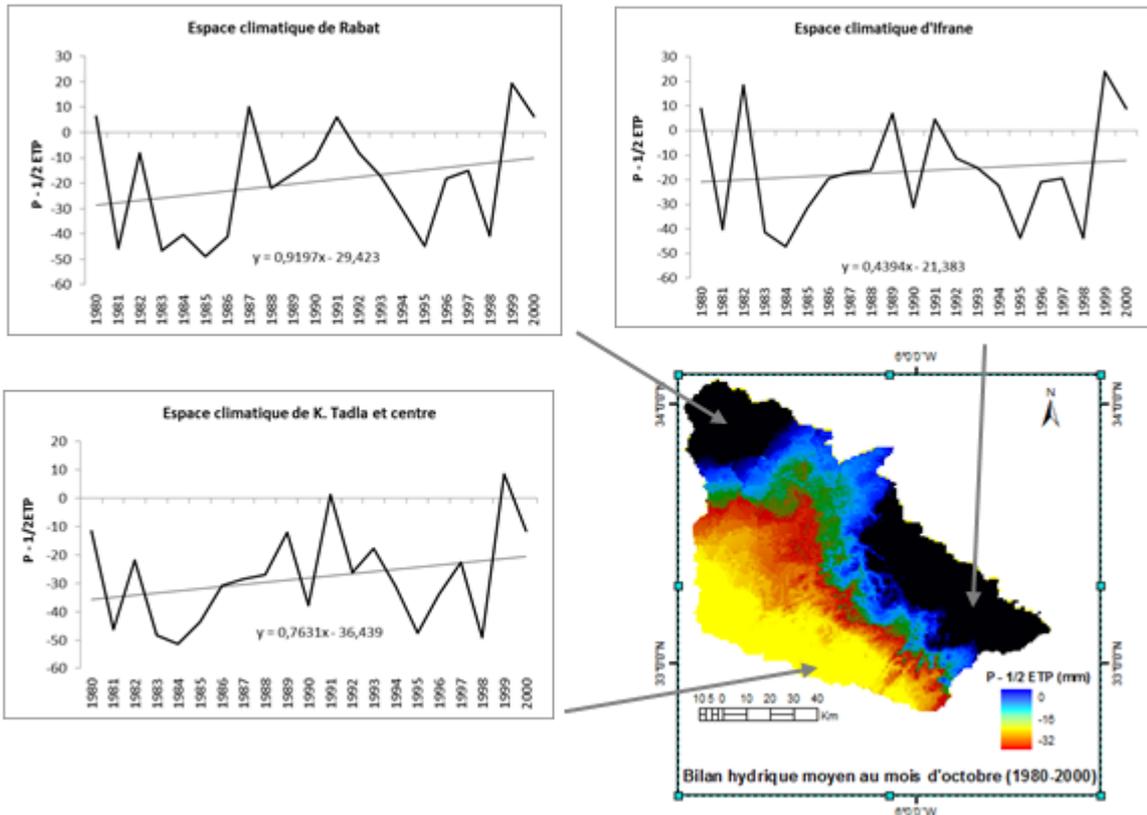


Fig. 57: Evolution spatio-temporelle de l'humidité au mois d'octobre

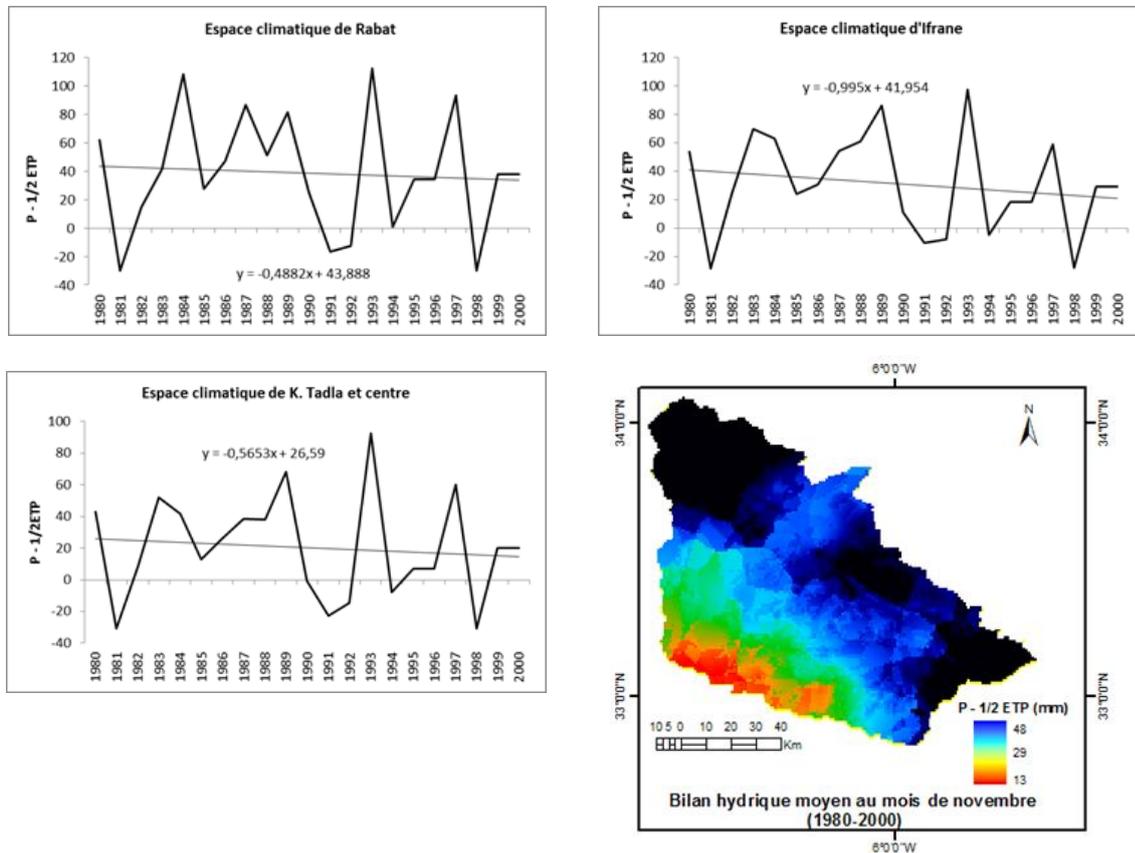
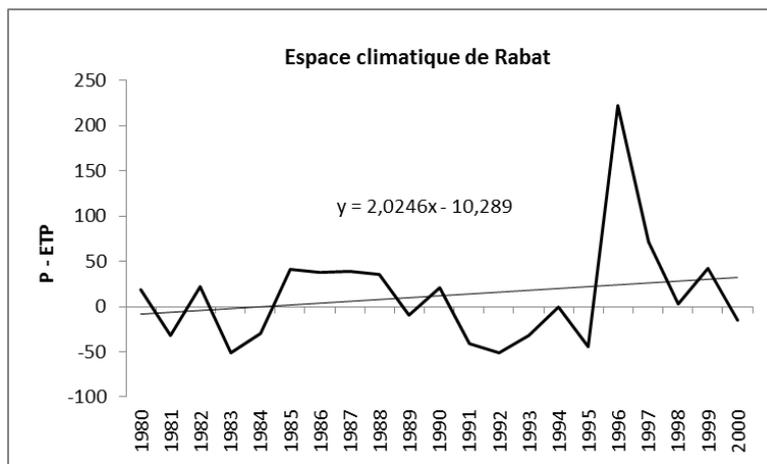
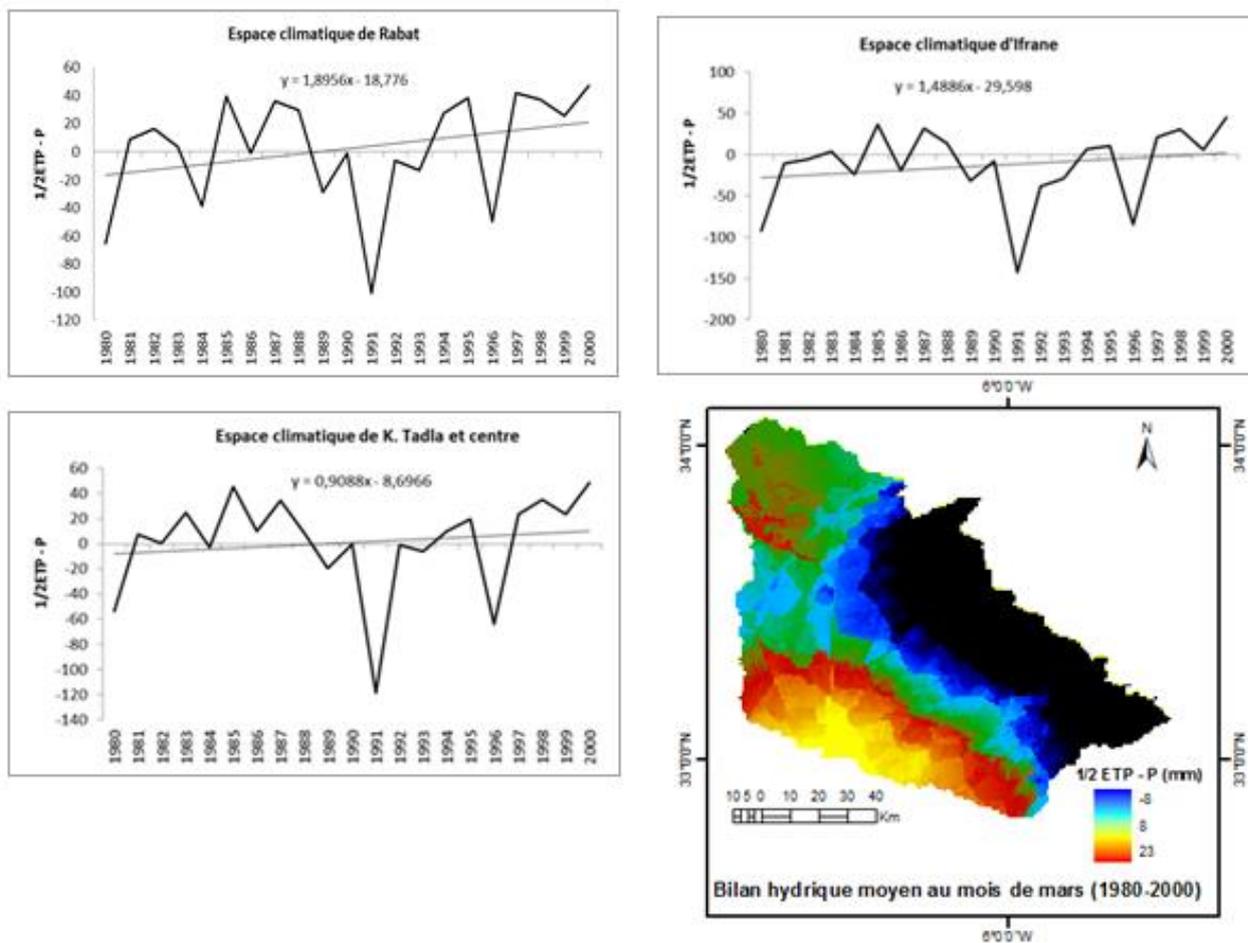


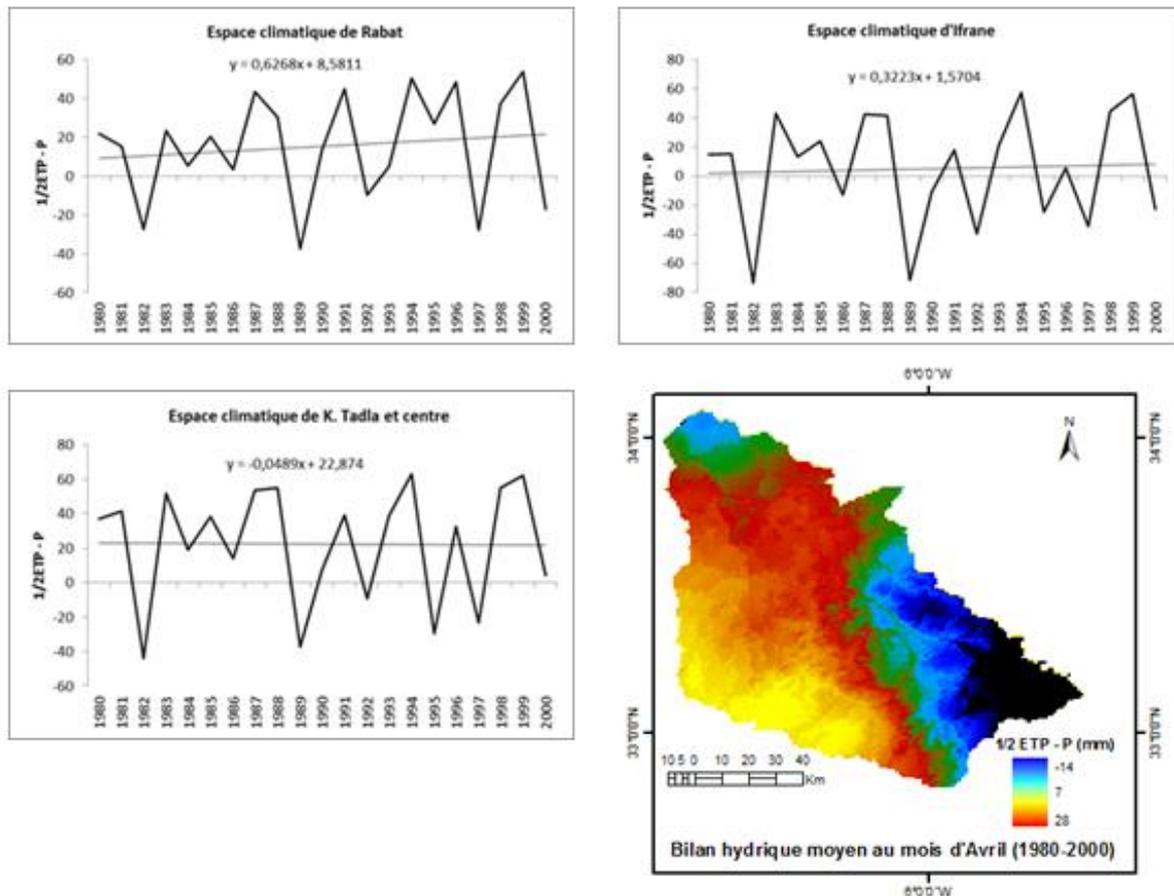
Figure 58: Evolution spatio-temporelle de l'humidité au mois de novembre



**Fig. 59:** Evolution temporelle de l'humidité au mois de janvier

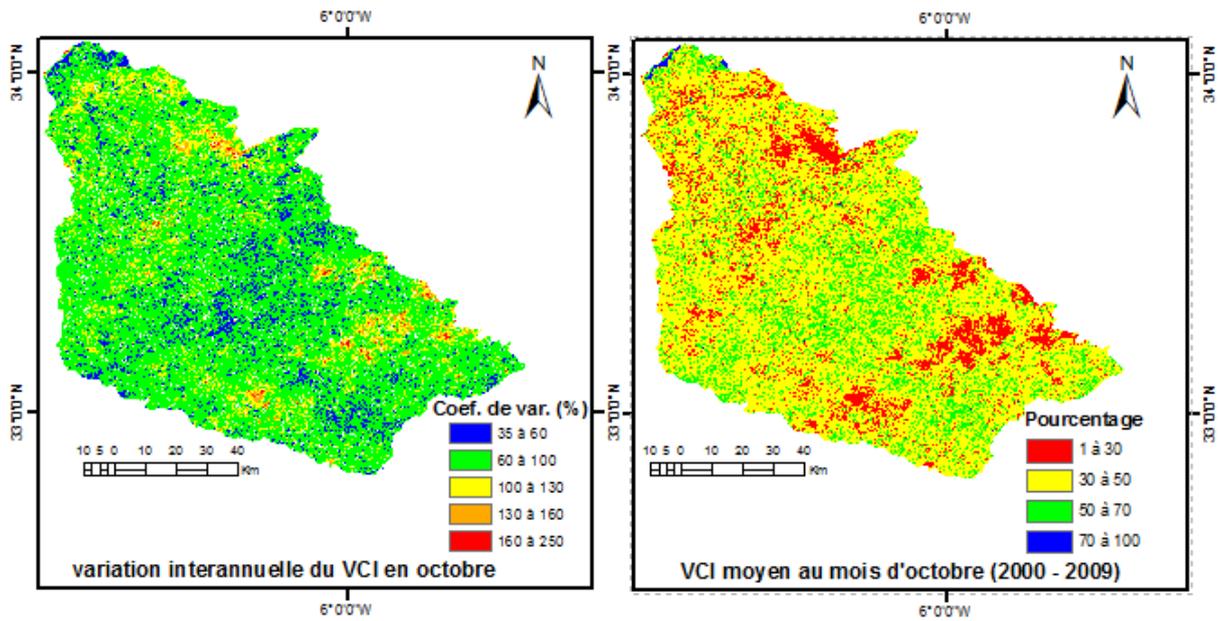


**Fig. 60:** Evolution spatio-temporelle de l'humidité au mois de mars

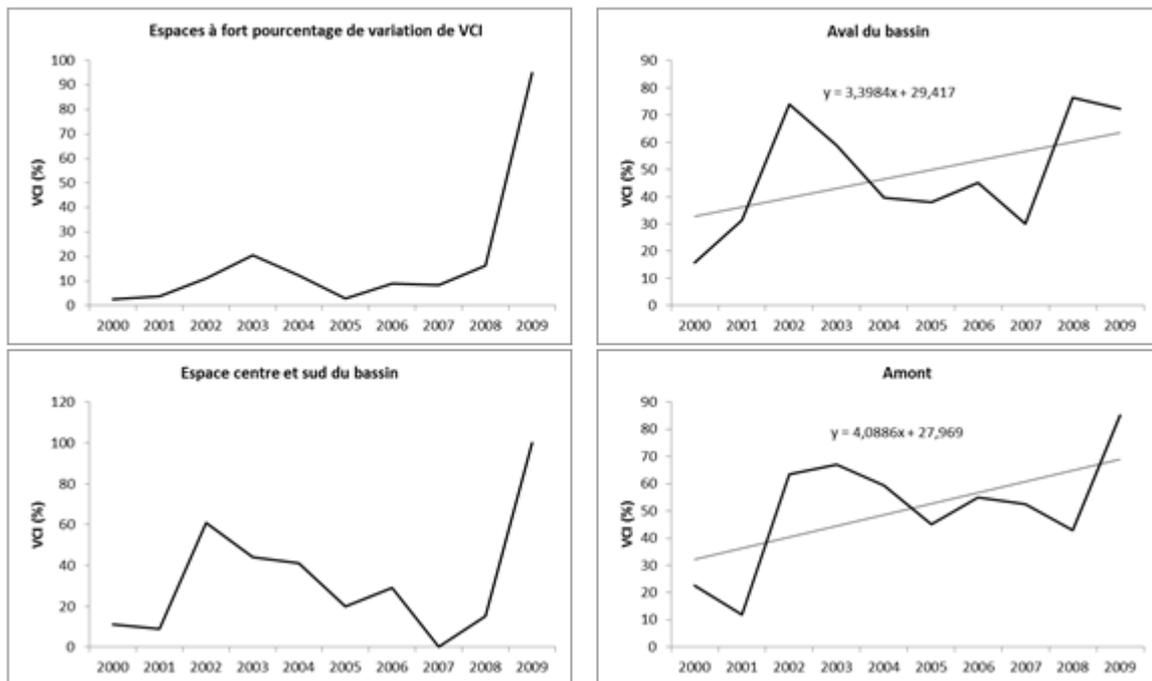


**Fig.61:** Evolution spatio-temporelle de l'humidité au mois d'avril

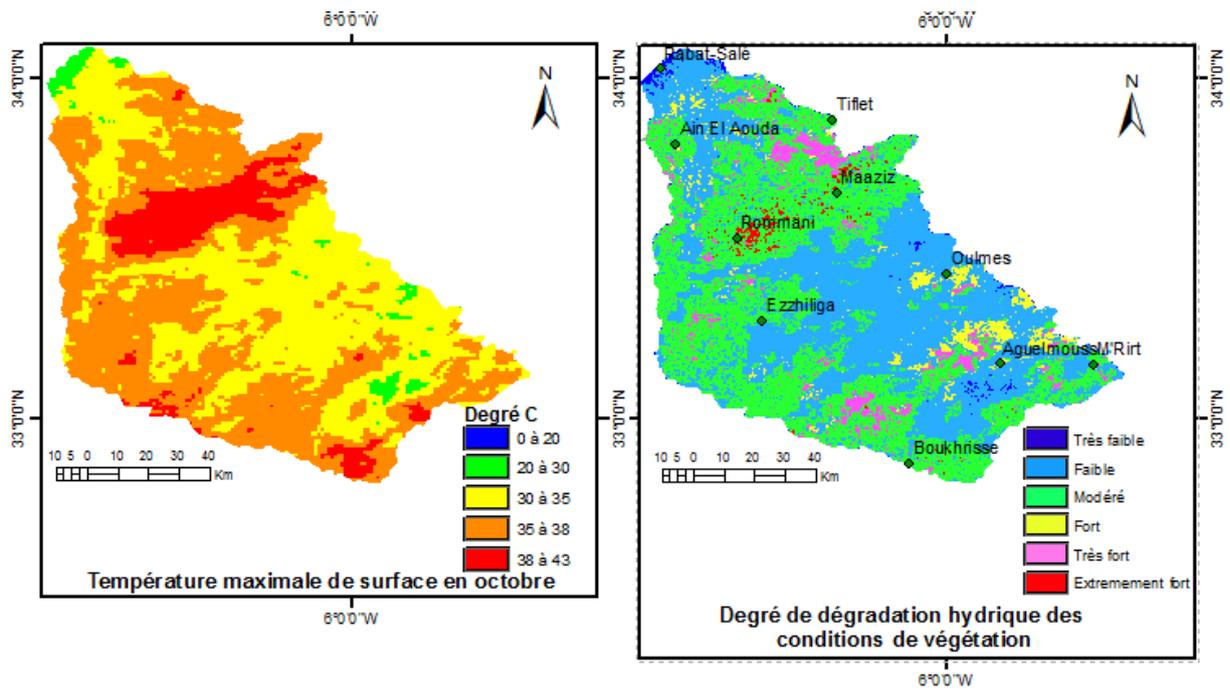
A l'aval du bassin, le pourcentage d'années marquées par des conditions défavorables de végétation (VCI inférieur à 50%) est de 60%. Cette proportion est de 80% dans le centre du bassin et de 40% dans la partie amont. Cette distribution spatiale des conditions de végétation est conforme à la répartition observée au niveau du bilan hydrique. L'analyse de la répartition spatiale des températures maximales de surface de la période de 2000 à 2009 met en relief cette distribution des conditions hydriques et édaphiques dans le bassin (figure 64). A cet effet, les espaces de végétation forestière connaissent des températures maximales comprises entre 20 et 35°C contre 35 à 38°C pour la plupart des espaces de culture. Les plus fortes températures sont observées au centre du bassin (température supérieure à 38°C). Quel que soit le mois de l'année, cette distribution des températures de surface se conserve avec des degrés thermiques différents. Les conditions de végétation favorable s'accompagnent d'une hausse des températures de surface de 2000 à 2009 pour les mois d'octobre à mars. La figure 64 et 65 présente le cas pour le mois d'octobre (l'année 2001 qui est une année sèche n'a pas été prise en compte car l'image comportait d'importantes superficies masquées par des nuages). Ces températures demeurent élevées, même pour des années assez humides comme 2009. Ce qui laisse supposer une dégradation des conditions édaphiques. Le mois d'octobre revêt à cet effet une importance particulière. La majorité des sols est préparée pour les cultures.



**Fig. 62:** Dynamique spatio-temporelle des conditions de végétation au mois d'octobre



**Fig. 63:** Dynamique temporelle du VCI au mois d'octobre



**Fig. 64:** Répartition spatiale de la dégradation de la végétation liée aux conditions hydriques des sols en octobre



**Fig. 65:** Evolution des températures de surface au mois d'octobre et d'avril

Ainsi, les précipitations de ces périodes rendent-elles ces sols vulnérables à d'important phénomènes d'érosion hydrique (Laouina, 2003, 2004). L'analyse croisée de la dynamique de l'indice de végétation et les températures maximales de surface permet de mettre en relief les espaces affectés par une dégradation des conditions hydrique de végétation (figure 64). Ces dégradations se localisent dans les espaces agricoles et forestiers centre et nord du bassin (Rommani, Maaziz et Tiflet). D'autres espaces agricoles à l'amont et au sud du bassin sont aussi marqués par cette dynamique négative. Si les espaces couverts par les formations forestières semblent relativement épargnés à cette date, l'analyse de la dynamique de l'indice des conditions de végétation au cours de la pleine saison agricole indique le contraire.

Le mois de novembre diffère de celui d'octobre par une généralisation des conditions favorables, surtout à l'amont et à l'aval du bassin. L'analyse temporelle du VCI en novembre indique que, tout comme au mois d'octobre, des proportions encore assez importantes d'années sont affectées à divers degré par les sécheresses. Cette proportion est de 60% sur tout le bassin pendant la période de 2000 à 2009 (figure 66).

Les mois de janvier et de mars permettent de comprendre que les espaces au centre du bassin caractérisés, en début de saison, par des conditions hydriques de végétation défavorables, sont des espaces de culture saisonnière sur sol humides. En janvier, ces espaces connaissent d'ailleurs les meilleurs conditions de végétation avec des indices allant jusqu'à 100% (figure 66). En outre, la répartition spatiale de la moyenne du VCI en janvier et mars (période de croissance végétale) montrent que les espaces forestiers de l'amont du bassin connaissent les plus basses conditions de végétation (30 à 50% de VCI en moyenne). Cette dynamique amène à penser à des facteurs externes autres que les conditions climatiques s'exerçant sur ces forêts et qui sont source de dégradation. Le faible taux de VCI des formations forestières tend à se généraliser à tout le bassin au mois d'avril. L'analyse temporelle du VCI pendant ces mois humides indique que deux années sur dix (2001 et 2007) sont marquées par un degré important de sécheresse avec des VCI, au mois de janvier, proche de 10%.

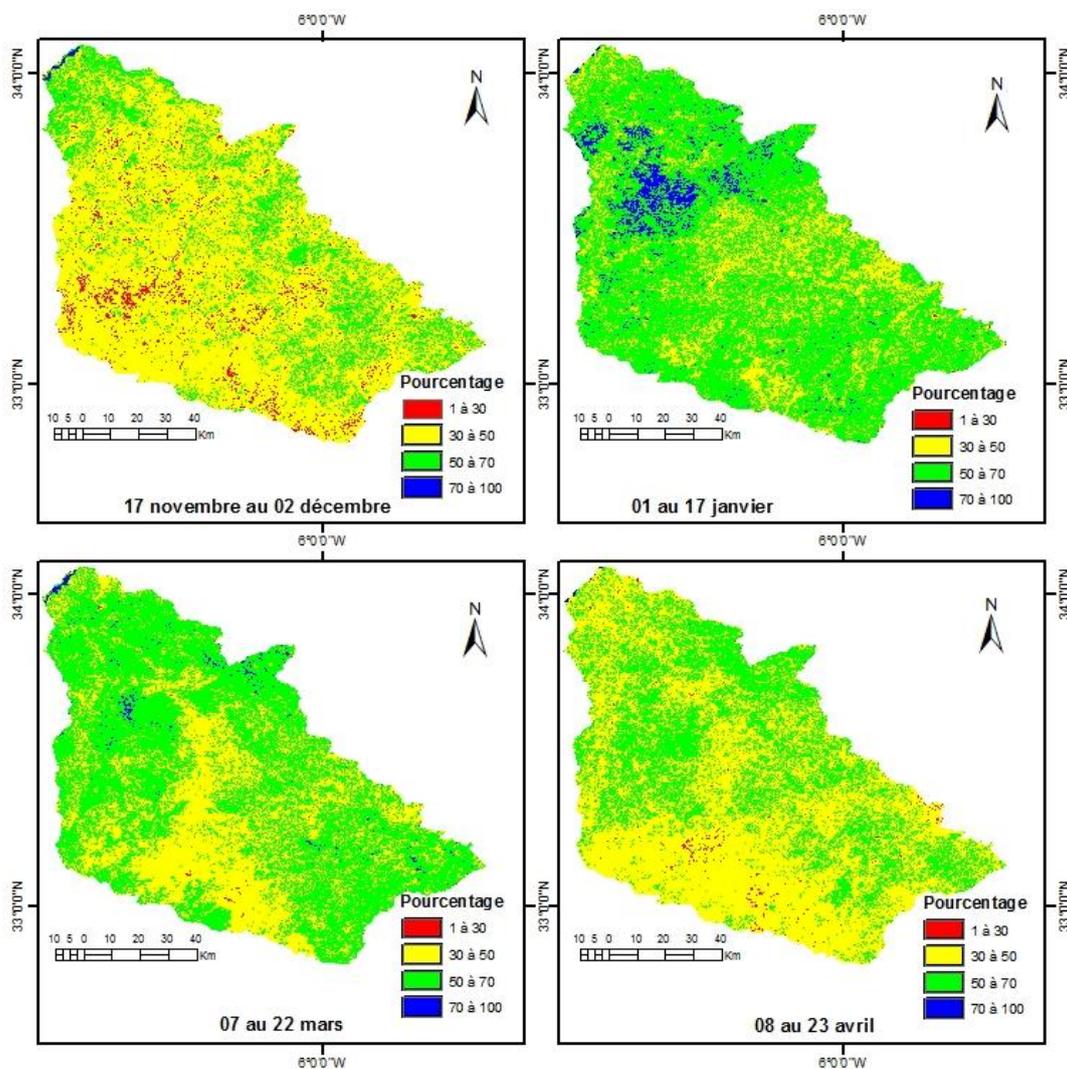
Les conditions d'humidité exceptionnellement favorables de l'année 2009 donnent une pente négative à la dynamique des températures de surface de 2000 à 2009 au mois de mars et d'avril. Cela tend à masquer l'allure défavorable de la dynamique temporelle des conditions de végétation dans le bassin de façon générale (figure 66).

Ainsi, par rapport au maximum historique de végétation de la période 2000 à 2009, les espaces forestiers semblent avoir subi les plus grandes variations de conditions de végétation pendant la saison culturale.

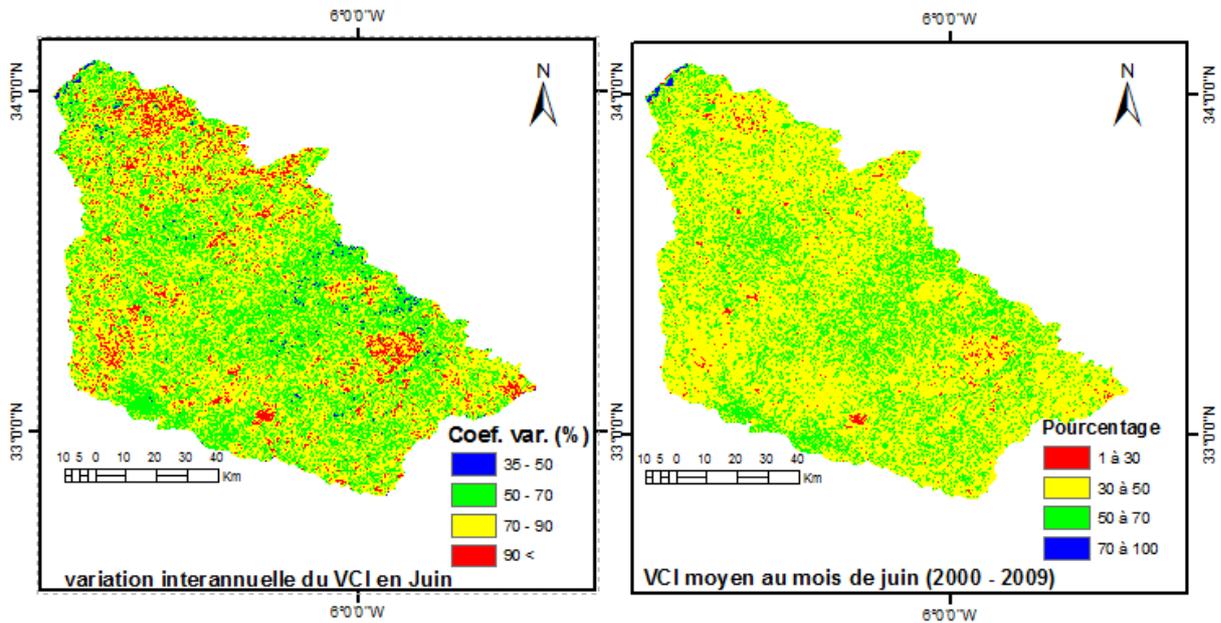
Les variations spatio-temporelles du VCI au mois de juin, à la fin de la saison culturale présente une répartition presque similaire à celui du mois d'octobre. A cet effet, les espaces de plus fortes variations se localisent dans les zones agricoles du bassin, avec une forte proportion à l'aval du bassin (figure 67). Cependant, les conditions de végétation semblent beaucoup plus stables en juin qu'en octobre. La majeure partie des espaces connaît des proportions moyennes de VCI compris entre 50 et 70%. Toutefois, l'analyse temporelle de la variation interannuelle des conditions de végétation en juin présente un mois défavorable. A cet effet, les transect tracés dans les espaces à forte variation interannuelle des conditions de végétation montrent que tous les espaces subissent une dégradation des conditions de végétation (figure 68). A l'aval et à l'amont du bassin, la proportion d'années marquées par des VCI inférieurs à 50% est de 70%. Cette proportion est plus importante au centre, avec 80% d'années en dessous du maximum historique de végétation. Quand bien même l'année 2009 restent suffisamment humide pour donner une pente positive à l'évolution temporelle du VCI à l'aval et au centre du bassin, à l'amont, la dynamique des conditions de végétation reste négative dans les espaces agricoles à forte variation.

Ainsi, si les conditions favorables au développement de la végétation sont de plus en plus défavorables dans les espaces agricoles en début et en fin de saison culturale, pendant la période humide, ce sont les espaces forestiers qui connaissent le même phénomène.

