

Mémoire de Master de 2<sup>ème</sup> année parcours Recherche Eau et Environnement (R2E)  
Mention Biologie Géologie Agrossources Environnement – Sciences Pour l'Environnement  
Département des Sciences de la Terre de l'Eau et de l'Environnement de Montpellier

**« Impact du changement climatique global  
sur les régimes hydroclimatiques au Maroc :  
tendances, ruptures et effets anthropiques sur les écoulements »**



par Singla Stéphanie

## Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier vivement Mr Eric Servat, directeur du laboratoire HydroSciences et du Master R2E, pour m'avoir accueilli dans ce master et pour m'avoir accordé de son temps. Merci encore pour ses précieux conseils tout au long de l'année pour mon avenir professionnel.*

*Merci à Gil Mahé, mon tuteur, pour m'avoir permis de réaliser un travail de recherche très intéressant. Je tiens également à le remercier pour son soutien, son aide, ainsi que ses conseils tout au long de ce stage et pour la continuité de mon avenir dans la recherche.*

*Je remercie également Claudine Dieulin, pour m'avoir aussi encadrée durant ce stage, pour son aide et son travail (calcul des whc, aide en SIG...), son soutien et ses conseils durant ce stage de recherche.*

*Merci encore à Nathalie Rouché, pour sa collaboration et son aide pour la constitution de la base de données, mais aussi pour les problèmes rencontrés sur les logiciels d'interpolation et de modélisation.*

*Je tiens à remercier également Mme Fatima Driouech et Mme Fatima Zohra El Guelai, travaillant à la Direction Météorologique Nationale du Maroc au Service des Etudes Climatiques, pour leurs collaborations et leurs conseils scientifiques.*

*Merci aussi à Madame Sandra Ardoin-Bardin, pour nous avoir autorisé à récupérer les données d'évapotranspirations potentielles calculées par Marianne, mais aussi pour nous avoir guidé pendant les problèmes rencontrés lors de l'interpolation et de la modélisation.*

*Mes remerciements vont aussi à Mlle Marianne Milano, également stagiaire en M2 R2E, pour son aide au cours du stage (données d'évapotranspiration potentielles, comparaison de résultats de modélisation...). Mais je tiens aussi à la remercier pour son soutien, son amitié, ses conseils et les moments de rigolade tout au long de ce stage.*

*Je tiens à remercier Monsieur Philippe Vauchel travaillant à l'IRD, qui a développé le logiciel Hydraccess. Merci pour son aide et ses conseils sur l'utilisation des vecteurs régionaux sur Hydraccess.*

*Merci aussi à Mr François-Noël Cres, pour, avec certains de mes camarades, nous avoir accordés de son temps et donner des cours de programmation sur VBA. Son aide fut précieuse pour les traitements de données sur Excel.*

*Merci à Sébastien, Viviane, Adriana, Vanessa, Grégory, Laurianne, tous stagiaires au laboratoire HydroSciences Montpellier, pour m'avoir supporté tout au long de ce stage. Merci aussi pour leur soutien, pour l'entraide dont ils font preuve, pour leurs conseils, et également pour les moments de détente entre midi et deux ou à la pause de 16 heures.*

*Enfin, je tiens à remercier mes parents et Christophe pour être toujours présents, leurs encouragements à continuer dans mon travail et pour avoir supporté mon stress au quotidien.*

# SOMMAIRE

<b>Remerciements.....</b>	<b>p1</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>p5</b>
<b>CHAPITRE I – CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE.....</b>	<b>p6</b>
<b>I.A. Géographie et climat du Maroc</b>	<b>p6</b>
<i>I.A.1. Eléments de climatologie : relief et plaine, pluviométrie et température moyennes</i>	<i>p6</i>
<i>I.A.2. Variabilité climatique</i>	<i>p6</i>
<i>I.A.3. Occupations des sols</i>	<i>p7</i>
<b>I.B. Ressources en eau</b>	<b>p8</b>
<i>I.B.1. Inventaire et cartographie</i>	<i>p8</i>
I.B.1.a. <u>Eaux superficielles : réseaux d'observations, barrages et zones irriguées</u>	<i>p8</i>
I.B.1.b. <u>Eaux souterraines : principaux aquifères et caractéristiques majeurs</u>	<i>p9</i>
<i>I.B.2. Tendances et variabilités observées</i>	<i>p10</i>
I.B.2.a. <u>Pluies</u>	<i>p10</i>
I.B.2.b. <u>Débits</u>	<i>p11</i>
I.B.2.c. <u>Eaux souterraines : exploitations et surexploitations</u>	<i>p12</i>
I.B.2.d. <u>Impacts sur les écoulements et transports associés : érosion hydrique et envasement des barrages</u>	<i>p12</i>
<b>I.C. Caractérisation de la variabilité climatique au Maroc</b>	<b>p13</b>
<i>I.C.1. Relations entre précipitations et climat global</i>	<i>p13</i>
<i>I.C.2. Régionalisation climatique</i>	<i>p15</i>
<i>I.C.3. Exemples de périodes de sécheresse au Maroc, particularités régionales</i>	<i>p16</i>
<b>I.D. Projections climatiques</b>	<b>p17</b>
<i>I.C.1. Modèles globaux</i>	<i>p17</i>
<i>I.C.2. Régionalisation du changement climatique</i>	<i>p18</i>
I.C.2.a. <u>Désagrégation ou « downscaling »</u>	<i>p18</i>
I.C.2.b. <u>Applications directes des modèles globaux à des bassins versants du Maroc</u>	<i>p19</i>
<b>CHAPITRE II – DONNEES HYDROCLIMATIQUES.....</b>	<b>p20</b>
<b>II.A. Constitution de la banque de données</b>	<b>p20</b>
<i>I.A.1. Origine des données</i>	<i>p20</i>
<i>I.A.2. Qualité et critique des données</i>	<i>p20</i>
<i>I.A.3. Localisation des stations pluviométriques</i>	<i>p20</i>
<b>II.B. Régionalisation climatique</b>	<b>p21</b>
<i>II.B.1. Définition des unités climatiques ou « régions »</i>	<i>p21</i>
<i>II.B.2. Régionalisation par la méthode du vecteur régional</i>	<i>p21</i>
II.B.2.a. <u>Définition du vecteur régional et méthode appliquée</u>	<i>p22</i>
II.B.2.b. <u>Avantages et limites</u>	<i>p22</i>
II.B.2.c. <u>Elaboration des vecteurs régionaux</u>	<i>p23</i>
II.B.2.d. <u>Résultats : indices annuels pluviométriques</u>	<i>p23</i>
<b>II.C. Tests de détection des ruptures sur les séries chronologiques</b>	<b>p26</b>
<i>II.C.1. Description et définition des différents tests utilisés</i>	<i>p26</i>

II.C.2. <i>Interprétation et analyse des résultats</i>	p28
II.C.2.a. <i>« Macro » « Atlantique Nord »</i>	p28
II.C.2.b. <i>« Macro » « Atlantique Sud »</i>	p29
II.C.2.c. <i>« Macro » « Méditerranée »</i>	p29
II.C.2.d. <i>« Macro » « Relief Atlas »</i>	p29
II.C.2.e. <i>« Macro » « Présaharien »</i>	p31
<b>II.D. Synthèse sur les données hydroclimatiques</b>	<b>p32</b>
II.D.1. <i>Qualité et critique des données</i>	p32
II.D.2. <i>Régionalisation climatique</i>	p33
II.D.3. <i>Ruptures</i>	p33
<b>CHAPITRE III-DONNEES HYDROLOGIQUES.....</b>	<b>p35</b>
<b>III.A. Constitution de la banque de données</b>	<b>p35</b>
III.A.1. <i>Origine des données</i>	p35
III.A.2. <i>Qualité et critique des données</i>	p35
III.A.3. <i>Localisation des stations hydrologiques</i>	p35
<b>III.B. Débits</b>	<b>p36</b>
III.B.1. <i>Evolution des débits annuels</i>	p36
III.B.2. <i>Approche statistique : tests de détection des ruptures</i>	p37
III.B.2.a. <i><u>Pas de temps annuel</u></i>	p37
III.B.2.b. <i><u>Pas de temps mensuel</u></i>	p40
<b>III.C. Application du modèle pluie-débit GR2M</b>	<b>p44</b>
III.C.1. <i>Généralités sur la modélisation pluie-débit</i>	p44
III.C.2. <i>Le modèle GR2M</i>	p44
III.C.3. <i>Constitution des données d'entrées</i>	p45
III.C.4. <i>Evaluation de la performance de GR2M</i>	p45
III.C.5. <i>Résultats</i>	p46
<b>III.D. Coefficients d'écoulement</b>	<b>p46</b>
III.D.1. <i>Précipitations moyennes par bassin versant</i>	p46
III.D.2. <i>Coefficient d'écoulements annuels</i>	p46
III.D.3. <i>Ruptures</i>	p49
<b>III.E. Synthèse sur les écoulements</b>	<b>p49</b>
III.E.1. <i>Evolution des écoulements</i>	p50
III.E.2. <i>Ruptures : comparaison entre débits et coefficients d'écoulement</i>	p50
III.E.3. <i>Impact climatique ou anthropique ?</i>	p51
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>p53</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>p55</b>
<b>Liste des abréviations.....</b>	<b>p58</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>p59</b>
<b>Liste des annexes.....</b>	<b>p61</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>p62</b>

## INTRODUCTION

Les effets du changement climatique global de la Terre ont déjà été observés depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle. Ceux-ci se manifestent majoritairement par un réchauffement mais aussi une modification du cycle hydrologique à grande échelle. En effet, des variations de précipitations, en intensité et dans ses phénomènes extrêmes, ont déjà été constatées. Les simulations effectuées grâce aux modèles globaux vont plutôt dans un sens d'accentuation des effets déjà observés (GIEC, 2001 ; IPCC, 2007 ; IPCC, 2008).

Le Maroc est un pays situé au Nord de l'Afrique. Son climat est essentiellement semi-aride mais subit aussi une influence méditerranéenne importante. Or, les régions semi-arides et méditerranéennes devraient être plus vulnérables aux changements climatiques, en partie à cause de leur grande variabilité climatique intrinsèque (Huebener et Kerschgens, 2007). Aussi, une modification des pluies va probablement entraîner une modification de la disponibilité des ressources en eau. Les impacts pour les hommes vivants dans ces régions devraient donc être importants.

D'autre part, la population au Maroc est passée de 12 millions d'habitants à 28 millions entre 1960 et 1999. Elle a donc plus que doublé (Ministère de l'environnement du Maroc, 2001). Une telle croissance démographique constitue également une pression sur les ressources en eau : changement d'occupation des sols, construction de barrages, prélèvements d'eau souterraine...

Les objectifs de cette étude sont : analyser les régimes hydroclimatiques du Maroc, puis essayer d'évaluer la part anthropique et climatique influençant les écoulements superficiels.

Tout d'abord, la régionalisation climatique des précipitations grâce à la méthode des vecteurs régionaux est choisie pour étudier la variabilité climatique du Maroc. Cette étape sera effectuée à plusieurs échelles. En effet, la constitution d'unités climatiques à plusieurs échelles nous permettra alors de bénéficier d'une approche globale et détaillée. Ce travail accompli, une méthode statistique sera ensuite employée par des tests de détection de ruptures sur les séries pluviométriques annuelles.

La deuxième phase du stage est d'étudier les écoulements. Pour cela, nous analyserons dans un premier temps, l'évolution des débits et des coefficients d'écoulements des bassins versants choisis. Puis, des tests statistiques de détection de ruptures seront également exécutés. Nous pourrions alors comparer les résultats obtenus aux tests réalisés sur les précipitations mais aussi aux dates de construction de grands barrages au Maroc.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier constitue une synthèse bibliographique sur le contexte général de l'étude. Ensuite, le deuxième chapitre sera consacré aux travaux effectués sur les données hydroclimatiques. Enfin, dans une dernière partie, les analyses réalisées sur les données hydrologiques seront présentées.

## CHAPITRE I – CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

### I.A. Géographie et climat du Maroc

#### I.A.1. Eléments de climatologie : reliefs, plaines, pluviométrie et température moyennes

Le Maroc possède une superficie totale de 710 850 km<sup>2</sup> (y compris le Sahara Occidental) (*Portail national du Maroc*). Il est situé au Nord-Ouest de l'Afrique et est limité : au Nord par le détroit de Gibraltar et la Mer Méditerranée ; à l'Est, par l'Algérie ; au Sud par la Mauritanie ; et, à l'Ouest, par l'Océan Atlantique (*Figure 1*).

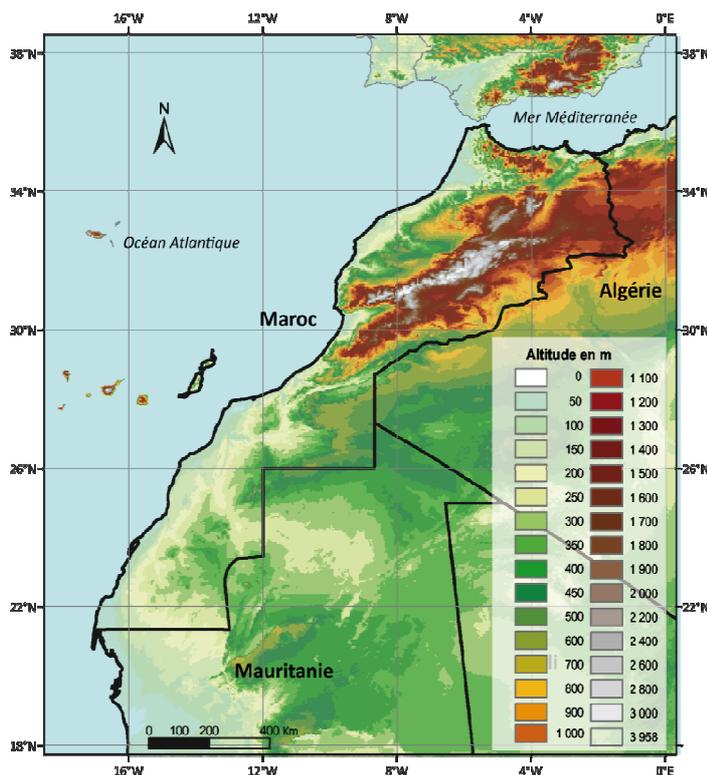


Figure 1 : carte MNT du Maroc effectuée en collaboration avec Claudine Dieulin

Le pays peut être globalement subdivisé en 2 unités paysagères : les montagnes et les plaines.

Tout d'abord, sont situées les plaines alluviales. La plupart des rivières et vallées du Maroc, traversent ces plaines. Elles sont larges entre l'océan Atlantique et l'Atlas (littorales et intérieures), et plus étroites (littorales) entre la Mer Méditerranée et le Rif. Les plaines et collines désertiques au Sud, quant à elles, s'étendent de l'Anti-Atlas jusqu'à la limite sud du Sahara Occidental.

Les montagnes du Rif au Nord du pays, culminent à 2456 m. Quant à l'Atlas (Moyen Atlas, Haut Atlas et Anti-Atlas), il s'étend du Nord-Est au Sud-Ouest et son point culminant est à 4165 m (figure 1). Les montagnes jouent ainsi un rôle de barrières climatiques, régulant la pluviométrie sur la partie Nord du pays.

Le climat au Maroc reste essentiellement semi-aride malgré ces différents régimes rencontrés. En effet, la pluviométrie moyenne reste assez faible, soit 346 mm/an (*FAO*).

Quant à la température, la moyenne annuelle reste élevée : 17,1°C (*CRU*). Dans la région du Sahara, elle peut atteindre jusqu'à 60 °C en été, tandis qu'elle peut tomber en dessous de 0°C dans les zones intérieures.

#### I.A.2. Variabilité climatique

Le climat du Maroc est caractérisé par une irrégularité des précipitations dans l'espace (Annexe 1). En effet, la pluviométrie va de 800 mm/an au Nord à moins de 25 mm/an au Sud, et de 600 mm/an à l'Ouest à 100 mm/an à l'Est (Agoumi et Debbarh, 2006). La pluviométrie moyenne varie ainsi de 500 à 2000 mm/an dans la zone la plus arrosée du pays au Nord-Ouest, alors qu'elle est de moins de 200 mm dans les zones arides du Sud du Pays (Ministère de l'Environnement du Maroc, 2001).

Par exemple les régions du Nord et le bassin de Sebou, reçoivent plus de 29.3% des précipitations globales et participent pour 51.1% des écoulements, bien qu'ils n'occupent que 8,5 % de la superficie totale. Le bassin de la Moulouya à l'Est, quant à lui, reçoit à peine 9.4% des précipitations totales et ne participe qu'à 8.7% des écoulements moyens, bien qu'il occupe 8,1% de la superficie du Maroc. En conclusion, 15% du royaume reçoit plus de la moitié des pluies (Agoumi et Debbarh, 2006).

### ***I.A.3. Occupation des sols (Ministère de l'environnement du Maroc, 2001)***

Les sols du Maroc sont fragiles, excepté dans les plaines alluviales. En effet, 93 % des ressources en sol sont soumises à une aridité importante. Or, en zone aride, le sol connaît une plus forte vulnérabilité sous l'action du vent et des pluies souvent violentes.

Entre 1960 et 1999, la population au Maroc est passée de 12 millions d'habitants à 28 millions, elle a donc plus que doublé. Cette croissance démographique s'est manifestée principalement par une forte urbanisation des terres agricoles à haut rendement, accompagnée par une diminution de la taille des champs. Ainsi, de nombreux agriculteurs doivent rechercher de nouvelles terres au détriment des ressources pastorales et forestières. Or, 50 % de la population du Maroc vit de l'agriculture et près de la moitié des terres cultivables sont situées dans des régions où la pluviométrie moyenne est de moins de 400 mm/an. De ce fait, la superficie totale aménagée au Maroc est de 1 180 000 hectares soit environ 35 hectares pour 1000 habitants (M'bark et Lhoussaine, 2004).

La forêt au Maroc représente à peu près 12,6% du territoire national et joue un rôle essentiel dans la régularisation des écoulements. De plus, elle protège les sols contre l'érosion.

Mais, elle est soumise à une dégradation croissante : 245 000 ha ont disparu entre 1985 et 1995. Les oasis présahariennes et sahariennes sont sujettes à des aménagements hydro-agricoles, surtout dans les grandes vallées alluviales du Sud (Ouarzazate et Tafilalt).

Une analyse du Rif Centro-Occidental a récemment montré que l'extension des terres de cultures a connu une augmentation de presque 100% en 20 ans. Ainsi, la forêt et le maquis régressent respectivement à raison de 989 ha/an et de 2858 ha/an. Si cette régression continue à ce rythme, il se pourrait qu'entre 2014 et 2019 les forêts disparaissent dans cette zone.

Quant aux terres de parcours, elles sont la principale source d'alimentation du bétail. Ces terres sont occupées à plus de 90 % par de vastes espaces généralement steppiques à faible productivité en climat aride, semi-aride et saharien. Enfin, les 10 % restant sont constitués de végétation herbacée vivace en montagne, et de végétation naturelle dans les plaines et plateaux nord-atlasiques.

## **I.B. Ressources en eau**

### ***I.B.1. Inventaire et cartographie***

Les précipitations totales sur le Maroc sont évaluées à 150 milliards de m<sup>3</sup>/an en moyenne. Parmi ces 150 milliards de m<sup>3</sup>/an, 121 milliards (80,6%) s'évaporent et 29 milliards (19,4 %) s'écoulent (Ministère de l'Environnement du Maroc, 2001).

### I.B.1.a. Eaux superficielles : réseaux d'observations, barrages et zones irriguées

Les écoulements de surface constituent environ 22,5 milliards de m<sup>3</sup>, soit environ 77,5% des écoulements totaux. Parmi ces 22,5 milliards, 16 milliards sont mobilisables, soit plus de 70 % (Ministère de l'Environnement du Maroc, 2001).

Bassins hydrauliques	
1-	Loukkos, Tangérois et côtiers méditerranéens
2-	Moulouya
3-	Sebou
4-	Bouregreg et côtiers atlantiques de Casablanca
5-	Oum Er Rbiâ
6-	Tensift et côtiers d'Essaouira
7-	Souss-Massa
8-	Guir, Ziz, Rhériss et Drâa ou Sud Atlasiens
9-	Sahara

Figure 2 : tableau légende de la carte 2, adapté de Bzioui (2004)

Le Maroc est constitué de neuf grands bassins hydrauliques (Figure 2 et Figure 3).

Les ressources en eau au Maroc sont relativement bien suivies.

En effet, La Direction Météorologique du Maroc (DMN) possède 44 stations synoptiques et plus de 700 postes climatologiques répartis sur le territoire (Agoumi et Debbarh, 2006).

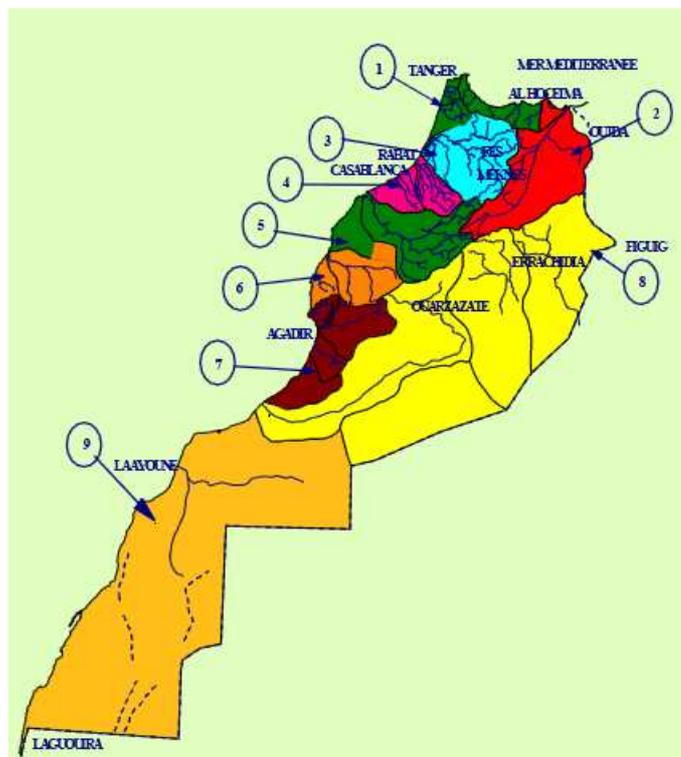


Figure 3 : carte représentant les grands bassins hydrauliques du Maroc, adapté de Bzioui (2004)

La plupart des postes est situé soit dans les communes, soit au niveau des barrages. Ils mesurent les volumes d'eaux précipités ainsi que les températures. Ces mesures sont alors transmises à la DMN chargé de leur exploitation, leur saisie et leur archivage.

La Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) du Maroc (aujourd'hui Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau) est chargée du suivi et de la mesure du volume des ressources en eau du pays. Ainsi, elle possède un réseau hydrographique comprenant 250 stations hydrométriques et 710 points de jaugeages périodiques. Les mesures sont ensuite communiquées quotidiennement aux agences de bassins hydrauliques et à la Direction de la Recherche et de la Planification de l'EAU (DRPE) (Bzioui, 2004). Cependant, même s'ils apparaissent comme nombreux, les postes pluviométriques et hydrométriques sont plus localisés dans la partie Nord du pays. En effet, dans le Sud (Sahara Occidental, région aride...) et dans l'Est (montagnes de l'Atlas), ils sont très peu nombreux souvent à cause des difficultés d'accès.

Le Maroc est aussi un pays où de nombreux barrages ont été construits, surtout depuis l'indépendance en 1956. Seuls 16 ouvrages étaient en service en 1966. Puis, en 1967, le Roi Hassan II a fixé l'objectif d'irriguer un million d'hectares pour l'horizon 2000. Ainsi, la construction des grands barrages put connaître une impulsion nouvelle. En 1984, il initia également le lancement d'un programme de construction de petits et moyens barrages pour ainsi favoriser un accès équilibré à l'eau sur l'ensemble du territoire marocain. En 2004, il était alors possible de compter 109 grands barrages possédant une capacité totale de stockage de 15,6 milliards de m<sup>3</sup>, un

volume régularisé de 9,5 milliards de m<sup>3</sup> et 13 systèmes de transfert d'eau d'une longueur totale de 785 km (Annexe 2) (*SEE*).

En ce qui concerne les demandes en eau au Maroc, elles étaient de 12,607 milliards de m<sup>3</sup> en 2000 dont : 11,01 milliards pour l'irrigation (plus de 87%) ; 1, 237 milliard pour les collectivités ; 360 millions pour l'industrie. En 2020, ces demandes pourraient s'élever à 15,690 milliards de m<sup>3</sup>, dont 83 % seront pour l'irrigation (*FAO*). Ainsi, la pression anthropique sur les ressources en eau ne cesse de croître et l'irrigation pour l'agriculture en monopolise la majeure partie disponible. Les grandes zones irriguées se situent essentiellement dans le Nord du Maroc, notamment dans les bassins du Sebou et de l'Oum Er Rbiâ (Annexe 3).

#### I.B.1.b. Eaux souterraines : principaux aquifères et caractéristiques majeures

Parmi 9 milliards de m<sup>3</sup>/an représentant environ 30 % des écoulements totaux, 4 milliards (45%) sont actuellement mobilisables dont plus de la moitié sont situés dans le Nord et le Centre du pays (Annexe 4). Les ressources mobilisées par forages, puits et sources sont de l'ordre de 3 milliards de m<sup>3</sup> : les deux tiers sont utilisées pour l'irrigation tandis que le tiers restant est utilisé pour l'alimentation en eau potable. Aussi, 2 milliards de m<sup>3</sup>/an s'écoulent directement vers les mers et l'océan (Bzioui, 2004).

Les ressources en eaux souterraines sont mieux réparties que les ressources en eaux superficielles sur le royaume. En tout, il y aurait 32 nappes profondes (de 200 m à plus de 1000 m) difficiles d'accès, et plus de 48 nappes superficielles plus faciles d'accès mais aussi plus vulnérables aux pollutions (Annexe 5) (Agoumi et Debbarh, 2006).