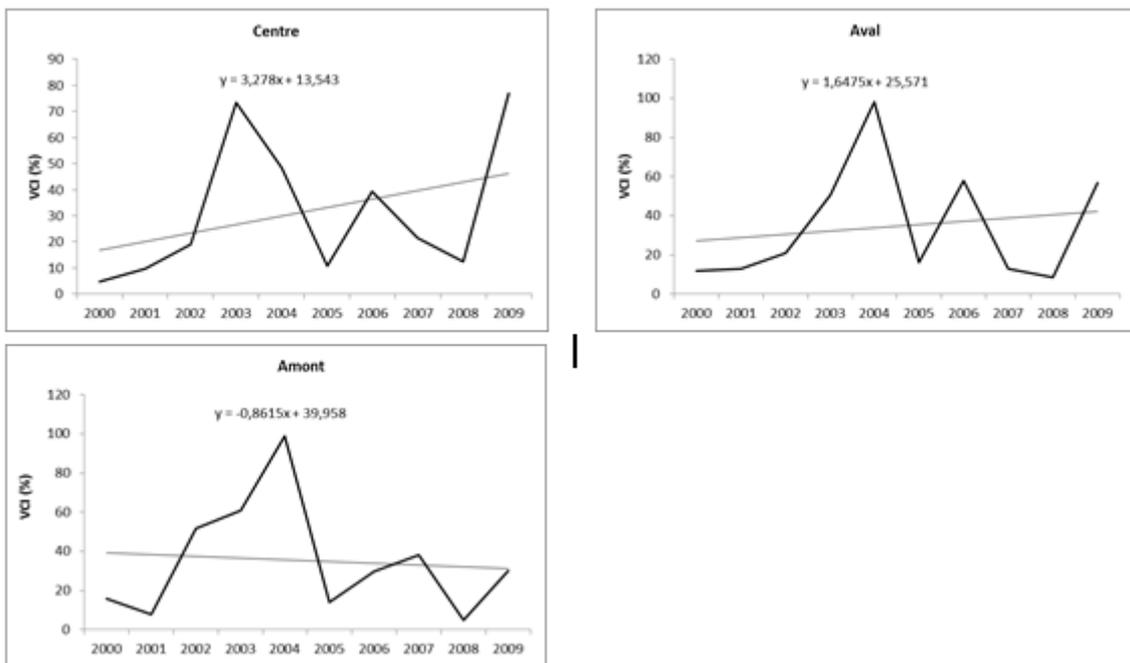
En résumé de la dynamique des conditions d'humidité de 1980 à 2009, il ressort que si au mois d'octobre de 1980 à 2000, le bilan hydrique semble indiquer un gain d'humidité, l'analyse des conditions de végétation pendant la période de 2000 à 2009 indique quant à elle une dynamique défavorable. Au mois de novembre, existe une suite logique de la baisse des conditions d'humidité de 1980 à 2009. En outre, l'analyse du VCI permet de mettre en relief des ruptures fréquentes d'humidité au cours des saisons agricoles. C'est le cas pour le mois de janvier, qui bien que gardant ces caractères humides (bilan hydrique), connaît souvent des périodes sèches dommageables aux productions agricoles annuelles. Ces mois humides permettent de constater aussi une baisse substantielle des conditions de végétation des formations forestières. Les mois de mars et d'avril qui correspondent au maximum de végétation de la saison humide connaissent une baisse des conditions d'humidité de 1980 à 2009. Quant au mois de juin, il présente une baisse générale d'humidité, surtout dans la partie la plus humide du bassin (l'amont).



**Fig. 66:** Dynamique spatio-temporelle des conditions de végétation dans le bassin de 2000 à 2009



**Fig. 67:** Dynamique spatio-temporelle des conditions de végétation au mois de juin



**Fig. 68:** Dynamique temporelle du VCI au mois de juin

### 2.2.3. Analyse de la corrélation variabilité climatique – production et masses végétales

#### 2.2.3.1. Corrélation entre variabilité climatique et dynamique végétale globale de 1980 à 2009

Il importe 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

certaines 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 agroclimatique. 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 12 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 importants (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.

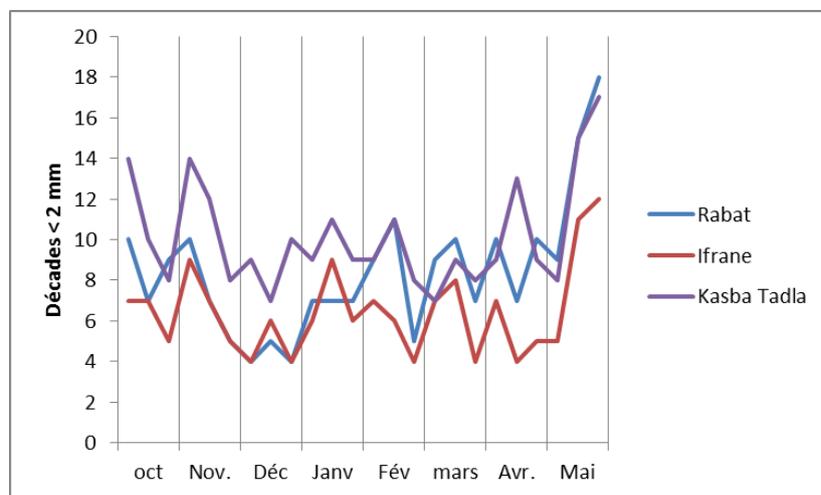
**Tableau 12:** Récapitulatif de la régression linéaire entre la pluviométrie et la végétation de 1982 à 2009

Rabat	Régression NDVI-P	février	mars	avril	juin	juillet	Novembre
	coef. Corrélation	0,44807344	0,4896485	0,45464192	0,14453911	0,14833991	0,35458292
	coef. 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
	coef. Corrélation	0,34580856	0,65572031	0,55046923	0,43379938	0,29976904	0,06867276
	coef. 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
	coef. Corrélation	0,3640373	0,50390019	0,3900231	0,22401146	0,19949716	0,34633194
	coef. 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

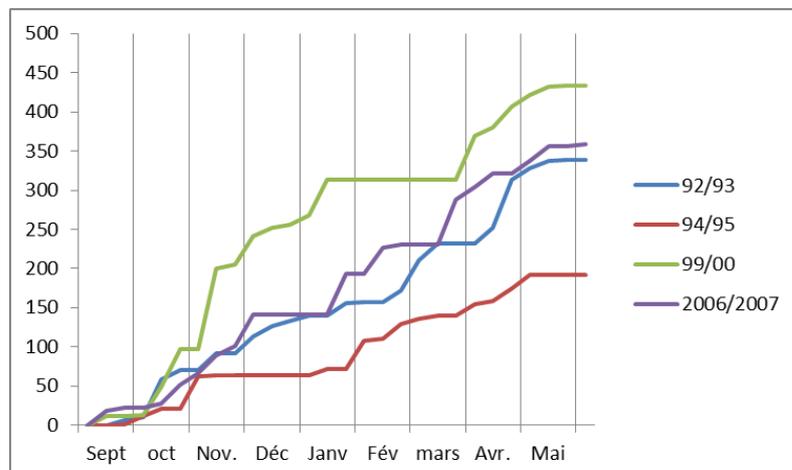
### 2.2.3.2. Expression pluviométrique des sécheresses agricoles enregistrées dans le bassin de 1988 à 2009

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 69 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 les 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 70 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.



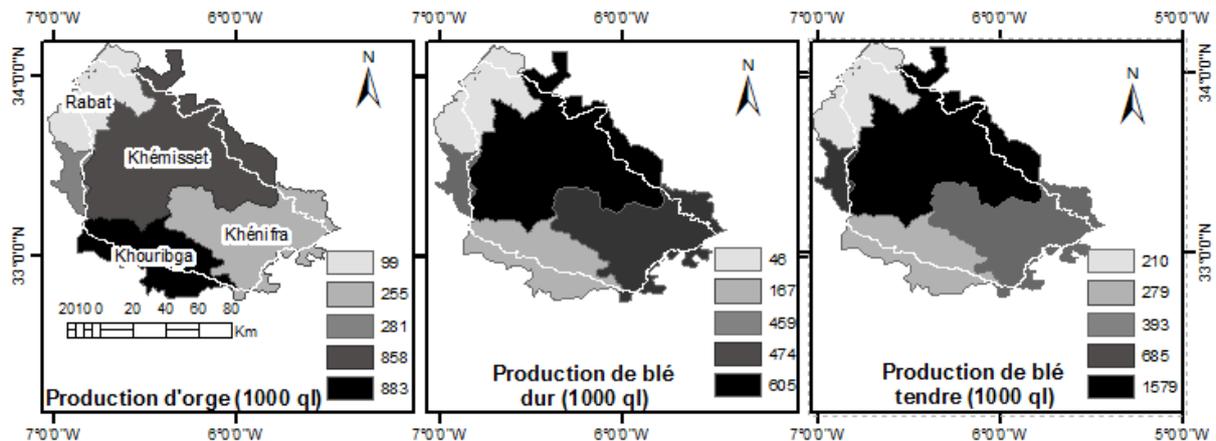
**Fig. 69:** Fréquence des décades pluviométriques nulles



**Fig. 70:** Détection de périodes sèches dans les campagnes agricoles d'années sèches à Rabat

### 2.2.3.3. Des productions agricoles affectées par la dynamique pluviométrique

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 décennale 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 pluviale 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 71 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



**Fig. 71:** Principales productions céréalières du bassin du Bouregreg (moyenne de 1980 à 2009)

de blé tendre sont plus du double 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, est égale à :

$$IS_x = 100 * (S - P_x) / S \quad (13)$$

où :

$IS_x$  = intensité de la sécheresse d'une année  $x$

$S$  = limite inférieure de l'intervalle de confiance

$P_x$  = 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 72) :

- 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

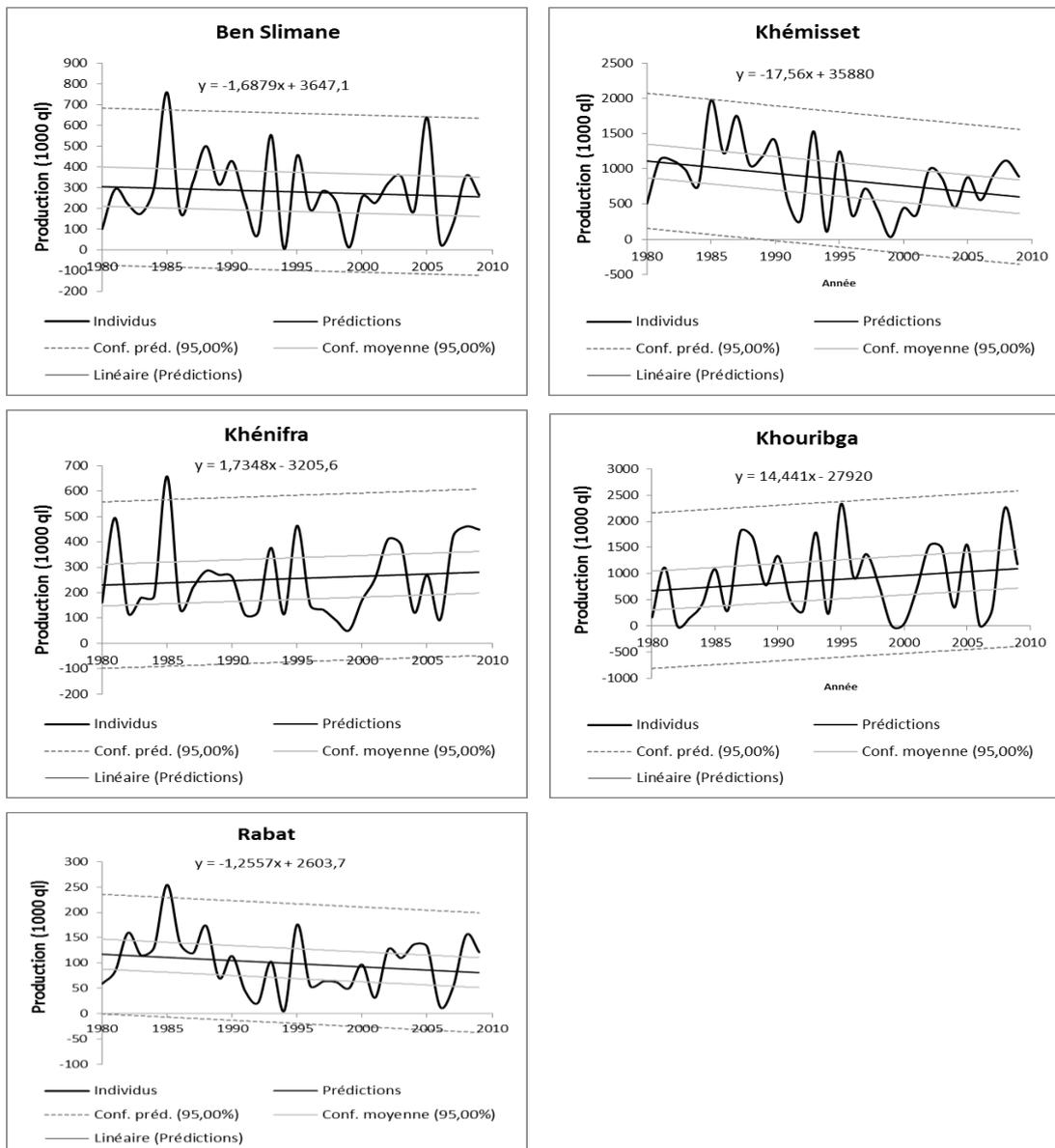
Dans l'un ou l'autre cas, ces productions ne sont pas des tendances significatives au niveau statistique. L'analyse de régression de l'évolution des productions d'orge (figure 72) permet de conclure qu'au cours des campagnes agricoles de 1980 à 2009, 40% des années ont été sèches à Khénifra, 37% l'ont été à Rabat, 33% à Khouribga et 27% à Ben Slimane (sud de Rabat). L'analyse du graphique de la figure 73 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 (figure 74 et 75). 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% (figure 75).

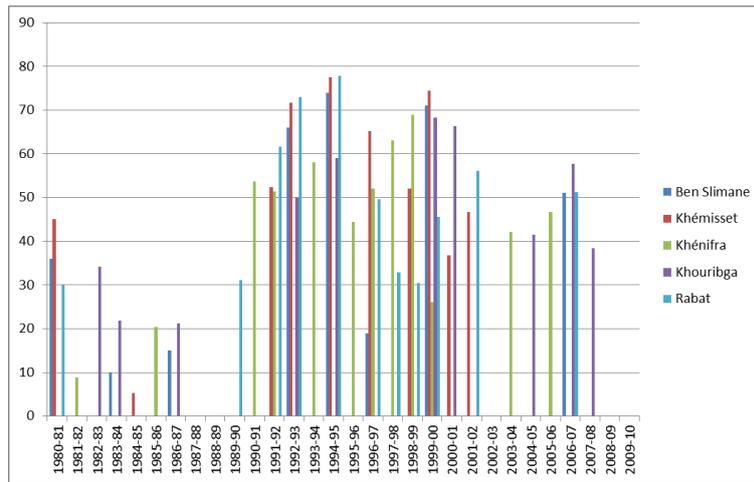
Les fréquences des sécheresses les plus importantes sont situées entre 1991-1992 et 2001-2002. La fréquence est ainsi, pour cette période, de 80% à Khémisset, 75% à Rabat, 63% à ben Slimane, 62% à Khénifra et 46% à Khouribga. L'intensité de ces sécheresses est dans la majorité des cas, supérieure à 50%.

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

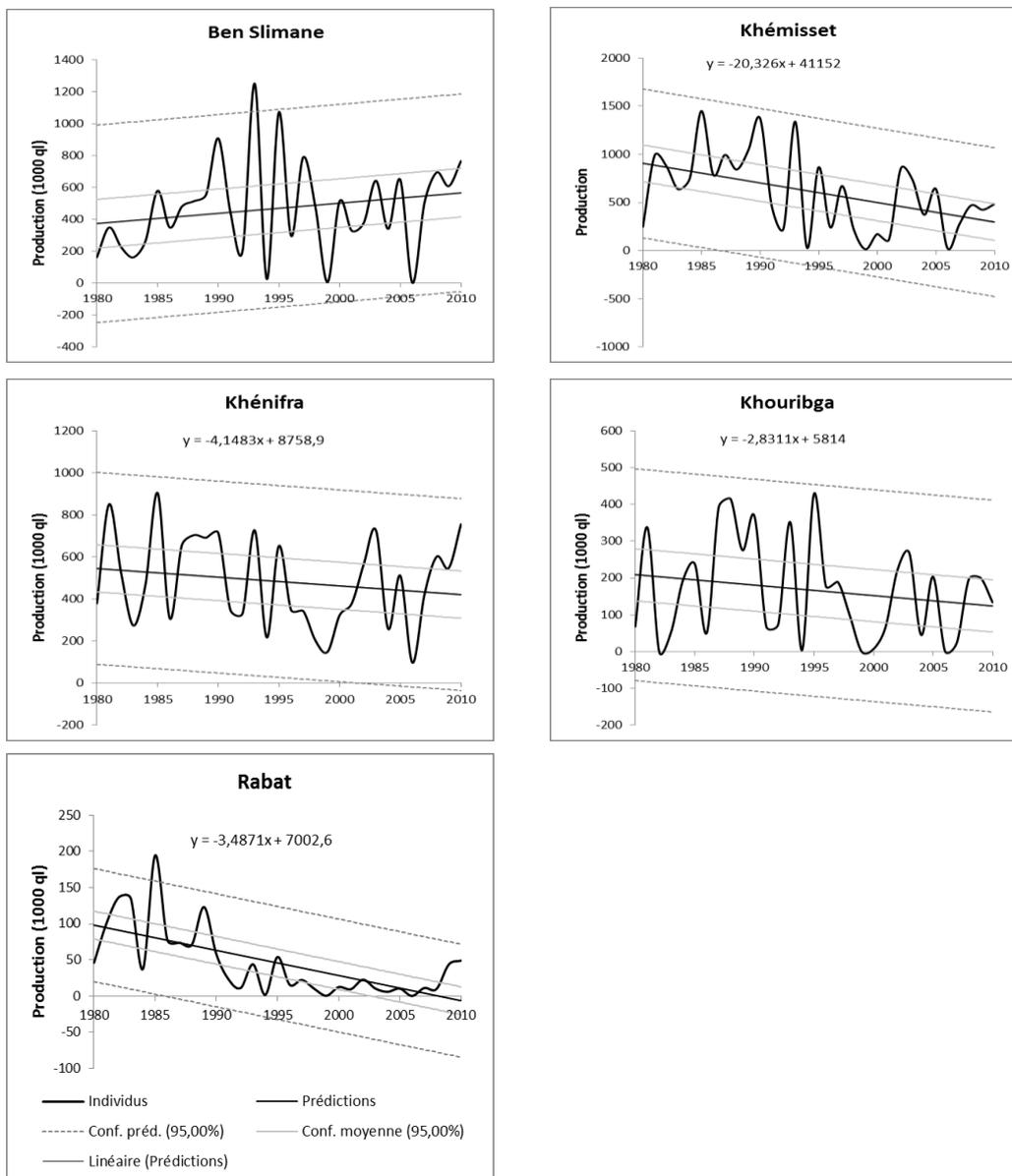
tendances significatives à la hausse pour tout le bassin (figure 76). A Khémisset par exemple, les productions du début de la série ont été multipliées par 12 en 2008-2009. Cependant, au contraire de cette évolution importante à la hausse des productions de blé tendre, l'analyse des périodes de sécheresse 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 77). 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%.



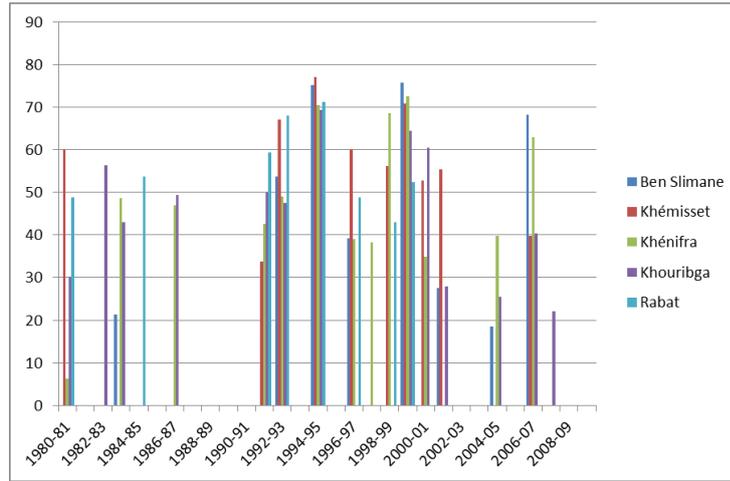
**Fig. 72:** Production d'orge dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009



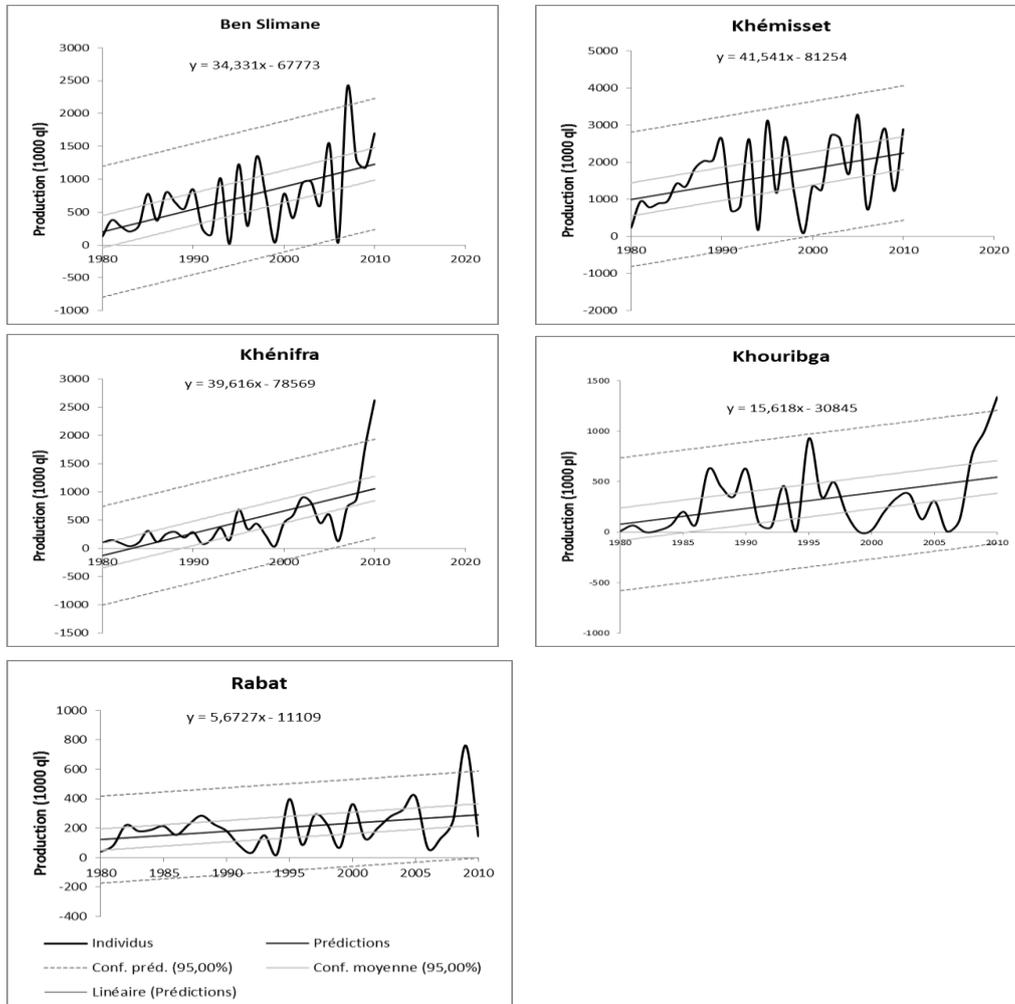
**Fig. 73:** Intensité des sécheresses pour la culture de l'orge de 1980 à 2009



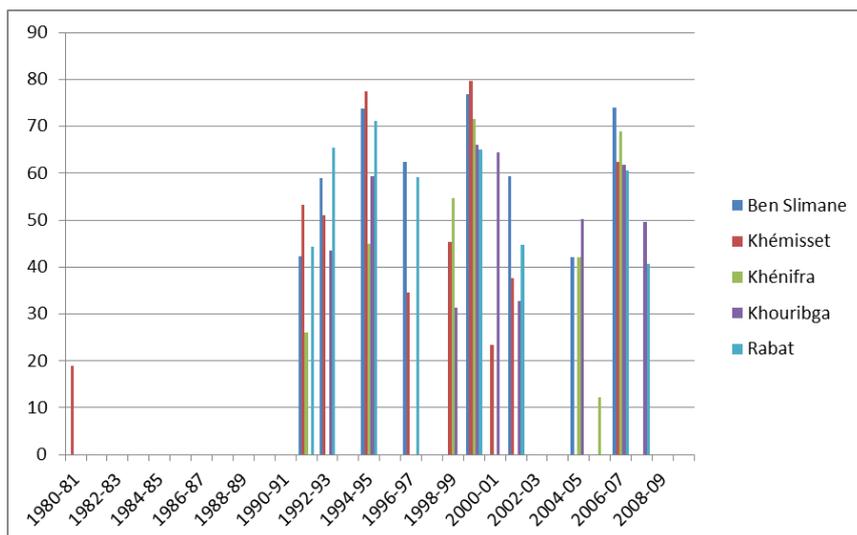
**Fig.74:** Production de blé dur dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009



**Fig. 75:** Intensité des sécheresses pour la culture de blé dur de 1980 à 2009

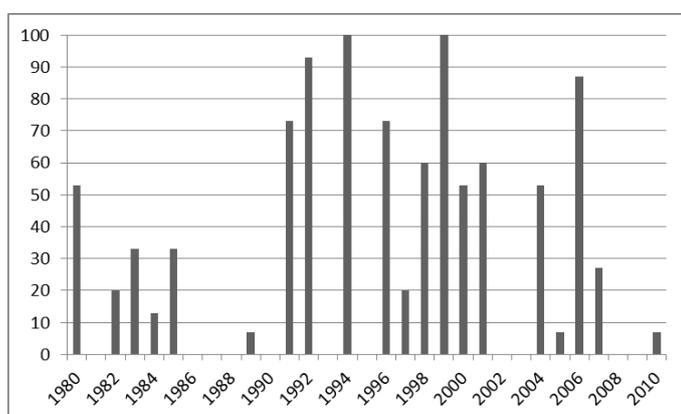


**Fig. 76:** Production de blé tendre dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009

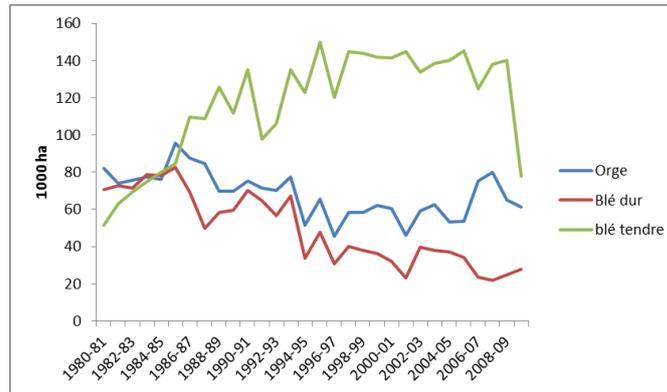


**Fig. 77:** Intensité des sécheresses pour la culture de blé tendre de 1980 à 2009

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 (figure 78) 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 79). 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.



**Fig. 78:** Proportion du bassin touché par la sécheresse agricole selon les campagnes



**Fig. 79:** Evolution des superficies cultivées pour les principales céréales à Khémisset

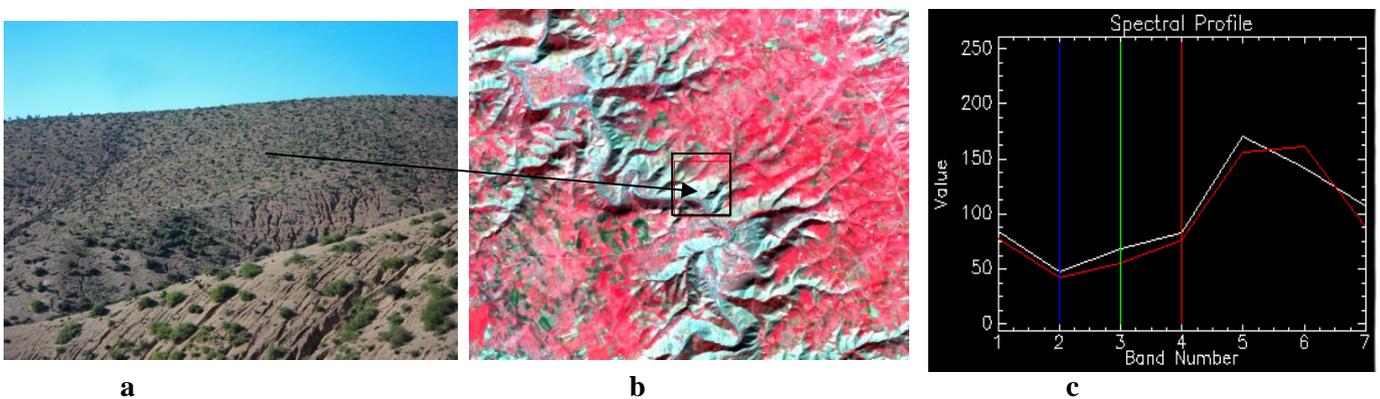
### 3. Les facteurs anthropiques de la dynamique de la végétation

#### 3.1. Elaboration de la carte d'occupation du sol

##### 3.1.1. Prétraitement des images pour la classification par arbre de décision (LANDSAT)

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 épars dont la réflectance sur l'image satellite se confond avec le sol nu. Or la zone d'étude connaît d'importants espaces où la végétation est très faible. Sur la figure 80a et 80b est visible une zone de versant exposée au sud, (illustration de ce type d'espace). La figure 13c représente la courbe de réflectance de cet espace (courbe rouge) comparée à celle d'un sol nu sec (courbe blanche).



**Fig. 80 :** Espace de végétation épars se confondant au sol nu sur l'image LANDSAT de printemps : a = photo ; b = image satellite composition 432 ; c = signature spectrale

- La seconde raison est que la classification par arbre de décision permet de prendre en compte le facteur relief, en particulier l'exposition au sud (figure 81) qui est un élément important de la colonisation végétale des espaces dans ce bassin ;



**Fig. 81:** Contraste de densité de végétation sur les versants : à gauche le versant exposé au Nord, à Droite le versant exposé au Sud

- 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 orthorectifiées, le prétraitement a concerné la correction atmosphérique des images et leur réprojection 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 méta donnée 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.

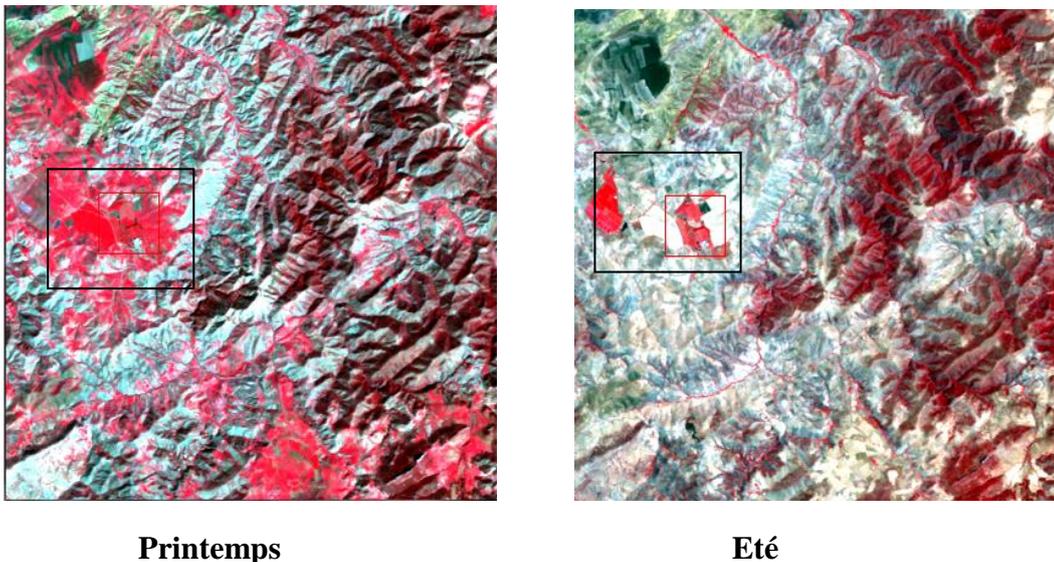
Chaque classification fait intervenir le même type de fichier. Pour 1985, il s'agit de :

- 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 les 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 avant de les intégrer dans l'arbre de décision.

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) d'autre part. L'image d'été est choisie car comme le présente la figure 82, elle lève les confusions de la période printanière où la réflectance de cultures céréalières et de verger industriel (encadré en noir) ainsi que de certaines formations forestières sont difficilement séparables.

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 (tableau 13). 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 figure 18a présente le résultat de cette classification qui a été améliorée par un filtre majoritaire 3x3. Le coefficient kappa de la classification indique 0,9383 (soit environ 94% de pixels bien classés). Toutefois, la classification par maximum de vraisemblance avec seulement deux classes reste imparfaite. Afin d'améliorer d'avantage cette classification et séparer le verger et les jachères des formations forestières, l'image raster de la classification est convertie en vecteur. Sur cette image en vecteur, et en comparaison avec une carte de référence (la carte de végétation du CERCEO), sont donc supprimés les vecteurs correspondants au verger et aux jachères ainsi qu'aux cultures pour ne conserver que les

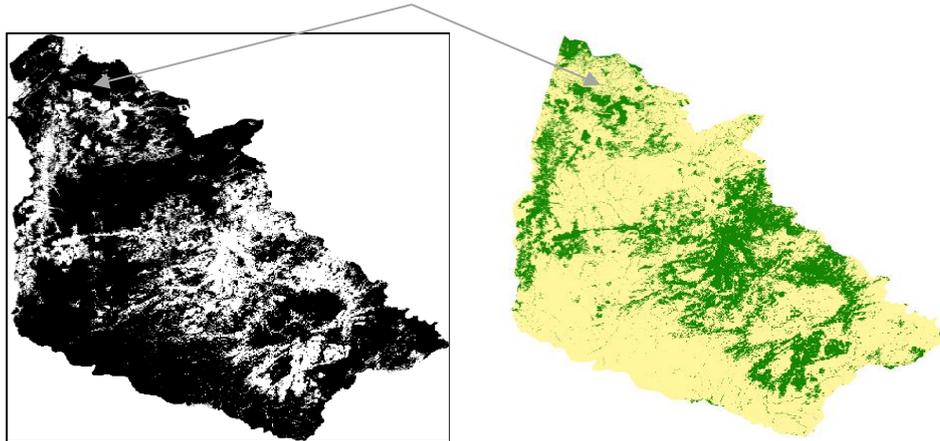


**Fig. 82:** Deux portions identiques des scènes du 11 mars et du 01 juillet 2007

formations forestières pures ou l'opération inverse (pour ne conserver que le verger). Ce qui permet d'obtenir deux images en vecteur : l'une correspondant aux forêts et l'autre correspondant au verger et aux jachères. Sur la figure 83 les pixels de verger et de jachères ressemblant à du bruit sur la figure de droite sont supprimés. Cette image corrigée est reconvertie en image binaire raster (figure de gauche) qui sera utilisée comme entrée dans l'arbre de décision.

**Tableau 13:** Evaluation de la séparabilité des zones d'entraînement

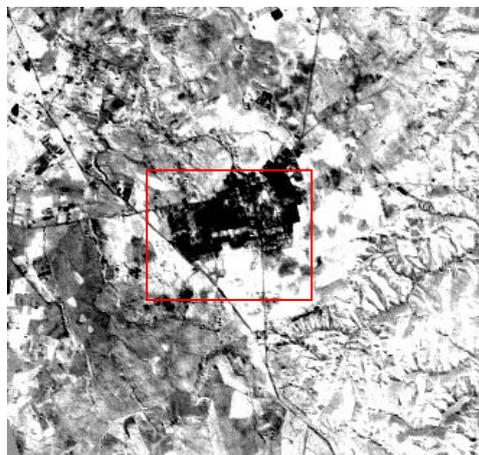
Classified Data	Reference Data			Row Total
	forêt	eau	sol_cultur	
forêt	99.73	0.85	5.38	1177
eau	0.00	97.75	0.00	347
sol_cultur	0.27	1.41	94.62	1045
Column Total	1118	355	1096	2569



**Fig. 83:** Délimitation des formations forestières du bassin : image classifiée binaire avec confusion de classe à droite et image corrigée à gauche

Le deuxième fichier image (le MNT ASTER) utilisé comme entré de l'arbre de décision connaît aussi une correction. En effet, le MNT ASTER étant construit à partir de balayage radar, certaines zones à l'abri des ondes de ce balayage peuvent être à l'origine de trous sur l'image. Il est donc important de combler ces vides par interpolation. Après cette correction du modèle numérique de terrain, sont extraites les pentes en degré et sauvegardées sous forme image.

Enfin, le dernier fichier à intégrer dans cet arbre est celui délimitant les localités. Il a été réalisé par numérisation de l'ACP 4 de l'image de Landsat. Image sur laquelle, les structures linéaires (les routes) ainsi que la vérification googlemappermet de voir assez aisément les limites des localités. La figure 84, par exemple, représente en encadré rouge la localité de Ain El Aouda.



**Fig. 84 :** Localité de Ain El Aouda (image ACP4)

### 3.1.2. Construction de l'arbre de décision pour le traitement des images LANDSAT

La classification par arbre de décision est une classification qui permet de prendre des décisions en plusieurs étapes pour mettre en relief une classe particulière d'objet selon le comportement spectrale d'une bande ou d'une transformation de bandes. Dans l'arbre de décision de la classification de l'image LANDSAT du 11 mars 2007 (figure 85), deux décisions sont communes à toutes les extrémités. Il s'agit, en premier, d'extraire de toutes les classes d'occupation du sol, celles qui sont situées sur des pentes relativement fortes (supérieure à  $10^\circ$ ), et en deuxième, il est question d'extraire de toutes les classes d'occupation du sol les localités (rurales ou urbaines) ou les agglomérations.

**Décision I :** la décision 1 vise à extraire les sols nus secs. Pour cela, la segmentation est effectuée sur la bande du moyen infrarouge 2 car les sols nus sont très réfléchis dans ce canal et contraste avec la végétation et l'eau. Sont alors considéré comme sols nus, les objets dont la réflectance est supérieure à 87.

**Décision II :** Il est question à ce niveau d'extraire la classe d'occupation correspondant à l'eau (Oued, barrage, océan). Les comptes numériques correspondant à l'eau sont très faibles dans l'infrarouge en générale. De ce fait, l'eau apparaît en noir sur l'image infrarouge moyen. Les pixels correspondant à cette classe d'occupation du sol sont inférieurs à 23.

**Décision III :** la troisième décision vise à extraire les zones humides occupées par des cultures. Pour cela la même bande du moyen infrarouge est segmentée pour retenir comme espace humide le segment dont le compte numérique est compris entre 23 et 35. Une sous décision à ce niveau consiste à extraire des classes d'objets correspondant aux zones humides et dont la réflectance se confond avec certaines végétations forestières. Ainsi, a-t-il été constaté que sur l'image les pixels de confusion appartiennent aux espaces à relief accidenté. Aussi, était-il possible de les extraire à partir de l'écart-type des pixels sur l'ensemble des 6 bandes de l'image (écart-type inférieur à 44).

**Décision IV :** la décision 4 vise à extraire la classe d'occupation de sol correspondant aux formations forestières. Cette décision est rendu possible en injectant dans l'arbre le fichier image binaire correspondant aux forêts, les forêts étant codé 1.

**Décision V :** tout comme la précédente décision, il s'agit à partir du fichier image du verger d'extraire cette classe d'objet qui a été codé 1 en image binaire.

**Décision VI :** en dépit de l'utilisation de la bande du moyen infrarouge pour extraire les zones humides, certaines classe y appartenant n'ont pu être extraites. Ainsi, la décision VI vise à extraire les classes de cultures (céréale majoritairement) marquées par une forte humidité. Pour cela est calculé un indice de la teneur en eau de la végétation équivalent à la somme des bandes du visible divisée par la somme des bandes de l'infrarouge. Une sous décision à ce niveau consiste à savoir quelle est dans cette végétation (céréale) à forte humidité celle qui à un très faible recouvrement végétal. Pour le savoir, un autre indice de végétation est calculé, le SAVI (SoilAdjustedVegetation Index) qui a l'avantage de prendre en compte la réflectance du sol. En effet, dans le bassin versant du Bouregreg et dans les zones semi arides du Maghreb en générale, la réflectance de la couverture végétale est très influencée par celle du sol. C'est pourquoi certains chercheurs proposent l'indice de végétation SAVI qui semble plus adapté (Escadafal et Huete, 1991 ; Lecerf, 2008). La végétation très épars correspond sur l'image de l'indice SAVI à une végétation dont l'indice est presque nul (0,04).

**Décision VII :** la décision VII a pour objectif l'extraction de différentes catégories de cultures pluviales (céréaliculture) en fonction de leur densité à travers l'indice de végétation SAVI.

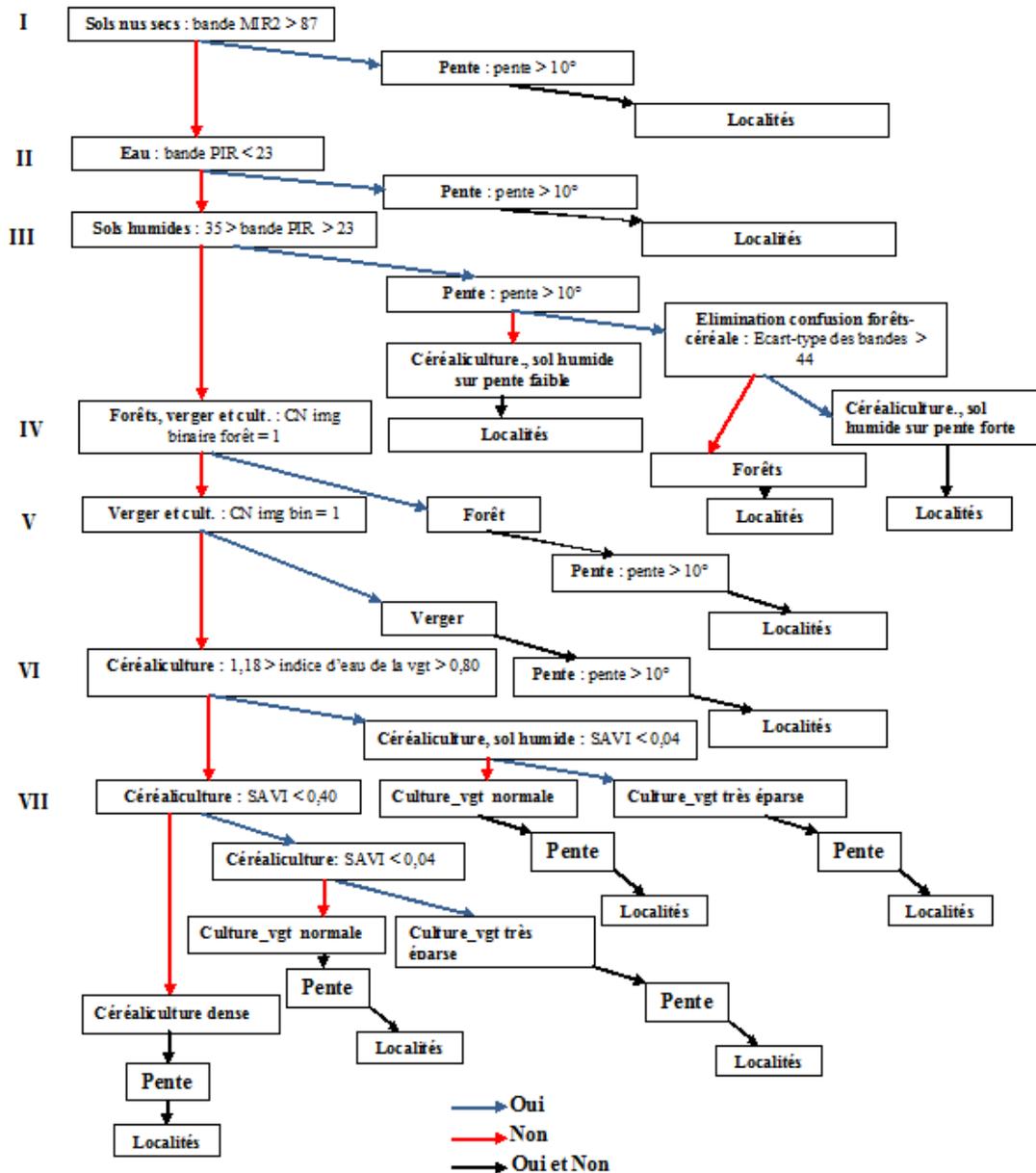


Fig. 85: Arbre de décision de la classification de l'image LANDSAT du 11 mars 2007

Ainsi, les cultures céréalières denses à très forte réflectance ont un indice supérieur à supérieur à 0,40. Les cultures à indice "normal" occupe le segment entre 0,40 et 0,04.

Cette classification conduit à un résultat meilleur d'autant plus que le coefficient kappa est très élevé, 0,91 pour l'exemple-ci.

La classification de l'image SPOT 5 est une classification orientée objet. Cette classification procède par segmentation et recherche d'objet d'intérêt sur l'image.

### **3.2. Une pression démographique de plus en plus importante sur le littoral et les espaces agricoles**

#### *3.2.1. Les facteurs de la dynamique et de la répartition de la population marocaine*

La croissance démographique et la répartition de la population marocaine s'expliquent aussi bien par les faits historiques que par les choix politico-économiques. En effet, en dehors de quelques villes existantes, le Maroc était occupé, entre le XVI<sup>e</sup> et le XIX<sup>e</sup> siècle par des tribus semi-nomades. Le passage du royaume, au début du XX<sup>e</sup> siècle, sous protectorat de la France va transformer le paysage socio-économique et démographique. Les tribus sont sédentarisées. La production céréalière de masse est intégrée dans le système agricole pour répondre aux besoins de la France. Pendant cette période de protectorat, la croissance démographique connaît un boom. La population marocaine triple. Ces mutations de cette période historique sont à l'origine d'une dynamique de dégradation des sols et de la végétation constatée aujourd'hui (Marthelot, 1961). A cet effet, Kloet (1975) cité par Swearingen (1987) affirme que « l'accroissement rapide de la population (au cours de la période du protectorat) et l'accaparement de près de 30% des terres agricoles par les colons ont donné lieu à un processus "d'involution". Ainsi, les populations sédentarisées sont dépossédées de terres très vastes que les colons estimaient inoccupées. « Le calcul numérique montre qu'au début du siècle, les densités humaines du Maroc central (renfermant le bassin versant du Bouregreg) étaient ne dépassaient 10 à 15 habitants par Km<sup>2</sup>, parfois moins » (Beaudet, 1979). Des mutations importantes dans la répartition spatiale de la population ont également vues le jour au cours de cette période. A cet effet, « la pénétration coloniale a imposé au pays un modèle d'organisation de l'espace qui privilégie les zones littorales, tout en marginalisant les espaces jugés impropres aux pratiques spéculatives » (El Mansouri, 2005). Les centres urbains qui concentrent de plus en plus de population vont se situer sur le littoral atlantique. sur le plan naturel, le climat et le relief restent des facteurs déterminants de la répartition de la population marocaine. La répartition géographique de la population calque la répartition des précipitations. De fortes densités de population sont observées dans les espaces où la culture sèche est possible, au contraire des zones défavorables du sud. De même, les conditions de température dans les zones de montagne où l'enneigement peut durer 4 à 5 mois sont des facteurs limitant de la répartition de la population au Maroc (El Mansouri, 2005).

Après 1956, la combinaison d'un accroissement naturel de la population et d'un système agro-sylvo-pastoral hérité de la colonisation ont accrue la pression sur les terres. En effet, au niveau rural, la SAU du Maroc est limitée. Elle n'est que de 13%. Même si cette surface agricole a connu une augmentation importante (environ 30% depuis 1970), la densité rurale n'a cessé de croître malgré la baisse du taux d'accroissement naturel (Jouve 2002 ; Laouina, 2002 ; El Mansouri 2005). La densité de la population par rapport à la SAU est passée de 180 habitants/km<sup>2</sup> en 1960 à 307 habitants/km<sup>2</sup> en 1999, équivalent à 60% d'augmentation (Jouve, 2002). L'augmentation des densités rurales s'effectue dans un cadre foncier et un système agricole et pastoral à problème. En effet, la période de l'indépendance n'a pas connu de véritable réforme agraire. Les riches terres qui appartenaient autrefois aux colons français sont aujourd'hui les propriétés de bourgeois marocains. 41% des agriculteurs possédant de petites exploitations (inférieur à 5 ha) ne détiennent que 8,5% de la SAU (Lazarev, 2008). Aussi, l'augmentation constatée de la SAU s'est faite au détriment des terres de parcours et des terres de forte déclivité, ce qui crée d'autres problèmes environnementaux. La multiplicité des statuts fonciers est un élément catalyseur de la pression démographique sur les terres. Les terres de statu *melk* (propriété privée de droit commun) qui représentent 75% de la SAU sont des patrimoines familiaux en indivision, ce qui surcharge les exploitations agricoles. Quant

aux terres collectives (18% de la SAU), la gestion relative aux lois coutumières n'est pas respectée.

Au niveau urbain, le taux d'urbanisation est passé de 30% en 1960 à 55% en 2004. Cette urbanisation rapide est caractérisée par une concentration des villes sur le littoral. Plus de 4 urbains sur 10 résident dans les trois régions que sont Casablanca, Rabat-Zemmour-Zaer (partie aval et centre du bassin du Bouregreg) et Tanger-Tetouan. La croissance urbaine est alimentée, en plus de l'accroissement naturel, par l'exode rural et l'annexion des espaces périphériques. Les densités de population des communes périphériques des villes côtières sont les plus élevées du Maroc (Joumady 1999 ; Haut-Commissariat du Plan, 2004 ; EL Mansouri, 2005 ; Berrada, 2005).

### *3.2.2. Le bassin versant du Bouregreg, un échantillon de la dynamique démographique des zones agricoles favorables du Maroc*

La répartition de la population est inégale dans le bassin versant du Bouregreg. La figure 86 permet de constater que conformément à la répartition générale de la population marocaine, la zone littorale du bassin regroupe les plus fortes populations par commune, contrastant d'avec le reste du bassin. L'observation des quantités permet de constater une importante croissance démographique dans cette partie atlantique. En 1982, la plupart des communes comptaient, dans la partie littorale du bassin, entre 90 000 et 169 000 habitants. En 1994, cette quantité passe de 125 000 à 205 000 habitants par commune. En 2004, la quantité atteint 163 000 à 235 000 habitants. Ce qui laisse penser à une moins grande croissance démographique entre 1994 et 2004 qu'entre 1982 et 1994. Le second pôle par ordre d'importance démographique est l'amont du bassin (exception faite du Sud-Est). Le nombre d'habitants par commune reste beaucoup moins important. Il est compris entre 25 000 et 90 000 habitants en 1982 ; 35 000 et 125 000 habitants en 1994 et 19 000 et 163 000 habitants en 2004. Le reste du bassin présente les populations les plus faibles notamment le centre et le Sud du bassin. Cela s'explique par l'histoire, mais aussi par le climat. Au niveau historique, cette distribution est due au fait que les meilleures terres agricoles sont localisées dans la partie centre du bassin, terres qui avaient été conquises par la colonisation. Au niveau climatique, les communes les plus importantes en terme démographique sont localisées dans les espaces les plus humides du bassin (figure 86). L'analyse des taux d'accroissement moyen annuel de la population de 1982 à 2004, conforte les observations précédentes (figure 87). Les taux d'accroissement de la population sont en effet très forts au niveau de l'aval du bassin (la zone d'influence du littoral) et à l'amont sur les plateaux humides. Les taux d'accroissements sont, dans la majorité, supérieurs à 25%. Ils atteignent même des records de plus de 8% au niveau du littoral. La répartition de la population entre 1982 et 2004 se polarise de plus en plus entre ces deux territoires du bassin. Il apparaît en effet que les espaces connaissant des taux d'accroissement importants sont plus étendus entre 1982 et 1994 qu'entre 1994 et 2004. Aussi, l'observation de l'aval du bassin laisse-t-il constater que les taux de croissance les plus forts (supérieur à 4,5%, souvent 8%) se situent à la périphérie des localités de Rabat- Salé, soit donc une extension très forte de l'urbanisation (figure 88). Les communes qui connaissent une évolution à la baisse de la population (taux d'accroissement négatif) sont localisées dans le Sud du bassin et dans quelques communes du centre.

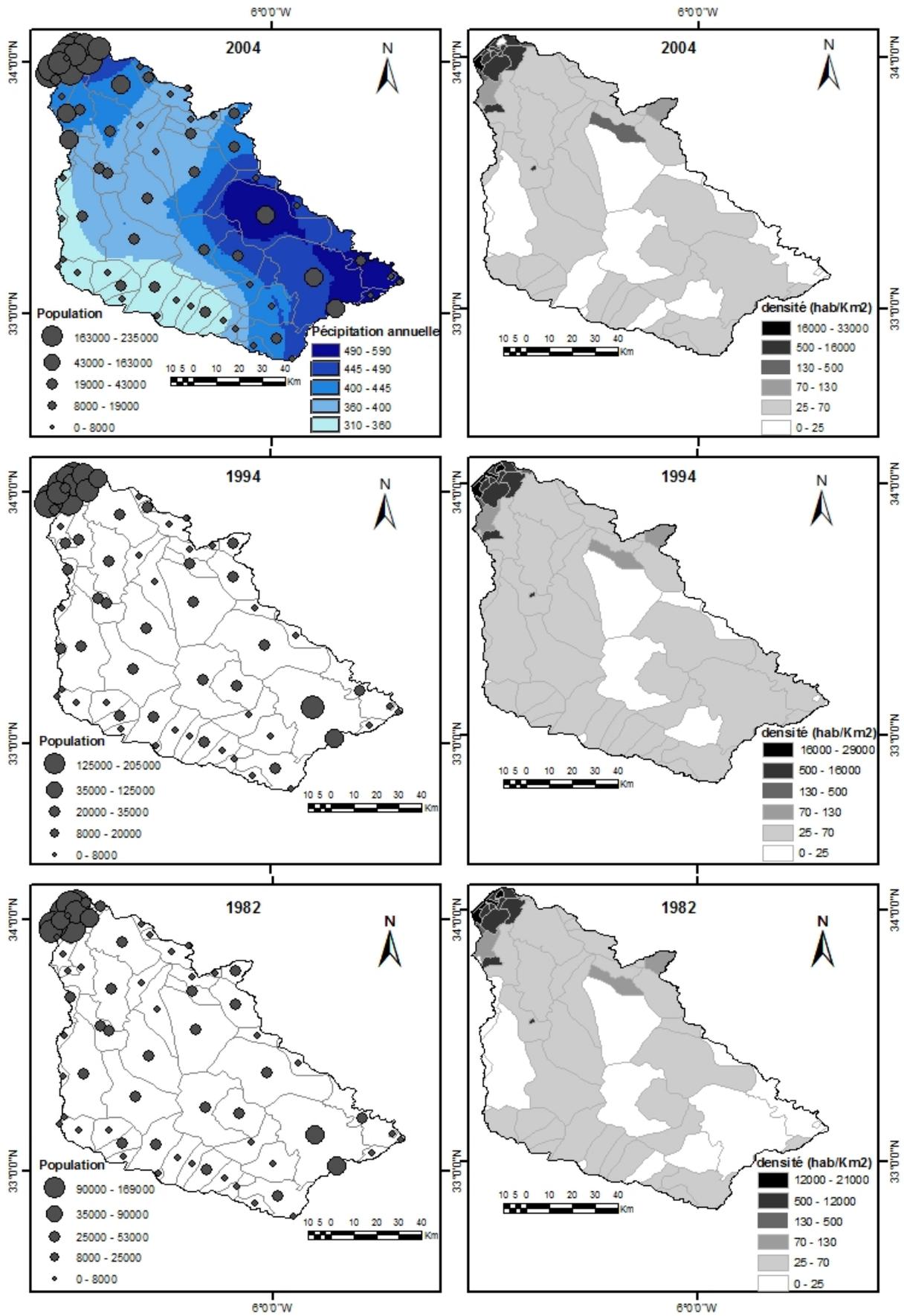
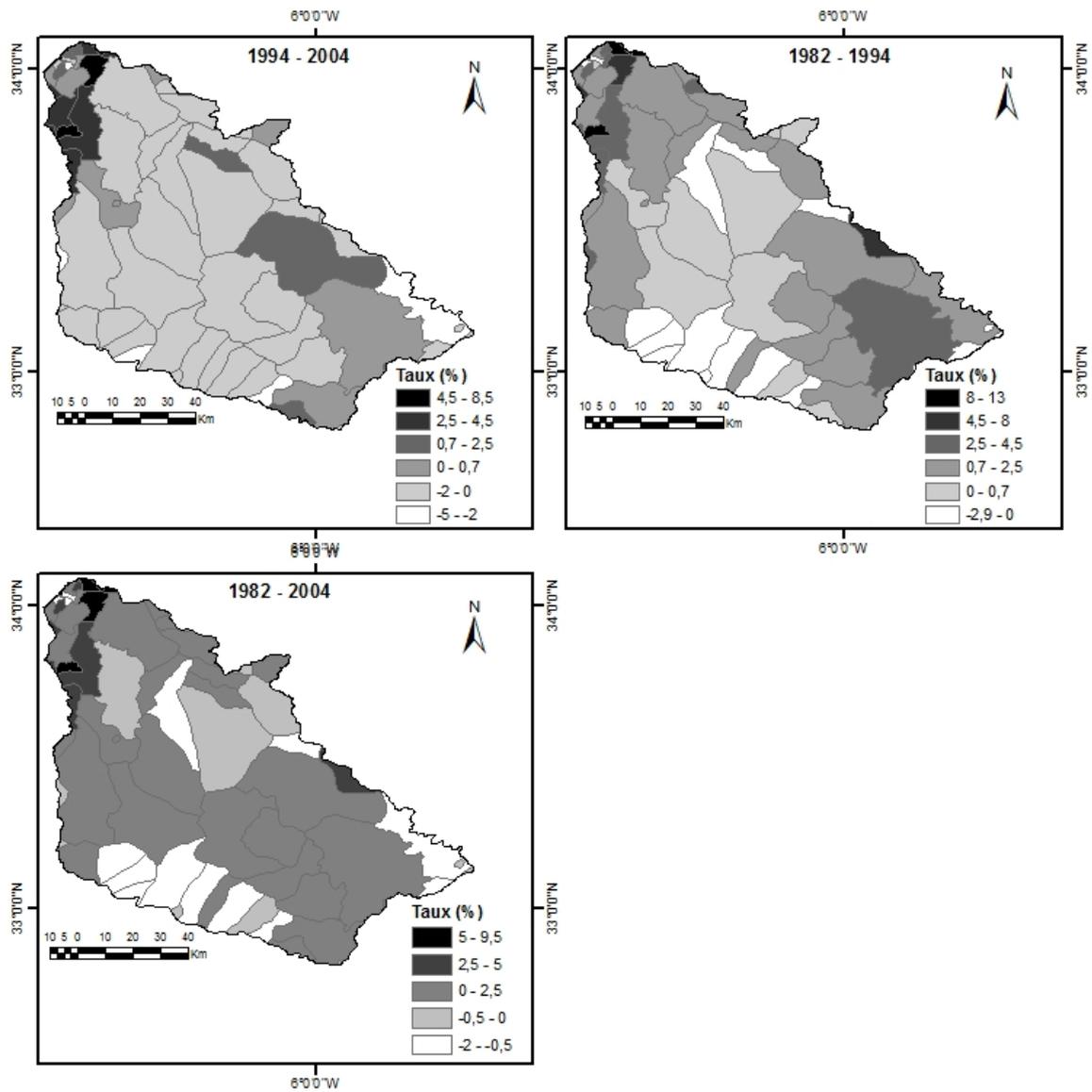


Fig. 86: Répartition de la population dans le bassin versant du Bouregreg

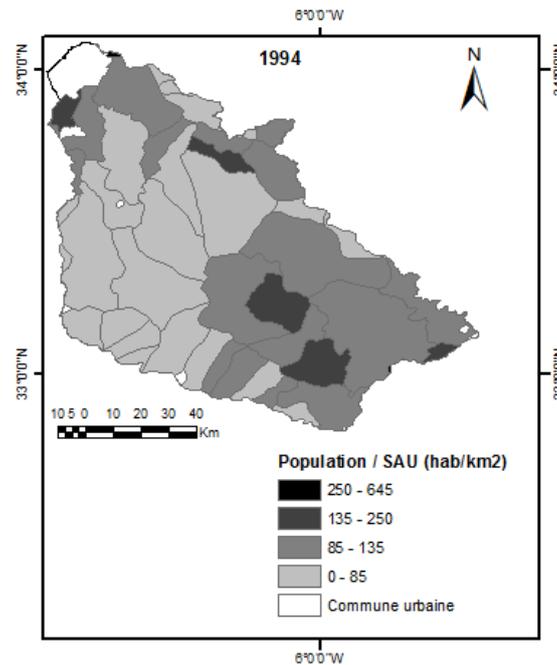


**Fig. 87:** Taux d'accroissement moyen annuel de population du bassin du Bouregreg



**Fig. 88:** Extension urbaine de la zone de Rabat, commune d'Ain El Aouda : au premier plan un terrain viabilisé dans le cadre d'une extension continue de la ville

Ainsi, la répartition de la densité de la population confirme la distribution et la croissance observée de cette population. Le centre et le Sud connaissent les plus faibles densités de population. Si en 1982 les communes de l'amont du bassin comptaient parmi les plus faibles densités du bassin (0 à 25 habitants/km<sup>2</sup>), en 1994 et 2004, elles sont passées à 25-70 habitants/km<sup>2</sup>. Les densités les plus importantes (supérieur à 130 habitants/km<sup>2</sup>) se localisent à l'amont du bassin. Cette répartition des densités par commune dans le bassin masque les fortes densités au niveau rural. En effet, à partir du RGA (Recensement Général de l'Agriculture) de 1996, la densité de population par superficie agricole en 1994 apparait très importante dans le bassin (figure 89). Dans les espaces amont, centre-nord et aval du bassin, ces densités sont supérieures à 85 habitants par km<sup>2</sup>. La caractéristique démographique majeure de distribution de cette population rurale est sa grande dispersion dans l'espace (figure 90).



**Fig. 89:** Densité de population par surface agricole (RGA 1996)



**Fig. 90 :** Dispersion de l'habitat dans le paysage rural, (commune de Maaziz)

### 3.3. Les transformations des paysages végétaux

La classification des images de landsat de printemps 1985, 2000 et 2007 permet de mettre en relief trois dynamiques principales de l'occupation du sol :

- Une augmentation des espaces agricoles aux sols dénudés ;
- Une réduction des surfaces forestières ;
- Une augmentation des superficies céréalières, principalement de blé.

#### 3.3.1. Des sols de plus en plus dénudés

Les statistiques de classes des images de 1985, 2000 et 2009 indiquent une proportion de sols nus sur pente faible de 1,53% (15332 ha) de la superficie du bassin en 1985, de 2,85% (28408 ha) en 2000 et de 3,64% (36371 ha) en 2007 (figure 91). Les sols dénudés sur pente forte représentent quant à eux 0,27% (2673 ha) de la superficie totale du bassin en 1985 contre 1,27% (12653 ha) en 2000 et 1,53% (15716 ha) en 2007. Il est ainsi constaté une accélération de l'évolution de certains espaces végétaux vers des sols nus de 1980 à 2009. A cet effet, le phénomène est remarquable au niveau des espaces à pente forte. Ainsi, de 1985 à 2000, les superficies des terres nues sur pente forte sont multipliées par 5. De 1985 à 2007, elles sont multipliées par 6. Cette évolution des surfaces dénudées est une caractéristique importante de la dynamique actuelle du paysage. Cela, d'autant plus qu'au niveau des saisons agricoles, les mois de mars sont plus humides et représentent généralement le maximum de la croissance végétale saisonnière. Mais, il est constaté au niveau de l'occupation du sol à ces trois dates, que le mois d'avril 1985 présente des terres plus couvertes par la végétation que les mois de mars 2000 et 2007. Cette situation ne peut être liée à des facteurs climatiques d'autant plus que ces trois dates présentent presque la même situation pluviométrique. Les cartes d'occupation du sol (figure 92, 93 et 94) permettent de localiser ce phénomène au sud du bassin (à l'Ouest d'Ezzhiliga) et au nord du bassin (espace à l'Ouest et au Sud-ouest de Tiflet). Ces espaces dénudés correspondent à la zone d'influence urbaine d'une part, et d'autre part aux espaces climatiques peu pluvieux du bassin. L'étude détaillée de la dégradation des sols fera l'objet du chapitre suivant.

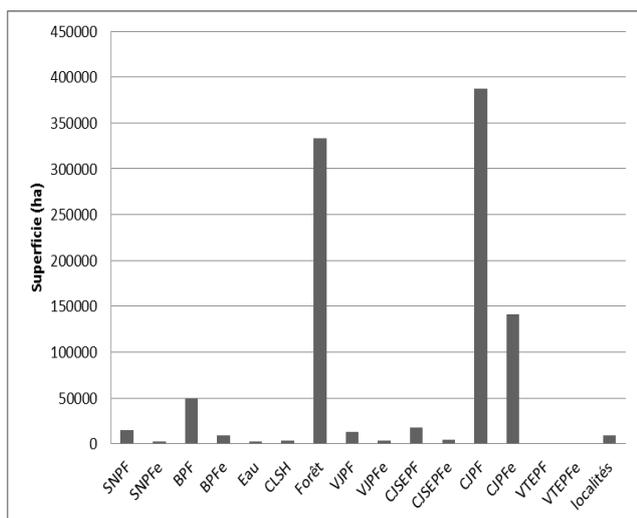
#### 3.3.2. Une réduction qualitative et quantitative des surfaces forestières

Les statistiques de la carte d'occupation du sol (figure 91) indiquent qu'en 1985, les formations forestières représentaient 33% (333126 ha) de la superficie du bassin. En 2000, la proportion des forêts était de 30% (295187 ha). En 2007, cette proportion n'est plus que de 27% (274509 ha), soit une réduction totale de 58617 ha. Entre 1985 et 2000, 42% des superficies forestières dégradées ou disparues se situent sur des pentes inférieures à 10% (pentes faibles). Entre 2000 et 2007, cette proportion d'espace forestière dégradé sur pente faible est réduite à 30%. Au contraire de cette évolution, les superficies forestières dégradées localisées sur de pentes fortes sont en nette progression. Entre 1985 et 2000, elles représentent 58% du total dégradé. La proportion est de 70% des superficies forestières dégradées entre 2000 et 2007. La répartition spatiale de la dynamique de régression des surfaces forestières fait ressortir deux causes principales de dégradation. En effet, dans la partie amont du bassin, à l'Est des forêts de chêne liège de la zone urbaine de Rabat-Salé, les espaces de déforestation correspondent aux aires d'extension urbaine. Les espaces à forte densité de réseau routier dans l'espace de la commune d'Ain El Aouda correspondent aux espaces forestiers disparus

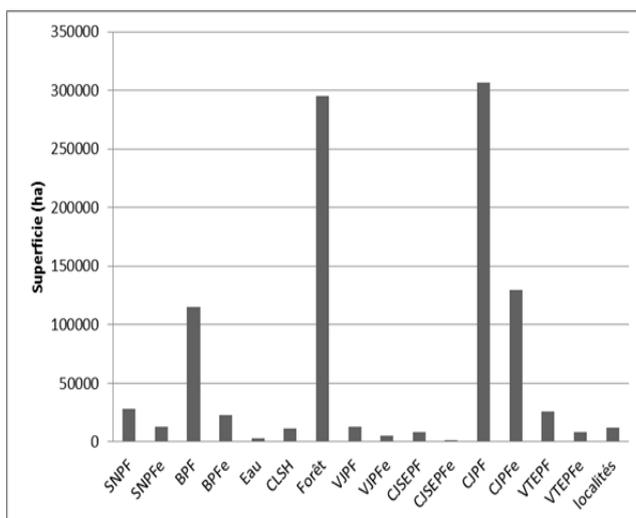
des zones topographiques à faible pente (figure 95 et 96). Il en est de même des espaces forestiers au Nord de Rommani. Pour connaître avec précision les aires d'influence des routes sur la dégradation de la couverture forestière, une analyse de proximité à travers des zones tampons est faite. Ainsi, il ressort que 28% des espaces forestiers dégradés ou disparus sont situés à une distance comprise entre 0 et 1 km des routes. Entre 1 et 3 km, la proportion dégradée est de 35%. De 3 à 4 km, cette proportion baisse à 14%, l'effet des routes s'estompant petit à petit. La route facilite dans ce bassin, les excès de prélèvement de bois. La dégradation des forêts sur pente forte, en plus de la pression anthropique visible à travers le réseau de route, est due aux activités agricoles et pastorales (la dynamique des espaces agricoles sera détaillée dans le point suivant de ce chapitre).