Parmi les principales nappes souterraines au Maroc, la nappe Toundoute dans le haut bassin versant du Drâa au centre du Haut Atlas peut être citée. C'est une nappe constituée de dolomites et de calcaires du Jurassique avec une capacité de volume potentiel entre 1000 et 3000 m<sup>3</sup>. Elle représente bien les aquifères en zone semi-aride et karstiques. Malgré une très grande évapotranspiration dans ces régions, la recharge est possible notamment grâce aux précipitations (pluies et neiges) générées sur le massif de l'Atlas. Mais la nappe est également très influencée par la diversion de l'eau pour l'irrigation, la dégradation du couvert végétal et l'occupation des sols (De Jong *et al*, 2008).

Une autre nappe très étudiée au Maroc est celle du Tadla dans le bassin versant de l'Oum Er Rbiâ. Elle est caractérisée par des épaisseurs d'aquifères très variables, ayant pour conséquence une hétérogénéité de la disponibilité des ressources en eau souterraine. De plus, cette nappe est très exploitée pour l'irrigation agricole (Hammani *et al*, 2006 ; Hammani et Kuper, 2007).

Beaucoup d'aquifères côtiers sont également présents au Maroc. Prenons l'exemple de l'aquifère de la Mamora. Il possède une surface de 2300 km<sup>2</sup> et constitue la principale ressource en eau pour alimenter la ville de Kénitra. Même s'il se situe sur la côte Atlantique, il est principalement influencé par le régime climatique méditerranéen et est principalement rechargé par les précipitations. De hautes transmissivités (environ  $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ ) et de forts coefficients de stockages ont été mesurés pour cet aquifère (Kabbour *et al*, 2005). C'est donc un aquifère possédant de bonnes propriétés hydrauliques et une bonne capacité en tant que réservoir d'eau.

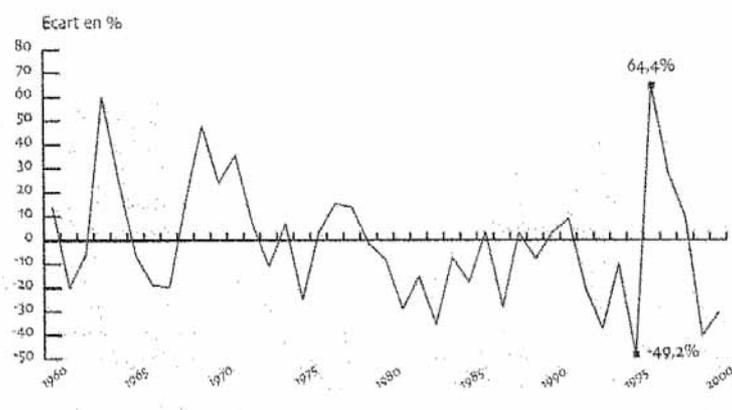
Les précipitations au Maroc constituent donc souvent la seule recharge possible pour les eaux souterraines. Un effort de mobilisation a donc été entrepris depuis 1961. Ceci a permis un développement de l'exploration et de l'exploitation des eaux souterraines : soit la réalisation d'un linéaire moyen d'environ 100 km/an en puits et forages d'eau. Ainsi, près de 2,87 milliards de m<sup>3</sup>/an sont mobilisables (*SEE*). Cependant, la connaissance des nappes souterraines du Maroc seraient tout de même limitée, surtout pour les nappes profondes, mais des efforts sont développés depuis les dernières années.

D'après le Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau, 1700 piézomètres font environ 10 000 mesures/an au Maroc (*SEE*). Ainsi un réseau national de suivi des ressources en eau souterraine est constitué au niveau des principales sources, afin de contrôler le niveau des nappes et d'en réglementer l'usage (Alibou, 2002).

### ***I.B.2. Tendances et variabilités observées***

#### ***I.B.2.a. Pluies***

Les pluies diminuent en moyenne sur tout le royaume depuis les années 60 et plus significativement depuis les années 70 (Figure 4), en particulier sur les côtes méditerranéennes mais aussi en Algérie (Senoussi *et al*, 1999 ; Knippertz *et al*, 2003).



**Figure 4 : graphique représentant l'écart (%) à la moyenne des précipitations annuelles sur l'ensemble du Maroc (Agoumi et Debbarh, 2006)**

Si nous nous intéressons à présent à quelques exemples régionaux.

Dans le bassin versant de l'Ouergha, l'évolution interannuelle des précipitations moyennes reçues montre une diminution. Cette diminution est accompagnée d'une alternance de périodes sèches et humides tous les 5 à 10 ans sur la période 1966/95. Une accélération de cette tendance a pu être constatée entre 1990 et 1995 avec des précipitations 2 à 3 fois inférieures à celles connues dans les années 70 (Senoussi *et al*, 1999).

En ce qui concerne le bassin versant de l'Oum Er Rbiâ, aucune tendance n'est détectée sur les précipitations (Chaponnière et Smakhtin, 2006). Il en est de même pour les régions de la côte Atlantique et de l'Atlas de 1931 à 1996 (Knippertz *et al*, 2003).

Ensuite, une analyse des données pluviométriques sur le dernier millénaire rend compte que le Maroc a connu et connaîtra probablement une sécheresse tous les 8 ans en moyenne (Ministère de

l'Environnement du Maroc, 2001). Les cinquante dernières années auraient connu une nette augmentation de la fréquence des sécheresses et inondations. Par exemple de 1955 à 2004, 7 périodes de sécheresses généralisées ont été enregistrées au Maroc (1957 ; 1966 ; 1974/75 ; 1980/85 ; 1986/87 ; 1990/95 et 1998 à 2000) (Agoumi et Debbarh, 2006).

Cependant même si les précipitations ont globalement tendance à diminuer, les fréquences d'inondations augmentent essentiellement à cause de pluies très rares mais très intenses.

Par exemple, si nous nous intéressons aux précipitations au sein d'une même année. De 1950 à 2000, la somme des précipitations journalières supérieure à 0,1 mm, a diminué en hiver. Par contre le nombre de jours pluvieux supérieurs à 10 mm a augmenté (Norrant et Douguédroit, 2005).

Autre constat de 1975 à 2004, beaucoup d'années humides de fréquence rare se sont produites avec une pluviométrie très forte et concentrée sur de très courtes périodes de l'année. Ceci a donc provoqué des inondations. Par exemple, du 20 au 27 novembre 2002, de gros dégâts ont été constatés (63 morts, 26 disparus, des dizaines de blessés, habitations et terres agricoles détruites...) (Agoumi et Debbarh, 2006). Plus récemment en 2008, les 9 et 11 Octobre ainsi que le 20 Novembre, des inondations ont encore fait des morts et effondrer des maisons.

#### I.B.2.b. Débits

Les débits sont étroitement liés aux apports pluviométriques, et sont donc aussi très variables dans l'espace et dans le temps. Dans une même année, l'essentiel des débits s'écoule sous forme de violentes et courtes crues, conséquentes aux apports pluviométriques se concentrant sur quelques jours ou quelques mois. De plus, tout comme les précipitations, les écoulements diminuent et leur variabilité s'accroît du Nord au Sud (Agoumi et Debbarh, 2006).

Dans le bassin versant de l'Oum Er Rbiâ, le débit moyen à Dchar El Oued est de 31,6 m<sup>3</sup>/s de 1954 à 1988. Il a été constaté que ce dernier a diminué de 1978 à 1988. Cette baisse de débit a alors été mise en relation avec une baisse des précipitations. Mais d'autres facteurs, comme le changement d'occupation des sols, sont peut être à l'origine de la diminution du débit (Chaponnière et Smakhtin, 2006).

La population augmente au Maroc et connaît un développement économique et technologique. Ceci a pour conséquence une demande en eau qui ne cesse de croître avec des aménagements hydrauliques et des sols de plus en plus nombreux. Ces changements couplés à des sécheresses plus nombreuses et plus sévères, exercent une pression grandissante sur les eaux de surface au Maroc (Taleb, 2006). Cependant, tout comme pour les précipitations, les séries de débits ne présentent souvent aucune tendance. Par exemple, le débit moyen journalier a été calculé de 1963 à 1998 sur le bassin de l'Ifre dans le Tensift (De Jong *et al*, 2008). De grandes variations du débit sont observées : en Automne et au Printemps, le débit est multiplié par 20 par rapport au débit de base, mais aucune tendance significative n'a été constatée.

#### I.B.2.c. Eaux souterraines : exemples d'exploitation et de surexploitation

Plusieurs nappes ont déjà été surexploitées de 1980 à 2000 au Maroc. Cette surexploitation est continue depuis les années 70 et a atteint des niveaux critiques en 2001. C'est le cas pour les

nappes de Saïss, de Berrechid mais aussi du Souss-Massa : aquifère côtier Mamora (Kabbour *et al*, 2005 ; El Bouqdaoui *et al*, 2008).

La Mamora, comme beaucoup d'autres nappes, se recharge seulement par les précipitations reçues. Elle est aussi la seule ressource pour l'alimentation en eau potable. De ce fait, les nombreux pompages évalués à 38 millions de m<sup>3</sup>/an effectués, font entrer les eaux salées dans la nappe. La salinisation est ainsi la conséquence de trop nombreux pompages.

C'est un des principaux problèmes pour les aquifères côtiers au Maroc : autre exemple le Bou-Areg au Nord-Est du Maroc (El Mandour *et al*, 2008).

En ce qui concerne la nappe de Trifa, Tadla et la plaine d'El Jadida, ce sont les pompages pour l'irrigation pour l'agriculture qui sont la cause d'une diminution de la piézométrie (Chofqi *et al*, 2004 ; El Idrysy et De Smedt, 2006).

#### I.B.2.d. Impacts sur les écoulements et transports associés : érosion hydrique et envasement des barrages

La pluviométrie, le relief et la nature du sol, peuvent favoriser l'érosion hydrique. La hauteur moyenne annuelle, la distribution saisonnière et l'intensité de la pluie sont les principales caractéristiques influençant la dégradation des sols.

Il est possible de distinguer des régions physiographiques au Maroc selon un risque d'érosion décroissant (Bzioui, 2004). Les chiffres avancés sur les taux d'érosion hydrique sont essentiellement basés sur : l'envasement des barrages existants ; la mesure de turbidité des eaux de ruissellement et les indices de risques d'érosion.

Dans les collines pré-rifaines, les taux d'érosion mesurés sur trois bassins ont montré que les terres cultivées sont les plus sensibles à l'érosion hydrique (Bzioui, 2004).

Le taux d'envasement des barrages en 1991, variait entre 0,2 millions de m<sup>3</sup>/an pour le bassin versant de Nakkha et Oued El Malleh, et 11,2 millions de m<sup>3</sup>/an pour le barrage Mohammed V (Ministère de l'environnement du Maroc, 2001). Ainsi, pour certains barrages la durée de vie est fortement affectée par les phénomènes d'envasement (Annexe 6). De plus, cet envasement provoque une diminution des quantités d'eau disponibles pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et la production d'énergie électrique. En 1991, il a été calculé que 50 millions de m<sup>3</sup> par an en moyenne auraient été perdues chaque année par envasement. Ceci correspondrait à une diminution de 0.5 % par an (5000 à 6000 ha/an) de possibilité d'irrigation (Ministère de l'environnement du Maroc, 2001).

Dans la région méditerranéenne du Maghreb, l'érosion hydrique est un phénomène complexe et très actif. Le problème principal est que la quantification du transport des sédiments est difficile dans cette région, notamment à cause de la grande variabilité temporelle des débits.

Cependant en Algérie, plusieurs analyses ont été réalisées sur le transport des sédiments en suspension dans plusieurs bassins semi-arides que l'on peut mettre en relation avec ceux du Maroc (Achite, 2006 ; Achite et Ouillon, 2007 ; Achite et Meddi, 2004 ; Achite et Meddi, 2005). Tous ces travaux mettent en évidence une variabilité saisonnière et interannuelle des taux de transports de sédiments. Dans Touaïbia *et al* (2001), des transports d'éléments fins en suspension ont été étudiés de 1973/74 à 1994/95 dans l'Algérie du Nord. La variabilité interannuelle a été démontrée à l'aide de l'érosion spécifique et du coefficient d'écoulement. Dans Achite et Ouillon (2007), il a été

montré que les deux saisons les plus favorables aux transports des sédiments en suspension sont les mois d'Octobre et Mars. La plus grosse partie en Octobre, peut s'expliquer par des inondations plus agressives qui suivent généralement une saison de faibles débits.

## I.C. Caractérisation de la variabilité climatique au Maroc

### I.C.1. Relations entre pluies et climat global

Le climat au Maroc est lié à une circulation atmosphérique d'échelle globale.

En effet, les précipitations sont fortement liées à la North Atlantic Oscillation (NAO), formée par une différence de pression entre l'anticyclone subtropical des Açores et la dépression subpolaire d'Islande (Knippertz *et al*, 2003a ; Knippertz *et al*, 2003b ; Ward *et al*, 1999). C'est-à-dire, pour un indice NAO positif (Figure 5), de très fortes différences de pression existent entre les Açores et l'Islande. Les hautes pressions sur l'Océan Atlantique vont ainsi rendre le climat du Maroc plus sec. Au contraire, un indice NAO négatif (Figure 6) est constaté lorsque le gradient de pression entre les Açores et l'Islande est plus faible. Le Maroc va donc tendre à un climat plus humide (Knippertz *et al*, 2003a).

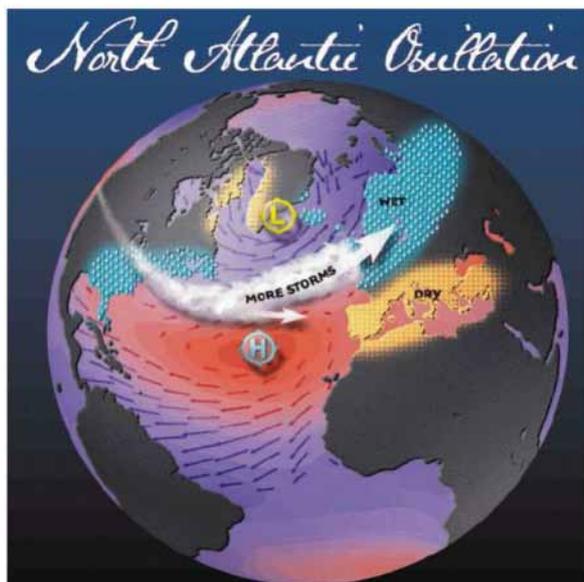


Figure 5 : schéma représentant la NAO en phase positive (LDEO)

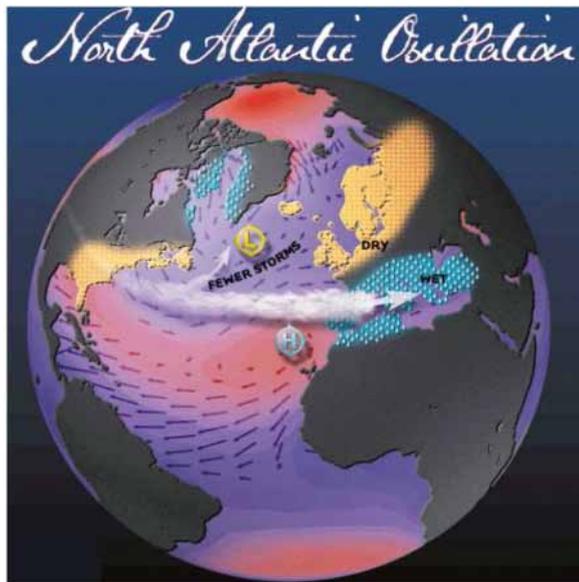


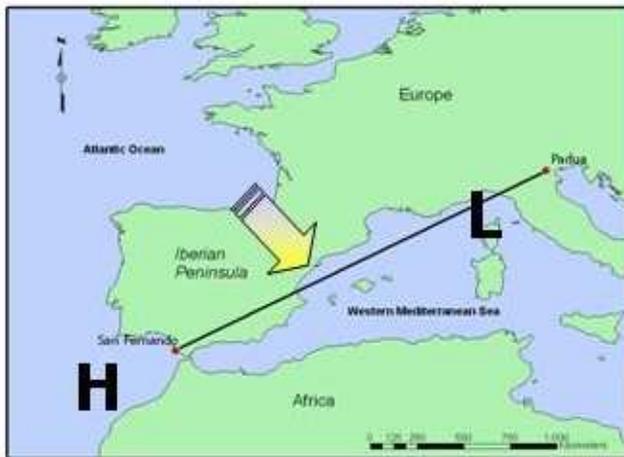
Figure 6: schéma représentant la NAO en phase négative (LDEO)

L'influence de la NAO est cependant plus importante en hiver (Décembre à Mars) et plus importante dans la région atlantique que dans la région méditerranéenne (Annexe 7) (Ward *et al*, 1999 ; Knippertz *et al*, 2003a).

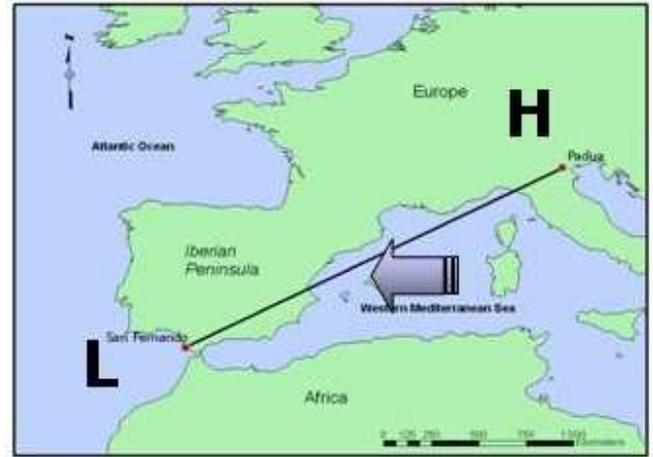
Autre remarque, l'indice NAO a tendance à être positif en hiver depuis la fin des années 70. Ceci a pour conséquence une diminution des précipitations dans le Nord-Ouest de l'Afrique et la péninsule ibérique. Par contre, en hiver 1995/96, un retour assez important de NAO négatif s'est produit et a été suivi par des indices normaux ou légèrement négatifs en 1996/97 et 1997/98 (Ward *et al*, 1999).

Dans la région méditerranéenne, c'est l'Oscillation Méditerranée Occidentale (OMO) qui prédomine (Knippertz *et al*, 2003a). Cette circulation atmosphérique est caractérisée par une

différence de pressions de surface entre les stations de San Fernando (Espagne) et Padua (Italie) (Lespinas F., 2008).



*Figure 7 : schéma représentant les anomalies de circulation atmosphérique associées aux phases positives. H (hautes) et B (basses) sont les anomalies de pression de surface positives et négatives, respectivement (OMO)*



*Figure 8 : schéma représentant les anomalies de circulation atmosphérique associées aux phases négatives. H (hautes) et B (basses) sont les anomalies de pression de surface positives et négatives, respectivement (OMO)*

Lors d'une phase dite positive, l'anticyclone des Açores est renforcé et s'étend sur le quart Sud-ouest de la péninsule ibérique tandis que de faibles pressions se situent au niveau du Golfe Ligurien (Figure 7 et Figure 8). Ceci va alors induire une circulation générale des masses d'air de surface de direction Nord-Ouest/Sud-Est. Au contraire, la phase négative s'observe lorsque la zone de basses pressions est située sur le Sud-Ouest de la péninsule ibérique, avec l'anticyclone central européen renforcé jusqu'au Golfe Ligurien. La circulation des masses d'air de surface se fait alors d'Est en Ouest (Lespinas, 2008).

La variabilité du climat au Maroc est également reliée à El Niño Southern Oscillation (ENSO) (Ward *et al.*, 1999 ; Knippertz *et al.*, 2003). Les températures de surface de la mer (ou « Sea Surface Temperature ») en hiver dans le Pacifique Est, affectent le climat nord africain ainsi que l'Europe. L'influence de l'ENSO sur les pluies est plus importante en Décembre, Janvier et Février et sur les précipitations du printemps (Mars, Avril et Mai). Des corrélations entre l'ENSO, les précipitations du Nord de l'Afrique et la NAO, ont ainsi été observées : de 1900 à 1925, de 1962 à 1987 et de 1931 à 1956. D'autres études ont également montré que les précipitations de printemps ou d'automne dans la région méditerranéenne étaient liées à l'ENSO (Annexe 7) (Huebener et Kerschgens, 2007).

En ce qui concerne la région sud de l'Atlas, le climat est plus complexe à cause de nombreuses influences. La source d'humidité provient de l'Atlantique mais les transports de cette humidité depuis le sud de l'Atlas, se font grâce à des dépressions plus locales. De plus, les précipitations sur cette zone montagneuse apparaissent reliées à des dépressions provenant de la partie supérieure de la troposphère. Les pluies sont alors générées par des mouvements convectifs le long de la pente de l'Atlas, avec de gros nuages très pluvieux, avec une condition : si assez d'humidité est disponible à plus basse altitude. Autre constat, les événements pluvieux qui se déroulent durant les demi-saisons, sont reliés à des interactions tropical-extratropical (Knippertz *et al.*, 2003a).

En résumé, le Maroc est soit globalement soumis à une prédominance atmosphérique et climatique subtropicale empêchant les précipitations ; soit, soumis à des atmosphères subpolaires, apportant ainsi des pluies (Karrouk, 2007).

### ***1.C.2. Régionalisation climatique***

Une unité climatique est définie comme une zone à pluviométrie homogène contenant des stations dont les variations interannuelles sont cohérentes les unes par rapport aux autres (Wotling, 1994 ; Wotling *et al*, 1995). La régionalisation climatique permet ainsi de mieux comprendre la variabilité des précipitations et donc du climat.

Pour réaliser une classification des différents climats du Maroc, la pluviométrie est donc un des principaux facteurs à prendre en compte. La régionalisation climatique est alors effectuée à partir des différents types de végétation, de la saisonnalité des pluies et des températures (Emberger, 1930 ; Emberger, 1955). Le Maroc est alors considéré comme un pays qui possède tous les types de climats méditerranéens (Emberger, 1930) avec 5 sous-régions (aride, semi-aride, tempéré, humide et de haute montagne). Or, la végétation est influencée par les activités anthropiques. Donc, une approche bioclimatique ne représente pas uniquement la variabilité climatique.

Cependant, les régions climatiques peuvent aussi être constituées en se basant sur des méthodes statistiques : analyse en composantes principales, classification ascendante hiérarchique, nuées dynamiques... (Born *et al*, 2009 ; Lamb *et al*, 1997).

Trois principales influences climatiques au Maroc sont souvent distinguées : atlantique, méditerranéenne et saharienne (Born *et al*, 2009). Les régions arides sont surtout caractérisées par de faibles variations saisonnières avec des pluies épisodiques, tandis que les régions tempérées atlantiques et méditerranéennes présentent des hivers humides et des étés chauds et secs. Ainsi à partir des trois régions (atlantique, méditerranée et sud de l'Atlas), des indices standardisés de précipitations saisonnières (SPI) ont été constitués sur la période 1901-2007. Ils mettent en évidence une diminution des indices en Méditerranée depuis le milieu des années 70 (Figure 9).

Au Maroc, la saison des pluies dure d'Octobre à Avril. Des analyses en composantes principales ont donc été effectuées sur cette période, sur des stations pluviométriques observées de 1932 à 1995. Ainsi, cinq unités climatiques sont identifiées (Annexe 8). Après la constitution des indices standardisés de précipitations saisonnières (SPI) pour ces cinq régions, les auteurs les ont comparés aux indices NAO. Par conséquent, il a été mis en évidence que les régions atlantiques I et II possédaient les corrélations les plus négatives. Ce sont donc celles qui sont le plus influencées par la NAO, avec un maximum ressenti en Janvier et Février. A l'échelle décennal, la corrélation négative entre la NAO et les SPI, s'étend jusqu'aux montagnes de l'Atlas et dans la région V (correspondant à la région méditerranéenne) (Lamb *et al*, 1997).

Autre méthode statistique utilisée pour la régionalisation climatique, il s'agit de la méthode des nuées dynamiques. Ce travail détaillé et plus précis que les travaux effectués auparavant, est réalisé par Mme Fatima Zohra El Guelai de la Direction Météorologique Nationale du Maroc. Cette étude est toujours en cours. Cependant, une première carte a pu nous être fournie (Annexe 9). 19 unités climatiques homogènes à partir des pluies ont été constituées.

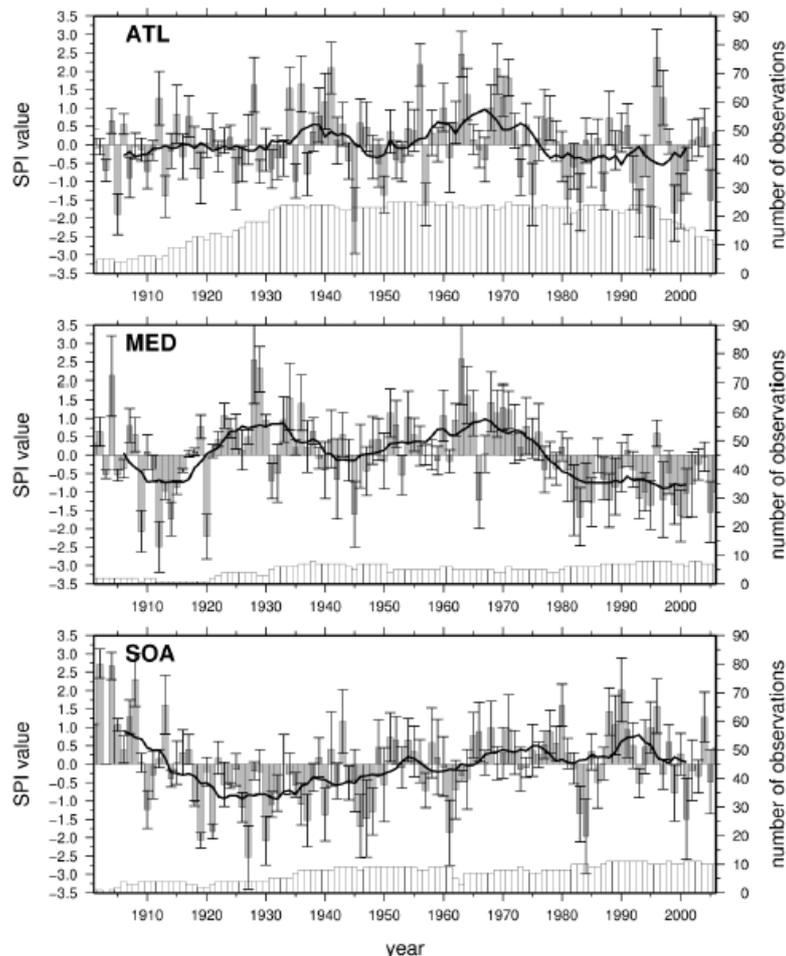


Figure 9 : Graphiques représentant les valeurs des SPI annuelles sur la période 1901/1902 à 2006/2007 pour les régions climatiques atlantique(ATL), méditerranéenne(MED), et du Sud de l'Atlas(SOA). Gris clair : valeurs des indices ; blanc : le nombre de stations disponibles pour chaque région (Born et al, 2009)

### I.C.3. Exemples de périodes de sécheresse au Maroc, et particularités régionales

Durant les périodes de sécheresses généralisées au Maroc, 1980/85 et 1990/95, le bilan hydrique était déficitaire dans presque tous les bassins versants du pays (Agoumi et Debbarh, 2006).