Au niveau pastoral, s'est opéré des transformations importantes dans la conduite du système. La gestion des parcours n'obéit plus aux rigueurs des lois coutumières, conduisant ainsi à des gestions individuelles de l'espace. Cette faiblesse accrue des lois coutumières est à l'origine de surpâturage et donc de dégradation de la couverture végétale et du sol. Le système de production agricole, à travers la mise en culture des terres de parcours collectifs, accentue la pression du cheptel sur les parcours permanents que sont les formations forestières (figure 97) (Abaab, 1995 ; Bourbouze, 2000 ; Benbrahim, 2004). La figure 98 représentant la densité du cheptel (addition des effectifs bovins, ovins et caprins dans le cas présent) dans le bassin versant du Bouregreg permet d'observer que, dans l'ensemble, les espaces de forte densité du cheptel coïncident avec la répartition spatiale des formations forestières du bassin. Faute d'un nouveau recensement de l'agriculture, les statistiques de 1996 restent la référence. La carte de densité du cheptel de 2005 est une estimation, et elle sous-estime la pression pastorale réelle. Toutefois, elle reste expressive au niveau de la répartition spatiale du cheptel. Ainsi en 1996, la zone forestière concentre plus de 100 têtes d'animaux par km<sup>2</sup>. Les densités les plus importantes (150 à 500 têtes par km<sup>2</sup>) sont localisées au sud (la bande d'Ezzhiliga à Boukhrisse) et à l'aval du bassin (la périphérie de la métropole de Rabat-Salé). En 2005, la répartition spatiale des densités animales reste presque la même qu'en 1996, mais avec des pressions moins importantes (l'espace de faible densité au Nord de Maaziz (commune de Ait Ouribel) est dû à une absence de données). Les plus faibles densités animales (inférieur à 50 têtes par km<sup>2</sup>) sont observées dans les espaces urbains et dans les espaces de production agricole au centre et à l'aval du bassin.

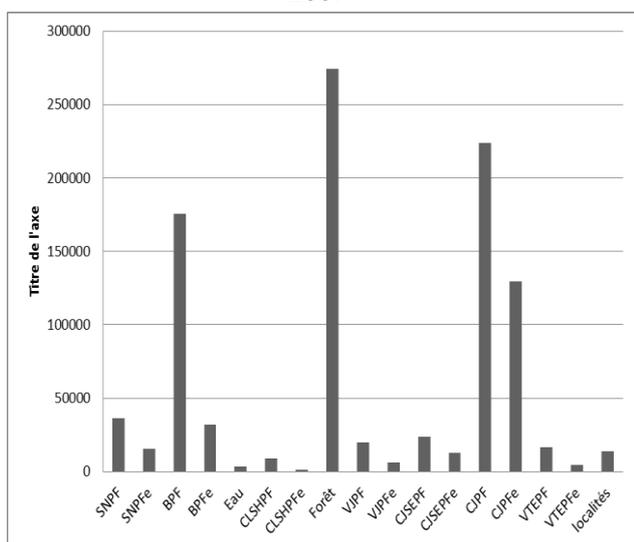
1985



2000



2007

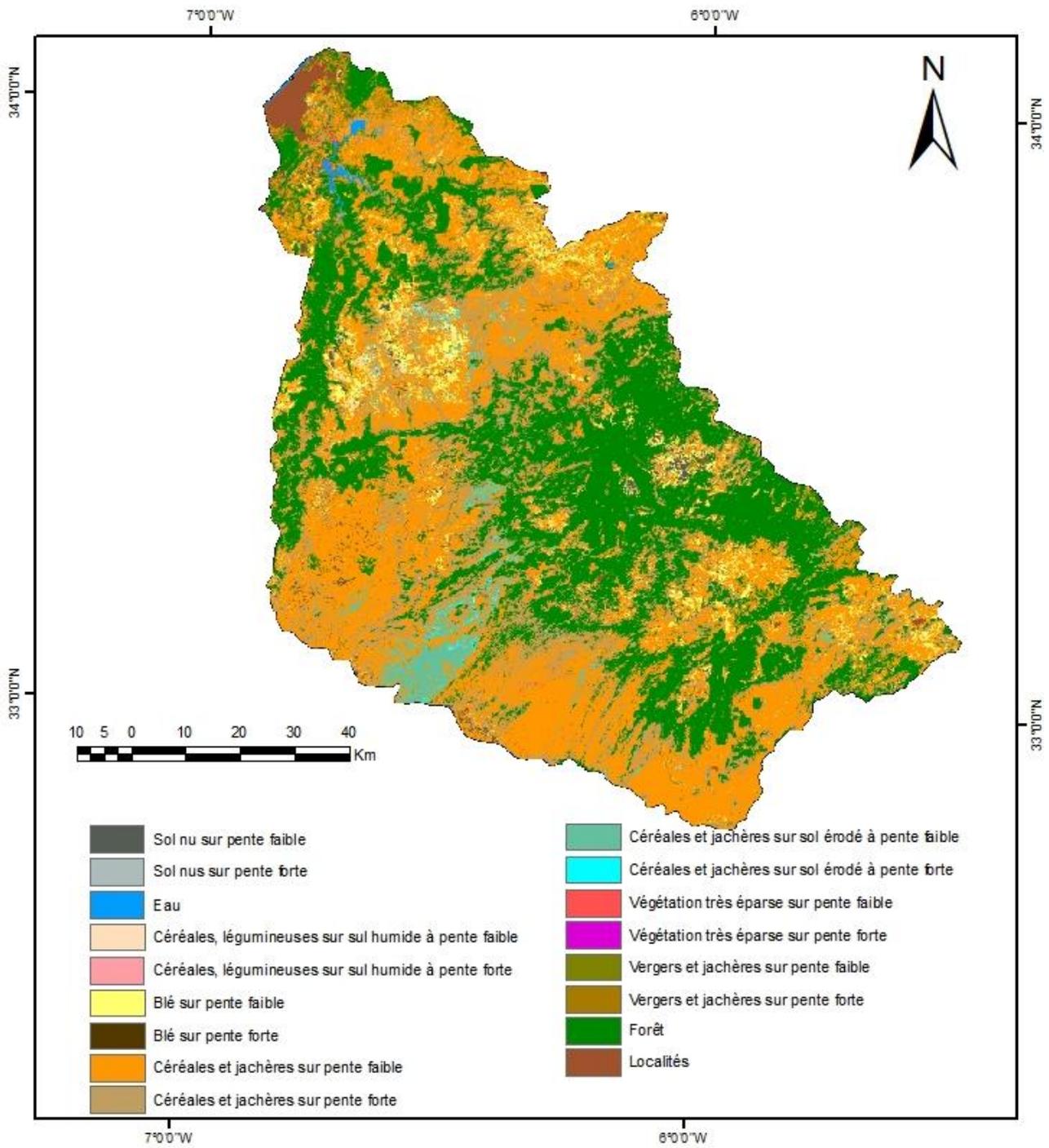


Légende

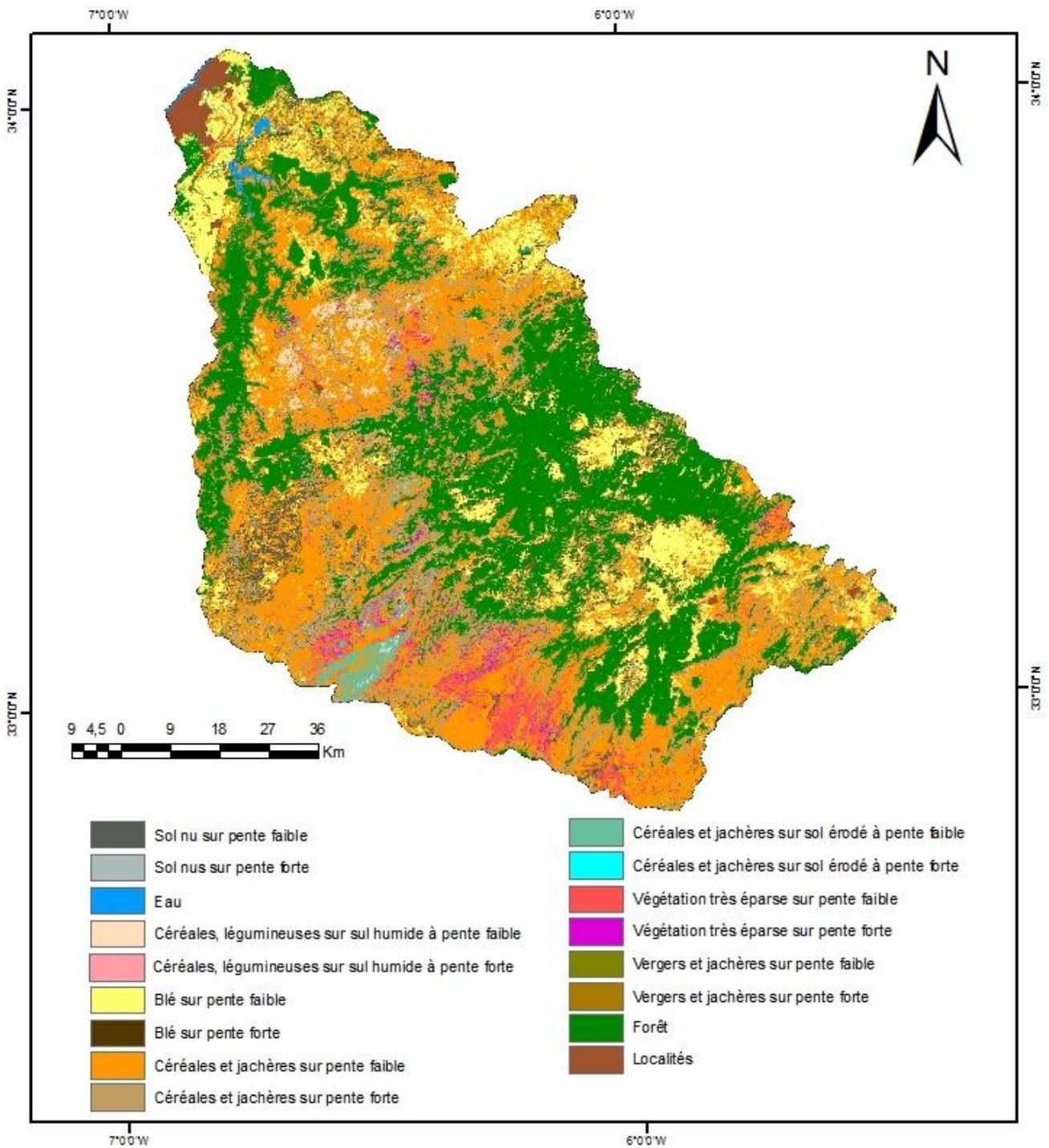
- SNPF** : Sol nu sur pente faible
- SNPFfe** : Sol nu sur pente forte
- BPF** : Blé sur pente faible
- BPFfe** : Blé sur pente forte
- CLSHPF** : Céréales et légumineuses sur pente faible
- CLSHPFfe** : céréales et légumineuses sur pente forte
- VJPF** : vergers et jachères sur pente faible
- VJPFfe** : vergers et jachères sur pente forte
- CJSEPF** : Céréales et jachères sur sol érodé à pente faible
- CJSEPFfe** : Céréales et jachères sur sol érodé à pente forte
- CJPF** : Céréales et jachères sur pente faible
- CJPFfe** : céréales et jachères sur pente forte
- VTEPF** : Végétation très épars sur pente faible
- VTEPFfe** : Végétation très épars sur pente forte

	Superficie des forêts (ha)	% par rapport à la superficie du bassin	Proportion réduite localisée sur pente faible	Proportion réduite localisée sur pente forte
1985	333126	33,45	42,36	57,64
2000	295187	29,58		
2007	274509	27,49	30,39	69,61

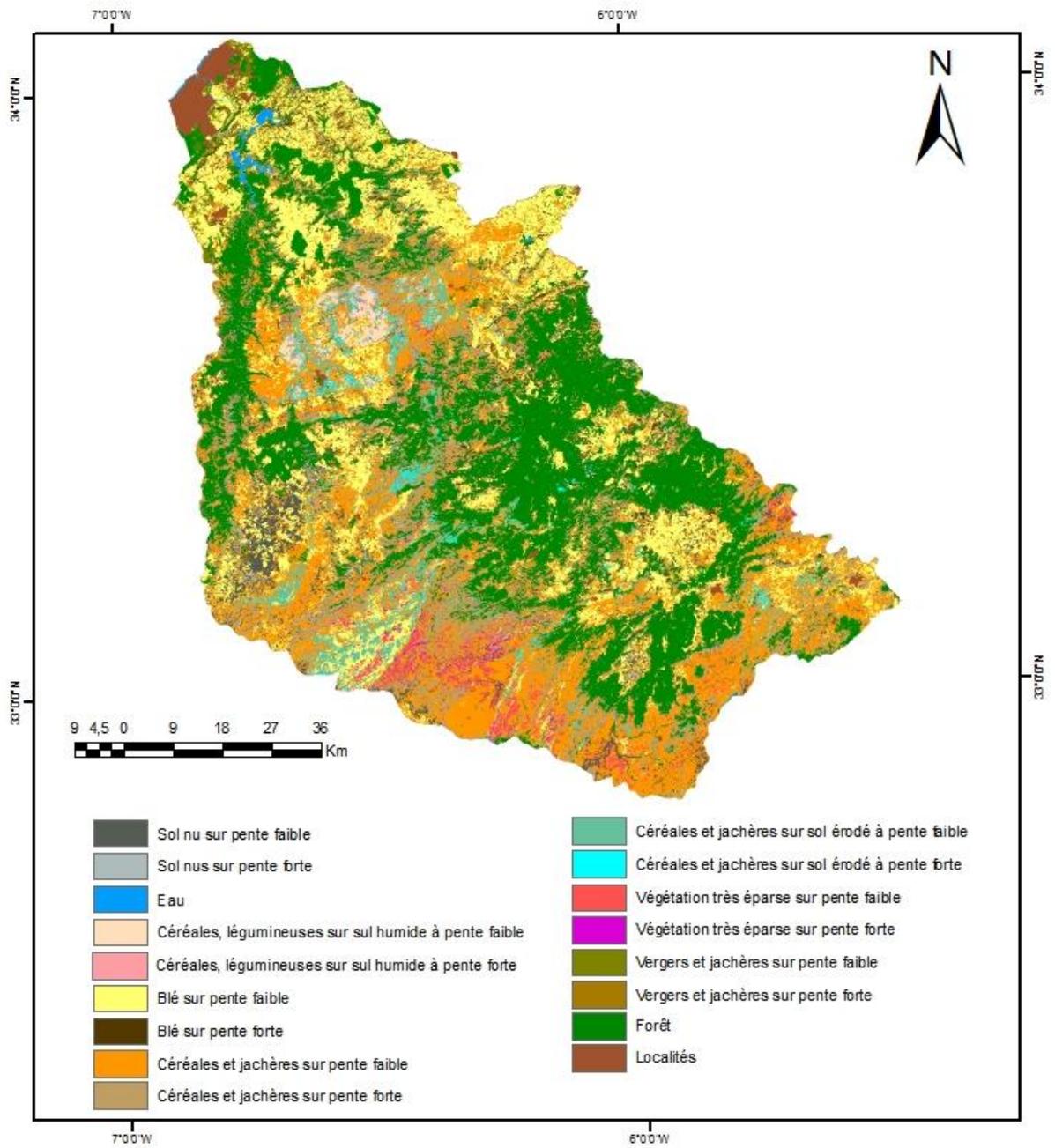
Fig. 91: Graphique de l'évolution des types d'occupation du sol aux dates de 1985, 2000 et 2010



**Fig. 92:** Carte d'occupation du sol en 1985



**Fig. 93:** Carte d'occupation du sol en 2000



**Fig. 94:** Carte d'occupation du sol en 2010

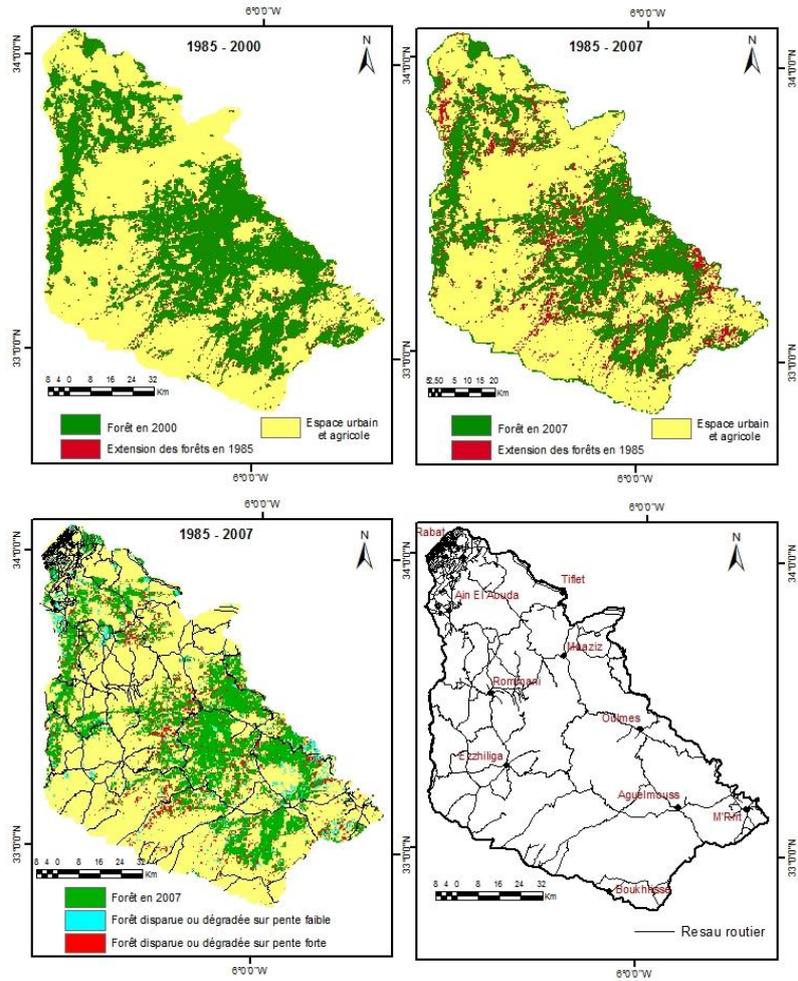


Fig. 95: Carte de l'impact du réseau de route sur la disparition des forêts

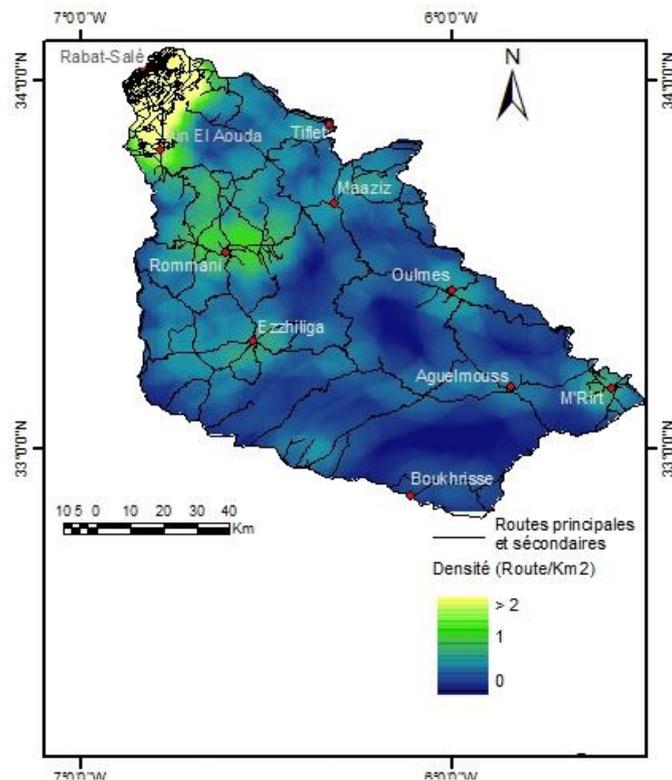
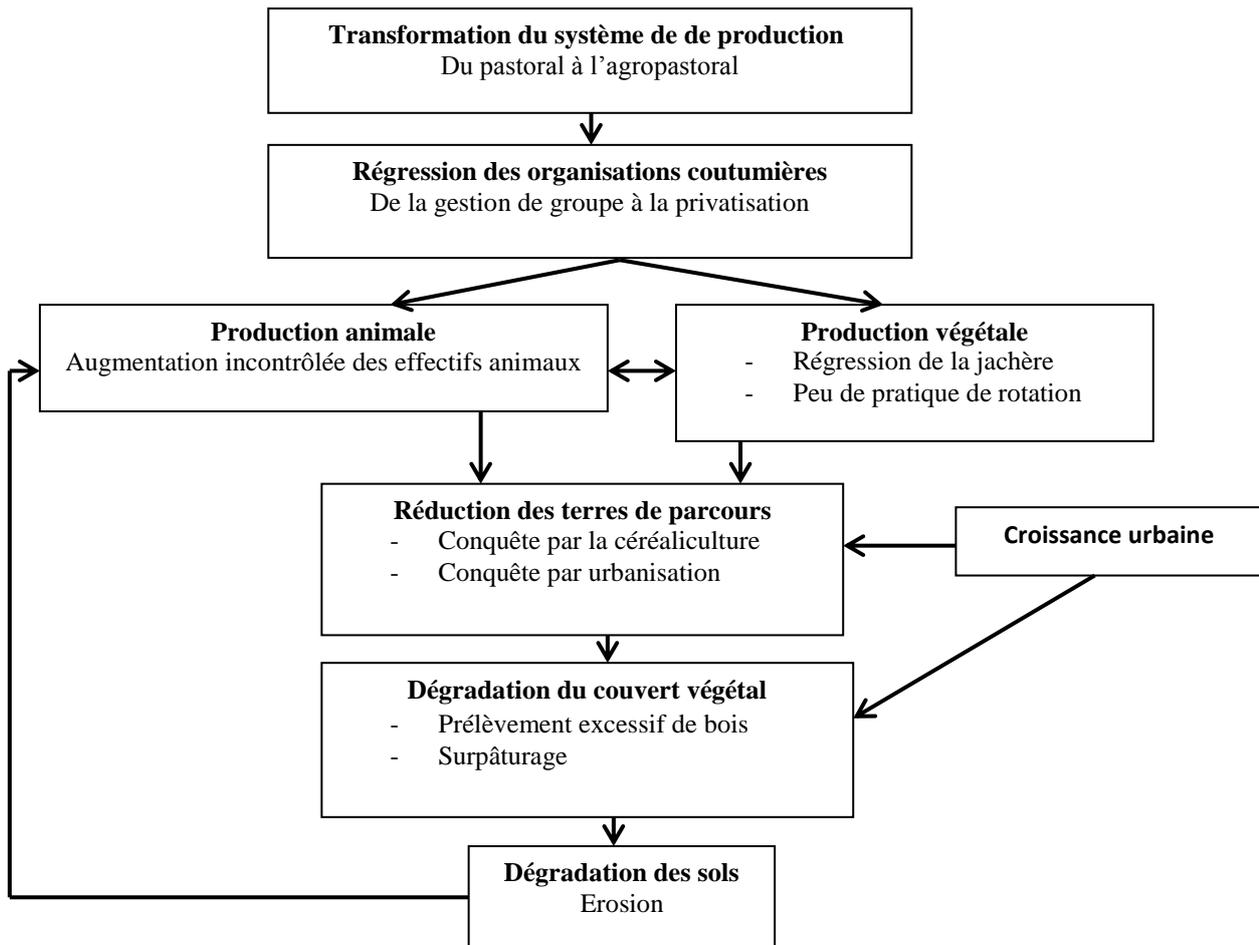


Fig. 96: carte de densité de route dans le bassin versant du Bouregreg



**Fig. 97** : Schéma des facteurs contribuant à la transformation du paysage végétal

L'analyse détaillée de la répartition de la densité du cheptel par type animal (figure 98) indique que les fortes densités de cheptel observées à l'aval du bassin, dans les espaces topographiques de basse altitude (plaines et bas plateaux) sont dues au cheptel bovin (figure 99). Ces derniers sont en partie responsables des évolutions à la baisse constatée de l'activité végétale des forêts de chêne lièges. Tout comme ailleurs dans le bassin, ce cheptel constitue une menace pour le capital régénératoire des forêts. Les fortes densités de cheptel constatées dans la partie Sud du bassin (partie amont constituée de hauts plateaux) sont le fait de petits ruminants (ovins et caprins). La densité d'ovin reste importante sur tout le bassin en 1996 tout comme en 2005. De façon générale, elle est de 50 à 100 têtes par km<sup>2</sup>. Bien que la densité de caprin semble faible dans l'ensemble (inférieure à 30 têtes par km<sup>2</sup>, la localisation de ces fortes densités pose problème. En effet, ces animaux qui sont rustiques occupent majoritairement les plus importantes réserves forestières de chêne du bassin (amont du bassin). Ce qui accentue la dégradation de ces forêts (figure 100 et 101).

Les résidus de culture et le pâturage constitué par les jachères s'épuisent plus vite sous l'action de pressions animales plus grandes en été, il apparaît de selon toute logique que la baisse importante de l'activité végétale constatée pendant cette période par l'analyse des images de NDVI (NOAA et MODIS), est due aux prélèvements excessifs réalisés par le cheptel sur le capital forestier. L'analyse des cartes d'occupation du sol fait ressortir, en plus de la réduction importante du couvert forestier, une augmentation de la végétation très éparse

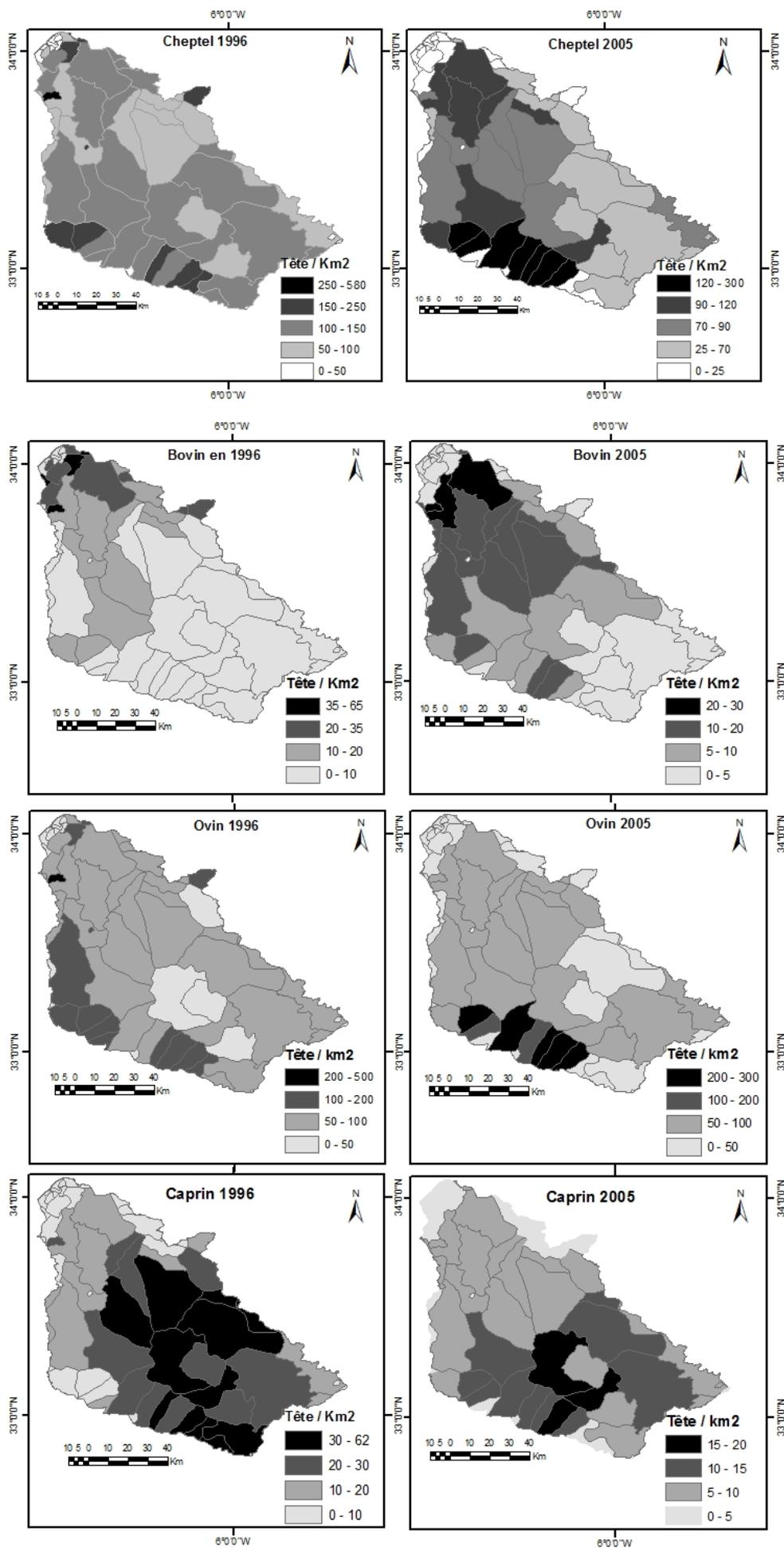


Fig. 98 : Densité de cheptel dans le bassin versant du Bouregreg



**Fig. 99 :** Pâturage de bovin sous chêne liège à la périphérie de Rabat



**Fig. 100:** Chèvres (arrière-plan) dans un parcours forestier sur pente accidenté. au premier plan (à gauche) apparaît une rigole



**Fig. 101:** Troupeau de chèvres autour d'un point d'Eau, à l'arrière-plan l'espace forestier de pâturage

### 3.3.3. Une augmentation des superficies céréalières

L'évolution à la baisse des surfaces forestières se traduit par une augmentation de celles de céréales. Partant de la reconnaissance sur les images de Landsat de 1985, 2000 et 2007 de certaines surfaces occupées essentiellement par du blé, il apparaît qu'en 1985, ce type d'occupation du sol représente 6% (58681 ha) de la superficie du bassin. En 2000, ces cultures de blé occupent 14% (137499 ha) de l'espace. En 2007, la proportion est de 21% (207708 ha). Au niveau topographique, en 1985, c'est 1% de la superficie du bassin occupée par du blé qui se localise sur des pentes fortes. En 2000, le blé sur pente forte occupe 2% de la superficie du bassin. En 2007, la proportion est de 3%. Il apparaît ainsi, qu'en plus de l'augmentation des surfaces occupées par du blé, la tendance à la mise en culture des pentes fortes est de plus en plus élevée. La proportion réelle d'espace occupée par la culture du blé est plus importante en tenant compte des espaces laissés en jachère et des espaces où la signature spectrale de la culture se confond à celles d'autres céréales ou légumineuses. En 1985, l'ensemble des céréales représentait 62% (614230 ha) de l'espace du bassin. En 2000, les céréales occupent 63% (628580 ha) du bassin. En 2007, cette proportion reste toujours à 63% (629281 ha). Ce taux d'occupation du sol par les céréales reste très proche de celles de statistiques officiels sur le bassin. L'analyse topographique de l'occupation du sol par les céréales indique que tout comme la culture du blé, des espaces à forte pente sont de plus en plus conquis pour être cultivés. En 1985, ce sont 155790 (16% du bassin) hectares de surface céréalière qui sont localisés sur des pentes fortes. La proportion est de 18% (179491 ha) en 2000 et de 20% (202226 ha) en 2007.

L'analyse statistique de l'évolution des superficies, des productions et des rendements de céréale permet de confirmer certaines tendances de changement de l'occupation du sol observées dans le bassin. La figure 102 représente cette dynamique pour deux provinces caractéristiques du bassin : la province de Khémisset représentant l'espace de plus grande production céréalière du bassin (partie centre du bassin), et la province de Khouribga (Sud-Est du bassin) moins humide et de faible production céréalière comparativement aux autres provinces de ce bassin. Ainsi, est-il constaté que les rendements sur la période de 1981-82 à 2009-10 (29 saisons agricoles) n'ont pas évolué significativement. Les pentes d'évolution, lorsqu'elles sont positives (cas de l'orge et du blé dur à Khouringa, du blé tendre dans toutes les localités) sont inférieures à 1%, soit une dynamique quasi constante. Par contre, au niveau de l'évolution des superficies, constat est fait que les superficies de blé tendre ont considérablement augmentées pendant cette période. La pente d'évolution est de 200% à khémisset et de 96% à Khouribga. Cette dynamique contraste avec l'évolution des superficies de blé dur qui ont considérablement baissé : -200% à khémisset et -78% à Khouribga. Les superficies occupées par l'orge, quant à elles connaissent une hausse notable à khouribga (121%) contrairement à Khémisset où elles évoluent à la baisse (-79%). Il ressort de ces évolutions que :

- La culture du blé dur connaît un déclin. Cette culture est généralement destinée à l'autoconsommation des familles ;
- La culture de blé tendre, principalement destinée à la commercialisation, connaît une hausse importante de surface emblavée. Son importance au niveau de l'occupation du sol est de plus en plus grande dans les espaces les plus humides du bassin. Cela confirme la dynamique observée au niveau de la carte d'occupation du sol ;
- La culture d'orge connaît un déclin dans les espaces humides du bassin, au contraire des régions moins humides comme le sud du bassin. Cela se justifie par le fait que la partie sud du bassin est la région de plus grande production pastorale du bassin. La

culture de l'orge étant dans la plupart des cas utilisée comme complément alimentaire pour le cheptel ;

Malgré une hausse importante des superficies (notamment de blé tendre) et les améliorations génétiques apportées aux différentes céréales par la recherche scientifique, les rendements sont restés constants car les sols se dégradent de plus en plus. Les importantes productions céréalières ne sont maintenues qu'au prix de conquête sur de nouveaux espaces de culture, notamment les terrains à pente forte. Cette céréaliculture sur pente forte est souvent réalisée par des paysans sans terre, notamment dans le centre du bassin. Cette évolution grandissante de la mise en culture des terrains à forte déclivité explique le fait qu'au niveau des cartes d'occupation du sol de 1985, 2000 et 2007, les proportions des sols dénudés ainsi que des cultures céréalières sur pente forte soient de plus en plus grandes.