Par exemple, pendant la période de 1966/95, le bassin versant de l'Ouergha a connu les précipitations les plus faibles de 1990 à 1995 : autour de 600 mm (Senoussi et al, 1999). Dans le bassin de l'Oum Er Rbiâ, une période de sécheresse plus étendue est constatée de 1980 à 1990 dans la partie montagneuse du pays (Chaponnière et Smakhtin, 2006). Dans le bassin du Drâa, une année d'extrême sécheresse s'est produite en 1984 (Huebener et Kerschgens, 2007).

Bassin hydraulique	Sécheresse hydraulique maximum
Souss	1960-1961
Loukkos	1966-1967
Bou-Regreg	1966-1967
Oum Er Rbiâ	1982-1983
Sebou	1984-1985
Moulouya	1984-1985

Figure 10 : tableau représentant les années de sécheresse hydrauliques maximum par bassin (chiffres d'après Lahlou, 2000).

En réalité, quatre types de sécheresses se sont produits simultanément de 1980 à 1985 : hydraulique, météorologique, agricole et énergétique (Lahlou, 2000). Cependant, nous pouvons aussi observer que des sécheresses sont survenues durant les années 60 sur la Figure 10. Mais elles restent localisées dans certaines régions.

Pour les cinq années sèches, la situation pluviométrique a été déficitaire :

- (i) sauf au Nord-Est de 1980 à 1981 ;
- (ii) sauf sur le Sud-Ouest du pays, où les précipitations étaient excédentaires de 1981 à 1982 ;
- (iii) sur tout le pays de 1982 à 1983 ;
- (iv) à l'exception d'une zone étroite sur le littoral atlantique de 1983 à 1984;
- (v) excepté sur le Sud-Ouest du pays où les pluies étaient « normales » ou légèrement excédentaires de 1984 à 1985 (Lahlou, 2000).

De 1981 à 1994, les années fut particulièrement sèches dans le Nord du Maroc mais aussi dans le Sud Ouest de l'Europe, comparé à la période de 1951 à 1980. Cela est surtout vrai pour la région méditerranéenne mais moins pour la région atlantique (Knippertz *et al*, 2003a).

## **I.D. Projections climatiques**

### ***I.D.1. Modèles globaux***

Plusieurs scénarios du changement climatique ont été effectués et sont regroupés par familles ou groupes. Ils correspondent chacun à une évolution démographique, sociale, économique, technologique et environnementale différente (Annexe 10). Ces scénarios sont ensuite utilisés pour faire fonctionner les Modèles de Circulation Générale (MCG ou GCM en anglais). Les MCG prévoient globalement une augmentation de la température de l'ordre de 0,7°C à 1°C pour 2020 (Alibou, 2002).

En 1997, les tendances pour les précipitations n'étaient pas encore connues ou du moins elles restaient très incertaines. En 2003 encore, les estimations des différents modèles étaient peu convergents (IISD, 2003). Mais, les précipitations devraient globalement diminuer au Maroc (Arnell, 2004). Sur tout le territoire, une diminution de 4 % des précipitations serait possible en 2020 par rapport en 2000, selon une communication nationale de l'United Nations Conference of Climate Change (Simone *et al*, 2006). Cette diminution serait due à une diminution des dépressions dans le Sud de l'Europe et dans la mer Méditerranée (Huebener et Kerschgens, 2007).

Deux modèles sont souvent cités dans les différents articles lus. Le modèle atmosphérique ECHAM4 (European Centre Model HAMBURG version 4), utilise une résolution de 2.8° de latitude sur 2.8° de longitude et est souvent couplé avec le modèle océanique OPYC3 (Ocean and isoPYCnal coordinates model). Ce modèle couplé atmosphère-océan simule des diminutions de précipitations plus importantes au sud (-25%) qu'au nord du Maroc (-15%) (Knippertz *et al*, 2003b). Le modèle HadCM2 (Hadley Centre Model version 2) utilise une résolution de 2.5° de latitude sur 3.75 ° de longitude et prévoit pour 2030-2049, des hivers plus humides (Octobre à avril) avec de plus grandes fréquences d'inondations (Fox *et al*, 2001).

Les conséquences d'une probable diminution des précipitations, sont principalement une diminution du débit moyen annuel possible en 2050 jusqu'à 25 mm/an. Mais également, une diminution des débits d'étiages et jusqu'à un haut stress hydrique sont à craindre en 2025. En fait, l'intensité des précipitations augmentera probablement provoquant des coefficients de ruissellement beaucoup plus grands en 2050 par rapport à 1990 (Simone *et al*, 2006).

Cependant, le principal problème des modèles globaux est que leur résolution n'est pas précise, environ deux à trois degrés (soit 250 km environ). De ce fait, ils ne tiennent pas compte des circulations atmosphériques plus locales, ni de la complexité des reliefs. Il est alors possible de faire du « downscaling », c'est-à-dire de la désagrégation.

### ***1.D.2. Régionalisation du changement climatique***

#### ***1.D.2.a. Désagrégation ou « downscaling »***

La désagrégation peut être définie suivant qu'elle est dynamique et/ou statistique.

La désagrégation dynamique est caractérisée globalement par une augmentation de la résolution spatiale des modèles climatiques. Quant à la désagrégation statistique, elle est plus basée sur des observations. En effet, il est considéré que le climat régional résulte de l'interaction entre le climat à grande échelle et les propriétés physiographiques locales (topographie, usage des sols...) (Lespinas, 2008).

Ces deux méthodes ont été appliquées séparément ou parallèlement en utilisant les SLP (Sea Level Pressure sur le bassin versant du Drâa, plus précisément sur la pente sud de l'Atlas. Les résultats sont les suivants : (i), la désagrégation statistique seule ne suffit pas pour donner une distribution précise des précipitations pour une région où peu de mesures sont disponibles ; (ii), le « downscaling » statistique et dynamique à la fois, montre de bonnes correspondances avec les précipitations mesurées (Huebener et Kerschgens, 2007a).

Cette dernière technique utilise donc des simulations à très haute résolution avec : des analyses globales d'un modèle météorologique allemand, un modèle régional plus un modèle à échelle moyenne. Mais, le principal inconvénient est alors une mauvaise résolution temporelle avec des valeurs extrêmes très atténuées (Huebener et Kerschgens, 2007a). Cependant, la résolution reste meilleure que celle des modèles globaux. Ainsi, la désagrégation statistique et dynamique à la fois, simule principalement pour 2060-2089 une augmentation des précipitations sur le Sud de l'Atlas (Huebener et Kerschgens, 2007a).

#### ***1.D.2.b. Applications directes des modèles globaux à des bassins versants au Maroc***

Les modèles globaux ont déjà été appliqués à deux bassins versants.

Tout d'abord, sur le bassin versant de l'Ouergha, un modèle hydrologique conceptuel a été utilisé pour simuler les débits à partir des pluies journalières reçues et de l'évapotranspiration potentielle. Ensuite, après calibrage et validation, deux scénarios différents de températures ont été considérés pour 2050 : le scénario 1 prévoit une augmentation de température de 1°C en été et de 2°C en hiver ; le scénario 2 prévoit une augmentation de 2°C en été et de 3°C en hiver. Les calculs et simulations des lames moyennes mensuelles montrent pour le scénario 1, un déficit dans le bilan d'eau qui se distingue plus en hiver qu'en été, avec une diminution nette d'environ 12,7% de la lame d'eau moyenne mensuelle en Avril. Pour le scénario 2, les lames mensuelles moyennes simulées montrent une diminution plus importante, soit de 16.6%.

Ces simulations ont alors permis d'évaluer l'impact possible sur les réserves en eau du barrage Al Wahda en traçant les écarts des volumes d'eau emmagasinés en moyenne annuelle aujourd'hui et pour les deux scénarios. Les résultats sont des écarts plus élevés en Avril. Le déficit de sa capacité

volumique atteindrait environ 5% pour le scénario 1 et 8% sur le deuxième scénario (sachant que sur la période 1966-1995, 2300 millions de m<sup>3</sup> est apporté sur le barrage) (Senoussi et al, 1999).

Ensuite, sur le bassin versant de l'Oum er Rbiâ, une étude préliminaire sur les données pluviométriques a été effectuée. Les déficits des précipitations devraient augmenter sur quelques stations, surtout sur l'Atlas. Or cette chaîne de montagnes est la principale source d'eau pour l'ouest du Maroc. Le but de cette étude était d'identifier comment le changement climatique pourrait avoir des impacts sur les ressources en eau, et savoir quelles mesures de gestion pourront être prises afin de mieux appréhender ces impacts possibles. Une utilisation des scénarios par un modèle hydrologique à l'échelle du bassin (Soil and Water Assessment Tool) combiné avec un modèle de réservoir à pas de temps journalier est ainsi suggérée. Ceci permettrait alors de constituer une bonne base pour savoir comment optimiser l'utilisation future de l'eau dans ce bassin (Chaponniere et Smakhtin, 2006).

## ***CHAPITRE II - DONNEES HYDROCLIMATIQUES***

### **II.A. Constitution de la banque de données**

#### ***II.A.1. Origine des données***

La banque de données provient dans sa majeure partie de la banque SIEREM (Système d'Information Environnementale sur les Ressources en Eau et leur Modélisation) de l'UMR HydroSciences Montpellier. Elle est elle-même composée de stations pluviométriques du GHCN (Global Historical Climate Network) et du CRU (Climatic Research Unit). Quelques stations du GHCN possèdent des séries de données s'arrêtant dans les années 80. Pour compléter ces séries, Mme Fatima Driouech, responsable de la cellule climatologie et travaillant à la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc, nous a envoyé quelques séries manquantes sur la période 1970-2008.

#### ***II.A.2. Qualité et critique des données***

Les données SIEREM ont fait l'objet d'une première critique manuelle. Quelques valeurs aberrantes ont ainsi été détectées et corrigées. De plus, ce travail a permis de constituer un inventaire des stations, mettant en évidence les périodes de lacunes. Ce travail constitue une première évaluation qualitative sur les stations.

La qualité des données a été évaluée une seconde fois, mais de manière systématique par la méthode des vecteurs régionaux qui sera décrite plus tard.

Toutefois, même après ces deux évaluations, les lacunes sur certaines périodes et les erreurs d'observations ne peuvent être totalement évitées. Il doit être possible d'obtenir un réseau de stations plus complet sur le Maroc à partir de données de la DMN. Malgré tout, et grâce aussi à un apport de données de la DMN, le jeu de données que nous avons utilisé est assez dense dans le pays (surtout dans la partie Nord).

#### ***II.A.3. Localisation des stations pluviométriques***

Comme il a déjà été énoncé auparavant (cf. p8), la répartition des postes pluviométriques reste hétérogène : le nombre de stations est considérablement réduit dans la partie sud de l'Atlas mais aussi dans le Sahara Occidental et dans le Maroc oriental (Figure 11 et Figure 12).

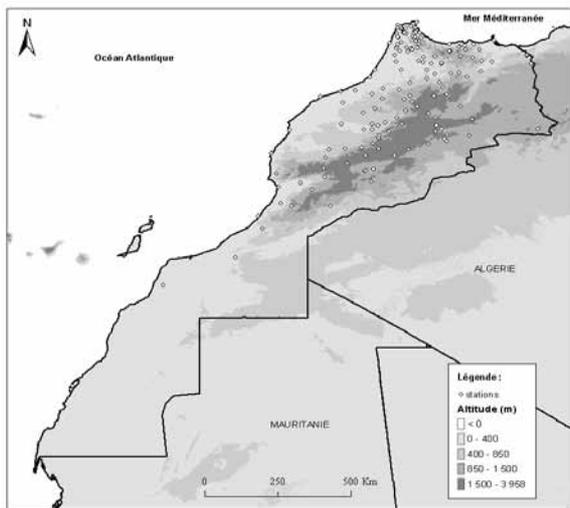


Figure 11 : carte représentant la répartition géographique des stations pluviométriques

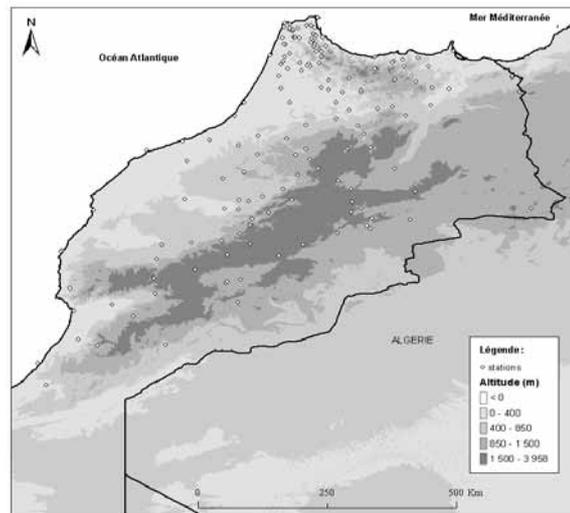


Figure 12 : zoom sur la partie de la figure 11

## II.B. Régionalisation climatique

### II. B. 1. Définition des unités climatiques ou « régions »

Une unité climatique est définie comme une zone à pluviométrie homogène contenant des stations dont les variations interannuelles sont cohérentes les unes par rapport aux autres (Wotling, 1994 ; Wotling *et al*, 1995). Avec le jeu de données pluviométriques mensuelles que nous possédons, nous cherchons à définir des régions climatiques du Maroc plus précises que dans les articles cités page 15 et 16. Par contre, Mme Fatima Zohra El Guelai travaillant à la DMN du Maroc, a déjà constitué une carte de régions homogènes grâce à la méthode des nuées dynamiques. Elle a défini ainsi 19 unités climatiques à partir des précipitations (Annexe 9). C'est son travail qui a donc constitué une base pour la suite de la régionalisation climatique.

### II.B.2. Régionalisation avec la méthode du vecteur régional

Au cours de ce stage, une régionalisation à partir des données pluviométriques a donc été réalisée. Elle a pour principal but, comme son nom l'indique, d'étudier les variations climatiques à une échelle régionale en considérant plusieurs stations.

Nous avons alors choisi d'effectuer la régionalisation grâce à la méthode du vecteur régional avec plusieurs objectifs : constituer des unités climatiques homogènes avec des critères automatiques ; et, reconstituer les données manquantes au pas de temps mensuel et annuel. D'autres méthodes existent telles que la classification ascendante hiérarchique, les nuées dynamiques... (p15 et 16) mais nous voulions utiliser une autre méthode avec laquelle personne n'avait travaillé pour le Maroc.

#### II.B.2.a. Définition du vecteur régional et méthode appliquée

Un vecteur régional est une méthode de critique des données, qui a été élaboré à l'ORSTOM-IRD dans les années soixante dix par Hiez en 1977. Il permet une homogénéisation automatique des données pluviométriques impliquant donc un minimum d'intervention manuelle.

Le vecteur régional est défini comme une suite chronologique d'indices annuels ou mensuels, représentative de l'évolution des précipitations à l'intérieur d'une région correspondant à un même type d'évolution climatique.

Il s'appuie sur le principe de pseudo-proportionnalité. C'est-à-dire, les stations doivent être toutes pseudo-proportionnelles entre elles ou évoluer colinéairement au vecteur régional aux fluctuations aléatoires près, pour une région considérée (possédant une même évolution climatique) (Annexe 11).

Il existe en fait deux méthodes. Une basée sur le mode (Hiez, 1977 ; Hiez et al, 1986), et une autre basée sur la moyenne (Brunet Moret, 1979).

La méthode Brunet Moret calcule la moyenne étendue d'une station et les indices du vecteur régional par une méthode des moindres carrés. En d'autres termes, l'indice régional d'une année est égal à la moyenne des indices de toutes les stations. Or, la moyenne peut être influencée par des valeurs extrêmes. Pour parer à cela, cette méthode filtre de manière itérative, les indices des stations s'écartant trop de la moyenne. Ces valeurs sont alors remplacées par leur estimation calculée par le vecteur. L'opération du calcul recommence ainsi jusqu'à l'obtention d'un vecteur régional dans lequel aucune valeur ne s'écarte trop (Vauchel, 2005).

La méthode de Hiez calcule aussi la moyenne étendue et les indices du vecteur régional mais en considérant cette fois que l'indice régional d'une année correspond à l'indice observé le plus fréquemment sur les différentes stations. Ainsi, il n'est pas nécessaire de filtrer les données s'écartant trop de la moyenne, les valeurs extrêmes ayant peu d'effet sur le calcul du mode (Vauchel, 2005).

Il n'existe aucune étude qui compare ces deux méthodes. La méthode de Brunet Moret a été choisie car dans notre cas il s'agit de la plus performante.

#### II.B.2.b. Avantages et limites

La méthode du vecteur régional est un outil qui permet une aide automatisée pour la critique des données. La détection des erreurs grossières, changements d'emplacement... se fait donc de manière objective et systématique. De plus, cette méthode permet de reconstituer les valeurs manquantes en fournissant des coefficients de correction pour les données erronées. Ce qui est nécessaire pour les études et projets régionaux ainsi que pour l'alimentation des modèles permettant ainsi une valorisation de l'information (Wotling, 1994 ; L'Hôte, 1985). Un autre avantage est de représenter de manière synthétique les variabilités climatiques et de ne pas se baser sur une seule station à la fois. Ainsi, le Vecteur Régional permet une synthèse de l'information et une analyse plus facile de champs pluviométriques à grande échelle. Enfin, bien que cette méthode fut utilisée le plus souvent avec des valeurs annuelles (Hiez et al, 1986 ; Wotling, 1994 ; Wotling et al, 1995), elle peut être adaptée à des valeurs mensuelles (Rossel F., 1997).

Cependant, la qualité du vecteur régional dépend de la qualité des données d'entrée (valeurs annuelles ou mensuelles des stations) puisqu'il est de toute façon contaminé par les erreurs existantes. Il est alors conseillé d'avoir un regard critique préliminaire. Aussi, cette méthode est seulement adaptée aux données vérifiant le principe de pseudo-proportionnalité (Wotling, 1994). Il faut donc au préalable découper la zone d'étude en région homogène et respecter le plus possible les limites climatiques. Pour cette raison, il est vivement conseillé d'utiliser l'année hydrologique comme base de calcul lorsque le climat est très contrasté. Le nombre de stations servant à l'élaboration du vecteur régional ainsi que le nombre d'années doit être au minimum égal à trois.

Donc, la taille des régions homogènes est aussi conditionnée par la quantité de données observées disponibles, et pas uniquement par la variabilité spatiale des précipitations. Un autre inconvénient est que cette méthode est limitée dans les zones intertropicales à pluviosité faible, soit en dessous de 400 à 500 mm/an (Wotling, 1994).

#### II.B.2.c. Elaboration des vecteurs régionaux

Afin d'améliorer la qualité des vecteurs régionaux calculés, nous avons donc appliqués les critères énumérées ci-après : (i), le calcul est effectué par année hydrologique (d'Octobre à Septembre) ; (ii), le minimum de station requis par régions a été gardé au strict minimum, c'est-à-dire, au nombre de trois ; (iii) le nombre minimum d'années observées par station a été fixée à 5; enfin (iv), la méthode appliquée est celle de Brunet Moret.

La banque de données initiale a donc été fractionnée en 19 régions climatiques. Les 19 vecteurs régionaux ont tout d'abord été calculés au pas de temps annuel, puis mensuel, grâce au logiciel Hydraccess développé par P. Vauchel, hydrologue de l'IRD (*Hydraccess*).

Il est tout de même important de noter que pour certaines régions du Maroc, la base de données était insuffisante pour constituer une unité climatique. C'est le cas de la région du « Haut Atlas Est/Midelt », où une seule station est disponible. Pour la zone « Méditerranée Est », nous disposons seulement de deux séries observées : Oujda et Sidi Jabbeur. Afin de pouvoir passer cette région au vecteur, une station algérienne a été utilisée : Maghnia. Après un premier passage aux vecteurs, certaines stations ont été supprimées automatiquement par le logiciel, tandis que d'autres l'ont été manuellement car elles s'écartaient trop du vecteur régional.

#### II.B.2.d. Résultats : indices annuels pluviométriques

Des indices annuels sont obtenus quand les vecteurs régionaux sont calculés. Ensuite, la corrélation par rapport au vecteur est calculée pour chaque station. C'est sur ce critère que nous nous sommes appuyés pour déterminer si la station pluviométrique possédait une variabilité climatique homogène de la région.

##### ➤ Premiers résultats :

Grâce aux nombreuses stations disponibles dans certaines unités climatiques, le nombre de régions a alors pu être porté à 23 (Annexe 12). Cependant, nous avons observé que certaines zones ne possèdent aucune station. Elles ont tout de même été conservées.

**Les résultats sont : (i), les séries chronologiques sont plus ou moins longues selon les régions ; (ii), certaines régions connaissent des périodes de lacunes très importantes sur certaines stations, ce qui implique alors une perte de données considérable ; et (iii), certaines ressemblances ou différences peuvent être notées entre des régions proches.**

##### ➤ Reconstitution de données :

Nous avons donc voulu reconstituer les données pluviométriques. En effet, une reconstitution permettra ainsi d'obtenir des séries plus longues et les plus homogènes possibles. Il sera alors possible d'effectuer des tests statistiques de détection des ruptures sur les indices annuels

pluviométriques par la suite. Puis, une comparaison entre les données reconstituées et les données observées, pourra être réalisée nous permettant de constater d'éventuelles différences.

**Cependant, reconstituer les données à partir du vecteur régional n'était possible qu'au pas de temps mensuel sur le logiciel utilisé. Or, la qualité des vecteurs ainsi que la perte de quantité de données considérable (par exemple pour une unité climatique, il était possible de perdre une dizaine d'années), nous ont orientés vers une autre méthode de reconstitution : les moyennes pondérées.** Formule théorique (E-drologie) :

$$P_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\bar{P}_x}{\bar{P}_i} P_i \right)$$

Où :

- $P_x$  : donnée manquante de précipitation (par exemple), estimée ;
- $n$  : nombre de stations de référence ;
- $P_i$  : précipitation à la station de référence ;
- $\bar{P}_x$  : précipitation moyenne à long terme de la station  $x$  ;
- $\bar{P}_i$  : précipitation moyenne à long terme de la station de référence  $i$ .

#### **Cette reconstitution a été effectuée à plusieurs échelles.**

En effet, un premier essai a été fait à l'échelle des 23 unités climatiques, que nous appellerons par la suite « *micros* » régions (Annexe 12). Puis, quand les séries pluviométriques possédaient des périodes trop courtes, un deuxième essai fut effectué en rassemblant plusieurs « *micro* » régions, ce qui nous a permis d'obtenir des « *mésos* » régions (Annexe 13). Ensuite, une reconstitution d'ordre « *macro* » régionale a été effectuée pour pouvoir analyser les fluctuations climatiques à plus grande échelle. Les « *macros* » régions peuvent être assimilées aux unités climatiques constituées par Ward *et al* (1999). Elles sont donc au nombre de 5 (Annexe 14).

Une fois les régions reconstituées par les moyennes pondérées, elles ont été repassées dans les vecteurs régionaux. N'ayant pas constaté de différences visuelles entre les graphiques d'indices annuels observés et reconstitués, l'interprétation est réalisée sur les données reconstituées.

#### ➤ Indices annuels (Annexe 15) :

Les indices annuels tracés nous ont permis de constater que :

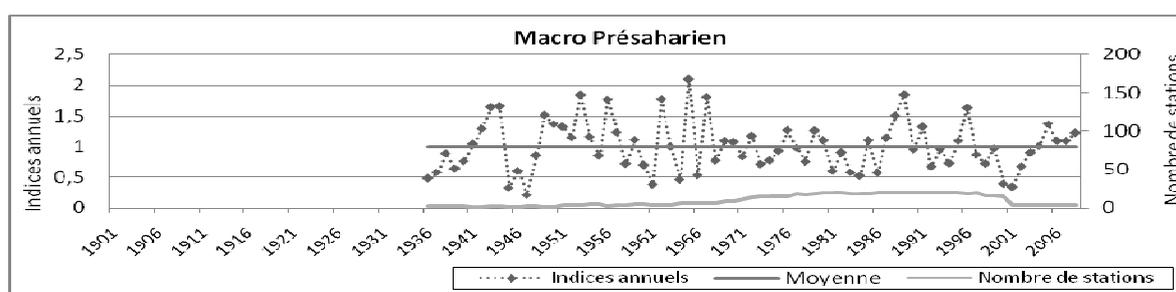
- (i) : les unités climatiques « Présaharien » et « Méditerranée » se distinguent par la fluctuation des indices par rapport aux autres « *macros* » ;
- (ii) : le nombre maximum de stations observées pour toutes les « *macros* », est atteint de 1970 à 2000 ;
- (iii) : de fortes ressemblances sont repérées entre « Atlantique Nord » et « Atlantique Sud » ;
- (iv) : la zone « Relief/Atlas » possède une fluctuation similaire à « Atlantique Nord » ;
- (v) : les indices ont tendances à diminuer depuis les années 60 sur la majeure partie des « *mésos* » et « *micros* » régions en « Atlantique Nord », « Atlantique Sud », « Relief Atlas » ;
- (vi) : enfin, en ce qui concerne les régions « Atlantique Nord », « Atlantique Sud » et « Relief/Atlas », un pic important peut être remarqué en 1996. Un autre pic maximum, se retrouve dans toutes ces régions en 1963, il est cependant plus prononcé en « Relief/Atlas » que dans les deux autres régions.