#### ***4. La dégradation des sols : une résultante de la combinaison des facteurs climatiques et anthropiques***

##### **4.1. Des sols fragiles**

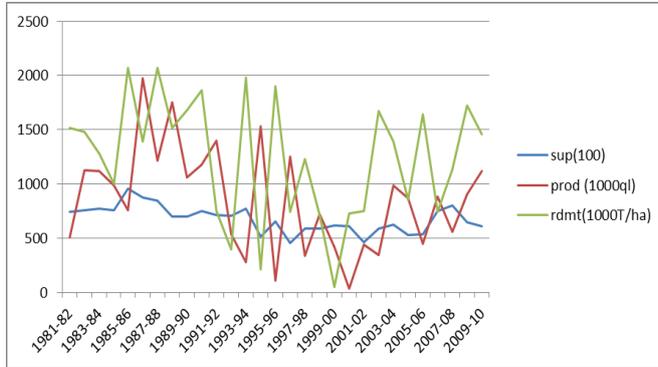
Roose (2010) résume la dégradation des terres dans les zones semi arides comme la dégradation de la structure et de la macro porosité sur place. Cette dégradation se manifeste en :

- 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 squelettisation 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 103 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.

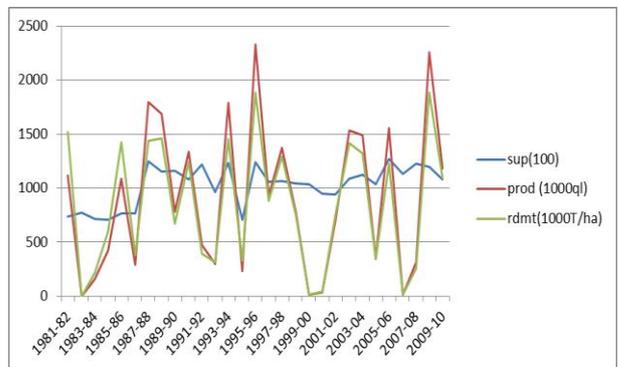
Les sols du bassin versant du Bouregreg sont constitués principalement de : sols rouges et bruns méditerranéens, de vertisols (ou tirs), de sols hydromorphes minéraux, de lithosols et de régosols. Les sols rouges et bruns méditerranéens sont typiques des zones forestières et présentent un horizon organique 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 minéraux 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 marquée 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 attaqués par l'érosion hydrique (Billiaux et Bryssine, 1967).

### Khémisset

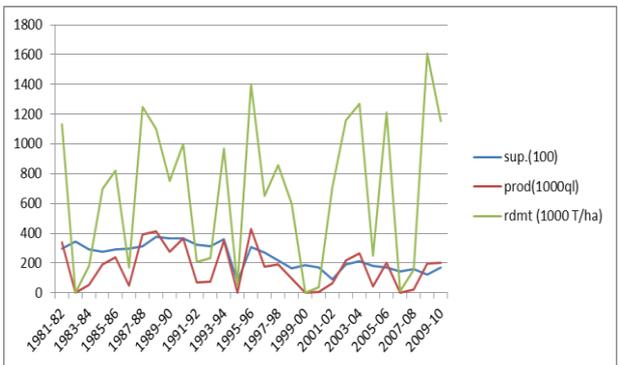
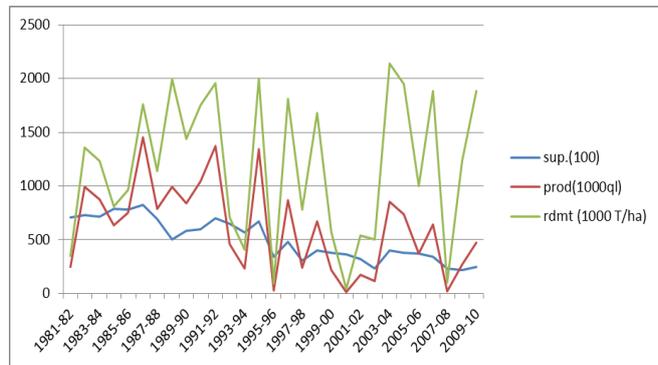


### Khouribga

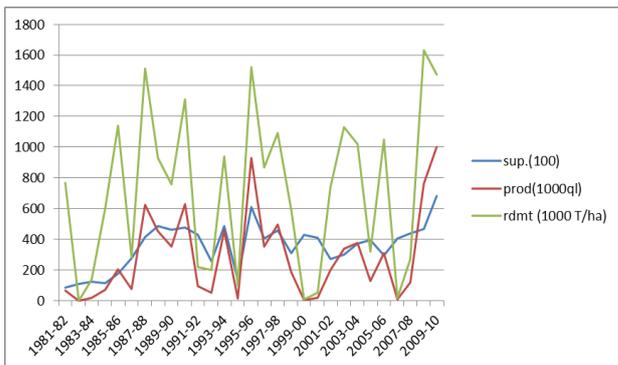
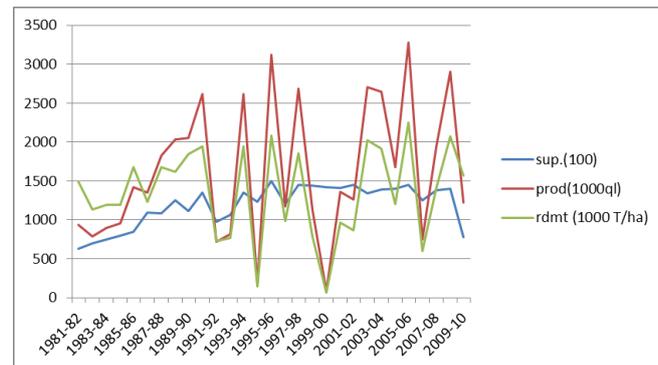
Orge



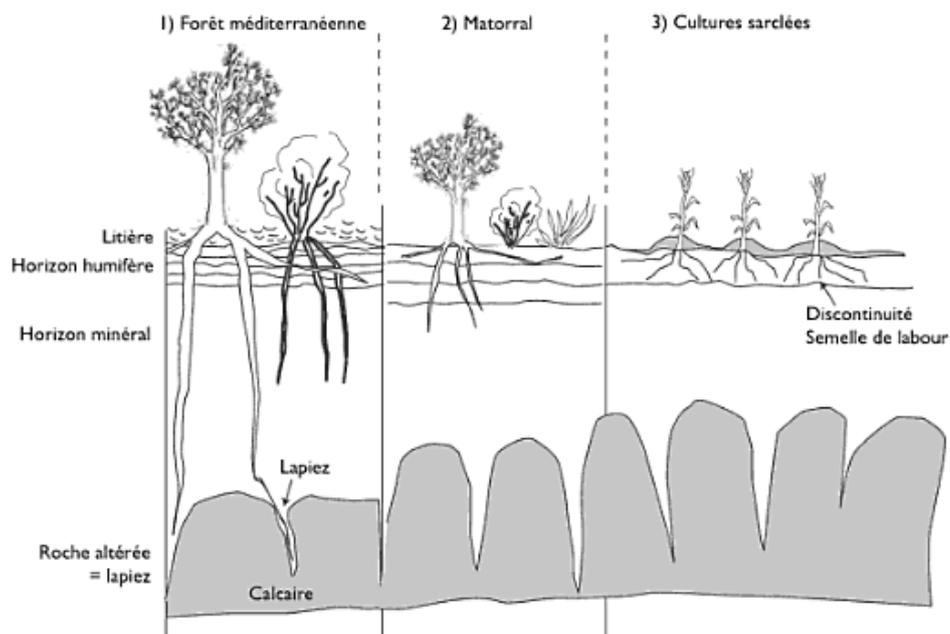
Blé dur



Blé tendre



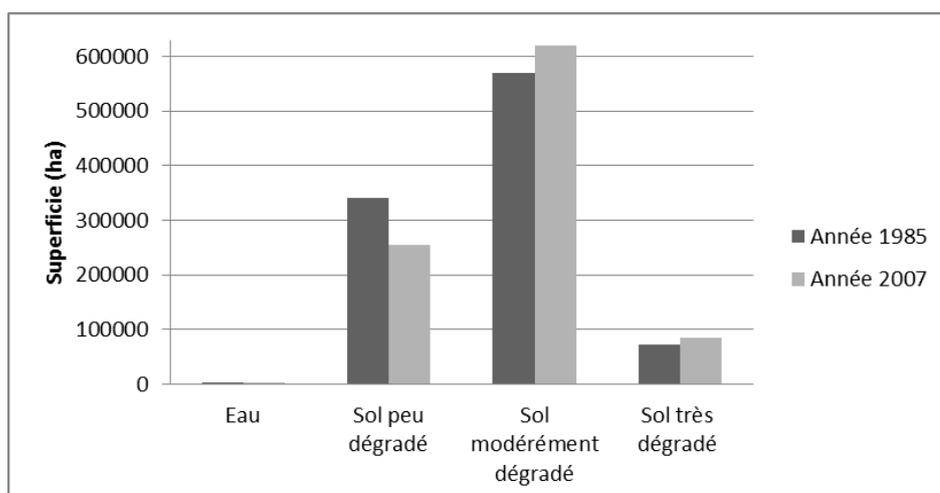
**Fig. 102:** Evolution des superficies et des productions dans les provinces de Khémisset (centre du bassin) et de Khouribga (Sud du bassin)



**Fig. 103:** 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) entament des sols fragiles (Roose, 2010)

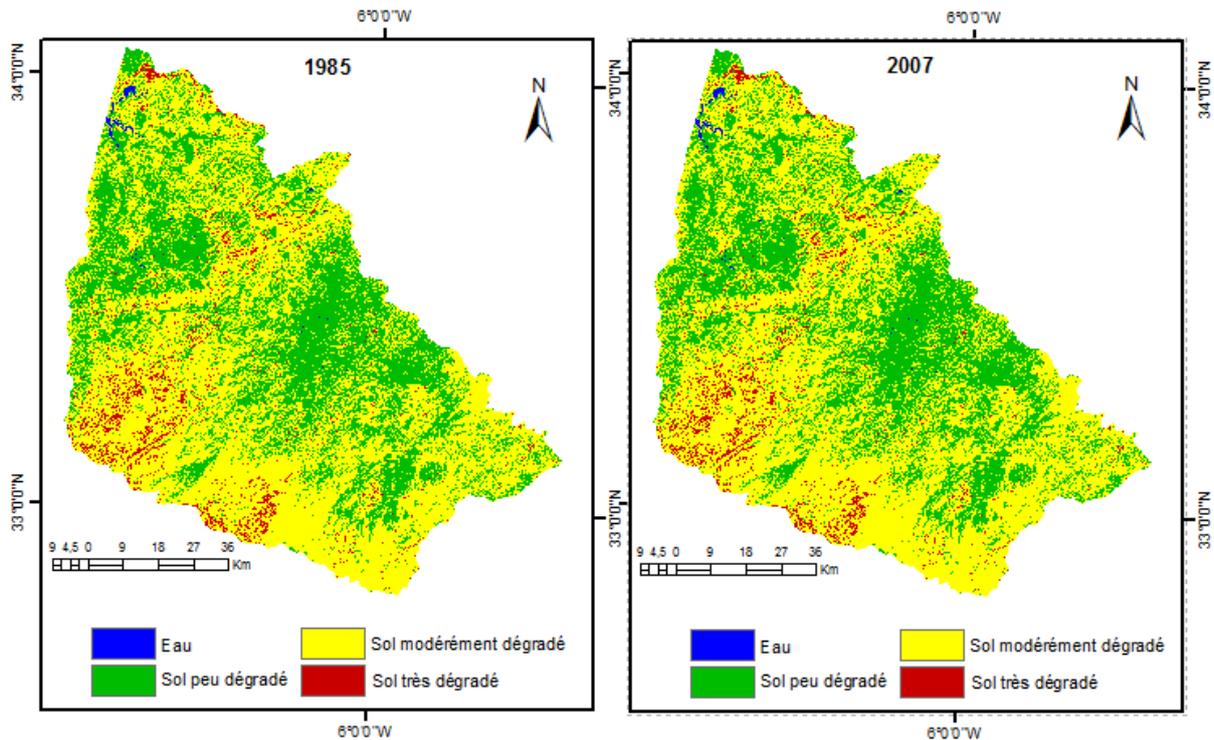
#### 4.2. Un bassin marqué par d'importantes dégradations des sols de 1980 à 2009

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 104 et 105). En 1985, les sols peu dégradés représentent 35% du bassin (341 803 ha) contre 26% en 2007 (253 848 ha). Cette regression 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% (72 975 ha) du bassin en 1985 contre 9% (85 189 ha) en 2007.



**Fig. 104:** 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.

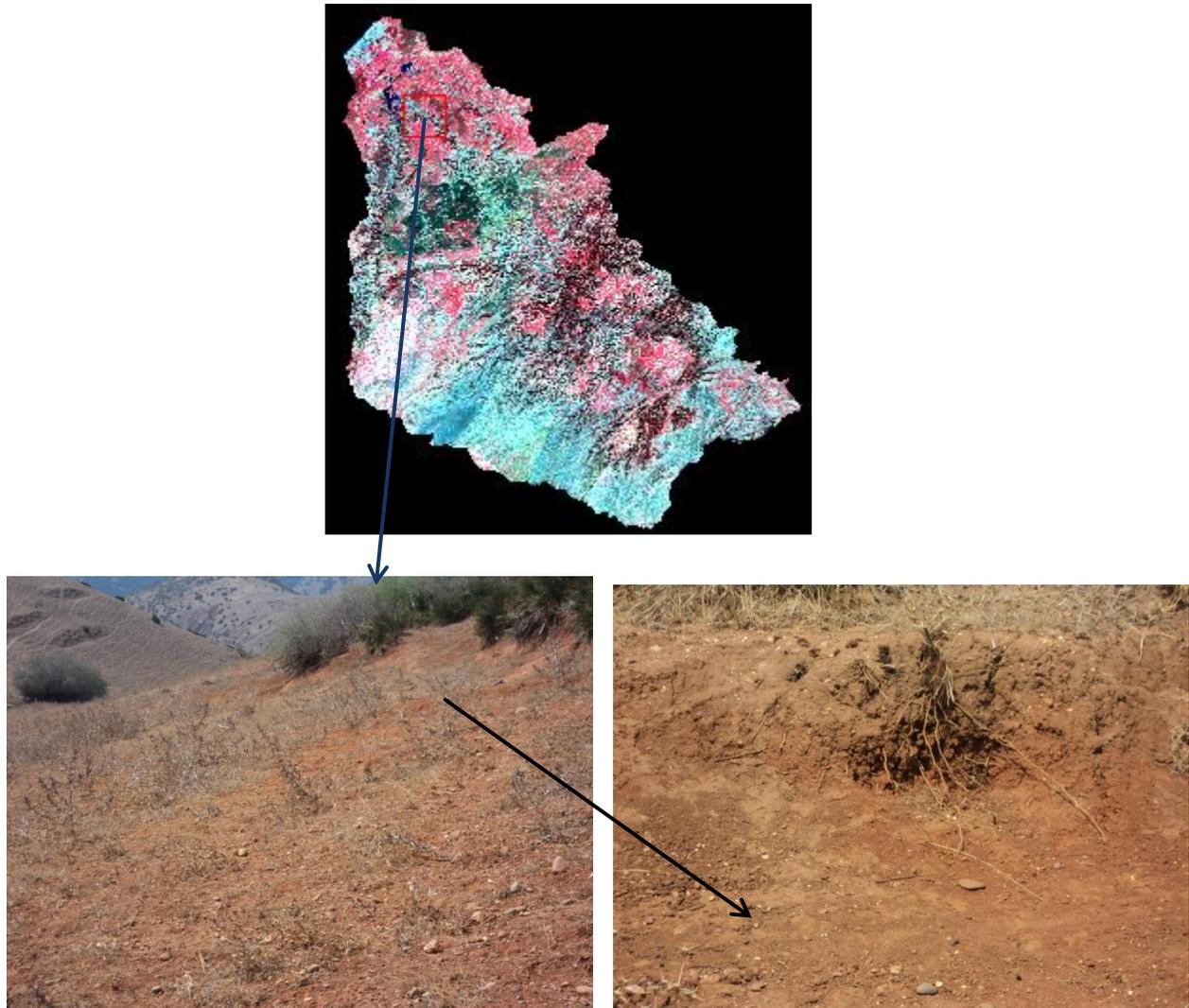


**Fig. 105:** Evolution de la dégradation des sols dans le bassin versant du Bouregreg

En association avec les types de sol, la dégradation peut être classée en plusieurs catégories expliquant d'ailleurs leurs origines :

- 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 106 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 (figure 107). 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.



**Fig. 106:** Espace agricole céréalier marqué par l'érosion en nappe (photo de gauche), sur le 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 108). 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 109). 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 110). 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 (Beaudet 1967).



**Fig. 107:** Matorral servant de parcours pour le bovin (aval du bassin). Au premier plan, la surface est entamée par l'érosion hydrique suite aux activités pastorales. Au second plan un troupeau de bovin



**Fig. 108:** Espace agricole sur pente forte marqué par des griffures importantes, dans le coin supérieur droit se trouve un semi de blé menacé



**Fig. 109:** Ravine à l'intérieur d'une forêt dégradé au centre du bassin (zone de pâturage)



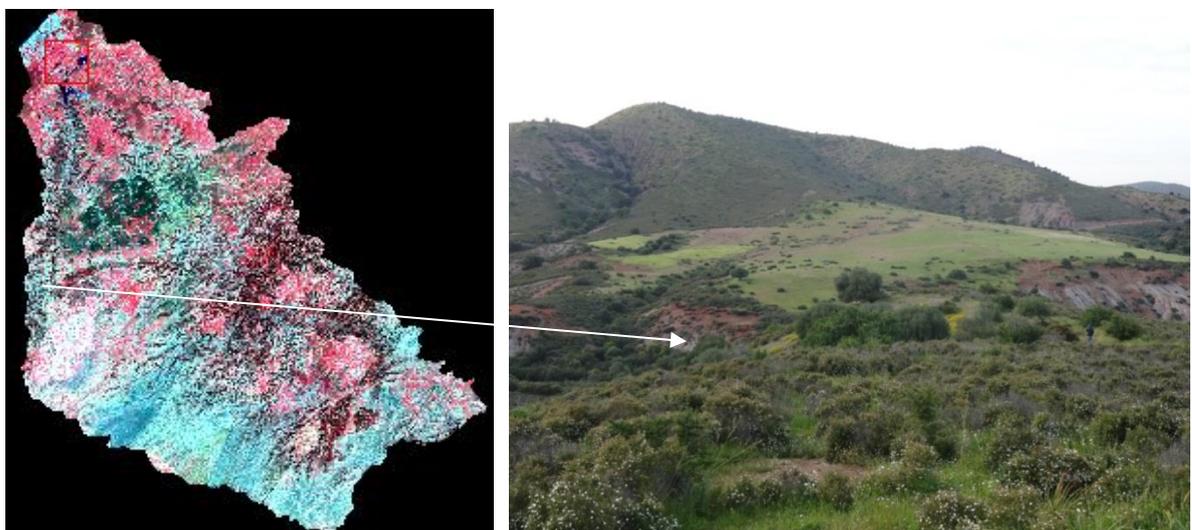
**Fig. 110:** La photo de gauche présente en lignes horizontales les terrassettes formées par le passage des petits ruminants. A droite de la photo du bas, une partie de ces terrassettes s'est transformée en ravine coupant les chemins des animaux

Ainsi la dégradation des sols bruns méditerranéens des zones forestières laisse souvent apparaître la roche mère sous-jacente (figure 111).

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 14 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 112). 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 (figure 113)

- Les espaces peu dégradés sont d'une part, les espaces dont la biomasses 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 114).



**Fig. 111:** 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)



**Fig. 112:** Exemple d'espace hydromorphe où la végétation saisonnièrement asphyxiée a disparue

**Tableau 14:** 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



**Fig. 113:** Erosion de berge, en bas à gauche l'effondrement d'une digue de protection



**Fig. 114:** Culture de fève sur sol équilibré. On observe une absence de d'érosion linéaire malgré la topographie accidentée

#### **4.3. L'aval du bassin versant du bouregreg, une exemple des pressions anthropiques et climatiques**

La carte d'occupation du sol de l'aval du bassin versant du Bouregreg (figure 115) 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 herbacé 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 (figure (114) (Laouina, 2010) s'installe dans le bassin.

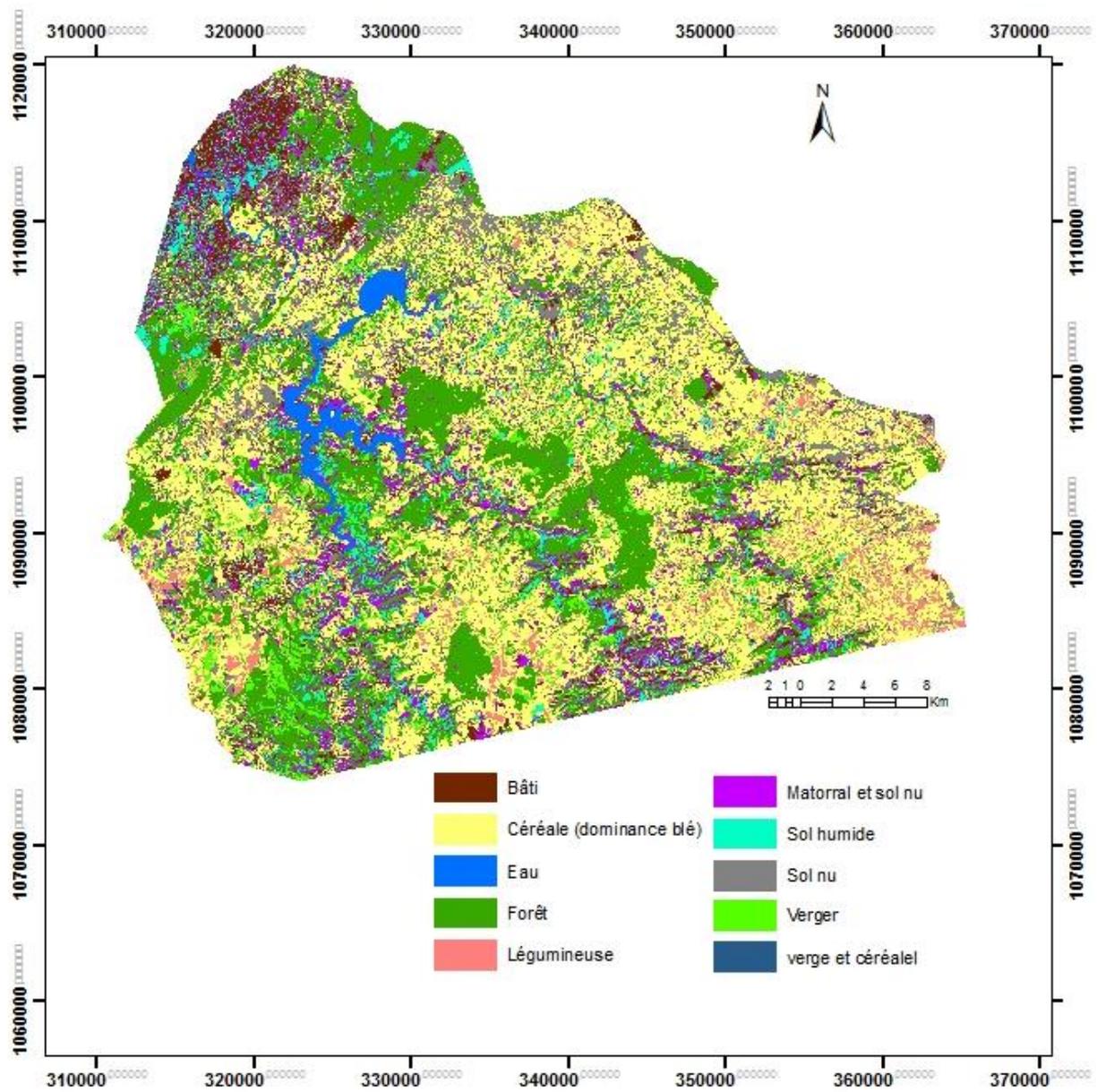


Fig. 115: Carte d'occupation du sol de l'aval du bassin versant du Bouregreg en avril 2008 (SPOT 5)

## Conclusion

L'analyse de la dynamique des précipitations de 1980 à 2009 fait ressortir une baisse marquée de quantités pluviométriques annuelles dans les parties les plus humides du bassin, notamment le Nord-Est. Bien qu'aucune rupture ne soit détectable dans les séries pluviométriques annuelles, les variations des quantités d'une année à l'autre restent importantes. Les coefficients de variation sont dans l'ensemble supérieurs à 30%, ce qui équivaut en moyenne à des écarts de plus de 120 mm d'une année à l'autre. Au niveau mensuel, le mois de décembre est le plus humide de l'année, contrairement au mois de juillet qui demeure le plus sec. Tout comme au niveau annuel, les variations mensuelles d'une année à l'autre sont considérables (plus de 60%). Deux types de variations sont observés. Les mois de février, mars, avril et mai connaissent des baisses significatives de quantité pluviométrique au contraire du mois de décembre. Le mois de novembre, particulièrement important matière pour l'agriculture céréalière (semi des céréales) connaît aussi d'importantes variations pluviométriques dans le sens de la baisse. L'analyse de l'humidité du sol favorable au développement des cultures (surtout des cultures annuelles) fait apparaître une baisse en début et fin de saisons humides. Les mois du milieu de la saison humide sont aussi caractérisés par des fréquences importantes de stress hydrique. L'analyse de la sécheresse agricole, dans le but de cerner l'impact de ces variations climatiques sur les productions agricoles, révèle que les sécheresses sont devenues plus importantes en nombre depuis le début 1990. Plus de 90% des sécheresses agricoles constatées, pour les cultures de blé et d'orge pendant la période de 1980 à 2009, se situent après 1990. Les performances agricoles réalisées sur cette période dans le bassin le sont beaucoup plus par le fait des améliorations des cultivars et des conquêtes de nouvelles terres sur les zones forestières et les parcours. D'ailleurs, l'étude de la corrélation par régression linéaire entre dynamique du climat et celle de la végétation indique l'existence de corrélation importante pendant les mois humides entre production végétale annuelle et pluviométrie. Les récoltes annuelles de céréale sont fortement influencées par les ruptures de précipitation pendant les phases de semi, de croissance et de maturation. La couverture végétale, fragilisée par les variations à la baisse de la pluviométrie, est l'objet de pressions démographiques et agropastorales qui accélèrent sa dégradation et celle des sols. Au niveau démographique, les pressions sont dues à la croissance urbaine à l'amont du bassin et aux densités rurales importantes. Les taux d'accroissement moyen annuels de la population demeurent très élevés à l'amont du bassin, généralement supérieur à 4,5%. L'évolution démographique récente dans les espaces ruraux de ce bassin est marquée par une augmentation de la dispersion de l'habitat rural, ce qui transforme le paysage mais surtout constitue des points de départ de dégradation du milieu physique. Les activités agricoles sont souvent pratiquées sur des pentes fortes, conduisant de fait à des pertes énormes du sol. Ainsi, une des mutations majeures du paysage du bassin est l'augmentation des surfaces dénudées de 1985 à 2007. En plus de la pression liée à la dynamique de la population humaine, les pressions animales sur le bassin restent très importantes. Les espaces de l'aval et du Sud de l'amont du bassin connaissent des densités de plus de 100 têtes d'animaux par km<sup>2</sup>. Cela soulève la question de la gestion et de la conduite des troupeaux en matière alimentaire. Aussi, les parcours forestiers font-ils objet de pressions pastorales de plus en plus grandes, ce qui impacte sur la qualité et la quantité de la biomasse végétale. Face à ces transformations continuent, il est important d'aborder la question des risques futures sur le milieu, la question du devenir de ce bassin versant.

## **Chapitre IV : Risques et scénarios futurs de dégradation du bassin versant du Bouregreg, horizon 2050 et 2100**

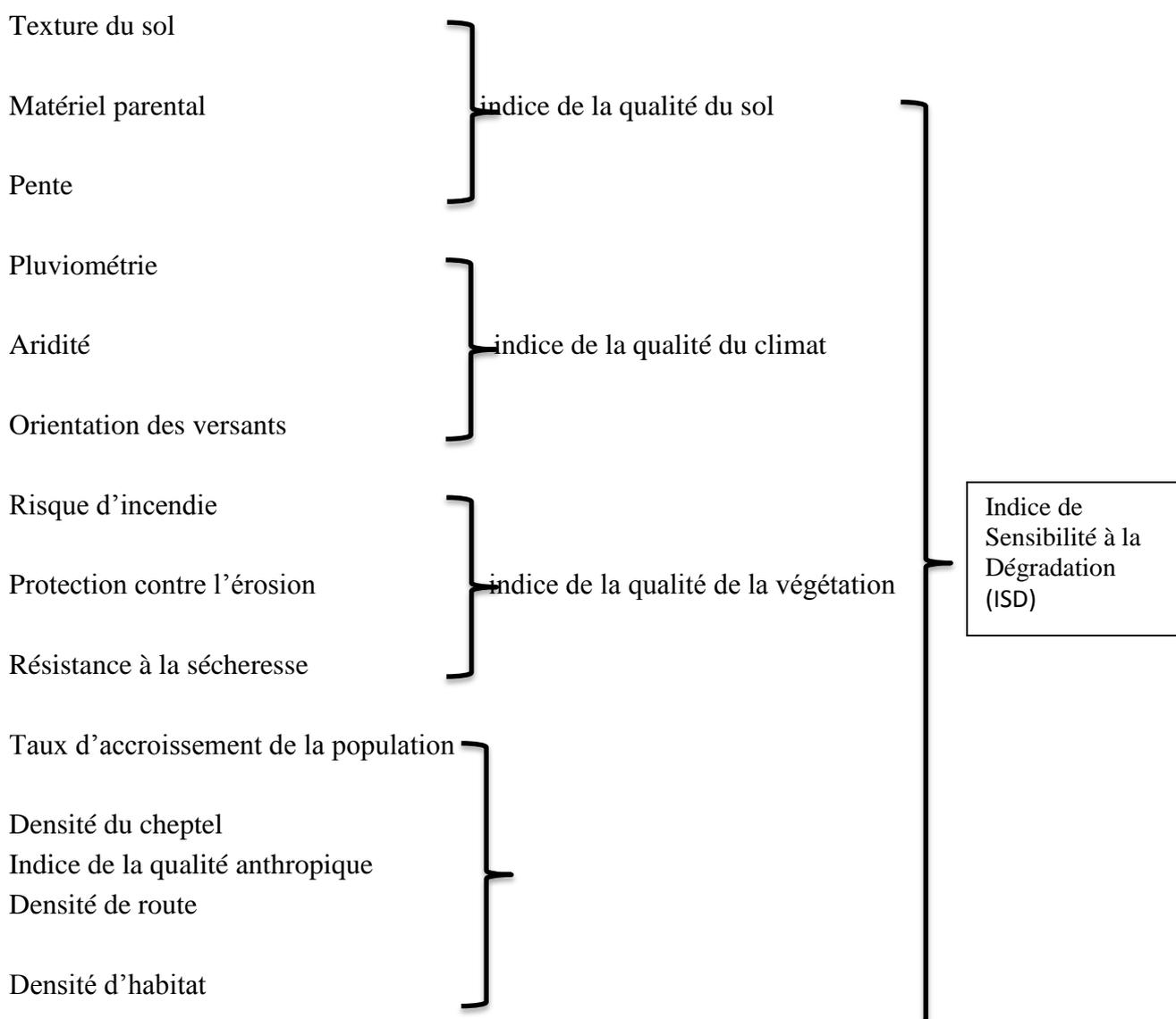
### **Introduction**

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 dégradation des terres à 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) (figure 115).



**Fig. 116:** Paramètres utilisés pour caractériser et cartographier la sensibilité à la dégradation

Chacun des indices est constitué d'un certain nombre de paramètre aux quels 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 :

$$IQS = (MP \times P \times T)^{1/3}$$

où :

*MP* = matériel parental

*P* = indice de pente

*T* = indice de texture

Les classes correspondant aux différents matériaux parentaux sont constituées à partir de la carte géologique du bassin. Le degré d'influence de chaque matériau dans la qualité de la couverture pédologique est obtenu en se basant sur leur cohérence. Quatre classes sont ainsi constituées. Il s'agit des classes de roches cohérentes (calcaire lacuste, calcaire dolomitique), moyennement cohérente (marno-calcaire, schiste, grès, encroutement) et tendre (argile et dépôts superficiels (El Bouqdaoui, 2007 ; Kosmas et al. 1999). Leurs indices respectifs sont : 1, 1,33 et 2.

Les pentes sont extraites du MNT du bassin. Les classes de pente constituées sont : très faible pente (0 à 5%, indice 1), pente modérée (5 à 15%, indice 1,33), pente forte (15 à 25%, indice 1,66) et pente très forte (> 25%, indice 2).

Les indices relatifs à la texture du sol sont extraits de la carte pédologique du bassin et des enquêtes de terrain. Le critère de classification, à défaut de test adéquat a été l'aptitude culturale de ces sols. 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 116) :

- 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.

## 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 :

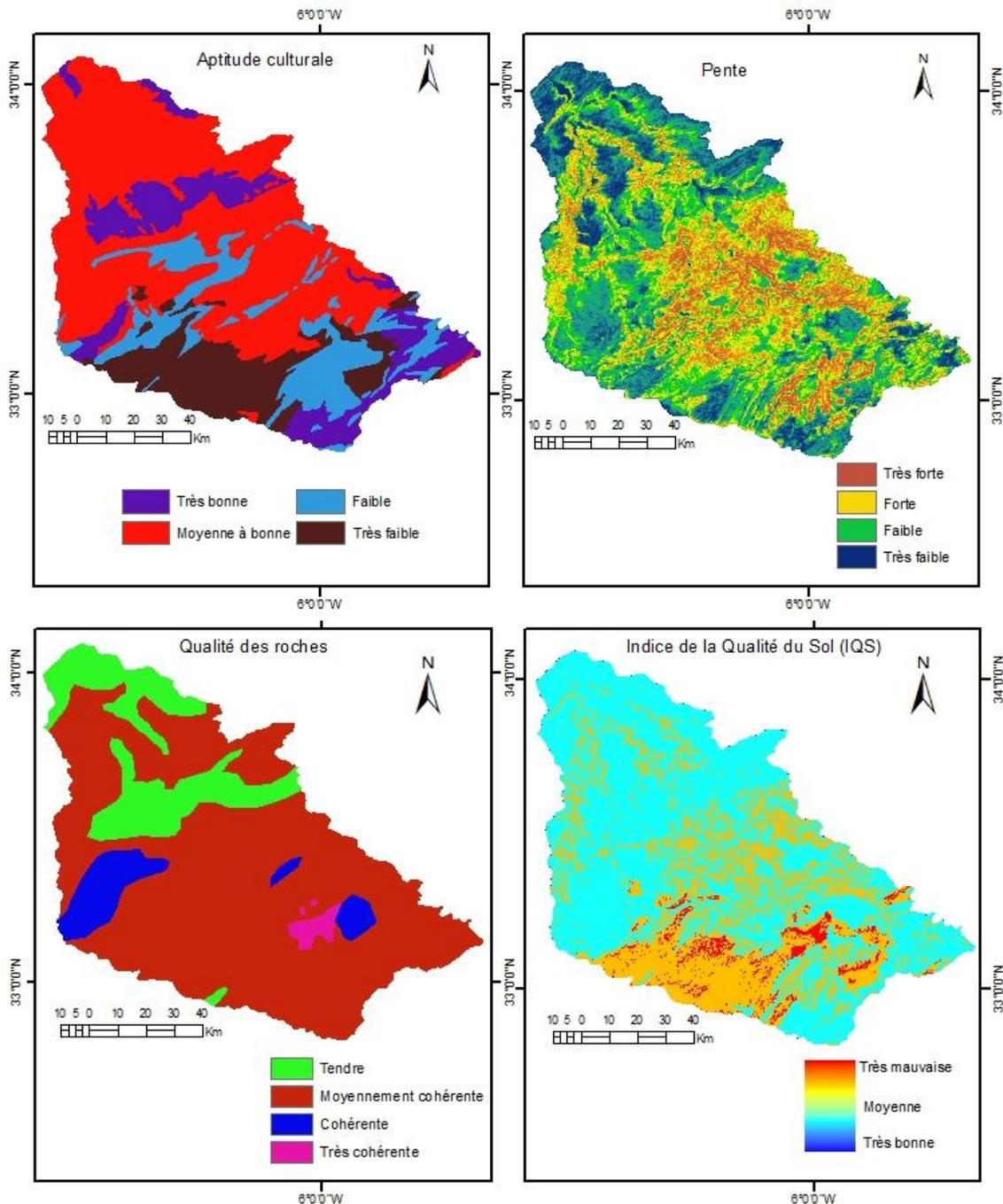
$$IQV = (RI \times Pe \times RS)^{1/3}$$

où :

*RI* = *risque d'incendie*

*Pe* = *protection contre l'érosion*

*RS* = *résistance à la sécheresse*



**Fig. 117:** Caractérisation de la qualité du sol

Le tableau 15 résume la structure de ces indicateurs et leur poids dans la caractérisation du risque de dégradation.

**Tableau 15:** Paramètres de caractérisation de l'indice de la qualité de la végétation

Poids	Risque d'incendie	Protection contre l'érosion	Résistance 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

La carte d'occupation du sol obtenue par classification de l'image de Landsat de 2007 a servi de modèle à la discrimination des différents indicateurs. Ainsi, les indicateurs de résistance à la sécheresse et de risque d'incendie permettent de constater, à quelques différences près, que les formations végétales de forêt présentent les meilleures qualités d'indice (figure 117). Toutefois, ces espaces restent très vulnérables aux risques d'incendie. Les espaces de culture présentent eux, des vulnérabilités importantes à la fois au niveau des sécheresses que de la protection contre l'érosion. Ces espaces connaissent des variations saisonnières importantes de l'utilisation du sol à cause des activités agricoles et pastorales. En outre, étant dénudés en été (saison sèche), ces espaces présentent peu de risque d'incendie. Ainsi, la carte finale de l'indice de la qualité de la végétation (IQV) regroupe le bassin en trois classes principales :

- Les espaces de bonne qualité végétale sont localisés au centre ainsi qu'à l'amont du bassin. Il s'agit d'espaces céréaliers. Toutefois, dans la partie Sud de l'amont du bassin, certaines zones apparaissent comme étant de bonne qualité végétale, ce qui n'est en réalité pas le cas. Cette confusion apparente est due au fait que ces espaces sont des matorraux pour la plupart et donc présentent des caractéristiques acceptables à la fois au niveau de la résistance à la sécheresse, du risque d'incendie et de la protection contre l'érosion.
- 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 céréalier de blé.
- Les espaces à caractéristique intermédiaire sont constitués par les forêts

#### 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 :

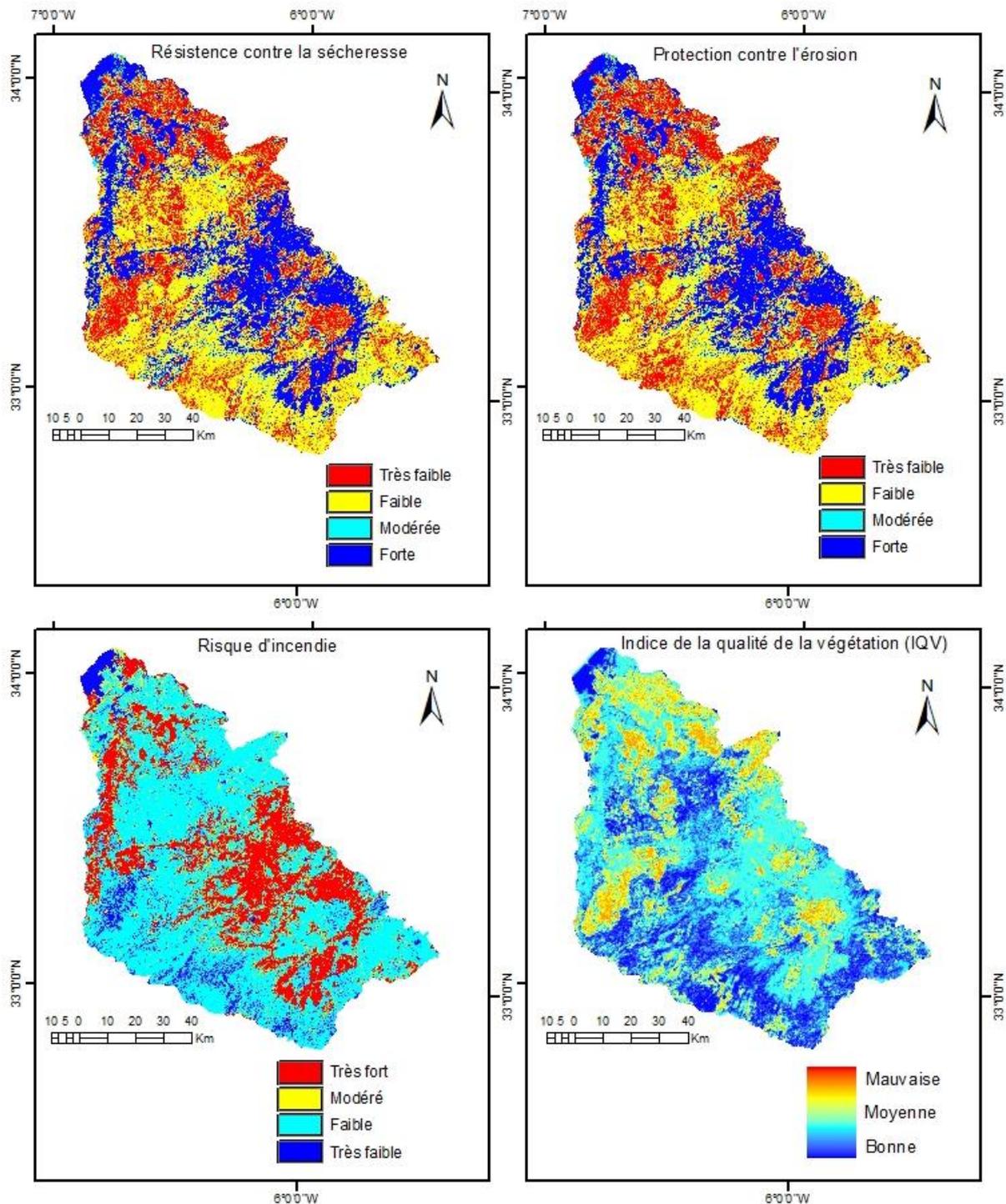
$$IQC = (PP \times IA \times OR)^{1/3} \quad 16$$

où :

*PP* = précipitation

*IA* = indice d'aridité

OR = orientation des versants (exposition des versants)



**Fig. 118:** Caractérisation de la qualité de la végétation

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).

L'indice d'aridité bioclimatique est obtenu par la formule :

$$IA = P/ETP$$

17

où :

P = précipitation

ETP = évapotranspiration potentielle

L'ETP est calculé selon la méthode de Hargreaves. L'indice d'Aridité bioclimatique utilisé dans cette analyse est téléchargé du site du CGIAR-CSI (Consultative Group for International Agriculture Research – Consortium for Spatial Information), (Trabucco et Zomer, 2009). Il s'agit d'une moyenne de la période de 1950 à 2000. Deux classes d'indice sont obtenues, à savoir les espaces semi-arides (indice compris entre 0,2 et 0,5) et les espaces subhumides (indice supérieur à 0,5 au niveau du bassin). Les poids respectifs attribués aux classes sont de 2 et de 1.

Le bassin versant est constitué en partie de plateau souvent élevés (partie amont du bassin). Les versants de ces reliefs sont influencés, au niveau de l'humidité par leur exposition au Sud ou au Nord, les versants Sud étant plus chauds que les versants Nord. Des classes sont également constitués : Les versants Nord d'indice 1 et Les versants sud, d'indice 2.

L'indice de la qualité du climat permet de mettre en relief quatre classes (figure 118). 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.

#### 1.1.1. 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 :

$$IQA = (TAA \times DA \times DR \times DC \times DP)^{1/5} \quad 18$$

où

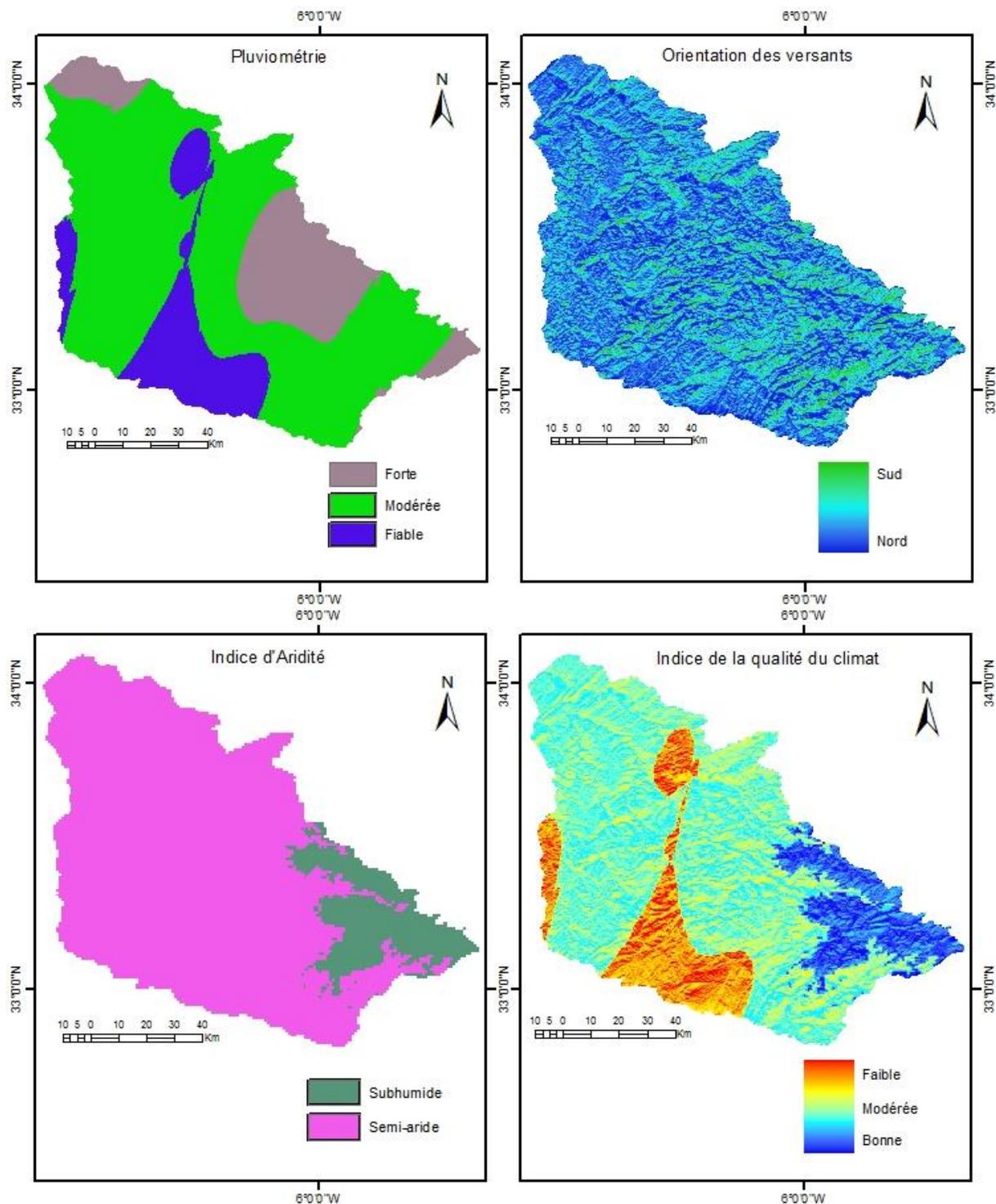
*TAA* = *taux d'accroissement annuel*

*DA* = *densité de l'habitat*

*DR* = *densité de route*

*DC* = *densité du cheptel*

*DP* = *densité de la population*



**Fig.119:** Caractérisation de la qualité du climat

Le taux d'accroissement annuel de la population a été divisé en 5 classes qui sont : inférieur à 0% ; de 0 à 1,5% ; de 1,5 à 3% ; de 3 à 6% et supérieur à 6%. Leurs poids respectifs sont de 100, 115, 150, 180 et 200.

La carte de densité de répartition de l'habitat a été réalisée par l'application d'une grille régulière de 2 km<sup>2</sup> sur les images satellites google et bing et par comptage approximatif du bâti. La répartition de la densité de l'habitat comprend 4 classes qui sont :

- les classes de faible densité (inférieur à 10 maisons / km<sup>2</sup>, indice 1) ;
- les classes de densité modérée (de 10 à 20 maisons / km<sup>2</sup>, indice 1,33) ;

- les classes de forte densité (de 20 à 50 maisons / km<sup>2</sup>, indice 1,66) ;
- et les classes de très forte densité (supérieur à 50 maisons par km<sup>2</sup>, indice 2) ;

Les classes de densité de population connaît quasiment la même distribution de classe que celle de l'habitat ;

La densité du réseau routier se subdivise en deux classes : les densités inférieurs à 0,5 routes par km<sup>2</sup> (indice 1) et les densités supérieures à 0,5 routes par km<sup>2</sup> (indice 2).

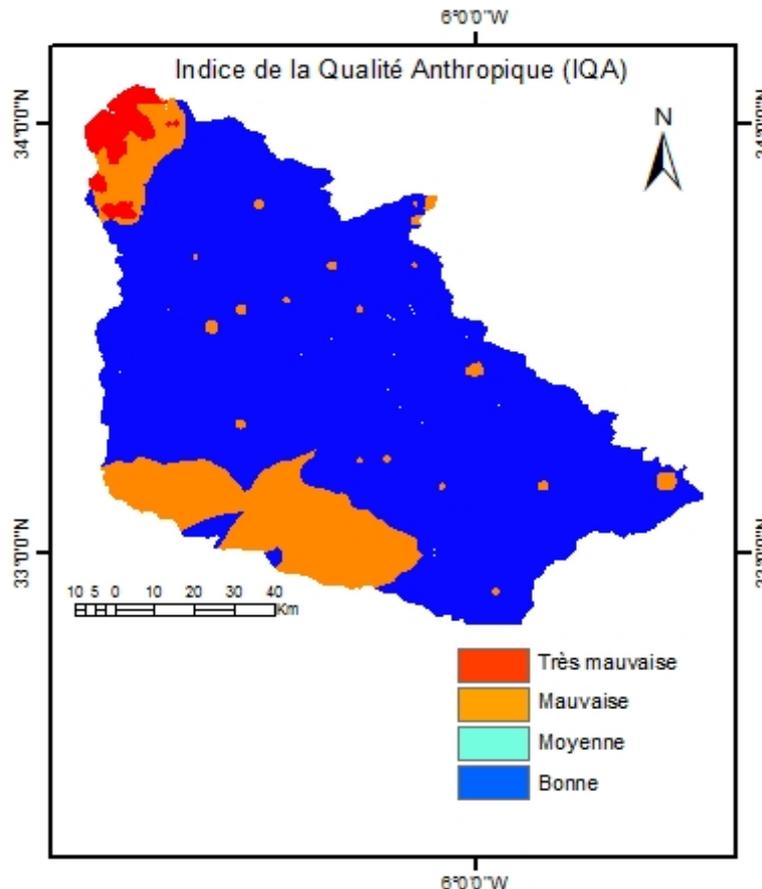
La densité du cheptel comprend 4 classes qui sont :

- Les densités faibles (inférieur à 20 têtes / km<sup>2</sup>), indice 1
- Les densités modérée (20 à 60 têtes / km<sup>2</sup>), indice 1,33 ;
- les densités fortes (60 à 100 têtes / km<sup>2</sup>), indice 1,66 ;
- et les densités très fortes (supérieures à 100 têtes / km<sup>2</sup>), indice 2

La carte finale de la qualité anthropique constitue fait ressortir deux principaux espaces (figure 119) :

- Le premier espace est celui dont la qualité anthropique constitue un grand risque de dégradation. Ce sont le littoral (zone urbaine de Rabat-Salé et sa périphérie) et le Sud (amont) du bassin. Le premier (le littoral) est l'expression d'une urbanisation galopante. Quant au second, il est objet de forte pression pastorale des petits ruminants.
- Le second espace est caractérisé par un moins grand risque de dégradation. Ceci est à relativiser car le bassin tout entier connaît une dispersion très importante de l'occupation humaine. Ce qui constitue des points de départ de mutations spatiales et environnementales.

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



**Fig. 120:** Caractérisation de la qualité anthropique

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

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 classe sont définies selon celui du projet MEDALUS (Tableau 16).

**Tableau 16:** Classe de dégradation des sols (Kosmas et al. 1999)

Type	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

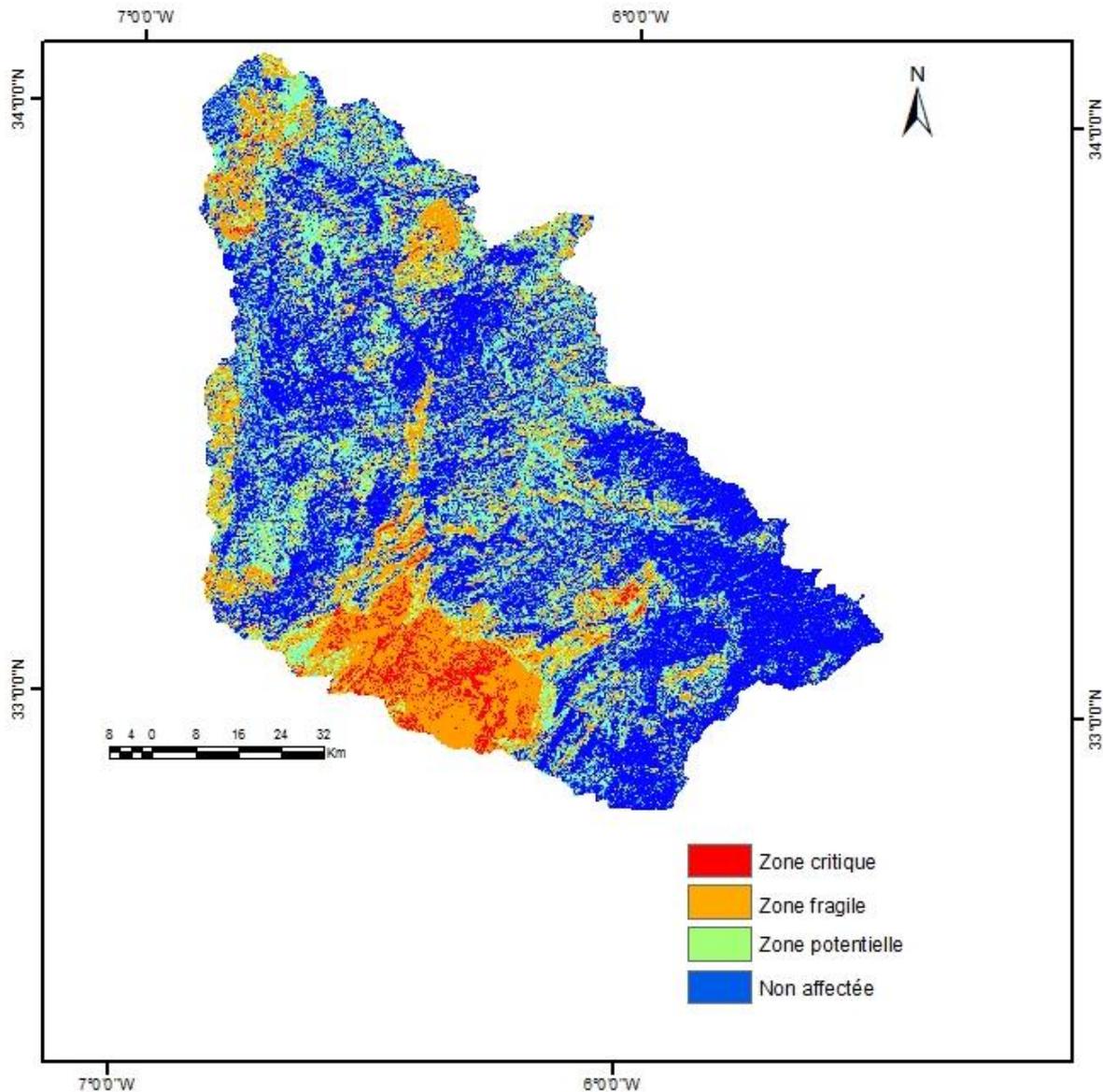
Les statistiques des classes indiquent que les espaces non affectés représentent 48% du bassin. Les espaces potentiellement affectés sont de 25%. Quant aux espaces fragiles, ils représentent 25% du bassin. Les espaces critiques en termes de dégradation sont de 2% du bassin. Ainsi, plus d'un quart du bassin est un espace fragile en termes d'exploitation agricole et pastorale. L'étude menée en 1975 par le FAO sur l'état de l'environnement (REEM, 1999) indiquait déjà que 54% des terres des bassins Bouregreg-Chaouia devraient ne pas être cultivés compte tenu de leur fragilité.

Au niveau spatial (figure 120), les espaces où la dégradation représente un risque critique sont localisés dans la partie sud du bassin (amont). Les espaces fragiles s'étendent à cette zone ainsi qu'à l'amont du bassin. Quant aux espaces de risque potentiel, ils sont localisés, en partie, dans les espaces forestiers et les terres agricoles de l'aval du bassin. Les espaces présentant de faibles risques de dégradation se localisent eux principalement à l'amont du bassin, dans les zones subhumides. Les bonnes terres agricoles du centre du bassin présentent elles aussi de faibles risques de dégradation.

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.



**Fig. 121:** Carte du risque de dégradation des sols dans le bassin versant du Bouregreg

## ***2. Analyse des scénarios de changement climatique du bassin et impact potentiel sur l'agriculture***

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

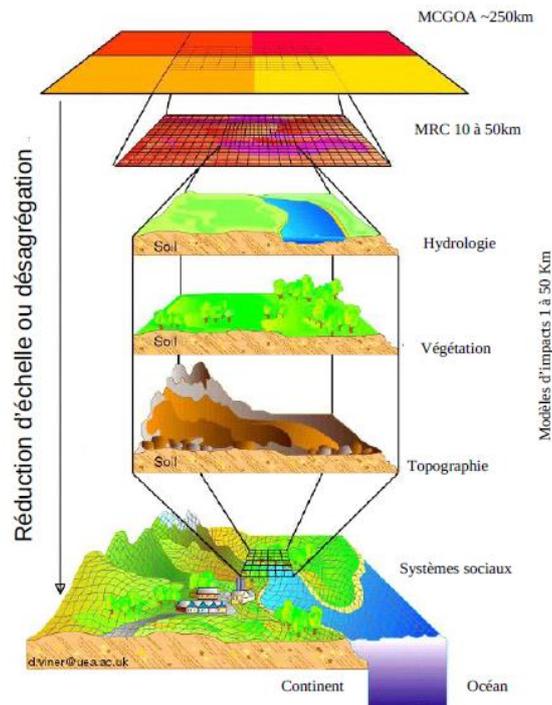
Les Modèles de Circulation Générale couplée Océan-Atmosphère (MCGOA ou MCG) permettent la modélisation numérique du climat. Ces modèles ont des résolutions spatiales de 200 à 300 km, ce qui n'est pas adapté aux études locales du changement climatique et de ces impacts. Pour combler cet état de fait,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

les méthodes de réduction dynamique et les méthodes de réduction d'échelle statistique (figure 121).

« 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 le température en un lieu donné (variables prédites ou prédictants). » (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 d du Maroc dans lequel se trouve le bassin versant du Bouregreg (figure 122). Le tableau 17 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).



**Fig. 122:** Schéma du concept de réduction d'échelle (d'après D. Viner, Climatic Research Unit – University of East Anglia, Royaume Uni, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/modelcc/>)



Sourcec : <http://www.ensembles-eu.org/>

**Fig. 123:** Zone de couverture des MCR du projet ENSEMBLE

**Tableau 17:** Caractéristique des MCR utilisés

Scenario	MCG de forçage	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

## 2.2. Comparaison entre les données des modèles et les données observées

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  $\text{kg/m}^2/\text{s}$  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 18 et la figure 123 permettent de constater que, comparativement aux données d'évolution réelles des pluviométries constatées 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 (476 pour le modèle et 481 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 18:** Statistiques de comparaison entre les données de précipitation des stations et les données simulées par les modèles

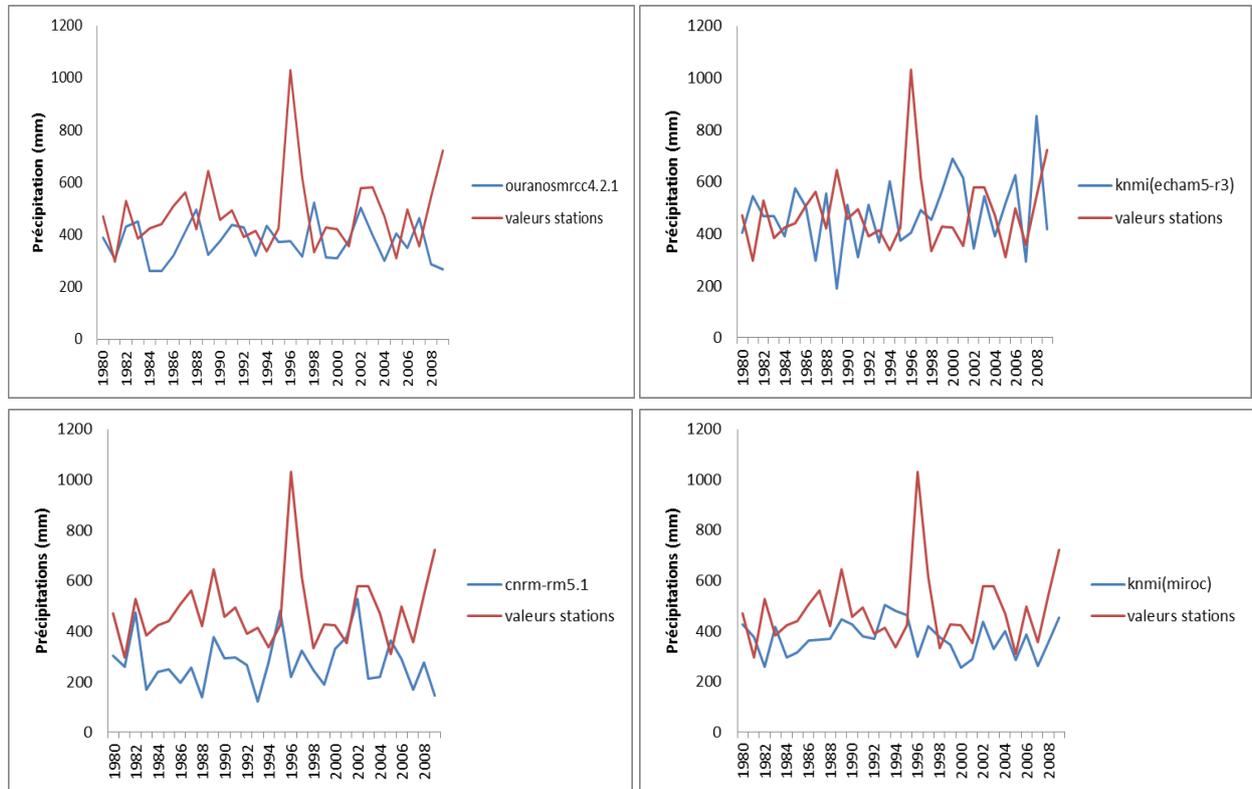
Statistiques	Données stations	OURANOSMRCC4.2.1	KNMI (ECHAM5-r3)	KNMI (MIROC)	CNRM-RM5.1
<b>maximum</b>	1030	522	855	505	529
<b>minimum</b>	298	259	189	257	123
<b>moyenne</b>	481	373	476	373	276
<b>Ecart-type</b>	146	74	135	68	100
<b>Coef. Corr. de Pearson</b>		-0,188	-0,233	-0,038	0,005

## 2.3. Evolution des précipitations et des températures jusqu'en 2050 et 2100

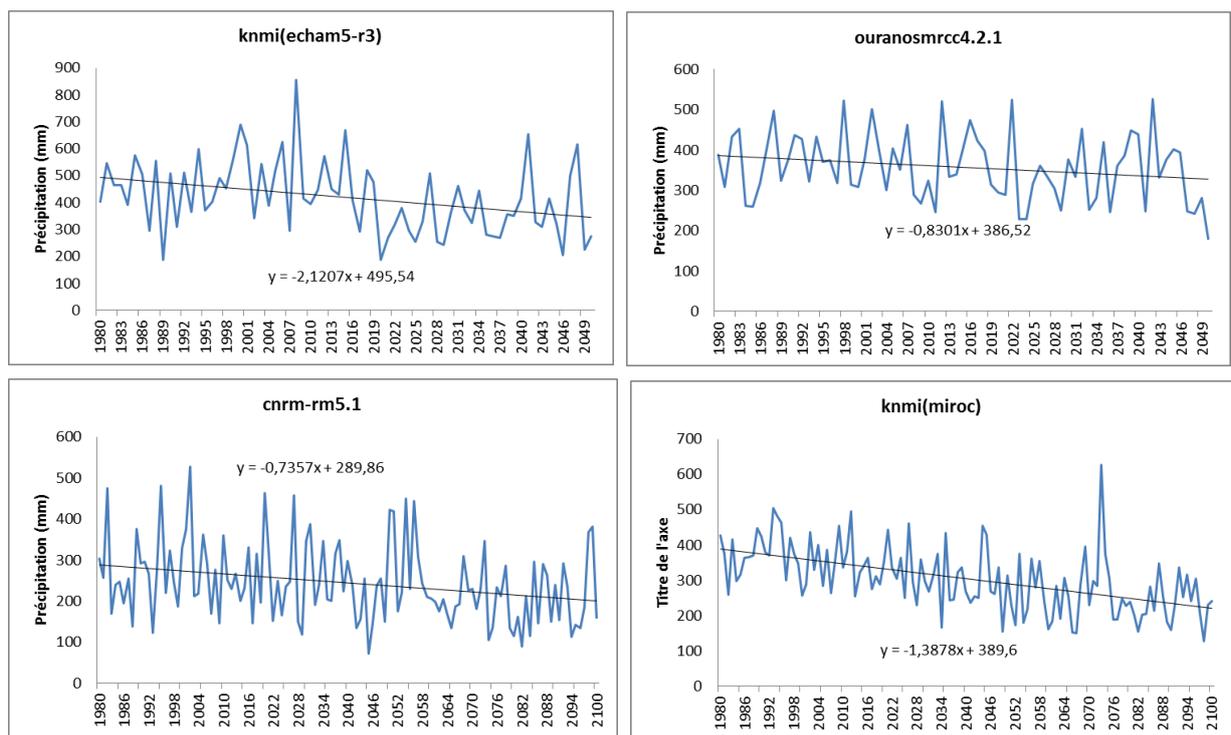
### 2.3.1. Une accentuation de la baisse des quantités pluviométriques annuelles

L'ensemble des modèles prédisent des baisses importantes de quantités pluviométriques jusqu'en 2050 et 2100 (figure 124). 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 termes 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.