**Le pic maximum de 1996 peut être mis en relation avec un très fort indice de NAO négatif en hiver 1995/96** (Ward *et al*, 1999). Il est important de rappeler que la NAO était alors dans une phase positive depuis 1980. De plus, ce pic ne se produit pas dans les zones climatiques « Méditerranée » et « Présaharien ». Cela confirme éventuellement l'idée que la NAO au Maroc influence majoritairement les précipitations des régions atlantiques.

A l'échelle des « *mésos* » régions, ce pic est encore observé en « Extrême Nord » et en « Atlas Occidental ». A l'échelle des « *micros* » régions, ce même pic est remarqué dans toutes les unités climatiques appartenant aux « *macros* » « Atlantique Nord » et « Atlantique Sud ». Cependant, le pic est aussi constaté en « Atlas/Atlantique », « Rif/Moyen Atlas » et « Atlantique/Marrakech ». **Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que l'influence de la NAO s'étend jusqu'à la chaîne de l'Atlas.** Cette hypothèse est aussi émise dans Ward *et al* (1999).

L'autre maximum en 1963 est moins prononcé et apparaît sur un nombre de stations limité dans les « *macros* » régions. Cependant, nous savons que cette année, l'indice NAO était très négatif, ce qui a coïncidé en France avec un des hivers les plus glaciaux. Au Maroc, cela s'est donc probablement manifesté par une année très pluvieuse.

Dans la « *macro* » « Présaharien », il est possible de noter le phénomène suivant : **la fluctuation de l'indice annuel diminue avec le nombre de stations observées par an** (Figure 13). Cette même observation est remarquée pour les autres unités climatiques mais de façon beaucoup moins évidente. En effet, de 1936 à 1971, les indices annuels fluctuent avec une grande amplitude et ne sont alors représentatifs que d'un nombre peu important de stations. Après 1971, les stations observées sont plus nombreuses. L'indice annuel calculé par le vecteur régional est alors plus représentatif et voit sa variabilité réduite en fonction des années. Ceci nous permet de vérifier que **la quantité de données constitue une limite de la qualité des indices annuels des vecteurs régionaux.**



**Figure 13 : graphiques représentant les indices annuels des précipitations des « macros » régions du Maroc, ainsi que le nombre de stations observées par année**

Toujours dans cette « *macro* », si nous considérons la période 1970-2000, deux indices annuels maxima ressortent : un en 1989 et un autre en 1996. A d'autres échelles, les pics réapparaissent avec quelques décalages dans le temps sur certaines régions (Annexe 15). Mais il reste difficile à interpréter ces variations climatiques du fait du peu de données dont nous disposons.

**En Méditerranée, il est possible de distinguer une tendance à l'augmentation des indices annuels du début des années 80 à la fin des années 90.** Ces mêmes tendances sont surtout observées sur l'unité climatique « Méditerranée Rif ». Ces résultats obtenus sont différents de ceux des travaux précédents. En effet, ils montrent plutôt une diminution des indices standardisés de précipitations saisonnières (SPI). Les études réalisées par Born *et al* (2009) ont utilisés les stations

du GHCN, tout comme dans Knippertz *et al* (2003a). Cependant, en région méditerranéenne, seules trois stations observées sont disponibles. De plus, nous supposons qu'ils ont ajoutés 3 autres stations observées en Algérie pour constituer l'unité climatique méditerranéenne. Nous pouvons donc nous questionner sur la représentativité des résultats obtenus dans les précédents travaux effectués. Car, effectivement si nous observons la « *micro* » région « Méditerranée est », nous remarquons alors une diminution des indices annuels (Annexe 15).

➤ Ecart des indices annuels « *micros* » / « *macro* »

« Macro »	« Micro » s'éloignant la plus du vecteur régional macroscopique
« Méditerranée »	« Méditerranée Est »
« Relief Atlas »	« Moyen Atlas/Méditerranée »
« Atlantique Sud »	-
« Atlantique Nord »	« Extrême Nord/Méditerranée »
« Présaharien »	« Sahara Occidental »

**Figure 14 : tableau représentant les unités climatiques qui s'éloignent le plus du vecteur régional à l'échelle de la « *macro* » région**

Les graphiques de la figure 15, correspondent aux écarts des indices annuels des « *micros* » régions à la « *macro* » région correspondante. Ceci nous permet de constater quelle unité climatique s'éloigne le plus du vecteur régional macroscopique puisque la valeur zéro correspond à l'indice annuel de la « *macro* » (Figure 15).

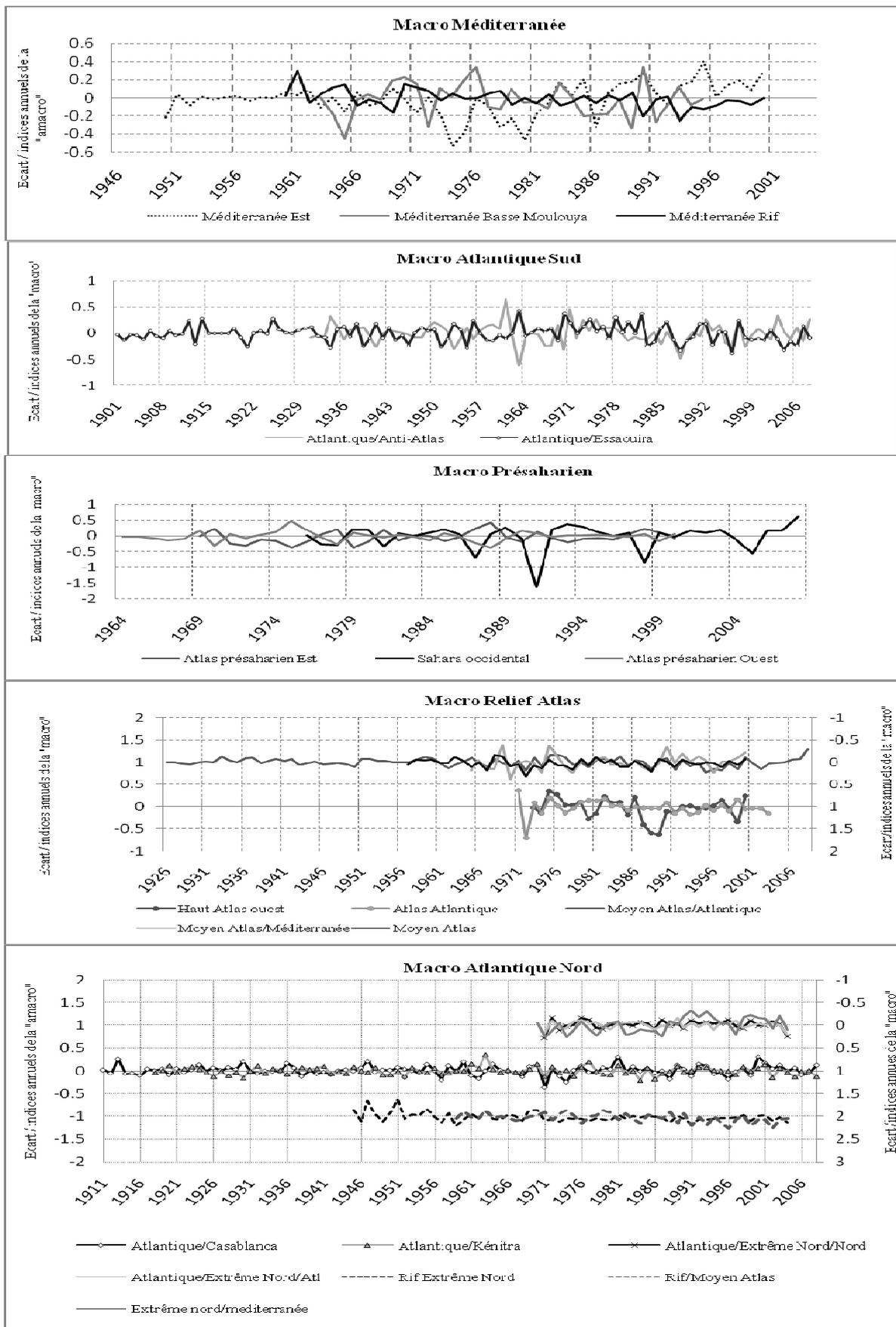


Figure 15 : graphiques représentant l'écart des indices annuels des « micros » par rapport à la « macro » région

## II. C. Tests de détection de ruptures sur les séries chronologiques

### II.C.1. Description et définition des différents tests utilisés

Une approche statistique a été réalisée pour nous aider à mieux analyser la variabilité des précipitations annuelles : les tests de détection des ruptures.

Tout d'abord, une rupture dans une série chronologique peut être assimilée à un changement dans la loi de probabilité de la série à un instant donné, le plus souvent inconnu (Ardoin-Bardin S., 2004).

Khronostat est un logiciel d'analyses statistiques de séries chronologiques développé par Jean-François Boyer à l'IRD disponible sur le site internet d'HydroSciences Montpellier (<http://www.hydrosciences.org/spip.php?article239>). Sur ce logiciel, plusieurs tests de détection de ruptures sont disponibles. Nous avons choisi ceux nous permettant de déterminer des dates de ruptures : méthode non paramétrique de Pettit, méthode Bayésienne de Lee et Heghinian, et la segmentation de Hubert (Annexe 16). Ces tests ont donc été appliqués sur les séries annuelles reconstituées des précipitations.

### II.C.2. Interprétation et analyse des résultats (Annexe 17)

Le but de cette partie est d'analyser et interpréter les détections de rupture. Pour ce faire, nous avons tout d'abord observé à l'aide des indices et précipitations des séries de références annuels, la présence de rupture. Cette analyse a été effectuée pour les régions à plusieurs échelles :

(i) « macro » ; (ii) « méso » ; et (iii), « micro ». Pour chaque région, seront précisés le(s) date(s) de rupture, le(s) test(s) de détection de rupture, ainsi que les dates de début et de fin de période des séries considérées. Il sera alors possible de comparer d'une part, les « méso » régions entre elles, et d'autre part, à la « macro » région. Nous ferons de même à l'échelle des « micros » régions, ainsi que pour les séries de références. Ainsi, des comparaisons entre les « micros » régions mais aussi aux « méso » régions et à la « macro » région pourront être effectuées. Nous comparerons également les éventuelles différences entre données observées et données reconstituées.

#### II.C.2.a. « Macro » « Atlantique Nord » (Figure 16)

A l'échelle « macro », ainsi qu'à l'échelle « méso », aucune rupture dans les séries chronologiques n'est détectée aussi bien pour les données reconstituées que non reconstituées. **Par contre, si nous observons les « micros » régions, pour deux d'entre elles (« Rif/Moyen Atlas » et « Rif Nord »), des ruptures probables sont constatées en 1979 et 1972 sur les jeux de pluies annuelles reconstituées et observées.**

Pour les séries de références, plusieurs ruptures à des années différentes sont observées pour El Jadida et Tanger. Au contraire pour Rabat-Salé et Casablanca, aucune modification ne semble être observée sur les séries chronologiques.

Pendant, à Kénitra un changement semble avoir eu lieu en milieu des années 20. Il est donc possible d'émettre plusieurs hypothèses : (i) les ruptures des séries de référence peuvent être dues à des phénomènes très locaux non représentatifs à l'échelle régionale ; ou (ii), les ruptures sont caractérisées par des influences régionales à plus petite échelle (les stations des séries de référence étant éloignées les unes des autres), mais nous disposons d'un nombre insuffisant de stations de longue durée dans les régions pour le vérifier.

Echelle	Nom des régions	Reconstitution	Rupture	Période	Nombre de stations
<b>Macro</b>	Atlantique Nord	non	aucune	1907-2008	61
		oui	aucune	1901-2008	-
<b>Méso</b>	Atlantique Nord	non	aucune	1915-2008	-
		oui	aucune	1911-2008	22
	Extrême Nord	non	aucune	1950-2004	
		oui	aucune	1932-2004	39
<b>Micro</b>	Atlantique/Casablanca	oui	aucune	1911-2008	7
		non	aucune	1917-2008	-
	Atlantique/Kénitra	oui	aucune	1918-2008	5
		non	aucune	1927-2008	-
	Extrême Nord atlantique	oui	aucune	1971-2004	17
		non	aucune	1971-2004	-
	Extrême Nord/Nord	oui	aucune	1971-2004	6
		non	aucune	1971-2004	-
	Extrême Nord/Méditerranée	oui	1988*	1970-2004	6
		non	1988*	1970-2004	-
	Rif/Moyen Atlas	oui	1979*; 1979**; 1972***	1959-2004	10
		non	1979*; 1979**; 1972***	1960-2004	-
Rif Nord	oui	1972**	1945-2004	16	
	non	1972*; 1972**; 1972***	1946-2004	-	
<b>Séries de référence</b>	Casablanca	oui	aucune	1902-2008	1
	El Jadida	oui	1954* ; 2004***	1931-2008	1
	Kénitra	oui	1925* ; 1926** ; 1926***	1918-2008	1
	Rabat-Salé	oui	aucune	1918-2008	1
	Tanger	oui	1972* ; 2003**	1902-2008	1

\*Test de Pettit, \*\*Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian, \*\*\*Segmentation de Hubert

**Figure 16: détection des ruptures des indices annuels des régions et des séries de référence appartenant à la « macro » « Atlantique Nord »**

### II.C.2.b. « Macro » « Atlantique Sud » (Annexe 18)

**Pour la « macro » « Atlantique Sud », il semblerait qu'aucune rupture des indices annuels n'ait été détectée.** Nous remarquons qu'aucune reconstitution à « méso » échelle n'a été effectuée. En effet, les séries chronologiques des « micros » régions sont jugées suffisamment longues et leur nombre insuffisant pour constituer une « méso » région. Notons tout de même que pour l'unité climatique « Atlantique/Essaouira », une rupture faible se produit en 1986.

Enfin, à l'échelle des séries de références, aucune rupture n'est remarquable pour Safi et Sidi Ifni. Pour les trois autres stations pluviométriques, des ruptures faibles sont détectées dont une en 2006 qui se retrouve à Agadir et Essaouira. Il est possible d'émettre l'hypothèse qu'il s'agit plus de variabilité climatique locale que régionale puisque celle-ci ne se retrouve pas à Safi située sur la côte Atlantique Sud entre Essaouira et Agadir. De plus, ces dates sont détectées par un seul test statistique.

### II.C.2.c. « Macro » « Méditerranée » (Annexe 18)

En ce qui concerne la « macro » « Méditerranée », une rupture faible est probable en 1976 et n'est pas retrouvée à l'échelle « méso ».

A l'échelle « méso », un changement en 1969 est observé sur les données seulement observées en « Méditerranée Rif et Basse Moulouya ». Cette même rupture est retrouvée mais sur les séries

reconstituées dans la « *micro* » région «Méditerranée Moulouya ». Il semblerait donc qu'une rupture faible se soit produite en 1969 en «Méditerranée Moulouya ».

**Pour les autres « *micros* » régions : (i), il est certain qu'une rupture est détectée en 1980 en « Méditerranée Est » ; (ii), aucun changement n'a été détecté en « Méditerranée Rif ».**

La seule série de référence dont nous disposons est celle d'Oujda. Sa série chronologique possède une rupture avérée en 1980, retrouvée en « Méditerranée Est ». Or, nous pouvons nous poser la question si la rupture de 1980 est vraiment représentative de la région Méditerranée Est. Car, en effet, il ne faut pas oublier que dans cette dernière région seules trois stations sont observées. La rupture détectée à Oujda influence peut être trop les indices annuels de la région. D'autres séries de données seraient donc souhaitables dans cette partie du Maroc.

#### II.C.2.d. « *Macro* » « Relief Atlas » (Figure 17)

Pour la « *macro* » Relief Atlas, en ce qui concerne les données non reconstituées plusieurs ruptures sont détectées : deux en début des années 60 et une à la fin des années 70 (Figure 10). Il est aussi important d'observer que sur la série reconstituée aucune rupture n'est détectée. Si nous regardons la courbe des indices annuels associée (Annexe 15), nous pouvons constater qu'au début des années 60, très peu de stations sont observées. Ainsi, nous pouvons supposer que les premières ruptures ne sont représentatives que d'un nombre insuffisant de stations pour les considérer.

Echelle	Nom des régions	Reconstitution	Rupture	Période	Nombre de stations
<b>Macro</b>					
	Relief Atlas	oui	aucune	1936-2008	31
		non	1979* ; 1961** ; 1962***	1922-2008	-
<b>Méso</b>					
	Marrakech et Atlas occidental	non	1978* ; 1972** ; 1972***	1959-2003	-
		oui	aucune	1921-1956	16
		oui	1976*	1959-2008	16
	Moyen Atlas	non	1979* ; 1979***	1931-2008	-
		oui	aucune	1925-2008	15
<b>Micro</b>					
	Atlantique/Marrakech	non	1980* ; 1978** ; 1978***	1964-2002	-
		oui	aucune	1921-1956	9
		oui	1980* ; 1978** ; 1995*** ; 1998***	1963-2008	9
	Moyen Atlas	non	aucune	1971-2000	-
		oui	1971***	1957-2000	5
	Moyen Atlas/Atlantique	oui	1979* ; 1979/1980***	1925-2008	7
		non	1979* ; 1979/1980***	1925-2000	
	Moyen Atlas/Méditerranée	oui	1976**	1965-2000	4
		non	aucune	1971-2001	
	Haut Atlas Ouest	non	aucune	1974-2000	-
		oui	aucune	1973-2000	4
	Atlas/Atlantique	non	1975**	1968-2003	-
		oui	1972**	1968-2003	5
<b>Séries de référence</b>					
	Fès	oui	1979* ; 1979** ; 1979***	1914-2008	1
	Ifrane	oui	1980* ; 1980**	1935-2008	1
	Meknès	oui	1980* ; 1980** ; 1975*** ; 1977***	1931-2008	1
	Midelt	oui	1976* ; 1976** ; 1962*** ; 1976***	1932-2008	1

\*Test de Pettit, \*\*Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian, \*\*\*Segmentation de Hubert

**Figure 17 : détection des ruptures des indices annuels des régions et des séries de référence appartenant à la « *macro* » « Relief Atlas »**

Si nous observons à présent les régions à l'échelle « *méso* ». Une rupture en 1972 est détectée pour « Marrakech et Atlas Occidental », ainsi qu'une autre plus faible en 1978. Dans le « Moyen Atlas », une rupture avérée est détectée en 1979. Or, pour ces deux unités climatiques, les ruptures détectées sur les séries principalement observées, disparaissent lors de la reconstitution.

A l'échelle des « *micros* » régions, il est certain qu'aucune rupture n'ait été détectée en « Haut Atlas Ouest » sur la période 1973-2000 sur données reconstituées et non reconstituées. Par contre, en « Moyen Atlas/Atlantique », en 1979 une rupture s'est probablement produite puisqu'elle est observée sur les deux types de séries.

Pour l'unité climatique « Atlantique/Marrakech », la segmentation de Hubert détecte des années différentes : 1978 pour la série d'indices annuels non reconstituée, puis 1996 et 1998 pour la série reconstituée. Nous pouvons alors penser que la reconstitution de données a dans ce cas, introduit un biais et les dates de ruptures s'en trouvent alors modifiées. En ce qui concerne les deux autres régions, de faibles ruptures sont observées et apparaissent ou disparaissent suivant que les données sont reconstituées ou non.

La rupture de 1979 en « Moyen Atlas/Atlantique », se retrouve très nettement à Fès et en 1980 à Ifrane et Meknès. A Midelt, il est certain qu'une rupture s'est produite en 1976.

**Suite à toutes ces observations, nous pouvons supposer qu'à la fin des années 70, dans la « macro » Relief Atlas et plus particulièrement, dans la région « Moyen Atlas/Atlantique », une rupture probable s'est produite.** Dans la région de Midelt, nous ne disposons d'aucune autre station pour savoir si la rupture de 1976 est représentative de toute une région, ou bien, si elle est propre à Midelt. Il serait donc préférable de disposer d'autres données en plus.

#### II.C.2.e. « *Macro* » « Présaharien » (Figure 18)

En ce qui concerne la « *macro* » « Présaharien », une rupture s'est probablement produite à la fin des années 50. Par contre, dans les données reconstituées cette rupture n'est plus détectée.

A l'échelle « *méso* », celle-ci ne se retrouve ni « Sahara/Anti-Atlas » ni en « Atlas présaharien/Anti-Atlas ». De plus, le nombre de stations observées est très réduit durant cette période.

Si nous regardons maintenant les données reconstituées, les dates de ruptures disparaissent ou changent. Dans les « *micros* » régions, en « Atlas présaharien Ouest » et « Sahara occidental », aucune rupture n'est détectée. Cependant en « Atlas présaharien Est », une rupture est détectée en 1996 pour les données reconstituées et en 1997 pour les données observées. Pour le « Sahara Occidental », il est possible de remarquer que seuls les indices annuels de pluies reconstituées ont été passés aux tests de détection de rupture. En effet, sur les données observées seules, cela n'a pas été possible car trop peu de données étaient exploitables.

En ce qui concerne les séries de références, Villa Cisneros 1 et Laayoune ne présentent aucune rupture. Il en est de même pour Tantan, mais la série dont nous disposons est très courte et ne permet pas de couvrir une période assez longue pour détecter une quelconque rupture. A Errachidia, des ruptures à des années différentes se sont produites. Par contre à Ouarzazate, il est certain qu'une rupture s'est produite à la fin des années 40. C'est cette même rupture que l'on retrouve dans les unités climatiques « Atlas Présaharien » et « Atlas Présaharien/Anti-Atlas » à l'échelle « *Méso* »,

mais seulement pour les données reconstituées. Or à cette période, le nombre de stations observées est très faible (2 ou 3), la variabilité climatique observée pour ces stations peut ne pas être représentative de toute la région concernée. Pour le vérifier, il nous faudrait disposer de données observées sur d'autres séries depuis le début des années 40.

Un des principaux problèmes dans la « macro » « Présaharien », est que nous disposons de peu de séries qui restent assez courtes et présentent de nombreuses lacunes. Ceci est surtout vrai pour le Sahara Occidental, seules trois stations sont à notre disposition : Villa Cisneros, présentant 7 ans de lacunes de 1973 à 1980 et ne pouvant être complétée ; Tantan, avec seulement 7 années de données ; et enfin, Laayoune ne commençant qu'en 1976. Il est donc difficile de détecter des ruptures cohérentes sur ces séries.

Echelle	Nom des régions	Reconstitution	Rupture	Période	Nombre de stations
<b>Macro</b>					
	Présaharien	oui	aucune	1936-2008	21
		non	1959* ; 1957** ; 1957***	1951-2008	-
<b>Méso</b>					
	Atlas présaharien	non	1959**	1957-2000	-
		oui	1947**	1936-2008	15
	Sahara/Anti-Atlas	non	aucune	1969-2000	-
		oui	aucune	1967-2008	7
	Atlas présaharien / Anti-Atlas	non	2002**	1951-2008	-
		oui	1947**	1936-2008	18
<b>Micro</b>					
	Atlas présaharien Ouest	non	aucune	1964-2000	-
		oui	aucune	1964-2000	10
	Atlas présaharien Est	oui	1996**	1969-2000	8
		non	1997**	1971-2000	-
	Sahara occidental	oui	aucune	1976-2008	-
<b>Séries de références</b>					
	Errachidia	oui	2005** ; 1959*** ; 1973***	1936-2008	1
	Goulmime	oui	1975**	1969-2000	1
	Laayoune	oui	1991**	1976-2008	1
	Ouarzazate	oui	1948* ; 1947** ; 1948*** ; 1954***	1931-2008	1
	Tantan	oui	aucune	1949-1956	1
	Villa Cisneros 1	oui	aucune	1951-1973	1
	Villa Cisneros 2	oui	1984**	1980-2000	1

\*Test de Pettit, \*\*Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian, \*\*\*Segmentation de Hubert

**Figure 18 : détection des ruptures des indices annuels des régions et des séries de référence appartenant à la « macro » « Présaharien ».**

## II.D. Synthèse sur les données hydroclimatiques

### II.D.1. Qualité et critique des données

Suite à une première critique, un inventaire des séries de données avec les périodes lacunaires a été constitué. Ainsi, certaines stations comportant des trop grandes lacunes ont pu être mises en évidence (environ 13 stations). D'autres possèdent des séries très courtes (quatre à huit ans de données), ou encore des séries très anciennes (Cap Spartel : de janvier 1894 à décembre 1920).

D'autres situations problématiques ont été repérées, par exemple : deux stations possédant les mêmes coordonnées avec des valeurs différentes ou inversement.

Cependant, des stations possédant des données complémentaires ont été rassemblées nous permettant de constituer des séries de référence.

Nous avons aussi remarqué que beaucoup de stations du GHCN possèdent des séries s'arrêtant au cours des années 80. Une mise à jour aurait besoin d'être effectuée concernant ces données. Quant aux stations pluviométriques du CRU, elles comportent de nombreuses valeurs aberrantes par rapport aux autres séries.

Après un premier passage aux vecteurs régionaux au pas de temps annuel grâce au logiciel Hydraccess, certaines stations ont été supprimées du jeu de données. En effet, leur variabilité climatique était très différente et non représentative de la variabilité climatique régionale. Par contre, certaines autres stations sortaient du vecteur régional car les séries étaient décalées d'un mois. Ceci est certainement dû à des erreurs d'entrée de données sous fichier informatique.

Au pas de temps mensuel, nous avons observé que la qualité des vecteurs a fortement diminué. Cette diminution s'accroît au fur et à mesure que l'on se dirige vers le Sud du Maroc, mais aussi en période sèche. Ceci est probablement dû à une variabilité climatique grandissante et à une diminution du total des précipitations. Nous supposons donc que la méthode des vecteurs régionaux trouve ses limites dans les zones sud marocaines ou du Sud de l'Atlas.

Entre temps, nous avons reçu des données de pluies mensuelles dont l'essentiel couvrait la période 1970-2008. Celles-ci proviennent de la DMN par l'intermédiaire de Fatima Driouech. Ainsi, nous avons complété la base de données et constitué d'autres séries de références. Quelques autres stations ont ainsi été ajoutées. Les vecteurs régionaux ont donc dû être recalculés et ont été de ce fait améliorés.

Au total, nous possédons tout de même une base de données assez dense, soit environ 148 séries pluviométriques mensuelles depuis 1878 jusqu'à 2008, mais qui restent tout de même hétérogènes.

### ***II.D.2. Régionalisation climatique***

Les objectifs de la régionalisation climatique étaient donc d'étudier la variabilité climatique à l'échelle régionale. Pour cela, une approche globale (« *macro* ») puis plus précise (« *méso* » et « *micro* ») ont été effectuées.

Les principales limites pour la constitution des unités climatiques ont été : la qualité initiale des données, les lacunes dans les séries observées, la répartition spatiale des stations, et la variabilité importante du climat au Maroc. Ce sont ces mêmes limites qui ont alors eu des conséquences sur la qualité des vecteurs régionaux.

Nous avons aussi rencontré des problèmes avec l'utilisation de la méthode des vecteurs régionaux, notamment avec l'impossibilité de reconstituer les données.

Cependant, nous obtenons des résultats intéressants. Tout d'abord, nous avons constitué 23 unités climatiques à l'échelle « *micro* ». Un travail aussi précis, nous a permis d'étudier plus en détail la variabilité climatique des précipitations au Maroc (surtout avec les tests de détections de ruptures effectués par la suite). Une approche à plusieurs échelles, nous a aussi permis de mettre en valeur les relations entre la NAO et les précipitations annuelles : en 1963 et 1996.

**Cependant, globalement nous remarquons une tendance à la diminution sur les indices annuels, surtout dans les régions atlantiques et sur l'Atlas. Seuls les indices annuels de la région méditerranéenne ont tendance à augmenter (surtout « Méditerranée Rif »).**

### II.D.3. Rupture

L'analyse et l'interprétation de détection des ruptures nous a permis de constater, que la constitution des régions est limitée par la quantité du jeu de données, mais aussi par leur répartition spatiale et la durée des séries.

Cette approche statistique nous a également permis de constater que la reconstitution de données indiquait des dates de ruptures différentes. Certaines dates de ruptures peuvent même disparaître ou apparaître (Figure 19 et 20). Enfin, les données reconstituées présentent moins de dates de ruptures que les données observées. Nous pouvons alors supposer que la reconstitution permet de mieux représenter la variabilité climatique régionale. En effet, les dates de ruptures détectées sur les séries observées manifestent probablement une variabilité climatique plus locale que régionale.

Enfin, nous avons noté une tendance à la diminution des précipitations à la fin des années 70/début des années 80 au Maroc. Cependant ce signal reste faible et hétérogène. En effet, de nombreuses ruptures faibles sont observées tandis que peu de ruptures probables sont détectées. Les dates suivant les régions pour une même échelle restent également différentes (Annexe 19).

Dates de ruptures *	Séries de références	« Macro »	« Méso »	« Micro »
1969				Méditerranée/Basse Moulouya
1972			Atlas Atlantique	Rif Nord
1976	Midelt			
1979	Fès		Moyen Atlas	Rif/Moyen Atlas et Moyen Atlas/Atlantique
1980	Meknès et Ifrane			Méditerranée Est

\*dates de ruptures détectées par au moins deux tests statistiques

**Figure 19 : tableau représentant les dates de ruptures associées aux régions climatiques ou séries de références concernées sur les données reconstituées**

Dates de ruptures *	Séries de références	« Macro »	« Méso »	« Micro »
1926	Kénitra			
1948	Ouarzazate			
1957		Présaharien		
1972			Atlas Atlantique	
1976	Midelt			
1978				Atlantique/Marrakech
1979	Fès		Moyen Atlas	Rif/Moyen Atlas et Moyen Atlas/Atlantique
1980	Meknès et Ifrane			Méditerranée Est

\*dates de ruptures détectées par au moins deux tests statistiques

**Figure 20 : Figure 21 : tableau représentant les dates de ruptures associées aux régions climatiques ou séries de références concernées sur les données reconstituées**

## CHAPITRE III - DONNEES HYDROLOGIQUES

### III.A. Constitution de la banque de données

#### III.A.1. Origine des données

La banque de données concernant les débits mensuels proviennent en majorité du GRDC (Global Runoff Data Center). Les séries chronologiques concernent généralement la période 1950 à 1990, mais sont de durées variables. D'autres données provenant de l'agence hydraulique du Souss-Massa ont pu être acquises par l'intermédiaire de Fatima Driouech.

#### III.A.2. Qualité et critique des données

La qualité des données dépend des erreurs qui peuvent se produire dans la chaîne d'acquisition et de traitement de données.

Les séries dont nous disposons ne possèdent très peu (pour les stations du GRDC) voire aucune lacune (pour les stations du de l'agence hydraulique du Souss-Massa).

Pour les stations comportant des lacunes, nous avons voulu reconstituer les données manquantes pour réaliser par la suite des tests de détection de rupture sur les débits annuels mais aussi mensuels. Pour cela, des corrélations sont réalisées entre les différentes stations.

Tout d'abord, nous avons cherché à effectuer des corrélations amont-aval entre des postes peu distants sur un même bassin versant. Cette méthode a fonctionné pour les stations de M'jara et Ourtzagh (Figure 22).

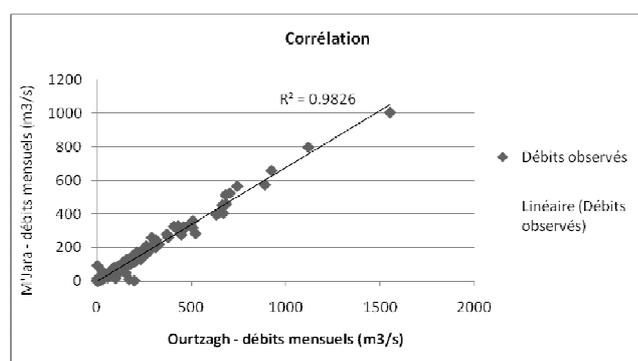


Figure 22 : graphique représentant la corrélation amont-aval entre les débits de M'Jara et Ourtzagh

Ensuite, nous avons essayé d'établir des corrélations entre stations situées sur deux bassins versants côte à côte. Aucune corrélation ne fut trouvée. Des corrélations pluies-débits ont donc dû être réalisées. Pour la station hydrologique Bab Ouender, le coefficient de corrélation est de 0.74, mais aucune autre corrélation pluie-débit n'a pu être établie pour les débits de Dechra El, Oued, Dar El Caïd, Pont du Mdez et Tazzoughert.

#### III.A.3. Localisation des stations hydrologiques et bassins versants

Nous disposons de 26 séries hydrologiques sur le Maroc, concernant 8 des 9 grands bassins hydrologiques du Maroc : Loukkos, Sebou, Moulouya, Oum Er Rbiâ, Bouregreg, Tensift, Souss-Massa, Ziz-Guir-Rhéris-Draa. Cependant si nous observons la figure 22, les bassins versants sont répartis de façon hétérogène dans l'espace. Le plus grand nombre de bassins est observé dans la partie Nord, plus précisément au centre sur les reliefs de l'Atlas et du Rif.

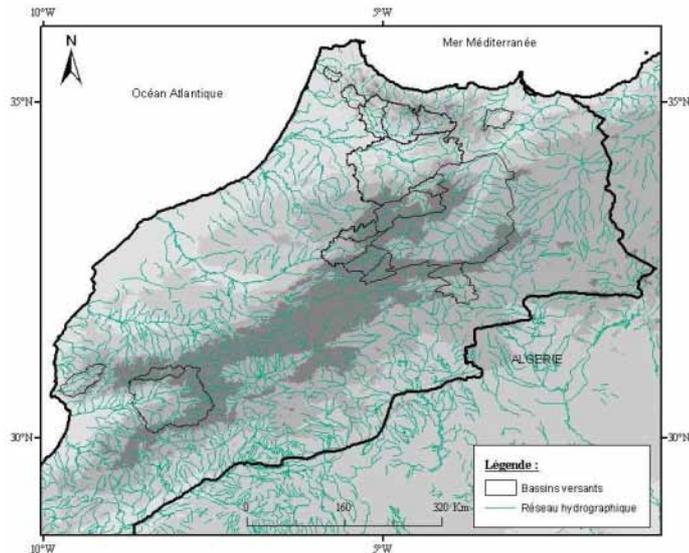


Figure 23 : carte des bassins versants et réseau hydrographiques sur le MNT

Cependant, en vue d'une éventuelle spatialisation des données et de l'application du modèle hydrologique GR2M, nous avons choisis de travailler sur les bassins versants possédant une superficie minimum de 1500 km<sup>2</sup> et dont la série durait plus de 10 ans (Annexe 20).

### III.B. Débits

#### III.B.1. Evolution des débits annuels

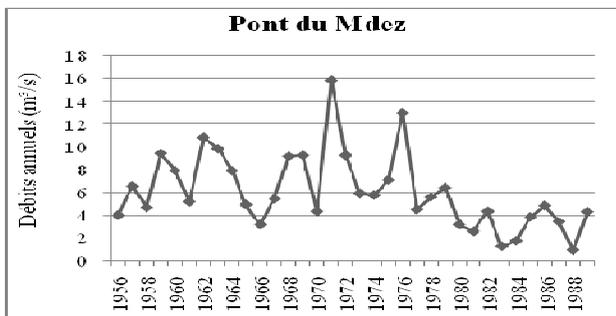


Figure 24 : graphique des débits annuels à Pont du Mdez de 1956 à 1988

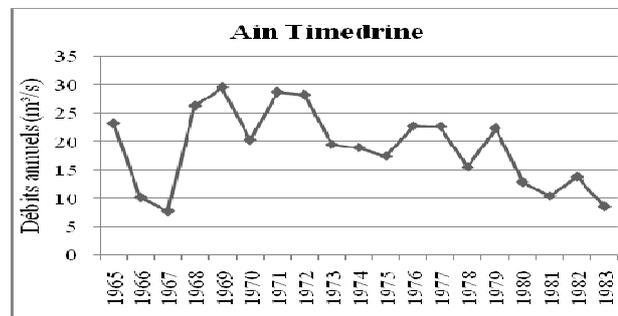


Figure 25 : graphique des débits annuels à Ain Timedrine de 1965 à 1983

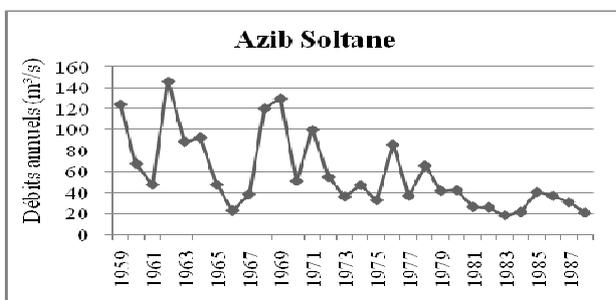


Figure 26 : graphique des débits annuels à Azib Soltane de 1959 à 1987

Dans le bassin versant du Sebou, les débits ont tendances à diminuer depuis la fin des années 60, mais plus significativement depuis le début des années 80 (figure 23, 24 et 25). En effet, depuis 1980 les débits n'excèdent pas : 5 m<sup>3</sup>/s à Pont du Mdez et 30 m<sup>3</sup>/s à Azib Soltane. De plus, les débits les plus faibles peuvent être observés en 1967 et de 1981 à 1985 pour les trois stations hydrologiques.

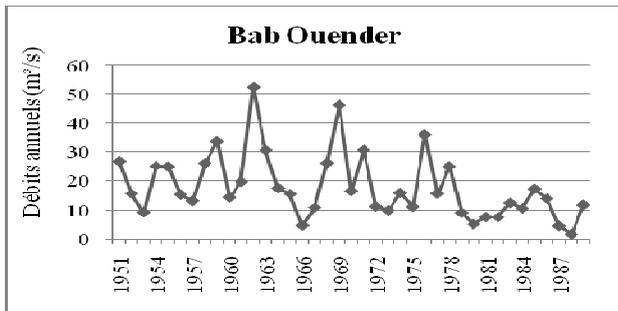


Figure 27 : graphique des débits annuels à Bab Ouender de 1951 à 1987

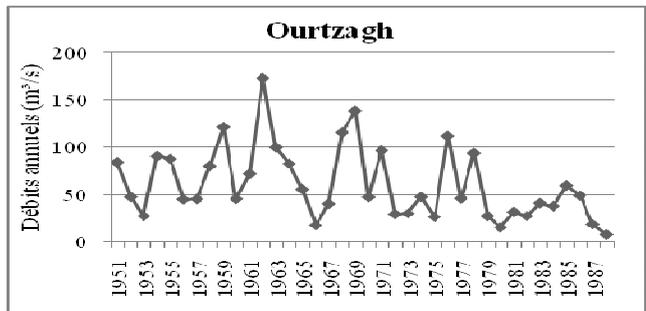


Figure 28 : graphique des débits annuels à Ourtzagh de 1951 à 1987

Dans le bassin versant de l'Ouergha, la diminution des débits (Bab Ouender, Ourtzagh et M'Jara) est moins significative que pour les stations précédentes (figure 26, 27 et 28). Cependant, nous pouvons remarquer que les débits sont plus faibles depuis 1979/80. Les débits maxima atteints, sont de 20 m<sup>3</sup>/s pour Bab Ouender et 50 m<sup>3</sup>/s pour Ourtzagh.

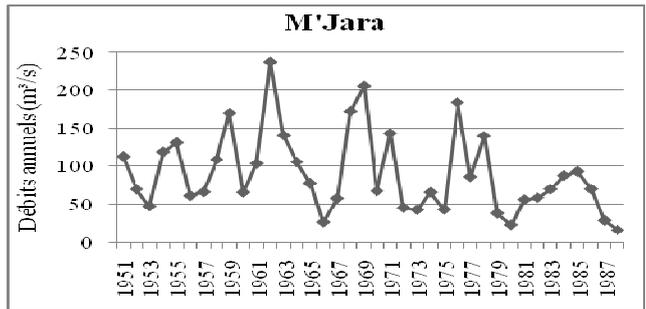


Figure 29 : graphique des débits annuels à M'Jara de 1951 à 1987

A Dar El Caïd et Zeïda dans le bassin de la Moulouya, les débits ont tendances à diminuer (Figure 29). Cependant, il serait bien d'avoir une quantité de données plus importantes pour Zeïda, au moins avant 1976. Il est encore possible d'observer que les plus faibles débits se situent durant la première moitié des années 80, mais aussi en 1956 et 1967 à Dar El Caïd.

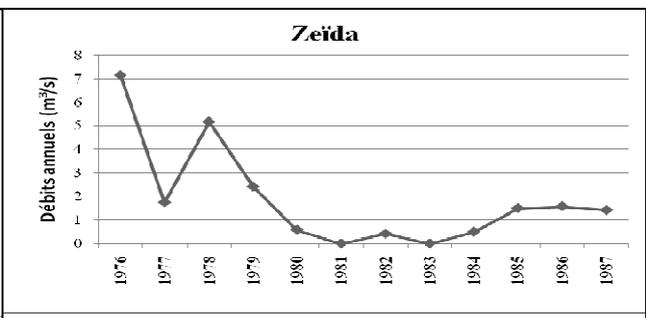
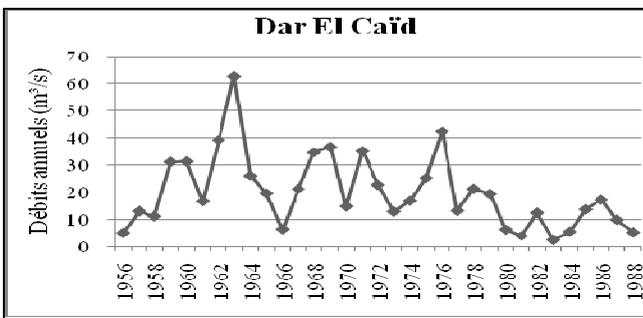


Figure 30 : graphiques des débits annuels dans le bassin de la Moulouya

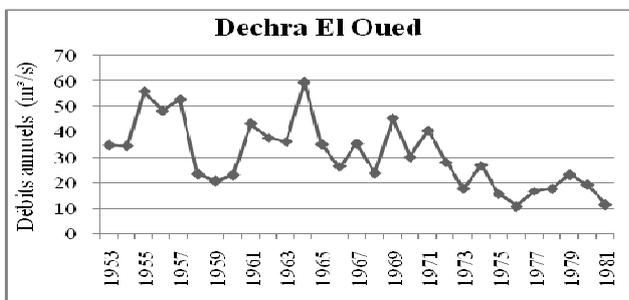


Figure 31 : graphiques du débits annuel dans le bassin de l'Oum Er Rbia à Dechra El Oued de 1953 à 1981

Dans le bassin versant de l'Oum Er Rbiâ, le débit à Dechra El Oued a tendance à diminuer depuis le milieu des années 60 (Figure 30). Dans Chaponnière et Smakhtin (2006), cette même station montre une diminution des débits de 1978 à 1988. Ceci ne peut être vérifié dans notre cas puisque la série dont nous disposons s'arrête en 1981.

Cependant, dans leurs travaux, Chaponnière et Smakhtin (2006) ont pu mettre en relation la diminution des débits avec une baisse des précipitations au même endroit. Toutefois, le changement d'occupation des sols peut être aussi à l'origine de cette tendance.

Enfin, dans la partie Sud du Maroc, pour Tazoughert, il paraît difficile de distinguer une tendance (Figure 31). Il en est de même pour Aoulouz pont dans le bassin hydraulique du Souss-Massa (Figure 32). Nous pouvons tout de même repérer des périodes de faible hydraulicité : 1957 à 1961, 1971 à 1977 et 1980 à 1986.

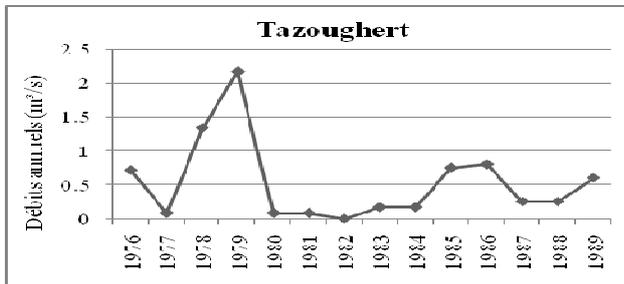


Figure 32 : graphique des débits annuels à Tazoughert de 1976 à 1989

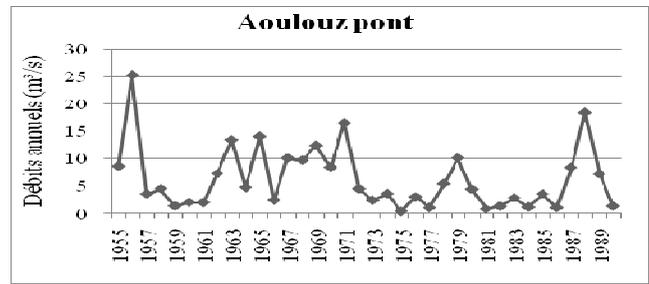


Figure 33 : graphique des débits annuels à Aoulouz Pont dans le Souss de 1955 à 1989

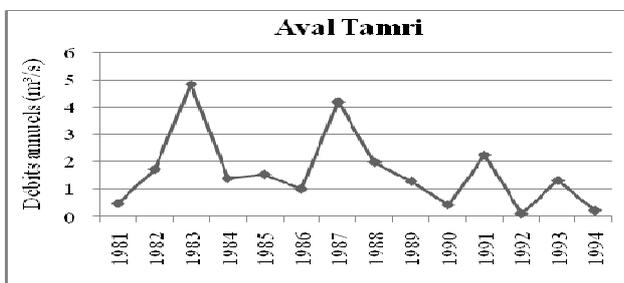


Figure 34 : graphique des débits annuels à Aval Tamri de 1981 à 1994

A Aval Tamri, situé dans le bassin du Souss-Massa, le débit a tendance à diminuer avec des débits encore plus faibles en 1990, 1992 et 1994 qu'en 1984 et 1986 (Figure 33). Des données hydrologiques avant 1981 seraient cependant nécessaires afin de mieux observer évaluer les tendances des débits.

En conclusion, nous pouvons dire que les débits annuels sur les bassins versants étudiés, ont tendance à diminuer depuis la fin des années 60, mais surtout plus significativement depuis la fin des années 70/début des années 80.

Or, si nous nous rappelons la littérature, les précipitations diminuent en moyenne au Maroc à ces mêmes périodes (Senoussi *et al*, 1999 ; Knippertz *et al*, 2003).

Nous pouvons alors émettre l'hypothèse que la diminution de débits est due à une diminution des pluies au Maroc. Mais l'hypothèse d'un changement d'occupation des sols ou d'aménagement hydrauliques sur les bassins versants n'est pas à écarter.

## II.B.2. Approche statistique : tests de détection des ruptures (annexes 13 et 14)

### II.B.2.a. Pas de temps annuel (Figure 35)

**Pour commencer, nous allons observer les ruptures détectées sur les séries de débits annuels en général et par bassin versant quand cela est possible.**

Premièrement, nous pouvons noter que pour les stations d'Amsoul, Amaghous et Oujjane aucune rupture n'a été constatée. Ces deux dernières stations font partie du bassin versant de Massa. Quant à Amsoul, il fait partie du bassin de l'Issen avec Aguenza, où une rupture faible est observée en 1986. Donc, nous pouvons émettre l'hypothèse que sur ces bassins, il est probable qu'aucune rupture ne se soit produite.

Ensuite, des ruptures avérées sont remarquées sur plusieurs stations. Il s'agit de : Dar Khrofa, Pont du Mdez et Dar El Caïd pour 1979 ; puis de Tarhat et Aït Moutade pour 1980. Il est à noter que toutes ces stations sont situées dans des régions et des bassins versants différents.

Cependant si nous regardons les débits par bassin versant. Dans l'Oum Er Rbia, Dechra El Oued manifeste une faible rupture en 1979 tandis qu'à Tarhat une rupture avérée est détectée en 1980. Dans le bassin versant de l'Ouergha, une seule station sur trois (Pont du Mdez) détecte une rupture avérée en 1979.

Autre remarque, une rupture en 1963 est seulement détectée par la segmentation de Hubert pour les stations de Dar El Caïd, Ansegrim et Bab Ouender. Les deux premières stations sont situées dans le grand bassin versant de la Moulouya, ce qui peut expliquer pourquoi la rupture de 1963 à Ansegrim se retrouve plus en aval à Dar El Caïd. Cependant, il semble important de remarquer que Bab Ouender n'est ni situé dans le même bassin versant ni dans la même région. Or, si nous nous rappelons le graphique des indices annuels de la « macro » région « Atlantique Nord », un pic maximum est observé en 1963. Ce qui aurait probablement influencé le débit de Bab Ouender, mais qui ne se retrouve pas sur les bassins versants amont ou aval proches.

Enfin, des ruptures sont observées au moins par deux tests pour Aoulouz pont (1972), Zeïda (1979), Ansegrim et Foum Tillich (1976). Ces dates de rupture restent spécifiques aux stations et ne sont pas observées par la suite dans le même bassin versant ou proche.

**A présent, si nous regardons les ruptures par unité climatique et que nous les comparons aux ruptures des indices annuels de précipitations.**

Pour la « macro » « Atlantique/Nord », en « Extrême Nord / Atlantique », aucune rupture n'est détectée sur les indices annuels pluviométriques. Cependant les débits annuels nous signalent une rupture très probable, en particulier en 1979 à Dar Khrofa. Dans le « Rif Nord », la rupture avérée signalée en 1972 dans les séries de pluies ne se retrouve pas sur les débits. Par contre, en « Rif/Moyen Atlas », nous pouvons dire que la rupture de 1979 est retrouvée dans les débits annuels mais aussi dans les pluies annuelles. Une plus grande quantité de données de débits pourrait nous permettre de constater si la rupture de 1979 est représentative de la région « Rif/Moyen Atlas » seule, ou si elle peut s'étendre jusqu'en « Extrême Nord / Atlantique ».

Pour la « macro » « Méditerranée », en « Méditerranée/Basse Moulouya », à Dar El Caïd, il est certain qu'une rupture s'est produite sur les débits en 1979. Par contre, sur les précipitations de la région concernée, la rupture est détectée 10 ans plus tôt et de plus, sur les données reconstituées seulement. La rupture détectée sur les débits est sans doute à relier à Zeïda située en amont et à la traversée de la Moulouya dans le Moyen Atlas. En effet, dans toutes les régions du Moyen Atlas, appartenant à la « macro » « Relief Atlas », les séries chronologiques des débits annuels sont marquées par plusieurs ruptures dont 5 stations sur 7, en 1979. Par contre, il est à noter que cette même rupture se retrouve seulement sur la région « Moyen Atlas/Atlantique » sur les séries d'indices annuels pluviométriques.

Toujours dans la « macro » « Relief Atlas », en « Moyen Atlas/Méditerranée », une faible rupture était détectée en 1976 sur les indices annuels des précipitations. Cette date de rupture est

retrouvée mais détectée cette fois par les trois tests statistiques dans les précipitations annuelles de Midelt, et dans les débits annuels d'Ansegnir.

Les dates de ruptures signalées dans les séries de débits et de précipitations sont complètement différentes en ce qui concerne la « macro » « Présaharien ». Dans la région « Atlas présaharien Ouest », une seule station de débit présente une rupture avérée en 1980 : Aït Moutade. De même pour l'unité climatique « Atlas présaharien Est », une rupture s'est produite en 1976 à Foug Tillich. Nous pouvons penser qu'il s'agit de ruptures non représentatives à l'échelle régionale, mais nous disposons que d'un nombre limité de stations de débits pour le vérifier. Les ruptures détectées sur certaines stations pluviométriques et lors des indices annuels détectées à la fin des années 40 et 50, ne peuvent être affirmées ou confirmées ici puisque les séries chronologiques ne débutent pas avant les années 70 pour les débits.

### II.B.2.b. Pas de temps mensuel

**Pour essayer de constater d'éventuelles ruptures en saison des pluies au Maroc, nous avons voulu réaliser des tests de détection des ruptures au pas de temps mensuel. Pour se faire, nous avons interpréter et analyser ces changements par bassin versant.**

Station	Aoulouz Pont
Janvier	1979**; 1956(++)**; 1979***
Février	aucune
Mars	1974*; 1974**; 1956(++)**; 1988***
Avril	1974**
Mai	1956**; 1956(++)**; 1971***
Juin	1972*
Juillet	1972*
Août	1973*; 1965***
Septembre	1972*
Octobre	aucune
Novembre	aucune
Décembre	1973*; 1973**
Annuel	1972*; 1972**

Figure 35 : tableau représentant les ruptures détectées à Aoulouz Pont

Globalement, nous avons constaté qu'aucune rupture avérée n'a été détectée pour les bassins de l'Issen, du Massa et du Souss. Cependant, une station fait exception : Aoulouz pont. En effet, il est probable qu'une rupture s'est produite : en 1979 en janvier ; en 1956, surtout au mois de mai ; 1973 en décembre ; et enfin, 1974 en mars (Figure 34). Par contre, au pas de temps annuel, une rupture probable était détectée en 1972.