**Fig. 124:** Courbe d'évolution comparative des précipitations moyennes annuelles des MCR et des stations météorologiques



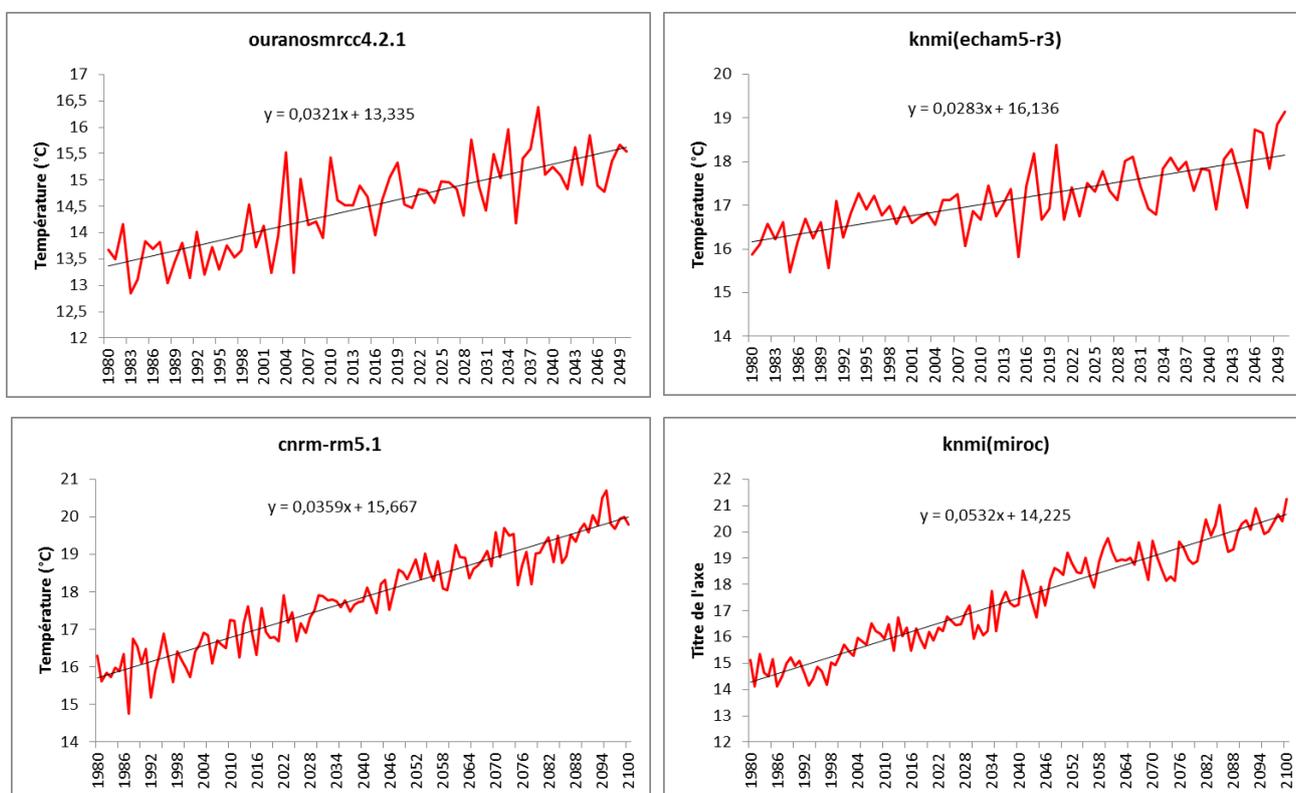
**Fig. 125:** Evolution interannuelle des précipitations simulées jusqu'en 2050 et 2100

**Tableau 19:** Statistique de rupture des séries pluviométriques des MCR

Statistique	OURANOSMRCC4.2.1	KNMI (ECHAM5-r3)	KNMI (MIROC)	CNRM-RM5.1
<b>p-value</b>	0,120	< 0,0001	< 0,0001	0,003
<b>Date rupture</b>	-	2019	2033	2058
<b>Moy. avant rupture</b>	-	474	356	267
<b>Moy. après rupture</b>	-	349	264	204
<b>Quantité de la baisse (mm)</b>	-	125	92	63
<b>Proportion de baisse (%)</b>		-26	-26	-24

### 2.3.2. 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 125). 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 20 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.



**Fig. 126:** Evolution des températures moyennes annuelles simulées jusqu'en 2050 et 2100

**Tableau 20 : Statistique de rupture des séries de température des MCR**

Statistique	OURANOSMRCC4.2.1	KNMI (ECHAM5-r3)	KNMI (MIROC)	CNRM-RM5.1
p-value	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Date rupture	2009	2015	2040	2043
Moy. avant rupture	14	17	16	17
Moy. après rupture	15	18	19	19
Quantité de la hausse (°C)	1	1	3	2
Proportion de hausse (%)	7	6	18	12

## 2.4. Evolution bioclimatique (2050, 2100) du bassin du Bouregreg

### 2.4.1. Le changement interannuel futur du climat dans le bassin versant du Bouregreg

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 :

$$I = P/T + 10$$

où

*I* = indice d'aridité de De Martone

*P* = précipitation totale annuelle

*T* = température moyenne annuelle

20

Il indique différentes classes d'aridité que sont :

< 5 = climat hyperaride

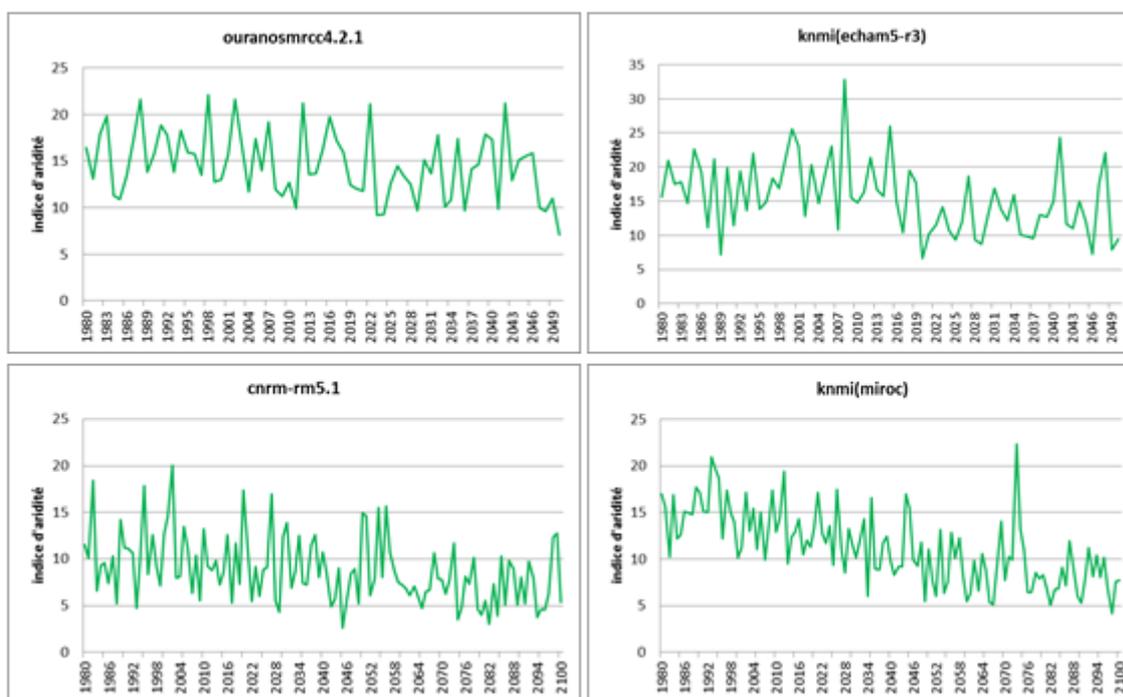
5 – 10 = climat aride

10 – 20

Le tableau 21 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. Cependant, le niveau d'humidité devrait connaître des baisses significatives. Ainsi, la proportion d'années arides (selon les modèles umériques), 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 126).

**Tableau 21:** Récapitulatif de l'évolution de l'indice de sécheresse de De Martone (1980- 2050 et 2100)

		OURANOSMRCC4.2.1	KNMI (ECHAM5-r3)	KNMI (MIROC)	CNRM- RM5.1
Date rupture		2018	2019	2033	2058
Moy. indice avant		16	18	14	10
Moy. indice après		13	13	9	7
% année aride avant	0	3	4	53	
% année aride après	10	23	58	81	



**Fig. 127:** courbes d'évolution pluriannuelle de l'indice de sécheresse de De Martone

#### 2.4.2. Le changement interannuel futur du climat dans le bassin versant du Bouregreg

L'analyse de la dynamique future de la sécheresse inter saisonnière est abordée ici par le calcul de l'indice de sécheresse de Gausson et Bagnouls (Gausson et Rognon, 1995 ; Lebourgeois et Piedallu, 2005). Cet indice est calculé pour chaque mois de la période 1980-2050 et 2100. Le mois est considéré comme sec lorsque les précipitations (P) sont inférieures à deux fois la température moyenne du mois. L'inverse (lorsque les précipitations sont supérieures à deux fois les températures) équivaut à un mois humide.

Le tableau 22 résume l'évolution saisonnière future selon les quatre modèles utilisés. Pour l'horizon 2050, la saison humide couvrira le mois de novembre à avril pour le modèle OURANO, et octobre à avril pour le modèle KNMI (ECHAM). Toutefois, la saison humide connaîtra certains changements. Ainsi, pour le modèle OURANO, bien que le mois de décembre restera humide jusqu'en 2050, ce mois connaîtra une baisse significative de

précipitation chiffrée à 27%. Pour le modèle KNMI (ECHAM), ce sont les deux premiers mois humides qui présenteront cette caractéristique. Ainsi, les mois d'octobre et de novembre connaîtront des baisses respectives de précipitation de 27 et 34%. Les mois de la saison sèche auront la caractéristique de devenir encore plus sec. Ces mois, selon ces deux modèles, présentent en effet des ruptures de série d'indice de sécheresse accentuant leur caractéristique aride. Ainsi, les précipitations déjà faibles de ces mois connaîtront des proportions de baisse pouvant atteindre 60% (exemple du mois de septembre pour KNMI (ECHAM)). Au regard de l'évolution de l'humidité de l'ensemble des mois, le changement le plus remarquable est attendu au mois de mai, selon le modèle OURANO. Ce mois passerait après 2018, de mois humide à mois sec, soit une réduction de la saison humide d'un mois en fin de saison. Concernant l'évolution des températures, elles connaîtront une hausse de 1° à 2°C.

Pour les modèles de prévision pour l'horizon 2100, les scénarios sont sensiblement différents. Pour le modèle KNMI (MIROC), la saison humide ne s'étendra plus qu'aux mois de novembre à février. En outre, dans cette saison humide, seul le mois de Janvier ne devrait pas connaître de changement important. Les autres mois, bien que restant humides seront marqués par d'importantes baisses évaluées entre 22 et 32%. Pour ce modèle, certains mois à caractère traditionnellement humide comme mars et avril passeront à des mois secs avec des baisses de pluviosité de plus de 40%.

Pour le modèle CNRM, la situation sera encore plus accentuée. Seul le mois de janvier conservera un caractère humide avec une réduction significative des quantités de précipitation. Les mois de novembre-décembre et février-mars vont muter vers des caractères secs.

L'unanimité entre ces deux modèles réside dans le fait que les projections d'évolution future des mois de la saison sèche présentent le même schéma : les saisons sèches deviendront encore plus arides. Ceux-ci deviendront d'autant plus secs que le modèle KNMI prévoit des hausses de température de 3° à 4°C. Ces hausses sont énormes car il est important de rappeler que pendant le siècle dernier, les températures du Maroc n'ont connues qu'une hausse de 1° à 2°C. Cependant, comparativement aux projections de certains modèles sur la méditerranée Sud et le Maroc, ces températures annoncées restent conformes et même et souvent même inférieures (Tubiello, 1997 ; Arrus et Rousset, 2007).

Pour résumer l'évolution des caractéristiques d'humidité des mois à l'horizon 2050 et 2100, il est à noter que les mois de fin de saison humide (mars, avril et mai) connaîtront des mutations pour devenir secs. Il en est de même, dans une moindre mesure, des mois de novembre et décembre. Ce changement sera surtout notable après 2050.

#### *2.4.3. 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 de 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).

**Tableau 22:** Récapitulatif de l'évolution de l'indice de sécheresse de Gaussem et Bagnouls, 1980-2050 et 2100

<b>OURANOSMRCC4.2.1</b>	<b>Janvier</b>	<b>Février</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>
Date rupture	-	-	-	-	2018	2005
Caractéristique du mois	H	H	H	H	HASA	SASA
Caractéristique de la rupture (mm/%)					11 / -28%	8 / -32
Hausse des températures (°C)					1	2
<b>OURANOSMRCC4.2.1</b>	<b>Juillet</b>	<b>Août</b>	<b>Septembre</b>	<b>Octobre</b>	<b>Novembre</b>	<b>Décembre</b>
Date rupture	2023	2016	-	2027	-	2005
Caractéristique du mois	SASA	SASA	S	SASA	H	HAHA
Evolution des précipitations (mm/%)	6 / -32	4 / -17		9 / -31		9 / -27
Hausse des températures (°C)	2	2		2		2

<b>KNMI (ECHAM5-r3)</b>	<b>Janvier</b>	<b>Février</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>
Date rupture	-	-	-	-	2020	2035
Caractéristique du mois	H	H	H	H	SASA	SASA
Evolution des précipitations (mm/%)					11 / -53	1 / -33
Hausse des températures (°C)					2	2
<b>KNMI (ECHAM5-r3)</b>	<b>Juillet</b>	<b>Août</b>	<b>Septembre</b>	<b>Octobre</b>	<b>Novembre</b>	<b>Décembre</b>
Date rupture	2018	2015	2008	2015	2020	-
Caractéristique du mois	SASA	SASA	SASA	HAHA	HAHA	H
Evolution des précipitations (mm/%)	1 / -50	1 / -20	16 / -62	12 / -27	24 / -34	
Hausse des températures (°C)	1	1	2	2	1	

<b>KNMI (MIROC)</b>	<b>Janvier</b>	<b>Février</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>
Date rupture	-	2044	2048	2035	2046	2047
Caractéristique du mois	H	HAHA	HASA	HASA	SASA	SASA
Evolution des précipitations (mm/%)		13 / -30	18 / -42	20 / -53	13 / -52	4 / -44
Hausse des températures (°C)		3	2	3	4	3
<b>KNMI (MIROC)</b>	<b>Juillet</b>	<b>Août</b>	<b>Septembre</b>	<b>Octobre</b>	<b>Novembre</b>	<b>Décembre</b>
Date rupture	2038	2048	2029	2050	2035	2029
Caractéristique du mois	SASA	SASA	SASA	SASA	HAHA	HAHA
Evolution des précipitations (mm/%)	0 / 0	2 / 13	9 / -27	15 / -50	14 / -32	10 / -22
Hausse des températures (°C)	3	3	4	4	3	3

<b>CNRM-RM5.1</b>	<b>Janvier</b>	<b>Février</b>	<b>Mars</b>	<b>Avril</b>	<b>Mai</b>	<b>Juin</b>
Date rupture	2064	2040	2068	2051	2040	2027
Caractéristique du mois	HAHA	HASA	HASA	SASA	SASA	SASA
Evolution des précipitations (mm/%)	7 / -24	2 / -7	10 / -32	12 / -50	3 / -20	4 / -36
Hausse des températures (°C)	1	2	2	2	2	2
<b>CNRM-RM5.1</b>	<b>Juillet</b>	<b>Août</b>	<b>Septembre</b>	<b>Octobre</b>	<b>Novembre</b>	<b>Décembre</b>
Date rupture	2034	2047	2042	-	2036	2055
Caractéristique du mois	SASA	SASA	SASA	S	HASA	HASA
Evolution des précipitations (mm/%)	1 / -11	1 / -11	1 / -5		4 / -34	12 / -48
Hausse des températures (°C)	2	3	2		2	1

H = humide

S = sec

HAHA = humide avant et après la rupture de série

SASA = sec avant et après la rupture de série

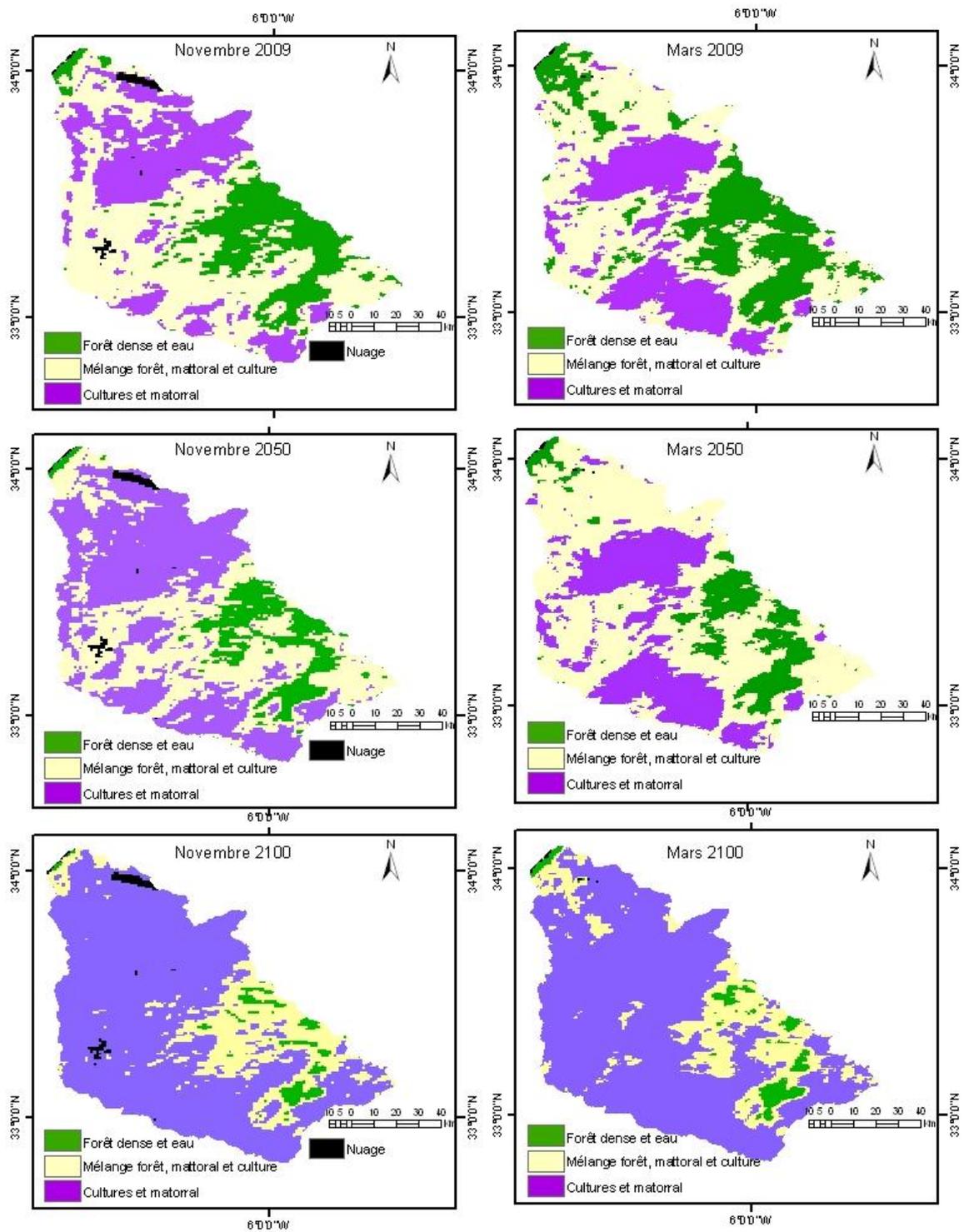
En début de saison agricole, la levée des céréales devrait devenir beaucoup plus difficile hydriquement, selon les prévisions de certains modèles comme CNRM où les mois de novembre et décembre deviendraient secs après 2036.

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 23). Les formations végétales de forêt dense ainsi que les surface 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'outre 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 127). 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 23** : Seuillage des températures de surface d'image MODIS en fonction des types d'occupation de 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)
Forêt dense, eau et bâti	16 – 21,5	15 – 25,4
Mélange forêt, matorral et culture	21,5 - 24	25,4 - 28
Culture et matorral	24 - 29	28 - 34



**Fig. 128:** Evolution de la végétation déterminée à partir des températures de surface des images MODIS et du MCR CNRM

## Conclusion

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 MRC 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 apparaitre 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.

## **Conclusion générale et perspective**

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 localisées), 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 pressions 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 10 000 km<sup>2</sup>. L'étude de bassin d'une telle dimension au Maroc s'est généralement basée 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 km<sup>2</sup> 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 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 et de langue. 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 lutte contre la dégradation des sols arables. Toutefois, ces questions de recherche demandent, au niveau pratique, de résider au Maroc ou d'y être intégré dans le cadre d'un projet de recherche. Ce qui ne me permet pas de poursuivre cette recherche. Cependant, mon séjour au Maroc durant cette thèse m'a permis d'observer que, bien que se situant dans des zones géographiques différentes avec des réalités pluviométriques apparemment éloignées, le Maroc et la Côte d'Ivoire présente de grandes similarités quant aux mutations environnementales liées à l'interrelation entre activités agropastorales et le climat. Les études menées en Côte d'Ivoire (Paturel et al. Brou, 1997, 2005) ont aussi abouti au constat d'une dégradation importante de la couverture végétale en relation avec l'évolution du climat et du système agricole. Cependant, au niveau naturel, la Côte d'Ivoire reste climatiquement favorisée par rapport au Maroc car elle appartient à la zone tropicale humide, et de ce fait, son agriculture ne connaît pas de limite liée au climat. Cependant, le contraste entre l'acuité de l'impact des sécheresses climatiques et les performances réalisées par le Maroc au niveau agricole et céréalière en particulier, indique de toute évidence que le potentiel ivoirien de production céréalière est sous exploité. Cet aspect de l'évolution des conditions hydriques et de l'autosuffisance alimentaire, particulièrement la production de vivrier dans le Nord de la Côte d'Ivoire, ouvre pour moi une nouvelle piste d'investigation.

En effet, l'économie ivoirienne est basée sur la production de cultures d'exportation comme le café et le cacao. Ces cultures sont pratiquées essentiellement dans les zones forestières du Sud qui attirent et concentrent la population agricole du pays au détriment d'une disparition rapide des forêts. Le Nord de la Côte d'Ivoire demeure en apparence moins attractif quant au potentiel de culture de rente. Cependant, la crise alimentaire vécue dans le monde ces dernières années soulève la question urgente pour les pays africains d'arriver à une autosuffisance alimentaire. En la matière, le Nord de la Côte d'Ivoire dispose d'un potentiel énorme qu'il convient de rentabiliser. Cependant, pour y arriver, il est important d'étudier l'évolution du potentiel hydrique et hydrologique de cet espace. Ainsi, cette nouvelle orientation de ma recherche vise à étudier la dynamique des espaces humides du Nord de la Côte d'Ivoire et leur contribution éventuelle à l'autosuffisance alimentaire du pays.

## Références 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]
- Alibou, J. (2002). Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau et les zones humides du Maroc. *Rapport CERSHE-EHTP, Ministère de l’Aménagement du territoire, de l’Urbanisme, de l’Habitat et de l’Environnement, Département de l’Environnement*.
- Ali, A., Lebel, T., & Amani, A. (2008). Signification et usage de l’indice pluviométrique au Sahel. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 19(4), 227-235.
- Ambrosi, P., & Courtois, P. (2004). Impacts du changement climatique et modélisation intégrée, la part de l’arbitraire. *Natures Sciences Sociétés*, 12(4), 375-386.
- Anys H., Bonn F. et Merzouk A. (1993). Cartographie et calcul de l’érosion hydrique à l’aide de la télédétection et d’un SIG, cas du bassin versant d’oued Aricha (Settat, Maroc), *Télédétection et cartographie*. Éd. AUPELF-UREF. Les Presses de l’Université du Québec. © 1993. p. 141-150
- 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](http://www.cndwebzine.hcp.ma/cnd_sii/IMG/pdf/connaissance_et_utilisation_des_ressources_en_sol_au_maroc.pdf) [Accessed 5 February 2013]
- Bahir, M., & Mennani, A. (2002). Problématique de la gestion des eaux souterraines au Maroc. *Estudios Geológicos*, 58(3-4), 103-108.
- Bailly, A. & Ferras R., (2004): Elément d’épistémologie de la géographie, ed. Amand Colin, pp191.
- 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
- Bannari, A., El-Harti, A., Haboudane, D., Bachaoui, E.F., et El-Ghmari, A. (2007). spectrales et géomorphométriques dans un sig pour la cartographie des aires exposées à l'érosion, *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 327-342
- Banque mondiale, (2003). Evaluation du coup de la dégradation de l'environnement, rapport n°25992-MOR
- Barakat, F., Handoufe, A., 1998. Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse* 9, 201–208
- Baraka, N., & Benrida, A. (2006). La croissance économique et l'emploi. *Background paper to, 5050 ans de développement humain au Maroc et perspectives pour 2025*.
- Beaudet, G. (1969). *Le plateau central marocain et ses bordures: étude géomorphologique*. Rabat: Imprimeries françaises et marocaines.
- Beaudet G. (1979). Un problème géographique : les aires asylvatiques du Maroc Central. In *Méditerranée, Troisième série, Tome 35, 1-2-1979. L'homme et son milieu naturel au Maghreb*. pp. 9-14.
- Benabdellouahad, S. (2006). Structure, dynamique et typologies physico-chimiques et phytoplanctoniques de l'estuaire du Bou Regreg (Côte Atlantique Marocaine). Thèse de doctorat, Université Mohammed V Agdal
- Benabderrahmane, M. C., & Chenchouni, H. (2010). Assessing environmental sensitivity areas to desertification in Eastern Algeria using Mediterranean desertification and land use "MEDALUS" model. *Int J Sustain Water Environ Syst*, 1, 5-10.
- 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.
- Benslimane, M., Hamimed, A., Zerey, W. E., Khaldi, A., & Mederbal, K. (2009). Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 8(3).
- Berkat, O. & Tazi, M. (2006). Morocco. Country Pasture/ Forage Resource profiles/ FAO. [www.fao.org/ag/AGP/.../Morocco/Morocco.htm](http://www.fao.org/ag/AGP/.../Morocco/Morocco.htm)
- Berrada, A. (2005). Répartition de la population, urbanisation et migration. In, *Population et développement au Maroc: dix après la conférence internationale sur la population et le développement (CIPD,1994)*

Berraho A., (2006) Biodiversité et équilibre écologique *rapport thématique, 50 ans de développement humain au Maroc et perspectives pour 2025 GT8-4*

<http://www.svt.ac-aix-marseille.fr/eedd/coopint/bibliogr/biodiversitequilibresecologiques.pdf>

[Accessed 5 February 2013]

Bessaoud, O., & Montaigne, E. (2009). Quelles réponses au mal-développement agricole? *Analyse des politiques agricoles et rurales passées et présentes, CIHEAM-IAMM, Montpellier [France]*.

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.

Bouderbala, N. (1999). Les systèmes de propriété foncière au Maghreb. Le cas du Maroc. *Cahiers Options Méditerranéennes*, 36, 47-61.

Bourbouze A, Donadieu P. (1987). *L'élevage sur parcours en régions méditerranéennes*. Montpellier : CIHEAM/IAM, 1987 ; p 104

Bourbouze, A. (2000). Pastoralisme au Maghreb: la révolution silencieuse. *Fourrages*, 161, 3-21.

Brou T. Y., 1997 : Analyse et dynamique de la pluviométrie en milieu forestier ivoirien : recherche de corrélations entre les variables climatiques et les variables liées aux activités anthropiques. Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Cocody-Abidjan, 210 P

Brou, Y. T. (1999). Climat mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire, Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille

Bzioui, M. (2004). Rapport national 2004 sur les ressources en eau au Maroc. *UN Water-Africa*.

Caloz R. et Collet C. (2001) *Précis de télédétection vol. 3 : traitement numérique d'image de télédétection* Presse Universitaire du Quebec et AUPELF-UREF

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 – 243

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).

Daoudi A. (2011) La régulation foncière au Maroc. In *Régulation foncière et protection des terres agricoles en Méditerranée. Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches*; n. 66 Montpellier: CIHEAM, 2011. p. 63-72

Dauphiné A., *risques et catastrophes. observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Armand colin, coll. « u », 2001.

Devineau, JL. (1988). Propriété spectrale de la végétation, communication journées télédétection de bondy : « *images satellites et milieux terrestres en régions arides et tropicales* »

- Diello, P., PATUREL, J. E., & Mahé, G. (2003). Approche d'identification d'un réseau climatique pour le suivi des modifications du climat au Burkina Faso. *Sud sciences technologie n°10*, 18-25
- 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)
- Driouchi, A. (2000). Principaux volets des politiques agricoles au Maroc. *Les agricultures maghrébines à l'Aube de l'an*, 119-126.
- 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 Bouqdaoui, K. (2007). Approche méthodologique de l'évaluation du risque potentiel d'érosion des sols du bassin versant du Srou (Moyen Atlas, Maroc) à l'aide de la télédétection et du SIG.
- 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. *Télédétection*, 8(3), 193-201.
- El Mansouri El H. (2005). Spatialisation de la population et urbanisation au Maroc. In, *Population et développement au Maroc : dix après la conférence internationale sur la population et le développement (CIPD,1994)*
- El Mekki A.A. (2008) L'agriculture, l'agroalimentaire, la pêche et le développement rural au Maroc. In *Les agricultures méditerranéennes : analyses par pays Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches*, n. 61. Montpellier: CIHEAM, 2008. p.1-36
- Escadafal, R. (1989). Caractérisation de la surface des sols arides par observations de terrain et par télédétection. Applications: exemple de la région de Tataouine (Tunisie).
- Escadafal, R., & Huete, A. (1991). Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 312(11), 1385-1391.
- 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
- Filleron, J. C. (1998). Le paysage, cela existe, même lorsque je ne le regarde pas ou quelques réflexions sur les pratiques paysagères des géographes. *REM. Revue de l'économie méridionale*, 46(183), 275-287.
- 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
- Girard M.C. & Girard C.M., (2010). Traitement des données de télédétection: environnement et ressources naturelles, 2<sup>e</sup> ed. 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. & Rognon, P., (1995). *Désertification et aménagement au Maghreb* (Vol. 8). Editions L'Harmattan.
- 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*, 1
- HAUT-COMMISSARIAT au PLAN, (2004). Population et développement au Maroc : dix ans après la conférence internationale sur la population et le développement (CIPD,1994)
- HAUT-COMMISSARIAT au PLAN, (2006). Prospective « Maroc 2030 » : gestion durable des ressources naturelles et de la biodiversité au maroc, p118
- Hiez, G. Cochonneau, G. Sechet, P. Fernandes, U. M., 1992. Application de la méthode du vecteur régional à l'analyse de la pluviométrie annuelle du bassin versant amazonien, *veille climatique satellitaire n°43*
- Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1417-1434.
- Höpfner, C., & Scherer, D. (2011). Analysis of vegetation and land cover dynamics in north-western Morocco during the last decade using MODIS NDVI time series data. *Biogeosciences*, 8(11), 3359-3373.
- Huete, A., Justice, C., & Van Leeuwen, W. (1999). MODIS vegetation index (MOD13). *Algorithm theoretical basis document*.
- 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.
- Joumady, K. (1999). Urbanisation et disparités spatiales au Maroc. *Méditerranée*, 91(1-2), 93-100.
- Jouve A.M., Belghazi S., Khelfache Y., (1995) La filière des céréales dans les pays du Maghreb : constance des enjeux, évolution des politiques. *Options Méditerranéennes*, B, 14, 1995, 167-192. OAA/FAO, 1999. Le caractère multifonctionnel de l'agriculture et des terroirs. *Conférence Maastricht, Pays Bas*, 1999, 1-14pp.
- Jouve, A. M. (2002). Cinquante ans d'agriculture marocaine. *Du Maghreb au Proche-Orient, les défis de l'agriculture*. Paris: L'Harmattan, 51-71
- Jouve A.-M., Napoléone C., (2011) Modes de régulation de l'usage des terres en Méditerranée et protection des terres agricoles. In *Régulation foncière et protection des terres agricoles en Méditerranée*. *Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches* n. 66, Montpellier CIHEAM, 2011. p. 9-21

- Kosmas, C., Kirkby, M. J., & Geeson, N. (Eds.). (1999). *The Medalus Project: Mediterranean Desertification and Land Use: Manual on Key Indicators of Desertification and Mapping Environmentally Sensitive Areas to Desertification*. Directorate-General Science, Research and Development.
- Kogan, F.N., (1997). Global drought watch from space, *bulletin of the American Meteorological Society*, 78:621–636.
- Kogan, F.N., Gitelson, A., Edige, Z., Spivak, I., and Lebed, L., 2003. AVHRR-Based Spectral Vegetation Index for Quantitative Assessment of Vegetation State and Productivity: Calibration and Validation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(8), pp. 899-906.
- Kosmas, C., Kirkby, M. J., & Geeson, N. (Eds.). (1999). *The Medalus Project: Mediterranean Desertification and Land Use: Manual on Key Indicators of Desertification and Mapping Environmentally Sensitive Areas to Desertification*. Directorate-General Science, Research and Development.
- Knippertz, P., Christoph, M., & Speth, P. (2003). Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 83(1-2), 67-88
- Kundzewicz, Z. W. & Robson, A. J. (2004) Change detection in hydrological records – a review of the methodology. *Hydrol. Sci. J.* **49**(1), 7–19
- [http://iahs.info/hsj/491/hysj\\_49\\_01\\_0007.pdf](http://iahs.info/hsj/491/hysj_49_01_0007.pdf) [Accessed 5 February 2013]
- Laborde, J. P. (2000). Méthodes d'interpolation et géostatistiques pour la cartographie automatique. *Notes de cours, Université de Nice, Sophia Antipolis, CNRS-UMR, 5651*.
- LACOSTE Y., (2001) Le problème des causalités en géographie, in THUMERELLE P. J. (dir.), *Explications en géographie*, Sedes, Dossiers des images économiques du monde, p. 9-20.
- Lambin, E. F. (1996). Change detection at multiple temporal scales: seasonal and annual variations in landscape variables. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(8), 931-938.
- 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. (2002). Le développement agricole durable et la conservation des ressources naturelles au Maroc. *Bulletin Réseau Erosion*, 21, 11-20.
- Laouina A., (2003) Transformation agraire et option agro-environnementales au Maroc in : *local resources and global trades : environments and agriculture in the mediterranean region*, 143 – 157, CIHEAM-IAHB
- 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 Sehoul, région atlantique (Maroc). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 21(4), 309-316.