<b>"Macro" région</b>	<b>"Méso" région</b>	<b>Unités climatiques ou « micro » région</b>	<b>Grand bassin versant</b>	<b>Nom station</b>	<b>Période</b>	<b>Durée (années)</b>	<b>Rupture</b>
<b>Atlantique Sud</b>	-	<b>Atlantique/Anti-Atlas</b>	<b>Souss</b>	Aoulouz pont	1955/1990	35	1972*; 1972**
	-	<b>Atlantique/Essaouira</b>	<b>Souss</b>	Aguenza	1980/1994	14	1986**
			<b>Souss</b>	Aval Tamri	1981/1994	13	1991**
			<b>Souss</b>	Amsoul	1979/1994	15	aucune
<b>Atlantique Nord</b>	<b>Extrême Nord</b>	<b>Atlantique Extrême Nord</b>	<b>Loukkos</b>	Dar Khrofa	1976/1987	11	1979*; 1979**; 1979***
			<b>Loukkos</b>	Kannoua	1972/1987	15	1975**
	<b>Extrême Nord</b>	<b>Méditerranée Nord</b>	<b>Loukkos</b>	Emsa	1972/1987	15	1979**
	<b>Extrême Nord</b>	<b>Rif Nord</b>	<b>Sebou</b>	Ourtzagh	1952/1987	25	1979**
			<b>Loukkos</b>	Mdouar	1970/1987	17	1971**
	<b>Atlantique Nord</b>	<b>Rif/Moyen Atlas</b>	<b>Sebou</b>	Azib Soltane	1970/1988	18	1979*; 1980**; 1982***
			<b>Sebou</b>	Bab Ouender	1953/1989	38	1979*; 1979**; 1963(++)**
			<b>Sebou</b>	M'Jara	1957/1988	31	1986**
<b>Présaharien</b>	<b>Atlas présaharien</b>	<b>Atlas présaharien Est</b>	<b>Zia</b>	Foum Tillich	1975/1988	13	1976**; 1976***
			<b>Guir</b>	Tazzoughert	1977/1988	11	aucune
	<b>Atlas présaharien</b>	<b>Atlas présaharien Ouest</b>	<b>Dadès</b>	Aït Moutade	1971/1987	16	1980*; 1980**; 1980***
			<b>Massa</b>	Amaghous	1977/1994	17	aucune
			<b>Massa</b>	Ouijjane	1979/1994	15	aucune
<b>Méditerranée</b>	<b>Méditerranée Rif/Est et Basse Moulouya</b>	<b>Méditerranée/Basse Moulouya</b>	<b>Moulouya</b>	Dar El Caïd	1960/1988	28	1979*; 1979**; 1963(++)** ; 1979***
	<b>Méditerranée Rif et Basse Moulouya</b>	<b>Méditerranée/Rif</b>	<b>Moulouya</b>	Dar Driouch	1970/1986	16	1977**
<b>Relief Atlas</b>	<b>Marrakech et Atlas Occidental</b>	<b>Haut Atlas Ouest</b>	<b>Tensift</b>	Nkouris	1977/1986	9	1980**
	<b>Moyen Atlas</b>	<b>Moyen Atlas</b>	<b>Sebou</b>	Ain Timedrine	1965/1983	18	1979**
			<b>Sebou</b>	Pont du Mdez	1958/1989	31	1979*; 1979**; 1979***
			<b>Oum Er Rbia</b>	Tarhat	1975/1986	11	1980* ; 1980**; 1980***
	<b>Moyen Atlas</b>	<b>Moyen Atlas/Atlantique</b>	<b>Oum Er Rbia</b>	Dechra El Oued	1954/1983	29	1979**
			<b>Bouregreg</b>	Oujlet Haboub	1977/1987	10	1979**
	<b>Moyen Atlas</b>	<b>Moyen Atlas/Méditerranée</b>	<b>Moulouya</b>	Zeïda	1977/1987	10	1979**; 1979***
			<b>Moulouya</b>	Ansegmir	1960/1987	27	1976*; 1976**; 1963(++)**

Figure 36 : tableau représentant les dates de ruptures détectées sur les débits au pas de temps annuel

A Bab Ouender, situé dans le bassin de l'Ouergha, plusieurs ruptures sont détectées pour les différents mois (Figure 35). Cependant en Mars, deux tests détectent la date de 1979. Il est donc probable qu'une rupture s'est produite cette année là. Si nous comparons avec la même série mais au pas de temps annuel, nous pouvons observer la même rupture en 1979.

Toujours dans ce même bassin, mais à Ourtzagh, une rupture probable est observée en 1980 au mois de Septembre alors qu'au pas de temps annuel la date de rupture de 1979 ressort.

A M'jara, nous observons seulement des ruptures faibles. Seule 1969 est détectée par deux tests statistiques en Novembre.

**Pour le bassin versant de l'Ouergha, il est alors possible de tirer la conclusion suivante : une rupture à la fin des années 70/début des années 80 a pu se produire en période de hautes eaux, mais elle n'est pas assez importante pour être détectée par tous les tests statistiques.**

Station	Bab Ouender	M'jara	Ourtzagh
Janvier	aucune	aucune	1972**
Février	1987**	1979**	1987**
Mars	1979*;1979**;1960(++)**	1979**	1979**;1960(++)**
Avril	1976*;1979**	1984**	1982**
Mai	1984**	1982**	1984**
Juin	1986**	1980**	1984**
Juillet	1979*	1982**	1978*;1979**;1971(++)**
Août	1975*;1980***	1979**	1978*;1984**
Septembre	1981***	1980**	1980*; 1980**;1965(++)**
Octobre	aucune	1982**	1980**
Novembre	1954**	1969*;1969**;1951***	1969**
Décembre	1963(++)**	1982**	1965**
Annuel	1979* ;1979** ;1963(++)**	1986**	1979**

Figure 37 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins de l'Ouergha

Si nous nous intéressons à présent au bassin du Sebou (Figure 37), à la station d'Ain Timedrine, les dates de rupture détectées par au moins deux tests statistiques sont 1976 et 1979, aux mois de Juin et Juillet respectivement.

A Azib Soltane dans le même bassin, plusieurs ruptures sont détectées. Les dates ressortant le plus souvent sont : 1973 en Janvier, 1978 en Mai et Juin, et 1979 en Novembre. Par contre, il est peut être important de noter que d'Avril à Juin, le test de segmentation de Hubert détecte toujours une rupture en 1971.

A Pont du Mdez, quelques dates de rupture ressortent : 1973 en Janvier, 1977 en Avril et 1976 en Mai et Juin.

**Dans le bassin versant du Sebou, il est donc probable qu'un changement s'est produit au milieu des années 70 voire à la fin.**

Station	Ain Timedrine	Azib Soltane	Pont du Mdez
Janvier	1973**	1973*;1973**;1970***	1973*;1973**;1970***
Février	aucune	1979**	1988**
Mars	1980**	1973*;1979**;1973***	1980**; 1979***
Avril	1979**	1975*;1979**;1971(++)**	1977*;1977**;1970***; 1976***
Mai	1967(++)*	1978*;1978**;1971(++)**	1976**
Juin	1978*;1976**;1976***	1978*;1978**;1971(++)**	1976*;1976**
Juillet	1978*;1979**;1979***	aucune	aucune
Août	1978**	1973*;1978**;1978***	aucune
Septembre	1979**	1972*;1968(++)**;1968(++)**	aucune
Octobre	1966***	aucune	aucune
Novembre	aucune	1979*;1979**	1980*;1981***
Décembre	1969**	1973*;1969**;1963(++)**	1972*;1979**;1959***; 1961***
Annuel	1979**	1979* ;1981** ;1982***	1979* ;1979** ;1979***

Figure 38 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins du Sebou

Dans le bassin de la Moulouya (Figure 38), la date de rupture de 1976 à Ansegmir, est détectée d'Avril à Août, avec en plus, depuis Mai, une rupture en 1963 proposée par le test de segmentation de Hubert.

A présent, si nous observons les débits mensuels de Zeida, peu de ruptures sont détectées. Seul le mois de Février est marqué par une rupture probable en 1979.

Par contre à Dar El Caïd, beaucoup de ruptures sont présentes. Cependant les dates de 1977 en Août et Décembre, et 1980 en Septembre ressortent le plus. La même rupture en 1963 qu'à Ansegmir est retrouvée ici à Dar El Caïd mais seulement en Juin et Juillet. En conclusion pour ce bassin versant, il est probable qu'une rupture s'est produite en 1963 à la fin du printemps et en été. Ensuite, même si les dates de ruptures ne sont pas identiques, une tendance générale de rupture en fin des années 70 semble se détacher.

Station	Ansegmir	Dar El Caid	Zeida
Janvier	1973**;1973***	1973*;1972**;1970***	1979**; 1977***
Février	aucune	aucune	1979**;1979***
Mars	1986**;1986***	1979**	aucune
Avril	1976*;1976**;1976***	1976*;1979**;1975***	1979***
Mai	1976*;1976**;1963(++)**	1978**	aucune
Juin	1976*;1976**;1963(++)**; 1976***	1976*;1979**;1963(++)**	aucune
Juillet	1976*;1963(++)**	1976*;1979**;1963(++)**	aucune
Août	1976**;1963(++)**	1977*;1977**	aucune
Septembre	aucune	1980*;1980**;1980***	aucune
Octobre	aucune	1985**	aucune
Novembre	1972*	1973*;1969**;1969**	aucune
Décembre	1973**;1972***	1977*;1977**;1963(++)**	1976***
Annuel	1976* ;1976** ;1963(++)**	1979* ;1979** ;1963(++)** ;1979***	1979** ;1979***

Figure 39 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins de la Moulouya

Dans l'Oum Er Rbia, à Dechra El Oued, une rupture est détectée dans plusieurs mois en 1979/80 d'Avril à Octobre (Figure 39). A Tarhat situé plus en amont, la rupture est plutôt située en 1980/81 et d'Avril à Décembre. Il est donc possible d'émettre l'hypothèse qu'un changement s'est produit en fin des années 70/début des années 80, du printemps jusqu'au début de l'hiver.

Station	Dechra El Oued	Tarhat
Janvier	1982**	1980**
Février	1982**	1979**
Mars	1974*;1980**;1956***;1962***	1980**
Avril	1979*;1979**;1971(++)**	1982**;1982***
Mai	1980*;1980**;1971(++)**; 1976***	1980*;1980**;1980***
Juin	1979*;1979**;1979***	1980*;1980**;1980***
Juillet	1979*;1979**;1979***	1980*;1980**;1980***
Août	1979*;1980**;1980***	1981*;1981**;1981***
Septembre	1980**;1980***	1981*;1981**;1981***
Octobre	1979**;1979***	1980*;1981**;1981***
Novembre	1980**	1980*;1980**;1980***
Décembre	1978**	1980*;1979**;1979***
Annuel	1979**	1980* ;1980** ;1980***

Figure 40 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins de l'Oum Er Rbiâ

Les stations où aucune rupture n'a été détectée au pas de temps mensuel sont Kannoua, Mdouar, Oujlet Haboub, N'Kouris et Dar Driouch (Annexe 20). Des ruptures faibles sont présentes sur les débits annuels, mais elles ne sont certainement pas assez significatives ou représentatives pour que nous puissions les considérer.

Dans le sud du Maroc, à Fom Tillich au pas de temps mensuel, les débits présentent des ruptures en 1976/77 sur les saisons du printemps et de l'été (Figure 40). A Aït Moutade, c'est au

printemps qu'une rupture en 1980 s'est produite. Par contre à Tazzoughert, aucun changement dans les séries mensuelles comme annuelle n'a été proposée par les tests statistiques (Annexe 20).

Station	Aït Moutade	Foum Tillich
Janvier	aucune	aucune
Février	aucune	aucune
Mars	1980**	aucune
Avril	1980*;1980**;1980***	1976; 1976***
Mai	1980*;1976**;1976***	1976**;1976***
Juin	1982*;1982***	1976**;1976***
Juillet	aucune	1976**;1976***
Août	aucune	1988/1989
Septembre	aucune	1976***
Octobre	aucune	1987***
Novembre	1971***	1984***
Décembre	aucune	aucune
Annuel	1980* ;1980** ;1980***	1976** ;1976***

Figure 41 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins du Sud de l'Atlas

### III. C. Applications du modèle pluie-débit GR2M

Un des objectifs du stage est d'étudier les écoulements et d'observer leur évolution au fil du temps. Nous voulons donc calculer les coefficients d'écoulements sur la plus grande période possible. Pour cela, nous utilisons la modélisation hydrologique GR2M pour pouvoir disposer des pluies interpolées par bassin versant de 1900 à 2008.

#### III.C.1. Généralité sur la modélisation pluie-débit

Un modèle est défini comme un ensemble de définitions, qui décrit les relations entre différents éléments d'un système. Un modèle hydrologique peut être assimilé à une représentation formelle (sous forme d'équations mathématiques) des mécanismes de transfert entre les différents compartiments du cycle de l'eau.

Les modèles hydrologiques existants sont nombreux. Une multitude de classification peut être trouvée sur ce sujet mais généralement, les modèles à base physique s'opposent aux modèles conceptuels. Les premiers ont pour objectif, grâce à des lois physiques, de décrire chacune des phases du cycle de l'eau. Les seconds cherchent à schématiser le cycle de l'eau. Il n'y a pas de lien avec la physique classique car ils nécessitent une optimisation des valeurs des différents paramètres d'ajustement. En fait, l'optimisation va consister à établir des jeux de paramètres assurant le meilleur ajustement entre les valeurs de débits simulées par le modèle et les valeurs observées. Cependant, les modèles conceptuels ont l'avantage de demander peu de données hydroclimatiques et permettent une utilisation simple.

Autre opposition entre les modèles sont les modèles globaux et modèles spatialisés. Les modèles globaux concernent le bassin versant en entier, toutes les variables sont alors moyennées sur sa surface. Par contre, les modèles spatialisés, simulent les écoulements à l'échelle d'un maillage régulier.

Compte tenu de nos objectifs et de nos limitations (temps imparti entre autres), il a donc été choisi d'utiliser un modèle conceptuel global : le modèle GR2M.

### III.C.2. Le modèle GR2M

Le modèle GR2M a été initié au CEMAGREF à la fin des années 80 (Perrin C et al, 2007). Il est simple d'utilisation. Connaissant la pluie mensuelle et l'évapotranspiration potentielle mensuelle, le modèle permet d'estimer l'écoulement mensuel à partir de deux paramètres à caler  $X_1$  et  $X_2$  (d'où son appellation : Génie Rural, 2 paramètres, pas de temps Mensuel).

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir-sol (ou réservoir de production) ou capacité en eau du sol (WHC), caractérisé par son remplissage maximal  $X_1$  (**Figure 42**).

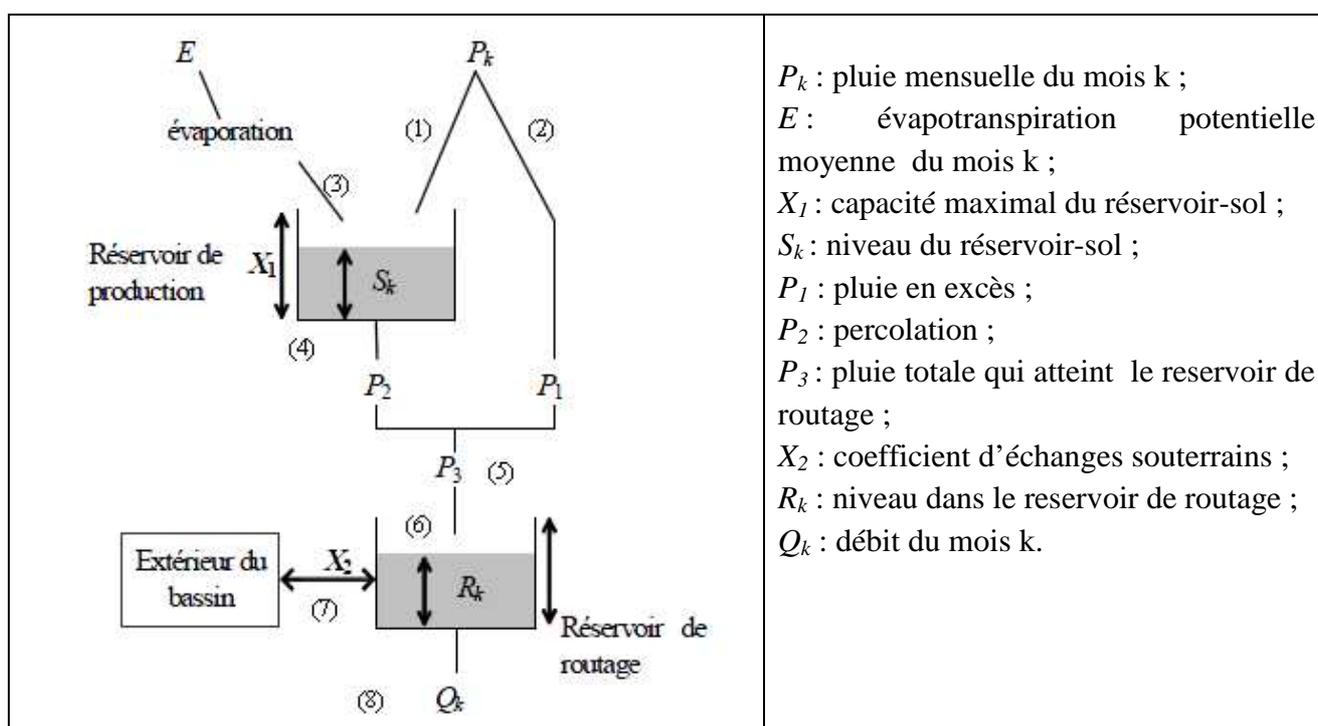


Figure 42 : schéma de la structure du modèle GR2M et sa légende. Adapté de Mouelhi et al, 2006.

### III.C.3. Constitution des données d'entrées

Le modèle GR2M nécessite donc en données d'entrée au pas de temps mensuel : les pluies, les évapotranspirations potentielles (ETP) et enfin les capacités du réservoir-sol (WHC).

Les précipitations mensuelles des bassins versants étudiés ont été calculées au demi-degré carré de 1900 à 2008. Ceci a pu être réalisé grâce à la méthode d'interpolation Spline et au logiciel Interpol, développé au sein d'HydroSciences Montpellier.

Les valeurs d'évapotranspiration potentielles ne sont pas disponibles directement. Elles ont donc été calculées à partir de températures moyennes mensuelles spatialisées du CRU en utilisant la formule de Thornwaite (Milano, 2009).

Les capacités en eau du sol (WHC) au demi degré-carré ont été calculées par HydroSciences Montpellier (suivant la méthode de Dieulin (2005)). Ce travail a été réalisé grâce à la carte des sols d'Afrique de la FAO (FAO, 1995).

### III.C.4. Evaluation de la performance de GR2M

La fonction critère de Nash-Sutcliffe en 1970, a été retenue pour évaluer la qualité du modèle lors du calage et de la validation. Il est défini par :

$$Nash = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_i (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_o^i - Q_m^i)^2} \right]$$

Si  $i$  est le mois considéré :  $Q_o^i$  : le débit mensuel observé,  $Q_c^i$  : le débit mensuel calculé et  $Q_m^i$  : le débit moyen mensuel observé.

Plus le critère se rapproche de 100 %, plus l'ajustement du modèle sera meilleur. Un critère de moins de 60 % ne donnerait pas une concordance satisfaisante entre les hydrogrammes observés et simulés par le modèle.

### III.C.4. Résultats

Nom	Période	Période_Calibration	Période_Validation	Nash_Validation	Nash_Calibration
Ain Timedrine	1965-1984	1965-1979	1980-1984	-	-
Aït Ouchene	1980-1984	1980-1982	1983-1984	-	-
Aoulouz pont	1955-1991	1955-1979	1980-1991	23.91	54.59
Aval Tamri	1980-1995	1980-1991	1992-1995	-	-
Azib Soltane	1959-1989	1959-1979	1980-1989	51.58	-
Bab Ouender	1952-1990	1952-1979	1980-1990	51.63	-
Dar El Caïd	1957-1988	1957-1979	1980-1988	46.14	-
Dechra El Oued	1953-1989	1953-1979	1980-1989	56.42	-
Lalla Chafia	1980-1984	1980-1982	1983-1984	55.19	-
M'Jara	1951-1989	1951-1979	1980-1989	-	-
Ourtzagh	1951-1989	1951-1979	1980-1989	54.25	10.82
Pont du Mdez	1956-1990	1951-1979	1980-1990	54.23	-
Tazzoughert	1976-1989	1976-1979	1980-1989	55.28	-
Zeïda	1976-1988	1976-1979	1980-1988	-	-

\* le signe – signifie une valeur négative

**Figure 43 : tableau des résultats obtenus lors de la calibration et validation du modèle sur les bassins versants étudiés**

Sur le tableau de la figure 42, nous observons des résultats médiocres. En effet, la valeur des fonctions critères de Nash sont de moindre qualité en période de validation et deviennent négatives en période de calibration. Pour quatre bassins versants, les deux périodes montrent des « Nash » non significatifs.

En conclusion, nous ne pouvons pas utiliser la modélisation hydrologique pour étudier les écoulements puisque le modèle n'arrive pas à reproduire correctement (critère de Nash supérieur à 60%) les débits observés. Ceci est probablement dû à un problème d'interpolation des pluies (distance d'interpolation insuffisante). Des tests devront être réalisés plus tard.

## III. D. Coefficients d'écoulements

### III.D.1. Précipitations moyennes par bassin versant

La modélisation hydrologique ayant échoué et étant donné le temps imparti, nous avons calculés les pluies moyennes annuelles en utilisant une simple moyenne arithmétique des stations pluviométriques situées sur le bassin versant (Annexe 21).

### III.D.2. Coefficients d'écoulement annuels

Le coefficient d'écoulement représente le ratio entre la quantité d'eau écoulee et la quantité d'eau précipitée pendant une période donnée et sur un bassin donné (<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/FRDIC/DICECLMT.HTM>).

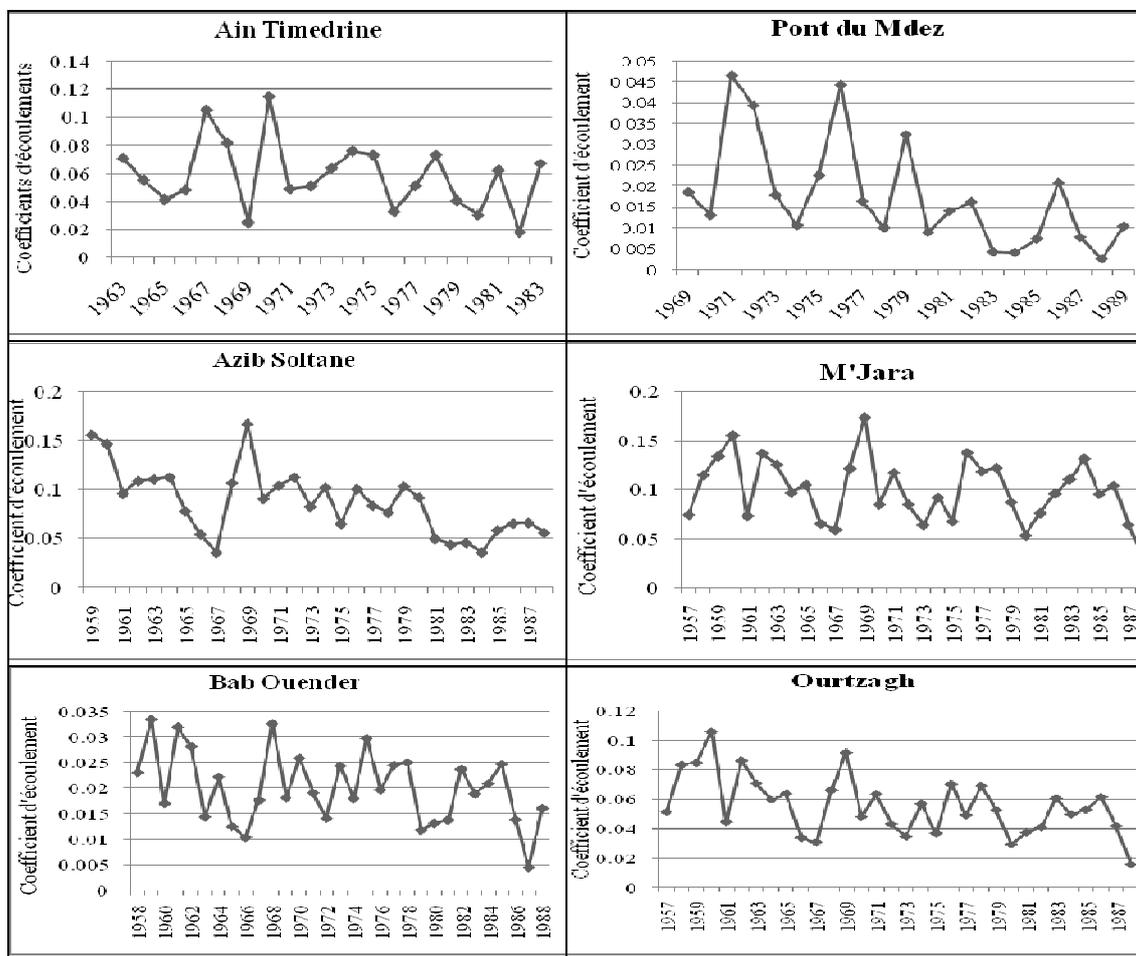


Figure 44 : graphiques représentant les coefficients d'écoulements en fonction du temps dans le grand bassin hydraulique du Sebou.

Sur le grand bassin hydraulique du Sebou, tous les coefficients d'écoulement ont tendance à diminuer (Figure 43).