- Lazarev, G. (2008). L'élevage pastoral dans les hauts plateaux de l'oriental du maroc. *CIHEAM [Les notes d'analyse du CIHEAM report no. 37], Paris, FR.*
- Lebourgeois, F., & Piedallu, C. (2005). Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue forestière française*, 57(4), 331-356.
- Lecerf, R. (2008). Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne) Doctoral dissertation, Université Rennes 2.
- Le Houérou, H. N. (1996). Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments*, 34(2), 133-186.
- Liu, W.T., and Kogan, F.N.,(1996). Monitoring regional drought using Vegetation Condition Index, *International Journal of Remote Sensing*, 17:2761–2782.
- Lopez B. et Leynet A., (2011) Evaluation des tendances d'évolution des concentrations en polluants dans les eaux souterraines : revue des méthodes statistiques existantes et recommandations pour la mise en œuvre de la DCE. *Rapport BRGM/RP-59515-FR*  
[http://www.onema.fr/IMG/pdf/2011\\_032.pdf](http://www.onema.fr/IMG/pdf/2011_032.pdf) [Accessed 5 February 2013]
- Lubès-Niel, H., Masson, J. M., Patrel, J. E. & Servat E. (1998) Variabilité climatique et statistique, Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Rev. des Science de l'eau* 11(3), 383 – 408  
[http://www.rse.inrs.ca/art/volume11/v11n3\\_383.pdf](http://www.rse.inrs.ca/art/volume11/v11n3_383.pdf) [Accessed 5 February 2013]
- Mahé, G. et L'Hôte, Y. (1992). Utilisation de la méthode du vecteur régional pour la description des variables pluviométriques interannuelles en Afrique de l'Ouest et centrale, VIII<sup>e</sup> journées hydrologiques - Orstom - Septembre 1992
- Mahe G., Singla S., Driouech F., Khomsi F. (2011). Analyse de la persistance de ruptures dans des séries pluviométriques au Maroc en fonction de l'échelle spatiale et de la reconstitution des données. *Conférence CIREDD4, Blida, février 2011.*
- Maimouni, S., Bannari, A., El-Harti, A., & El-Ghmari, A. (2011). Potentiels et limites des indices spectraux pour caractériser la dégradation des sols en milieu semi-aride. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37(3), 285-301.
- Mathelot P. (1961). Histoire et réalité de la modernisation du monde rural au Maroc  
 In: *Tiers-Monde*. 1961, tome 2 n°6. pp. 137-168.
- Matheron, G. (1969). *Le krigeage universel*. École nationale supérieure des mines de Paris.
- 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
- Mathieu, C., Pieltain, F., Asseline, J., Chossat, J. C., & Valentin, C. H. (1998). *Analyse physique des sols: Méthodes choisies* (p. 275). Paris: Lavoisier Tec & Doc.
- Mercier, D. (2010). *Le commentaire de paysage en géographie physique – documents et méthodes*, collection U, Armand Colin
- Michel, C. Ruellan, A., (1967). L'agriculture et les forêts au Maroc, *cahier de la recherche agronomique n°24 : congrès de pédologie méditerranéenne 1966. Madrid* pp. 103-140

- Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire (1992). Inventaire des ressources fourragères, *projet stratégie de développement des terres de parcours au Maroc, phase I situation actuelle des terres de parcours* pp110
- Meylan, P. (1986) Régionalisation de données entachées d'erreurs de mesure par krigeage, Application à la pluviométrie In: *Hydrol. Contin.*, vol 1, 25-34
- Mohsine, Y. (2009). Application du magnétisme de l'environnement pour la caractérisation de l'état d'évolution et/ou de dégradation des sols: Application aux sous bassins versants de Mezguida et Ait Azzouz de Bouregreg. Thèse de doctorat, Université Mohammed V Agdal
- Moukhchane M., 2002. Erosion et envasement des barrages: cas du bassin versant Nakhla (Rif occidental, Maroc). Colloque sur l'eau, 24/25 octobre 2002. Université Abdelmalek Essaidi, Tétouan, Maroc
- Moussa, I. B., Maiga, O. F., Ambouta, J. M. K., Sarr, B., Descroix, L., & Adamou, M. M. (2009). Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin-versant rural sahélien. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 20(1), 145-152.
- Moyen-Orient, B. R., & du Nord, A. (2003). Royaume DU Maroc évaluation du cout de la dégradation de l'environnement. p40
- Narjisse H., (2006) les écosystèmes agricoles et pastoraux : état des lieux et voix d'évolution, *50 ans de développement humain au Maroc et perspectives 2025*  
[http://doc.abhatoo.net.ma/DOC/IMG/pdf/ecosystemes\\_agricoles\\_et\\_pastoraux-2.pdf](http://doc.abhatoo.net.ma/DOC/IMG/pdf/ecosystemes_agricoles_et_pastoraux-2.pdf) [Accessed 5 February 2013]
- Neboit R., (1991). L'homme et l'érosion : l'érosion des sols dans le monde, *fasc 34*, pp.269
- Paturel J-E., Servat E., Kouame B., Boyer J-F., Lubes H., Masson J-M., 1995  
 La sécheresse en Afrique de l'ouest non sahélienne (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). *Sécheresse*, vol. 6, n°1, P. 95-102.
- Pintus F. (2009) L'agriculture sous contrainte environnementale et climatique. In *Perspectives des politiques agricoles en Afrique du Nord. Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches*, n. 64 Paris CIHEAM, 2009. p. 195-203
- REEM (1998) *Rapport sur l'Etat de l'Environnement au maroc*
- Voiron-Canicio, C. (2012). L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géoprospective. *L'Espace géographique*, (2), 99-110.
- Wischmeier, W.H. 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 31 (1): 5-9.
- Richard, J. F. (1989). *Le paysage: un nouveau langage pour l'étude des milieux tropicaux*. Ed. de l'ORSTOM.
- Roose, É. (2004). Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive--Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(1), 9-18.
- Roose, E. (2010). La lutte antiérosive conventionnelle en fonction des processus et des facteurs de l'érosion hydrique. In *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéenne*, ed. IRD, 2010 p. 47-78

- Rosensweig C., Tubiello F. N., 1997, Impacts of global climate change on Mediterranean : current methodologies and future directions, *Mitigation, adaptation and Strategies for Global Climate Change*, vol 1, pp 219- 232.
- Roy, D. P. (1997). Investigation of the maximum normalized difference vegetation index (NDVI) and the maximum surface temperature (Ts) AVHRR compositing procedures for the extraction of NDVI and Ts over forest. *International Journal of Remote Sensing*, 18(11), 2383-2401.
- Sadiki A., Bouhlassa S., J., Auajjar J., Faleh A., Macaire J.J. (2004). Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab, *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 26, 69-79
- Sebbar, A., Badri, W., Fougrach, H., Hsaine, M., & Saloui, A. (2011). Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 22(3), 139-148.
- Singh, R. P., Roy, S., & Kogan, F. (2003). Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing*, 24(22), 4393-4402.
- Sobrino, J. A., & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 353-366
- Somot, S. (2005). Modélisation climatique du bassin méditerranéen: variabilité et scénarios de changement climatique. Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III
- Stour, L., & Agoumi, A. (2008). Sécheresse climatique au Maroc durant les dernières décennies. *Hydroécologie Appliquée*, 16, 215-232.
- Sultan, B. (2011). L'étude des variations et du changement climatique en Afrique de l'ouest et ses retombées sociétales, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Pierre et Marie Curie
- Swearingen, W. D. (1987). Terre, politique et pouvoir au Maroc. *Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée*, 45(1), 41-54.
- Zomer, R. J., Trabucco, A., & Ustin, S. L. (2009). Building spectral libraries for wetlands land cover classification and hyperspectral remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 90(7), 2170-2177.
- Tribak, A., El Garouani, A., & Abahrour, M. (2009). Evaluation quantitative de l'érosion hydrique sur les terrains marneux du PréRif oriental (Maroc): cas du sous-bassin de l'oued Tlata. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 20(4), 333-337.
- Tucker, CJ, Pinzon, JE, Brown, ME, Slayback, DA, Pak, EW, Mahoney, R., Vermont, EF and El Saleous, N. (2005): an extended AVHRR 8km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International journal of remote sensing* vol 26:20 pp. 4485-5598
- Van Dijck, S. J., Laouina, A., Carvalho, A. V., Loos, S., Schipper, A. M., Van der Kwast, H., & Ritsema, C. J. (2006). Desertification in northern Morocco due to effects of climate change on groundwater recharge. In *Desertification in the Mediterranean region. A Security Issue* (pp. 549-577). Springer Netherlands.

Watson, R. T. coll.(dir.), 2001. Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse. Rapport GIEC, Genève, Suisse, 184 p

World Resources Institute, PNUE, PNUD, Banque mondiale, (1998). Forêts et couverture terrestre. In Centre de recherches pour le développement international et Comité 21, éd. Ressources mondiales 1996-97. SI : sn, 1998 : 219-43

Yassin, M., El Bahi, S., Renard, K., & EL WARTITI, M. (2009). Application du modèle universel de perte en terre révisé (RUSLE) aux terrains forestiers du Plateau Central. In *Annales de la recherche forestière au Maroc* (Vol. 40, pp. 50-64). Centre national de la recherche forestière.

Yue, S. and Pilon P., (2004) A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection, *Hydrol. Sci. J.*,49 (1), 21–37

[http://iahs.info/hsj/491/hysj\\_49\\_01\\_0021.pdf](http://iahs.info/hsj/491/hysj_49_01_0021.pdf) [Accessed 5 February 2013]

Zeggaf TA, Nsarellah N, Hadrabach D, Baidani A (2002). Caractérisation de la variabilité spatiale du climat marocain en relation avec la productivité des céréales à petites graines. *Rev. H.T.E.* n° 124:84-92

Zehtabian, G. H., Emam, A. R., & Khosravi, H. (2005). The approach of desertification mapping using Medalus methodology in Iran. *Desert, I.*

### **Quelques sites utilisés**

<http://www.cgiar-csi.org/>

<http://kids.fao.org/glipha/>

<http://glcf.umd.edu/data/gimms/>

[www.water.gov.ma](http://www.water.gov.ma)

<http://tribusdumaroc.free.fr/>

<http://www.cru.uea.uk/cru/info/modelcc/>

<http://www.ensembles-eu.org/>

# Table des matières

<b>Résumé</b> .....	<b>6</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>9</b>
1. Contexte de l'étude et motivation scientifique.....	10
1.1. Des activités agricoles et pastorales soumis à une baisse de la pluviosité .....	10
1.2. Activités agricoles – disponibilité de la ressource en eau – pression sur le milieu .....	14
1.3. Activités pastorales – dégradation du milieu physique .....	17
2. Problématique et objectif de l'étude .....	18
2.1. Problématique .....	18
2.2. Objectifs de l'étude .....	21
3. Méthodologie générale de l'étude.....	22
<b>Chapitre I : Cadre géographique de la dynamique de la végétation et de l'occupation du sol</b> .....	<b>24</b>
Introduction .....	24
1. Cadre physique du bassin versant du Bouregreg .....	25
1.1. Cadre géomorphologique (Beudet, 1969 ; Marghich, 2004) .....	25
1.2. Cadre géologique et lithologique (Moshine, 2009 ; Atlas du Maroc, 2002) .....	26
1.3. Cadre pédologique .....	26
1.4. Cadre hydro-climatique du bassin versant du Bouregreg .....	29
1.5. La couverture végétale du bassin versant du Bouregreg (Berkat et Tazi, 2004 ; Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, 1992) .....	31
1.6. Importance du cadre physique du bassin versant du Bouregreg dans la dynamique de la végétation .....	33
2. Impact du cadre politique et économique local sur la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg (Michel et Ruellan, 1967 ; Bouderbala, 1999).....	33
2.1. Les modes de faire-valoir .....	34
2.2. La répartition de la propriété.....	35
2.3. Un calendrier agricole axé sur la céréaliculture et l'élevage extensif .....	36
<b>Chapitre II : Dynamique saisonnière et pluriannuelle de la végétation de 1980 à 2009 à partir d'images de basses résolution spatiale</b> .....	<b>40</b>
Introduction .....	40
1. Données et techniques d'analyse de la dynamique de la couverture végétale .....	41
1.1. Données.....	41
1.2. Techniques d'analyse de l'évolution de la végétation.....	42
1.2.1. Traitements des images de basse résolution spatiale : les indices de végétation .....	43
1.2.2. L'analyse statistique de la dynamique spatio-temporelle de la végétation .....	44
2. Détection et suivi des saisons culturales : analyse par maille .....	49

2.1.	Dynamique pluriannuelle globale de la productivité végétale .....	49
2.2.	Une baisse de l'activité végétale en période estivale .....	51
2.2.1.	Le début de la saison agricole : septembre à décembre .....	51
2.2.1.	Le milieu de la saison agricole : janvier et février .....	58
2.2.1.	Pendant la période de maturité des céréales : mars et avril .....	64
2.2.2.	La fin de la saison agricole : mai-juin-juillet-août.....	65
	Conclusion.....	72
<b>Chapitre III : Vulnérabilité de la végétation et des sols en relation avec les variabilités climatiques et les activités agropastorales .....</b>		<b>74</b>
	Introduction.....	74
1.	Techniques d'analyse de l'évolution de l'occupation du sol dans sa relation avec la variabilité climatique et les activités agropastorales.....	75
1.1.	Exploration et spatialisation des données pluviométriques .....	75
1.2.	Elaboration de la carte d'occupation du sol .....	78
1.2.1.	Prétraitement des images pour la classification par arbre de décision (LANDSAT).....	78
1.2.2.	Construction de l'arbre de décision de la classification des images LANDSAT .....	81
1.3.	Cartographie de la dégradation des sols par analyse des indices spectraux .....	82
1.3.1.	Justification du choix de la méthode .....	82
1.3.2.	Extraction de l'information sur l'évolution des sols du bassin à partir des images Landsat ...	84
2.	Les facteurs climatiques de la dynamique de la végétation .....	87
2.1.	Dynamique spatiotemporelle des précipitations de 1980 à 2009 .....	87
2.1.1.	Evolution interannuelle de la pluviométrie du bassin.....	87
2.1.2.	Evolution saisonnière de la pluviométrie .....	88
2.2.	Analyse de l'impact de la variabilité climatique sur le dynamisme de la végétation dans le bassin versant du Bouregreg.....	93
2.2.1.	Caractérisation générale de la dynamique de l'humidité annuelle .....	93
2.2.2.	Evolution saisonnière pluriannuelle de l'humidité du sol dans le bassin .....	94
2.2.3.	Analyse de la corrélation variabilité climatique – production et masses végétales .....	104
3.	Les facteurs anthropiques de la dynamique de la végétation .....	114
3.1.	Elaboration de la carte d'occupation du sol .....	114
3.1.1.	Prétraitement des images pour la classification par arbre de décision (LANDSAT).....	114
3.1.2.	Construction de l'arbre de décision pour le traitement des images LANDSAT .....	118
3.2.	Une pression démographique de plus en plus importante sur le littoral et les espaces agricoles ...	120
3.2.1.	Les facteurs de la dynamique et de la répartition de la population marocaine .....	120
3.2.2.	Le bassin versant du Bouregreg, un échantillon de la dynamique démographique des zones agricoles favorables du Maroc .....	121
3.3.	Les transformations des paysages végétaux .....	125
3.3.1.	Des sols de plus en plus dénudés.....	125
3.3.2.	Une réduction qualitative et quantitative des surfaces forestières .....	125

3.3.3.	Une augmentation des superficies céréalières .....	135
4.	La dégradation des sols : une résultante de la combinaison des facteurs climatiques et anthropiques ...	136
4.1.	Des sols fragiles .....	136
4.2.	Un bassin marqué par d'importantes dégradations des sols de 1980 à 2009.....	138
4.3.	L'aval du bassin versant du bouregreg, une exemple des pressions anthropiques et climatiques ..	144
<b>Chapitre IV : Risques et scénarios futurs de dégradation du bassin versant du Bouregreg, horizon 2050 et 2100</b>		<b>147</b>
.....		
	Introduction .....	147
1.	Analyse du risque de dégradation des terres à moyen terme.....	148
1.1.	Une méthodologie SIG inspirée du projet MEDALUS (MediterraneanDesertification and Land Use) 148	
1.2.	L'indice de la qualité du sol (IQS) .....	149
1.3.	L'Indice de la Qualité de la Végétation.....	149
1.4.	L'Indice de la Qualité du Climat (IQC) .....	151
2.	Analyse des scénarios de changement climatique du bassin et impact potentiel sur l'agriculture.....	157
2.1.	Les modèles climatiques régionaux utilisés : ALADIN, CRCM, RACMO .....	157
2.2.	Comparaison entre les données des modèles et les données observées.....	159
2.3.	Evolution des précipitations et des températures jusqu'en 2050 et 2100 .....	160
2.3.1.	Une accentuation de la baisse des quantités pluviométriques annuelles .....	160
2.3.2.	Une augmentation continue des températures .....	162
2.4.	Evolution bioclimatique (2050, 2100) du bassin du Bouregreg .....	163
2.4.1.	Le changement interannuel futur du climat dans le bassin versant du Bouregreg .....	163
2.4.2.	Le changement interannuel futur du climat dans le bassin versant du Bouregreg .....	164
2.4.3.	Une agriculture pluviale amenée à disparaître.....	165
<b>Conclusion générale et perspective.....</b>		<b>170</b>
	Références bibliographiques .....	173
<b>Table des matières.....</b>		<b>183</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>		<b>186</b>
<b>Liste des figures.....</b>		<b>187</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 : Besoins fourrager du cheptel dans le bassin versant du Bouregreg</b>	18
Tableau 2: Résultats du planimétrage des formations lithologiques du bassin versant du Bouregreg	26
Tableau 3: Echantillon d'une image NDVI de NOAA en format texte exporté sous excel	46
Tableau 4: Tableau statistique récapitulatif de l'évolution temporelle du NDVI par quinzaine	52
Tableau 5: Les séquences d'évolution temporelle de la végétation de 1982 à 2009 pour les mois de janvier et de février	59
Tableau 6: Dates de rupture des séries chronologiques au mois de janvier et février	62
Tableau 7: Tableau récapitulatif des résultats de la méthode du vecteur régional des stations de la zone de Rabat (mois de janvier 1982-2000)	76
Tableau 8: statistique descriptive de l'application de la méthode de krigeage universel pour le mois de janvier	77
Tableau 9: Evaluation de la séparabilité des zones d'entraînement	80
Tableau 10: Matrice de confusion des classifications de 1985 et 2007	86
Tableau 11: Récapitulatives de l'évolution interannuelle de la pluviométrie de 1980 à 2006	88
Tableau 12: Récapitulatif de la régression linéaire entre la pluviométrie et la végétation de 1982 à 2009	106
Tableau 13: Evaluation de la séparabilité des zones d'entraînement	117
Tableau 14: Statistique récapitulatif de la classification des images de Landsat du bassin	143
Tableau 15: Paramètres de caractérisation de l'indice de la qualité de la végétation	151
Tableau 16: Classe de dégradation des sols (Kosmas et al. 1999)	156
Tableau 17: Caractéristique des MCR utilisés	159
Tableau 18: Statistiques de comparaison entre les données de précipitation des stations et les données simulées par les modèles	160
Tableau 19: Statistique de rupture des séries pluviométriques des MCR	162

## Liste des figures

Fig.1 : Localisation du bassin versant du Bouregreg .....	10
Fig. 2: Processus de dégradations des espaces agricoles et forestiers dans le bassin versant du Bouregreg .....	11
Fig. 3: Evolution temporelle des précipitations de la zone semi-aride du Maroc (Benseddik et Benabdelli, 2000) .....	12
Fig. 4 : Dépendance du PIB des aléas de la production agricole.....	15
Fig. 5: Les grands ensembles biogéographiques du Maroc.....	18
Fig.6: Les grands ensembles de relief du Maroc.....	20
Fig.7: Carte hypsométrique du bassin versant du Bouregreg.....	20
Fig.8 : Schéma méthodologique général .....	23
Fig. 9: unités géomorphologiques du bassin versant du Bouregreg : les paliers sont limités par les courbes de niveau sur la figure (Beudet 1969) .....	25
Fig. 10: Structure géologique du bassin versant du Bouregreg .....	27
Fig. 11: Carte pédologique du bassin versant du Bouregreg .....	28
Fig.12 : Position des masses d'air au Maroc.....	30
Fig.13: Variation spatiale de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin du Bouregreg (moyenne de 1980 à 1999) .....	30
Fig.14: Principales végétations du Bassin du Bouregreg .....	32
Fig. 15: Division administrative et tribale du Maroc .....	34
Fig. 16: Calendrier culturel du bassin versant du Bouregreg .....	37
Fig.17: Pâturation de l'orge de vaches à lait (Maaziz) .....	38
Fig. 18: Pâturation sur jachère d'un troupeau d'ovin, caprins et bovin au printemps (Maaziz) .....	38
Fig. 19 : Schéma méthodologique général .....	42
Fig. 20 : Spectre de réflectance d'une feuille verte.....	43
Fig.21: Résultat du test d'homogénéité de Pettitt appliqué au pixel de la position 182 .....	47
Fig.22: Schéma méthodologique d'analyse des images de NDVI de NOAA du bassin du Bouregreg.....	48
Fig.23: Etapes d'analyse des images NDVI de MODIS : l'image (a) représente le coefficient de variation interannuel du NDVI pour les dates du 23avril 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.....	49
Fig.24: Evolution interannuelle de la végétation du bassin du Bouregreg de 1982 à 2009 (somme de l'ensemble des pixels des images de NDVI par année ou par 15 jours) .....	50
Fig.25: Evolution interannuelle de la végétation du bassin du Bouregreg selon les saisons culturelles .....	51
Fig. 26: Graphique du test de rupture de la série chronologique du NDVI des saisons sèches.....	51
Fig. 27: 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 .....	55
Fig. 28: Evolution spatio-temporelle de la végétation de la première moitié du mois de septembre à la première moitié du mois de mars (NOAA 1982-2009).....	56

<b>Fig. 29:</b> Evolution spatio-temporelle de la végétation de la deuxième moitié du mois de mars à la deuxième moitié du mois d'août (NOAA 1982-2009) .....	57
Fig.30: Tendance évolutive de la végétation dans le bassin versant du Bouregreg de 1982 à 2009 .....	58
Fig. 31: Variation de la couverture végétale du bassin du Bouregreg en début de saison agricole (MODIS 2000-2009) .....	60
Fig.32: Carte d'occupation du sol en début de saison agricole (MODIS 2000-2009) .....	61
Fig.33: Courbe d'évolution du NDVI : moyenne annuelle de l'ensemble des pixels aux mois de janvier et février .....	62
Fig. 34: Variation de la couverture végétale du bassin du Bouregreg en milieu de saison agricole (MODIS 2000-2009) .....	63
Fig. 35: Carte générale d'occupation du sol à la première moitié de janvier .....	63
Fig.36: Courbe d'évolution du NDVI : moyenne annuelle de l'ensemble des pixels aux mois de mars et avril ...	64
<b>Fig.37:</b> Variation de la couverture végétale en fonction de la nature de l'occupation du sol aux mois de mars et avril (MODIS 2000-2009) .....	66
Fig.38: Courbe d'évolution interannuelle du NDVI en fin de saison agricole .....	67
Fig. 39: Résultat du test de rupture de Pettitt pour les séries de NDVI des quinze jours de mai à juillet .....	69
Fig.40: Variation de la couverture végétale dans le bassin versant du Bouregreg de mai à juillet (MODIS 2000-2009) .....	70
Figure 41: Carte générale d'occupation du sol en fin de saison agricole (MODIS 2000 à 2009) .....	71
<b>Fig. 42 :</b> Courbe représentant les maxima et minima de chaque série temporelle de la période 1982- .....	73
Fig. 43: Unités climatiques du bassin versant du Bouregreg (en vert sur la carte de droite les unités modifiées à partir de celui de Thiessen en noir : les unités de Casablanca et S. Slimane ont été fusionnées aux autres) .....	76
<b>Fig.44:</b> Indice du vecteur et des stations du mois de janvier (méthode Brunet Moret) .....	77
Fig. 45 : Espace de végétation éparse se confondant au sol nu sur l'image LANDSAT de printemps : a = photo ; b = image satellite composition 432 ; c = signature spectrale .....	78
Fig. 46: Contraste de densité de végétation sur les versants : à gauche le versant exposé au Nord, à Droite le versant exposé au Sud .....	79
Fig. 47: Deux portions identiques des scènes du 11 mars et du 01 juillet 2007 .....	80
Fig. 48: Délimitation des formations forestières du bassin : image classifiée binaire avec confusion de classe à droite et image corrigée à gauche .....	81
Fig. 49 : Localité de Ain El Aouda (image ACP4) .....	81
Fig. 50: Arbre de décision de la classification de l'image LANDSAT du 11 mars 2007 .....	83
Fig. 51: les étapes de la classification : I/ échantillonnage pour la classification et diagramme (bidimensionnel de l'échantillon (A) et classes de l'échantillon (B)) : eau (rouge), Jaune (non dégradé), vert modérément dégradé ; II/ Résultats de la sélection .....	85
<b>Fig. 52:</b> Courbe d'évolution interannuelle de la pluviométrie dans l'espace du Bassin du Bouregreg .....	89
Fig. 53: Régime pluviométrique de l'espace du bassin du Bouregreg .....	90
Fig.54: Evolution interannuelle des précipitations mensuelles dans le bassin du Bouregreg .....	91
<b>Fig. 55:</b> Test d'homogénéité de Pettitt au mois d'octobre .....	92

Fig. 56 : Caractérisation de l'évolution interannuelle des précipitations à travers l'Indice Pluviométrique Standardisé.....	95
Fig. 57: Evolution spatio-temporelle de l'humidité au mois d'octobre.....	97
Figure 58: Evolution spatio-temporelle de l'humidité au mois de novembre .....	97
Fig. 59: Evolution temporelle de l'humidité au mois de janvier .....	98
Fig. 60: Evolution spatio-temporelle de l'humidité au mois de mars .....	98
Fig.61: Evolution spatio-temporelle de l'humidité au mois d'avril .....	99
Fig. 62: Dynamique spatio-temporelle des conditions de végétation au mois d'octobre .....	100
Fig. 63: Dynamique temporelle du VCI au mois d'octobre .....	100
<b>Fig. 64:</b> Répartition spatiale de la dégradation de la végétation liée aux conditions hydriques des sols en octobre .....	101
Fig. 65: Evolution des températures de surface au mois d'octobre et d'avril .....	101
Fig. 66: Dynamique spatio-temporelle des conditions de végétation dans le bassin de 2000 à 2009 .....	103
<b>Fig. 67:</b> Dynamique spatio-temporelle des conditions de végétation au mois de juin.....	104
Fig. 68: Dynamique temporelle du VCI au mois de juin .....	104
Fig. 69: Fréquence des décades pluviométriques nulles .....	107
Fig. 70: Détection de périodes sèches dans les campagnes agricoles d'années sèches à Rabat .....	107
Fig. 71: Principales productions céréalières du bassin du Bouregreg (moyenne de 1980 à 2009).....	108
Fig. 72: Production d'orge dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009.....	110
Fig. 73: Intensité des sécheresses pour la culture de l'orge de 1980 à 2009 .....	111
<b>Fig.74:</b> Production de blé dur dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009.....	111
Fig. 75: Intensité des sécheresses pour la culture de blé dur de 1980 à 2009 .....	112
Fig. 76: Production de blé tendre dans le bassin versant du Bouregreg de 1980 à 2009.....	112
Fig. 77: Intensité des sécheresses pour la culture de blé tendre de 1980 à 2009.....	113
Fig. 78: Proportion du bassin touché par la sécheresse agricole selon les campagnes.....	113
Fig. 79: Evolution des superficies cultivées pour les principales céréales à Khémisset .....	114
Fig. 80 : Espace de végétation épars se confondant au sol nu sur l'image LANDSAT de printemps : a = photo ; b = image satellite composition 432 ; c = signature spectrale.....	114
Fig. 81: Contraste de densité de végétation sur les versants : à gauche le versant exposé au Nord, à Droite le versant exposé au Sud.....	115
Fig. 82: Deux portions identiques des scènes du 11 mars et du 01 juillet 2007.....	116
Fig. 83: Délimitation des formations forestières du bassin : image classifiée binaire avec confusion de classe à droite et image corrigée à gauche.....	117
Fig. 84 : Localité de Ain El Aouda (image ACP4) .....	117
Fig. 85: Arbre de décision de la classification de l'image LANDSAT du 11 mars 2007 .....	119
Fig. 86: Répartition de la population dans le bassin versant du Bouregreg .....	122
Fig. 87: Taux d'accroissement moyen annuel de population du bassin du Bouregreg .....	123
Fig. 88: Extension urbaine de la zone de Rabat, commune d'Ain El Aouda : au premier plan un terrain viabilisé dans le cadre d'une extension continue de la ville.....	123
Fig. 89: Densité de population par surface agricole (RGA 1996).....	124

Fig. 90 : Dispersion de l'habitat dans le paysage rural, (commune de Maaziz) .....	124
Fig. 91: Graphique de l'évolution des types d'occupation du sol aux dates de 1985, 2000 et 2010 .....	127
Fig. 92: Carte d'occupation du sol en 1985 .....	128
Fig. 93: Carte d'occupation du sol en 2000 .....	129
Fig. 94: Carte d'occupation du sol en 2010 .....	130
Fig. 95: Carte de l'impact du réseau de route sur la disparition des forêts .....	131
Fig. 96: carte de densité de route dans le bassin versant du Bouregreg .....	131
Fig. 97 : Schéma des facteurs contribuant à la transformation du paysage végétal .....	132
Fig. 98 : Densité de cheptel dans le bassin versant du Bouregreg.....	133
Fig. 99 : Pâture de bovin sous chêne liège à la périphérie de Rabat .....	134
Fig. 100: Chèvres (arrière-plan) dans un parcours forestier sur pente accidenté. au premier plan (à gauche) apparaît une rigole.....	134
Fig. 101: Troupeau de chèvres autour d'un point d'Eau, à l'arrière-plan l'espace forestier de pâturage .....	134
Fig. 102: Evolution des superficies et des productions dans les provinces de Khemisset (centre du bassin) et de Khouribga (Sud du bassin).....	137
Fig. 103: 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) entament des sols fragiles (Roose, 2010) .....	138
Fig. 104: Graphique des classes de dégradation du sol (classification d'image de Landsat) .....	138
Fig. 105: Evolution de la dégradation des sols dans le bassin versant du Bouregreg .....	139
Fig. 106: Espace agricole céréalier marqué par l'érosion en nappe (photo de gauche), sur le photo de droite (partie supérieure de la photo de gauche) apparaît en arrière-plan l'épaisseur originelle du sol protégé ici par le matorral .....	140
Fig. 107: Matorral servant de parcours pour le bovin (aval du bassin). Au premier plan, la surface est entamée par l'érosion hydrique suite aux activités pastorales. Au second plan un troupeau de bovin.....	141
Fig. 108: Espace agricole sur pente forte marqué par des griffures importantes, dans le coin supérieur droit se trouve un semi de blé menacé .....	141
Fig. 109: Ravine à l'intérieur d'une forêt dégradé au centre du bassin (zone de pâturage) .....	141
Fig. 110: 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 .....	142
Fig. 111: 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).....	142
Fig. 112: Exemple d'espace hydromorphe où la végétation saisonnièrement asphyxiée a disparue .....	143
Fig. 113: Erosion de berge, en bas à gauche l'effondrement d'une digue de protection.....	143
Fig. 114: Culture de fève sur sol équilibré. On observe une absence de d'érosion linéaire malgré la topographie accidentée.....	144
Fig. 115: Carte d'occupation du sol de l'aval du bassin versant du Bouregreg en avril 2008 (SPOT 5) .....	145
Fig. 116: Paramètres utilisés pour caractériser et cartographier la sensibilité à la dégradation .....	148
Fig. 117: Caractérisation de la qualité du sol .....	150
Fig. 118: Caractérisation de la qualité de la végétation.....	152

Fig.119: Caractérisation de la qualité du climat.....	154
Fig. 120: Caractérisation de la qualité anthropique.....	155
Fig. 121: Carte du risque de dégradation des sols dans le bassin versant du Bouregreg.....	157
Fig. 122: Schéma du concept de réduction d'échelle (d'après D. Viner, Climatic Research Unit – University of East Anglia, Royaume Uni, <a href="http://www.cru.uea.uk/cru/info/modelcc/">http://www.cru.uea.uk/cru/info/modelcc/</a> ) .....	158
Fig. 123: Zone de couverture des MCR du projet ENSEMBLE .....	159
Fig. 124: Courbe d'évolution comparative des précipitations moyennes annuelles des MCR et des stations météorologiques .....	161
Fig. 125: Evolution interannuelle des précipitations simulées jusqu'en 2050 et 2100 .....	161
Fig. 126: Evolution des températures moyennes annuelles simulées jusqu'en 2050 et 2100 .....	162
Fig. 127: courbes d'évolution pluriannuelle de l'indice de sécheresse de De Martone.....	164
Fig. 128: Evolution de la végétation déterminée à partir des températures de surface des images MODIS et du MCR CNRM.....	168