Dans le bassin de l'Ouergha, le bassin versant du Pont du Mdez est situé sur le Moyen Atlas et est le plus en amont. Nous pouvons remarquer qu'il montre une diminution plus importante par rapport aux autres stations depuis 1971 jusqu'à 1989. A Ain Timedrine et Azib Soltane, les coefficients d'écoulements diminuent depuis 1967 et 1969 respectivement.

A Bab Ouender, dans le bassin du Sebou, nous pouvons observer une tendance à la diminution depuis 1959. A M'Jara et à Ourtzagh, nous pouvons observer une baisse continue des coefficients d'écoulements depuis 1960, mais moins significative pour M'Jara. De plus, 1967 et 1980 marquent les plus faibles coefficients d'écoulements sur les séries.

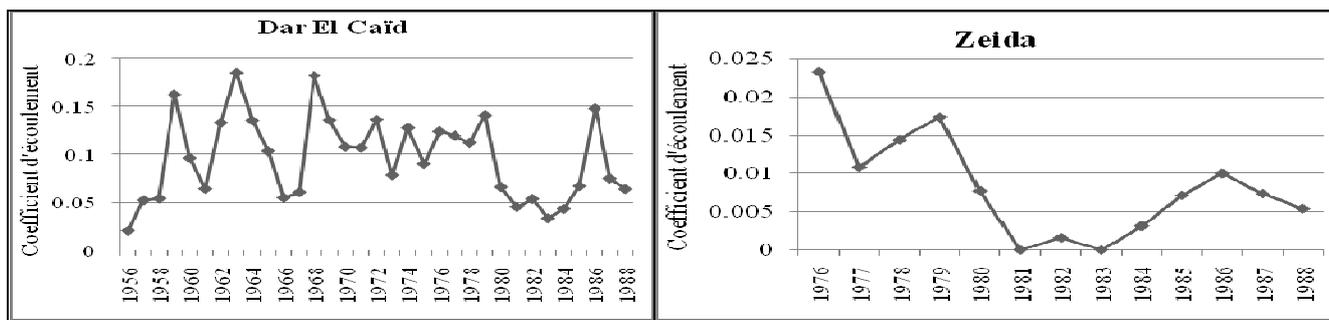


Figure 45 : graphique représentant les coefficients d'écoulements en fonction du temps dans le bassin de la Moulouya

Sur le grand bassin de la Moulouya, Dar El Caïd ne montre aucune tendance significative de 1956 à 1988 (Figure 44). Par contre, une diminution des coefficients d'écoulement est observée de 1976 à 1988 sur le bassin versant de Zeïda. Sur ces deux bassins, nous pouvons aussi observer des très faibles coefficients de 1980 à 1985/86.

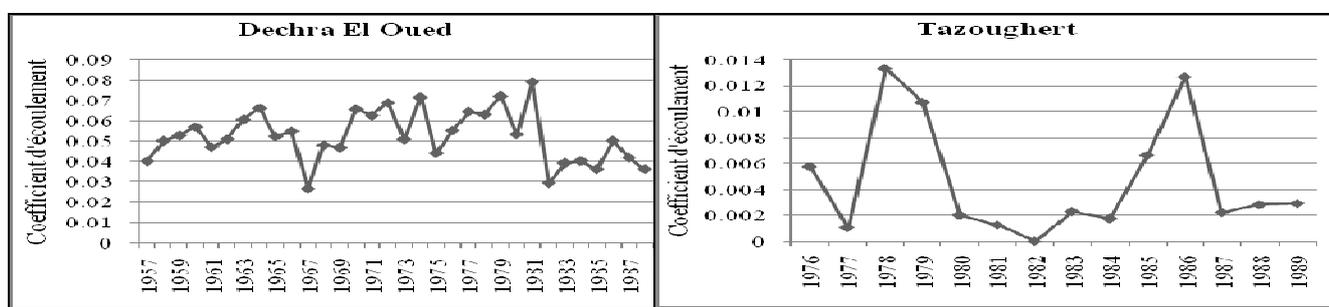


Figure 46 : graphique représentant les coefficients d'écoulements en fonction du temps à Tazoughert

Sur l'Oum er Rbia à Dechra El Oued, aucune tendance générale ne peut être constatée de 1957 à 1987 (Figure 45). Cependant, nous pouvons remarquer des coefficients d'écoulements beaucoup plus faibles depuis 1981. 1967 montre le plus faible coefficient sur la série.

A Tazoughert, nous ne pouvons distinguer de tendance mais seulement une période de faibles coefficients d'écoulement de 1980 à 1984 avec un minimum atteint en 1982.

Dans le grand bassin hydraulique du Souss-Massa, le bassin d'Aval Tamri montre une diminution de 1980 à 1995, tandis que le bassin d'Aoulouz pont ne montre pas de tendance particulière (Figure 46). Encore une fois, les coefficients minimums sont atteints durant le début des années 80, mais aussi en 1975 pour Aoulouz pont. Par contre Aval Tamri montre les plus faibles coefficients d'écoulements en 1985 et 1992.

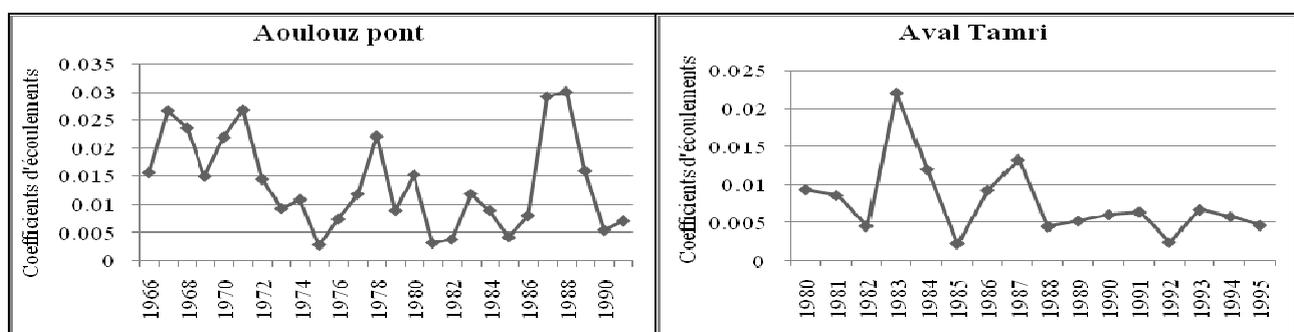


Figure 47 : graphique représentant les coefficients d'écoulements en fonction du temps à Aval Tamri

**En conclusion, une diminution des coefficients d'écoulements est visible depuis les années 70, accentuée pour de nombreux bassins depuis le début des années 80.**

### III.D.3. Ruptures

Grand bassin hydrologique	Sous -bassin	Bassin Versant	Période	Rupture
Sebou	Sebou	Pont du Mdez	1958/1989	1979*; 1982** ; 1980***
		Ain Timedrine	1965/1983	1975**
		Azib Soltane	1959/1988	1980*; 1980**; 1960***; 1980***
	Ouergha	Bab Ouender	1953/1989	1986**
		Ourtzagh	1952/1987	1966*; 1963**; 1966***
		M'Jara	1957/1988	1986**
Oum Er Rbia	Oum Er Rbia	Dechra El Oued	1954/1983	1981*; 1981**; 1981***
Moulouya	Moulouya	Dar El Caïd	1960/1988	1979**
		Zeïda	1977/1987	1980*; 1979* ; 1980***
		Aoulouz pont	1955/1990	1980* ; 1979** ; 1980***
Souss-Massa	Souss	Aval Tamri	1981/1994	1984**
	Ait Amer	Tazoughert	1977/1988	1979**
Sud Atlas	Guir			

Figure 48 : tableau représentant les ruptures détectées sur les séries chronologiques des coefficients d'écoulements

Dans le grand bassin hydrologique du Sebou, les bassins versants semblent être affectés par des ruptures dans le début des années 80.

En effet, dans le sous-bassin du Sebou, Azib Soltane présente une rupture avérée en 1980 et une rupture faible en 1960. Le bassin du Pont du Mdez présente quant à lui plusieurs dates de rupture concordant cependant toutes à la fin des années 70/début des années 80. Seul Ain Timedrine possède un faible changement en 1975.

Dans le sous-bassin de l'Ouergha, des ruptures faibles sont détectées à Bab Ouender et à M'Jara. Par contre, Ourtzagh montre deux ruptures probables en 1966 et une plus faible en 1963. Le changement produit en 1966 peut être mis en relation avec la sécheresse qui a eu lieu à cette même période dans la Loukkos et le Bou-regreg (Lahlou, 2000).

Pour le bassin de Dechra El Oued, dans le bassin de l'Oum Er Rbia, une rupture avérée est détectée en 1981.

Dans le bassin de la Moulouya, la rupture est plutôt survenue en 1979/80, de même que dans le Souss.

Par contre, à Tazoughert et Aval Tamri ce sont des ruptures faibles qui ont été détectées en 1979 et 1984 respectivement.

En résumé, les ruptures se situent généralement à la fin des années 70 jusqu'en milieu des années 80, excepté pour le bassin versant d'Ourtzagh et d'Ain Timedrine. De plus, toutes ces ruptures comme pour les débits, marquent des changements négatifs, c'est-à-dire des diminutions dans les écoulements.

Nous pouvons alors mettre en relation ces ruptures avec les sécheresses qui ont lieu de 1980 à 1985 au Maroc (cf. p13).

### III.E. Synthèse sur les données hydrologiques

Un des objectifs du stage est de calculer les coefficients d'écoulement et d'observer leur évolution au fil du temps. Pour se faire, nous avons calculés les pluies moyennes par bassin versant au pas de temps annuel. Puis à l'aide des débits annuels à l'exutoire des bassins, le calcul des coefficients d'écoulements annuels a pu être effectué.

### III.E. 1. Evolutions des écoulements

Les débits et les coefficients d'écoulements annuels connaissent une diminution depuis les années 70. De 1980 à 1985, nous avons constaté les années les plus sèches d'un point de vue hydrologique.

Auparavant, une tendance à la diminution a été constatée sur les indices annuels pluviométriques depuis les années 60. De plus, la littérature nous a montré une diminution des précipitations au Maroc, depuis les années 60 et plus significativement depuis la fin des années 70/début des années 80. Nous supposons donc que la diminution des écoulements est due à une diminution des précipitations.

### III.E. 2. Ruptures : comparaison entre débits et coefficients d'écoulements

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Débit annuel	Coeff. écoulement annuel
Aoulouz pont	79		74		56							73	72	80
Amsoul		79												
Ourtzagh									80				79	65
Azib Soltane	73				78	78		78	68		79			80
Bab Ouender			79										79	
M'Jara											69			
Foum Tillich				76	76	76							76	
Aït Moutade				80	76	82							80	
Dar El Caïd								77	80		69	77	79	
N'Kouris	79													
Ain Timedrine						76	79							
Pont du Mdez	73			77		76							79	
Tarhat				82	80	80	80	81	81	81	80	79	80	
Dechra El Oued				79	80	79	79	80	80	79				81
Zeïda		79											79	80
Ansegmir	73		86	76	76	76							76	

\*les cases vides signifient qu'aucune rupture probable n'a été détectée

**Figure 49 : tableau représentant les dates de ruptures détectées par au moins deux tests statistiques sur les bassins versants (en gras : les dates de ruptures détectées par plus d'un bassin versant la même année ou le même mois)**

Sur la figure 48, nous observons que des ruptures probables se sont produites : en 1973 et 1979 en Janvier dans 4 grand bassin hydraulique différents ; en 1976 en Avril, Mai et Juin dans les reliefs de l'Atlas ; en 1980, au mois de Mai dans le bassin de l'Oum Er Rbia et au mois de Septembre dans trois bassins différents ; enfin en 1969, au mois de Novembre sur deux bassins versants. Nous constatons donc que les ruptures ont lieu aussi bien en saison de pluies qu'en saison sèche. Mais 1976 est signalé qu'en période sèche.

A l'année, les ruptures probables sont 1976, 1979 et 1980 pour les débits (Figure 48 et Annexe 23). Dans l'ensemble, elles correspondent bien aux ruptures détectées au pas de temps mensuel. Mais si nous regardons le tableau par bassin versant, nous remarquons que certaines dates annuelles et mensuelles ne concordent pas : Dar El Caïd, Ain Timedrine, Dechra El Oued...

En ce qui concerne les coefficients d'écoulement, l'année de rupture probable est 1980 (Figure 48). Beaucoup de ruptures faibles ont été détectées (Annexe 23) et nous indique une tendance à une diminution depuis la fin des années 70 au milieu des années 80. Ce changement est donc postérieur à celui constaté sur les débits annuels mais aussi aux indices annuels pluviométrique (cf. p35). Cependant nous notons que sur le bassin versant d'Ourtzagh, une tendance à la rupture en 1965 est détectée.

### III.E.3. Impact climatique ou anthropique ?

D'après les résultats obtenus par les tests de détection de rupture sur écoulements (débits et coefficients d'écoulements), nous constatons une concordance satisfaisante avec les dates détectées sur les indices annuels pluviométriques de la fin des années 70 / début des années 80.

Ce constat nous fait supposer que la diminution des écoulements sur les bassins versants au Maroc dont nous disposons, serait due à une diminution globale des précipitations.

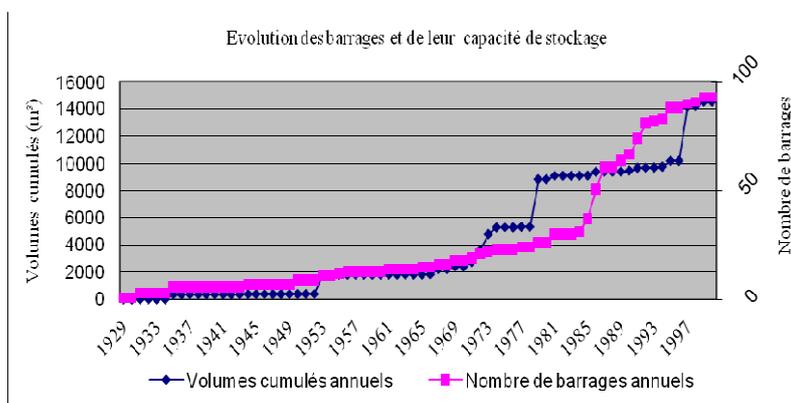


Figure 50 : graphique représentant les courbes de volumes cumulés annuels et le nombre de barrages annuels au Maroc

Cependant, nous rappelons que depuis 1967, de nombreux barrages ont été construits au Maroc. En effet, si nous observons la figure 49, le nombre de barrages annuels connaît une croissance continue de 1929 à 1985. Puis en 1985, une augmentation rapide est constatée jusqu'en 2000.

En ce qui concerne les volumes cumulés annuels, nous remarquons plusieurs ruptures sur la courbe : 1953, 1973, 1979 et 1997. Ces dates peuvent s'expliquer par la construction de grands barrages énumérés dans le tableau de la figure 50. Nous retrouvons ainsi deux bassins hydrauliques sur lesquels nous avons travaillé. Nous avons donc vérifié si certaines dates de ruptures sur certains bassins versants ne concordent pas avec les dates de construction de barrage.

Pour Bine El Ouidane et Al Massira situés dans le bassin de l'Oum Er Rbiâ, ils sont situés bien aval du bassin sur lequel nous travaillons.

Pour le barrage Idriss Ier, il est situé sur le Sebou en amont de la station hydrologique Azib Soltane. Sur cette station aucune rupture annuelle n'est signalée en 1973. Cependant au pas de temps mensuel, 1973 est détectée comme une rupture probable en Janvier et Mars. Nous supposons donc que le barrage Idriss Ier a influencé les débits durant ces deux mois. Par contre, son influence ne paraît pas assez importante au pas de temps annuel.

Pour Al Wahda (ou M'Jara) dans le Sebou, l'hypothèse que ce barrage a influencé le bassin versant de M'Jara est écartée pour la période étudiée, puisque la date de construction de barrage est postérieure.

Bassin hydraulique	Année de construction	Barrage	Capacité de stockage (Mm <sup>3</sup> )
Oum Er Rbiâ	1953	Bine El Ouidane	1384
	1979	Al Massira	2760
Sebou	1973	Idriss Ier	1186
	1997	Al Wahda	3800

Figure 51 : tableau représentant les barrages correspondant aux ruptures de la courbe des cumuls des volumes annuels de la figure 48

Suite à ces observations, nous avons donc cherché plus précisément d'autres dates de construction de barrage par bassin hydraulique. Nous avons réalisés cette étape pour les dates de ruptures inhabituelles, c'est-à-dire en dehors de 1979/80.

Cette recherche nous a permis de ne constater aucune correspondance. Les barrages construits sont soit trop récents, soit situé trop en aval des bassins versants étudiés sur la période donnée. En effet, les séries dont nous disposons s'arrêtent pour la plupart avant les années 90.

En conclusion, d'après les observations réalisées, nous supposons donc que les barrages n'ont pas générés de changements importants sur les écoulements au Maroc jusqu'aux années 90. Nous émettons donc l'hypothèse que ce sont plus les changements climatiques qui ont induit un changement des écoulements, d'après la concordance des dates de ruptures obtenues entre les précipitations, débits et coefficients d'écoulements.

## CONCLUSION

Le Maroc est un pays où les stations hydroclimatiques et hydrologiques sont nombreuses, bien que leur répartition reste hétérogène. La base de données dont nous disposons actuellement est tout de même suffisante pour réaliser.

Le pays est soumis à un climat semi-aride mais aussi méditerranéen. Il est de ce fait très vulnérable aux changements climatiques. En plus de cette pression climatique, la pression anthropique sur les ressources en eau ne cesse de croître. Il paraît donc important d'étudier la variabilité climatique de ce pays, mais aussi de connaître son impact ainsi que celui de la population sur les ressources en eau.

Dans la première phase du stage, nous avons choisi une approche régionale pour étudier les régimes hydroclimatiques du Maroc. En effet, 23 unités climatiques ont été constituées grâce à la méthode des vecteurs régionaux. Nous avons ainsi étudié plus en détail la variabilité des précipitations au Maroc. Ensuite, une approche multi-échelle a été effectuée, nous permettant d'avoir une vision plus ou moins globale sur la régionalisation climatique (« *macro* » et « *méso* » régions). Les indices annuels pluviométriques obtenus ont alors été mis en relation avec la NAO en 1963 et 1996. Puis, nous avons aussi constaté une augmentation de ces indices en région méditerranéenne. Ce résultat est important puisqu'il est contraire aux travaux effectués auparavant sur le Maroc. Par contre, nous avons majoritairement observé une tendance à la diminution sur les autres régions depuis les années 60.

La deuxième étape du stage a été de réaliser des tests statistiques de détection des ruptures sur les séries chronologiques (précipitations annuelles, débits mensuels et annuels et coefficients d'écoulements annuels). Nous avons alors obtenus les résultats suivants. Des changements négatifs, c'est-à-dire des diminutions, ont été trouvés durant la fin des années 70/début des années 80. Nous avons donc supposé que la diminution des débits est dû à la diminution des précipitations sur les bassins versants étudiés.

Cependant, nous avons remarqué que les coefficients d'écoulements ont été soumis à des ruptures un plus tard : de 1980 au milieu des années 80. Or, de 1980 à 1985, le Maroc a connu une période de sécheresse hydraulique, météorologique, agricole et énergétique généralisée. Nous avons donc cherché à quoi pouvaient bien correspondre les dates de ruptures : un impact du climat associé à des précipitations qui diminuent significativement depuis la fin des années 70 ; ou un impact anthropique dû aux nombreuses aménagements hydrauliques réalisés depuis 1967 ?

Avant tout, nous avons tenu à observer l'évolution des débits et des coefficients d'écoulements annuels au cours du temps. D'après les graphiques constitués, une diminution des écoulements a été constatée depuis les années 60 et plus significativement depuis la fin des années 70. Les débits les plus faibles furent alors observés de 1980 à 1985 pour la plupart des bassins versants étudiés. Nous avons donc retrouvé la période de sécheresse généralisée au Maroc.

Enfin, dans le but d'évaluer si ce sont le climat ou les aménagements hydrauliques effectués par l'Homme qui étaient la cause de la diminution des écoulements, nous avons comparé les dates de ruptures détectées sur les séries hydrologiques aux dates de construction de grands barrages au Maroc. Les résultats ont alors montré qu'il s'agissait plus d'une diminution des précipitations. Cependant ceci n'a été constaté que jusqu'à 1990. D'autres données après 1990 seraient nécessaires afin d'observer l'éventuel impact de nombreux barrages effectués depuis cette année.

Ce stage donne de nombreuses possibilités de poursuite d'étude. Pour cela, une base de données plus homogène serait nécessaire. L'idéal serait aussi d'obtenir d'autres séries chronologiques mieux réparties dans l'espace : au Sud de l'Atlas, sur la côte Atlantique Sud et plaines de Marrakech, sur les plateaux orientales et au Sahara Occidental.

Ensuite, poursuivre plus en détail la régionalisation climatique est important pour étudier la variabilité climatique du Maroc. Il faudrait réaliser ce travail avec plusieurs méthodes de régionalisation en parallèle puis comparer les résultats obtenus. Réaliser des tests de détection à plusieurs échelles est aussi intéressant. Cela permet de constater les différences et ressemblances entre les différentes régions que l'on ne peut voir graphiquement.

En ce qui concerne la partie modélisation hydrologique, nous avons obtenus des résultats non satisfaisants. Ceci peut être en partie dû à une médiocre interpolation des précipitations. Refaire une interpolation des pluies soit par une autre méthode, soit par un autre logiciel serait intéressant à réaliser. Puis il faudrait essayer à nouveau de modéliser et observer les résultats.

D'autres séries hydrologiques seraient souhaitables. Certains bassins versants étudiés étaient majoritairement à des altitudes élevées ne permettant pas d'aménagements hydrauliques. Ce qui a été un avantage puisque nous avons alors constatés seulement l'influence climatique. Cependant, pour mener une étude globale sur les débits et écoulements du Maroc d'autres bassins versant seraient nécessaires.

Lors de la recherche de correspondance entre dates de ruptures des écoulements et les aménagements hydrauliques, seuls les barrages étaient concernés. Une étude plus approfondie serait à effectuer sur l'évolution de l'occupation des sols et les aménagements : prélèvements, transferts d'eau inter-bassins, urbanisation, déforestation....

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achite M., et Meddi M., 2004. Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). *Sécheresse* **15**(4) : 367-373.
- Achite M., et Meddi M., 2005. Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (nord-ouest algérien). *Journal des sciences de l'eau* **18** (Hors série) : 37-56
- Achite M., et Ouillon S., 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). *Journal of Hydrology* **343** : 187-202.
- Agoumi A., Debbarh A., 2006. Ressources en eau et bassins versants du Maroc : 50 ans de développement (1955-2000). 62 pp. <http://www.rdh50.ma/fr/pdf/contributions/GT8-1.pdf>
- Alibou J., 2002. Impact des changements climatiques sur les ressources en eau et les zones humides du Maroc. Communication Mediterranean Roundtable on Water, Wetlands and Climate Change; 10-11 december 2002, Athens
- Ardoin-Bardin S., 2004. Variabilité hydroclimatiques et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de l'Université de Montpellier II, 437p.
- Arnell N.W., 2004. Climate change and global water resources. SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* **14**: 31-52.
- Brunet-Moret Y., 1979. Retour sur l'homogénéisation des pluies annuelles par vecteur régional.
- Born K., Fink A.H., Paeth H., 2008. Dry and Wet Periods in the Northwestern Maghreb for Present and Futures Climate Conditions. *Meteorologische Zeitschrift* **17**(5) : 533-551.
- Bzioui M., 2004. *Rapport national 2004 sur les ressources en eau du Maroc*. UN WATER-AFRICA. [http://www.pnud.org.ma/pdf/Rappt\\_national\\_1%20juin\\_fr.pdf](http://www.pnud.org.ma/pdf/Rappt_national_1%20juin_fr.pdf)
- Chaponniere A., Smakhtin V., 2006. A review of climate change scenarios and preliminary rainfall trend analysis in the Oum Er Rbia Basin, Morocco. *Working Paper 110 (Drought Series : Paper 8)* Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI).
- Chofqi A., Younsi A., El Kbir L., Mania J., Mudry J., Veron A., 2004. Environmental impact of an urban landfill on a coastal aquifer (El Jadida, Morocco). *Journal of African Earth Sciences* **39**: 509-516.
- CRU (Climate Research Unit):  
- <http://www.cru.uea.ac.uk>  
- <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/modelcc/>
- De Jong C., Cappy S., Finckh M., Funk D., 2008. A transdisciplinary analysis of water problems in the mountainous karst areas of Morocco. *Engineering Geology* **99**: 228-238.
- Dieulin C., 2005. Calcul des capacités en eau des sols (Water Holding Capacity-WHC) à partir de la carte des sols de la FAO – Note interne.
- DMN (Direction Météorologique Nationale du Maroc): <http://www.marocmeteo.ma/>
- Driouech F., Déqué M., Mokssit A., 2008. Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco. *Climate Dynamics* doi:10.1007/s00382-008-0430-6.
- El Bouqdaoui K., Aachib M., Blaghen M., Kholtei S., 2008. Modélisation de l'écoulement de la nappe de Berrechid (Maroc). *La Houille Blanche, revue internationale de l'eau* **2-2008** : 24-92.
- E-drologie : <http://echo.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre8/main.html>
- El Idrysy H., De Smedt F., 2006. Modelling groundwater flow of the Trifa aquifer, Morocco. *Hydrogeology Journal* **14**: 1265-1276.

- El Mandour A., El Yaouti F., Fakir Y., Zarhloule Y., Benavente J., 2008. Evolution of groundwater salinity in the unconfined aquifer of Bou-Areg, Northeastern Mediterranean coast, Morocco. *Environmental Geology* **54** : 491-503.
- FAO (Food and Agriculture Organization): <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>
- FAO, 1995 : Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties. (CDROM). FAO Land and Water Digital Media Series.
- Fox H.R., Wilby R.L., Moore H.M., 2001. The impact of river regulation and climate change on the barred estuary of the oued Massa, southern Morocco. *Regulated Rivers: Research and Management* **17**: 235-250.
- GIEC, 2001. *Bilan 2001 des changements climatiques : Conséquences, adaptation et vulnérabilité*. Contribution du Groupe de travail II au troisième rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental EC. Publié sous la direction de J. McCarthy, O. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White. Genève, Suisse, 13-16 février 2001.
- Hammani A., Kuper M., Bekkar Y., Zaz H., 2006. Exploitation des eaux souterraines dans le périmètre irrigué de Tadla (Maroc) – Etat des lieux et éléments de méthodologie pour contribuer à une réflexion sur une gestion intégrée et durable des eaux souterraines et de surface. In *Economies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb*. Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Maroc, 29-31 mai 2006.
- Hammani A. et Kuper M., 2007. Caractérisation des pompages des eaux souterraines dans le Tadla, Maroc. In *Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb*. Actes du troisième atelier régional du projet Sirma. [M. Kuper et A. Zaïri (eds)], Nabeul, Tunisie, 4-7 juin 2007.
- Hertig E., Jacobeit J., 2008. Assessments of Mediterranean precipitation changes for the 21st century using statistical downscaling techniques. *International journal of Climatology* **28**: 1025-1045.
- Hiez G., 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, **14** (2) : 129-172.
- Hiez G., Rancan L., Costa Barros M., Pedrollo O., Tourre Y.M., 1986. Le vecteur regional et les fluctuations climatiques. In : TOURRE Y.M. (ED.) *Climat et développement*. Paris : ORSTOM, 113-122. (Colloques et Séminaires).
- Huebener H., Kerschgens M., 2007a. Downscaling of current and future rainfall climatologies for southern Morocco. Part I : Downscaling method and current climatology. *International journal of climatology* **27**: 1763–1774
- Huebener H., Kerschgens M., 2007b. Downscaling of current and future rainfall climatologies for southern Morocco. Part II : Climate change signals. *International journal of climatology* **27**: 1065–1073
- Hydraccess : <http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.htm>. Version 4.3.
- International Institute for Sustainable Development (iisd), Climate Change Knowledge Network (CCKN), 2003. Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques. Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre. [http://www.cckn.net/pdf/north\\_africa\\_fr.pdf](http://www.cckn.net/pdf/north_africa_fr.pdf)
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds)]. Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC, 2008. *Technical paper VI : Climate Change and Water*. [Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof (eds)]. Geneva, Switzerland, 210 pp.
- Kabbour B.B., Zouhri L., Mania J., 2005. Overexploitation and continuous drought effects on groundwater yield and marine intrusion: considerations arising from the modelling of Mamora coastal aquifer, Morocco. *Hydrological Processes* **19**: 3765-3782.
- Karrouk M-S., 2007. Climate change and its impacts in Morocco. In *Regional Climate Variability and its Impacts in the Mediterranean Area*. [Mellouki A. et Ravishankara A.R. (eds)] Marrakech, Morocco. 316 pp.
- Knippertz P., Christoph M., Speth P., 2003a. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorology Atmospheric Physics* **83**: 67–88.
- Knippertz P., Ulbrich U., Marques F. et Corte-Real J., 2003b. Decadal changes in the link between El Niño and springtime North Atlantic Oscillation and European-North African rainfall. *International Journal of Climatology* **23**: 1293-1311.

Lahlou A., 2000. Quelques aspects environnementaux dans les pays du Maghreb – chapitre 3 : Sécheresses observées dans les pays du Maghreb. ISESCO

LDEO: <http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/NAO/>

Lespinas F., 2008. Impact du Changement Climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon. Thèse en Hydroclimatologie. Université de Perpignan. 332 p.

Lubès H., Masson J.M., Servat E., Paturel J.-E., Kouamé B., Boyer J.-F., 1994. ICCARE : rapport no 3 : caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques : étude bibliographique. Montpellier : ORSTOM, 22 p.

M'bark A. et Lhoussane B., 2004. Les problèmes majeurs de la gestion de l'eau au Maroc. *Sécheresse* **25(2)** : 187-94.

Milano M., 2009. Les changements climatiques en Méditerranée et les impacts prévisibles sur les ressources en Eau. Mémoire de Master Recherche Eau et Environnement Université de Montpellier 2.

Ministère de l'environnement du Maroc, 2001. *Rapport de l'Etat de l'environnement du Maroc*. pp.292.

Norrant C., Douguédroit A., 2006. Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950-2000). *Theoretical and Applied Climatology* **83**: 89–106.

OMO : <http://www.ub.edu/gc/English/wemo.htm>

Portail national du Maroc: <http://www.maroc.ma/>

Rossel Frédéric, 1997. Influence du Niño sur les régimes pluviométriques de l'Equateur. Thèse Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil : Hydrologie. « Sciences de l'Eau et Aménagement ». Université Montpellier II, 289 p.

SEE : Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau (auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement) : <http://www.water.gov.ma/>

Senoussi S., Agoumi A., Yacoubi M., Fakhreddine A., Sayouty E.H., Mokssit A., Chikri N., 1999. Changements climatiques et ressources en eau Bassin versant de l'Ouergha (Maroc). *Hydroécologie Appliquée* **11** : 163-182.

Shrage J.M., Fink A.H., Bruecher T., Christoph M., Knippertz P., Speth P., 2004. Low-frequency rainfall variability in Northwest Africa and the Sahelian and Sudanian zones. 15<sup>th</sup> Symposium on Global Change and Climate Variations. Poster Session 3, Enso and Monsoons.

Simone J.E., Dijck V., Laouina A., Carvalho A.V., Loos S., Schipper A.M., Van der Kwast H., Nafaa R, Antari M., Rocha A., Borrego C., Ritsema C.J., 2003. Desertification in northern Morocco due to effects of climate change on groundwater recharge. In *Desertification in the Mediterranean Region a Security Issue*. [William G. Kepner, Jose L. Rubio, David A. Mouat and Fausto Pedrazzini (eds)]. Valencia, Spain. 614 pp.

Touaïbia B., Achite M., 2003. Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi-aride de l'Algérie septentrionale. *Journal des Sciences Hydrologiques* **48(2)** : 235-242.

Touaïbia B., Aïdaoui A., Gomer D., Achite M., 2001. Quantification et variabilité temporelle de l'écoulement solide en zone semi-aride, de l'Algérie du Nord. *Journal des Sciences Hydrologiques* **46(1)** : 41-53.

Vauchel P., 2005. Hydraccess version 4.3. Aide disponible sur le logiciel

Ward M.N., Lamb P.J., Portis D.H., El Hamly M., Sebbari R., 1999. Climate Variability in Northern Africa : Understanding Droughts in the Sahel and the Maghreb. – Chapter 6in : *Beyond el Niño--decadal and interdecadal climate variability*. Ed.: A.Navarra. Springer Verlag, 119-140.

Wotling G., 1994. Analyse de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson africaine de 1951 à 1989 : application de la méthode du vecteur régional (M.V.R.). Mémoire de DEA National d'Hydrologie.Univ.Montpellier II/ORSTOM Montpellier 121p.

Wotling G., Mahé G., L'Hôte Y., Lebarbe L., 1995. Analyse par les vecteurs régionaux de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la Mousson africaine. Veille climatique satellitaire, ORSTOM/Météo-France **52** : 58-73.

## LISTE DES ABREVIATIONS

- CRU : Climatic Research Unit
- DGH : Direction Générale de l'Hydraulique, aujourd'hui Secrétariat Chargé de l'Eau
- DMN : Direction de la Météorologie Nationale
- ENSO : El Niño Southern Oscillation
- FAO : Food and Agriculture Organization
- GHCN : Global Historical Climatology Network
- GRDC : Global Runoff Data Center
- IRD : Institut de Recherche et du Développement
- MCG : Modèle Climatique Global
- MNT : Module Numérique de Terrain
- NAO : North Atlantique Oscillation
- ORSTOM : Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement et la Coopération (maintenant IRD)
- SIEREM : Systèmes d'Information Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation
- SPI : indices standardisés de précipitations saisonnières
- UMR : Unité Mixte de Recherche

## Liste des figures

Figure 1 : carte MNT du Maroc effectuée en collaboration avec Claudine Dieulin .....	6
Figure 2 : tableau légende de la carte 2, adapté de Bzioui (2004) .....	8
Figure 3 : carte représentant les grands bassins hydrauliques du Maroc, adapté de Bzioui (2004).....	8
Figure 4 : graphique représentant l'écart (%) à la moyenne des précipitations annuelles sur l'ensemble du Maroc (Agoumi et Debbarh, 2006).....	10
Figure 5 : schéma représentant la NAO en phase positive (LDEO) .....	13
Figure 6: schéma représentant la NAO en phase négative (LDEO) .....	13
Figure 7 : schéma représentant les anomalies de circulation atmosphérique associées aux phases positives. H (hautes) et B (basses) sont les anomalies de pression de surface positives et négatives, respectivement (OMO).....	14
Figure 8 : schéma représentant les anomalies de circulation atmosphérique associées aux phases négatives. H (hautes) et B (basses) sont les anomalies de pression de surface positives et négatives, respectivement (OMO).....	14
Figure 9 : Graphiques représentant les valeurs des SPI annuelles sur la période 1901/1902 à 2006/2007 pour les régions climatiques atlantique(ATL), méditerranéenne(MED), et du Sud de l'Atlas(SOA). Gris clair : valeurs des indices ; blanc : le nombre de stations disponibles pour chaque région (Born et al, 2009).....	16
Figure 10 : tableau représentant les années de sécheresse hydrauliques maximum par bassin (chiffres d'après Lahlou, 2000).....	16
Figure 11 : carte représentant la répartition géographique des stations pluviométriques .....	21
Figure 12 : zoom sur la partie de la figure 11 .....	21
Figure 13 : graphiques représentant les indices annuels des précipitations des « macros » régions du Maroc, ainsi que le nombre de stations observées par année .....	25
Figure 14 : tableau représentant les unités climatiques qui s'éloigne le plus du vecteur régional à l'échelle de la « macro » région .....	26
Figure 15 : graphiques représentant l'écart des indices annuels des « micros » par rapport à la « macro» région.....	27
Figure 16: détection des ruptures des indices annuels des régions et des séries de référence appartenant à la « macro » « Atlantique Nord » .....	29
Figure 17 : détection des ruptures des indices annuels des régions et des séries de référence appartenant à la « macro » « Relief Atlas » .....	30
Figure 18 : détection des ruptures des indices annuels des régions et des séries de référence appartenant à la « macro » « Présaharien ».....	32
Figure 19 : tableau représentant les dates de ruptures associées aux régions climatiques ou séries de références concernées sur les données reconstituées .....	34
Figure 20 : Figure 19 : tableau représentant les dates de ruptures associées aux régions climatiques ou séries de références concernées sur les données reconstituées .....	34
Figure 21 : graphique représentant la corrélation amont-aval entre les débits de M'Jara et Ourtzagh .....	35
Figure 22 : carte des bassins versants et réseau hydrographiques sur le MNT .....	36
Figure 23 : graphique des débits annuels à Pont du Mdez de 1956 à 1988 .....	36

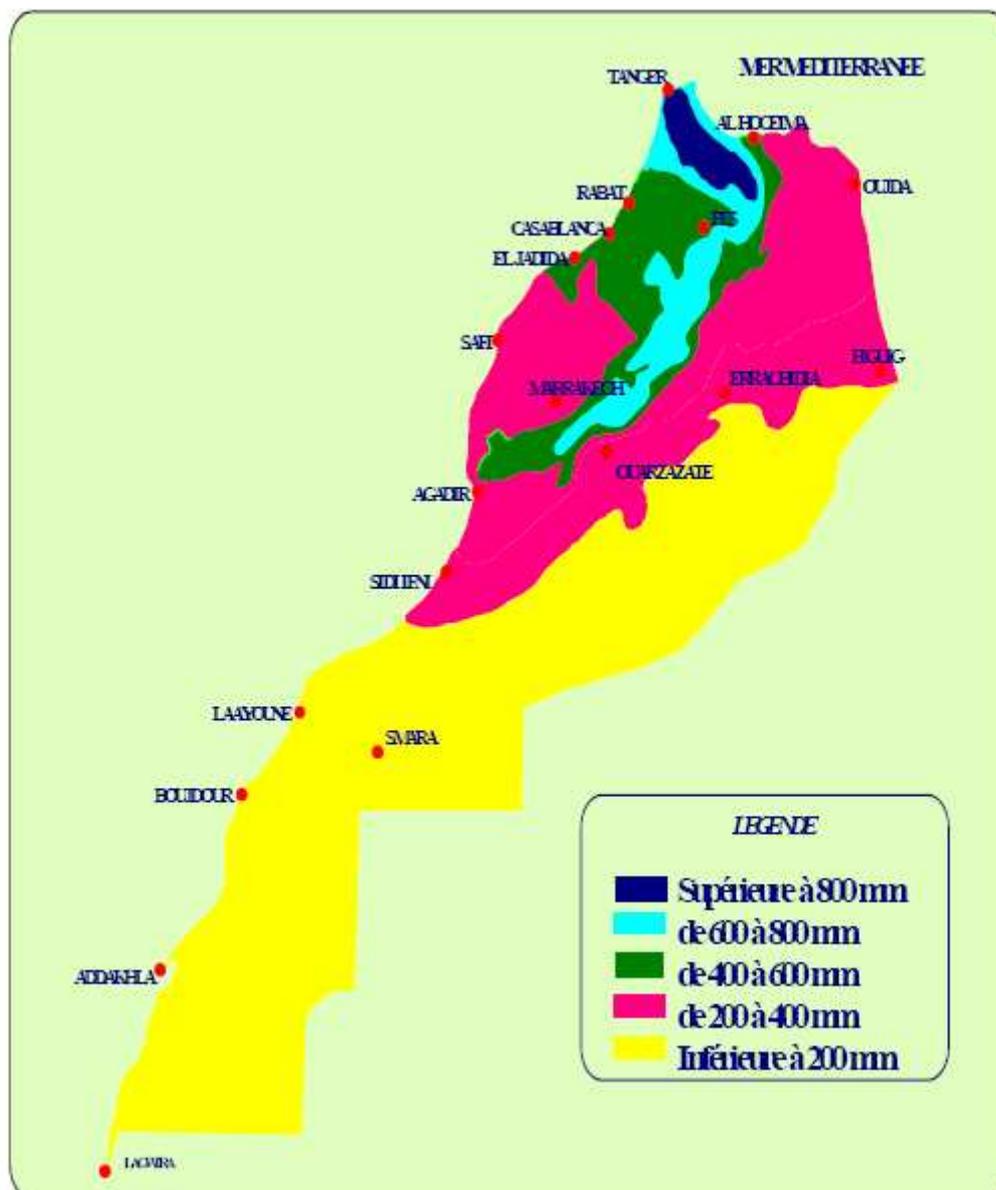
Figure 24 : graphique des débits annuels à Ain Timedrine de 1965 à 1983 .....	36
Figure 25 : graphique des débits annuels à Azib Soltane de 1959 à 1987 .....	36
Figure 26 : graphique des débits annuels à Bab Ouender de 1951 à 1987.....	37
Figure 27 : graphique des débits annuels à Ourtzagh de 1951 à 1987 .....	37
Figure 28 : graphique des débits annuels à M'Jara de 1951 à 1987 .....	37
Figure 29 : graphiques des débits annuels dans le bassin de la Moulouya .....	37
Figure 30 : graphiques du débits annuel dans le bassin de l'Oum Er Rbia à Dechra El Oued de 1953 à 1981 .....	37
Figure 31 : graphique des débits annuels à Tazzoughert de 1976 à 1989.....	38
Figure 32 : graphique des débits annuels à Aoulouz Pont dans le Souss de 1955 à 1989 .....	38
Figure 33 : graphique des débits annuels à Aval Tamri de 1981 à 1994 .....	38
Figure 34 : tableau représentant les ruptures détectées à Aoulouz Pont .....	40
Figure 35 : tableau représentant les dates de ruptures détectées sur les débits au pas de temps annuel .....	41
Figure 36 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins de l'Ouergha.....	42
Figure 37 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins du Sebou.....	42
Figure 38 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins de la Moulouya.....	43
Figure 39 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins de l'Oum Er Rbiâ .....	43
Figure 40 : tableau représentant les ruptures détectées dans les bassins du Sud de l'Atlas .....	44
Figure 41 : schéma de la structure du modèle GR2M et sa légende. Adapté de Mouelhi et al, 2006.....	45
Figure 42 : tableau des résultats obtenus lors de la calibration et validation du modèle sur les bassins versants étudiés.	46
Figure 43 : graphiques représentant les coefficients d'écoulements en fonction du temps dans le grand bassin hydraulique du Sebou. ....	47
Figure 44 : graphique représentant les coefficients d'écoulements en fonction du temps dans le bassin de la Moulouya	48
Figure 45 : graphique représentant les coefficients d'écoulements en fonction du temps à Tazoughert .....	48
Figure 46 : graphique représentant les coefficients d'écoulements en fonction du temps à Aval Tamri.....	48
Figure 47 : tableau représentant les ruptures détectées sur les séries chronologiques des coefficients d'écoulements ....	49
Figure 48 : tableau représentant les dates de ruptures détectées par au moins deux tests statistiques sur les bassins versants (en gras : les dates de ruptures détectées par plus d'un bassin versant la même année ou le même mois).....	50
Figure 49 : graphique représentant les courbes de volumes cumulés annuels et le nombre de barrages annuels au Maroc .....	51
Figure 50 : tableau représentant les barrages correspondant aux ruptures de la courbe des cumuls des volumes annuels de la figure 48 .....	51

## Liste des annexes

- ANNEXE 1** : Carte de la répartition spatiale de la pluviométrie moyenne (mm) au Maroc (Bzioui, 2004)
- ANNEXE 2** : Carte montrant la répartition des 100 plus grands barrages au Maroc
- ANNEXE 3** : Carte des principaux oueds et grandes zones irriguées du Maroc
- ANNEXE 4** : Graphique représentant la répartition des eaux souterraines au Maroc (M'barek et Lhoussaine, 2004)
- ANNEXE 5** : Carte des principales nappes au Maroc (Bzioui M, 2004)
- ANNEXE 6** : Tableau montrant l'envasement des barrages en 2003 au Maroc
- ANNEXE 7** : Corrélations entre précipitations, NAO et El Niño
- ANNEXE 8** : Carte représentant 5 régions climatiques homogènes à partir des analyses de composantes principales (Lamb et al, 1999)
- ANNEXE 9** : Carte représentant les unités climatiques homogènes effectuées par la méthode des nuées dynamiques par Mme Fatima Zohra El Guelai.
- ANNEXE 10** : Schéma représentant les quatre familles de scénarii (Ardoin-Bardin, 2004)
- ANNEXE 11** : Le Vecteur Régional : la théorie (Hiez et al, 1986 ; Wotling, 1994)
- ANNEXE 12** : Régionalisation à l'échelle « micro »
- ANNEXE 13** : Régionalisation à l'échelle « méso »
- ANNEXE 14** : Régionalisation à l'échelle « méso »
- ANNEXE 15** : Indices annuels
- ANNEXE 16** : Test de détection de ruptures (Lubès et al, 1994)
- ANNEXE 17** : Notice explicative des tests de détections de ruptures appliqués
- ANNEXE 18** : Ruptures sur les indices annuels pluviométriques
- ANNEXE 19** : Carte des ruptures sur les régions climatiques
- ANNEXE 20** : Inventaire des stations hydrologiques et bassins versants associés
- ANNEXE 21** : Tableau des dates de ruptures détectées sur les débits au pas de temps mensuel
- ANNEXE 22** : Explication du schéma de la figure 34 p 45
- ANNEXE 23** : Carte des ruptures sur les écoulements annuels

## ANNEXE 1 :

Carte de la répartition spatiale de la pluviométrie moyenne (mm) au Maroc (Bzioui, 2004)

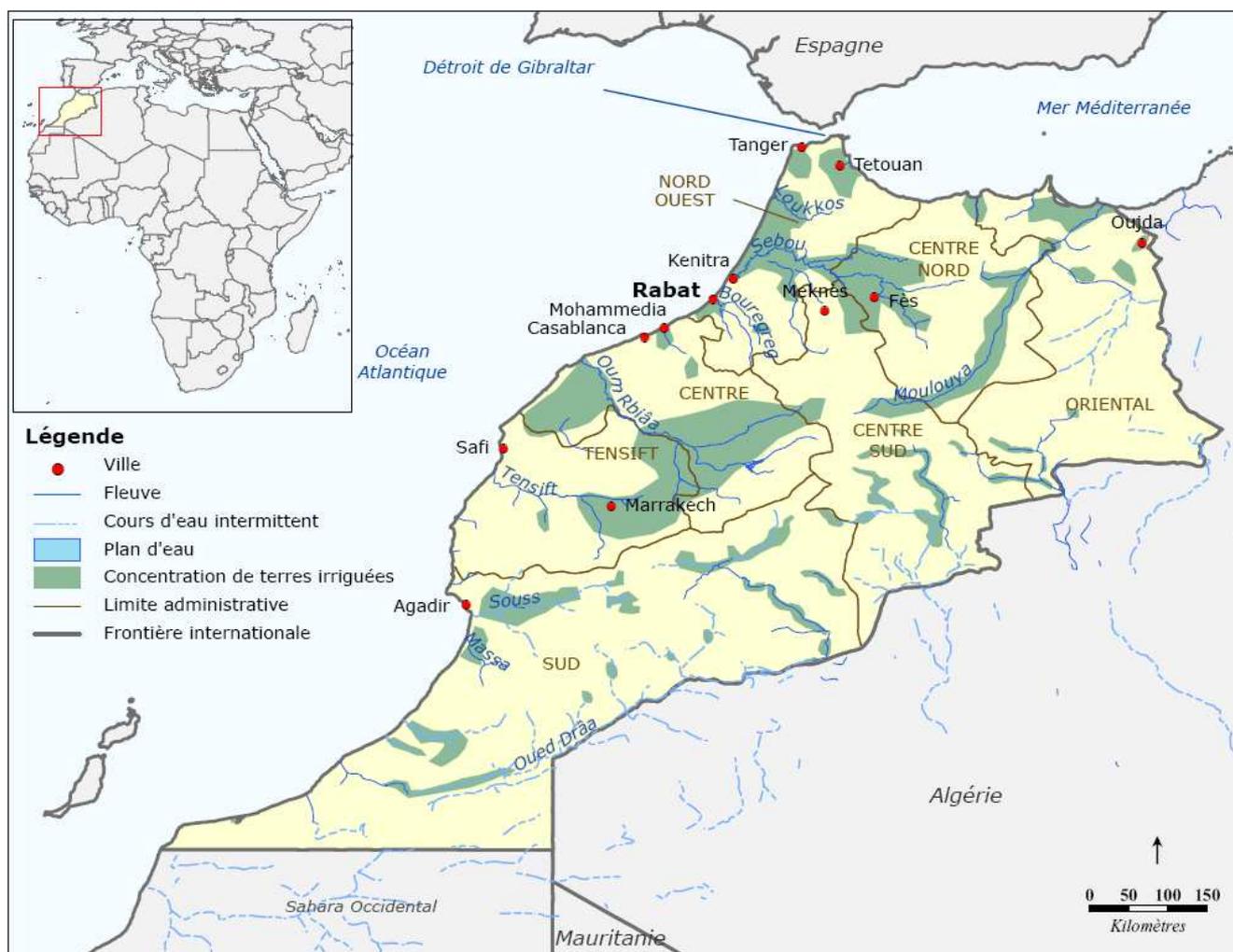




### ANNEXE 3 :

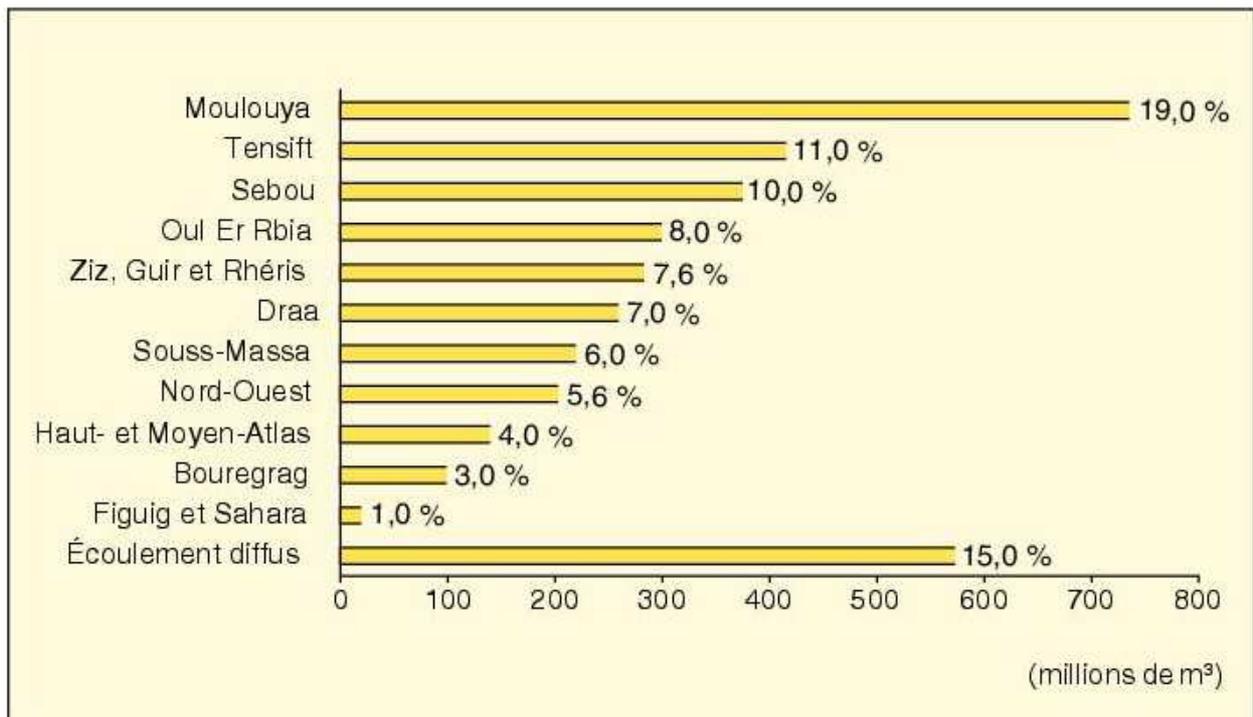
#### Carte des principaux oueds et grandes zones irriguées du Maroc

(source : <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries/morocco/morocco.pdf>)



#### ANNEXE 4

Graphique représentant la répartition des eaux souterraines au Maroc (M'barek et Lhoussaine, 2004)





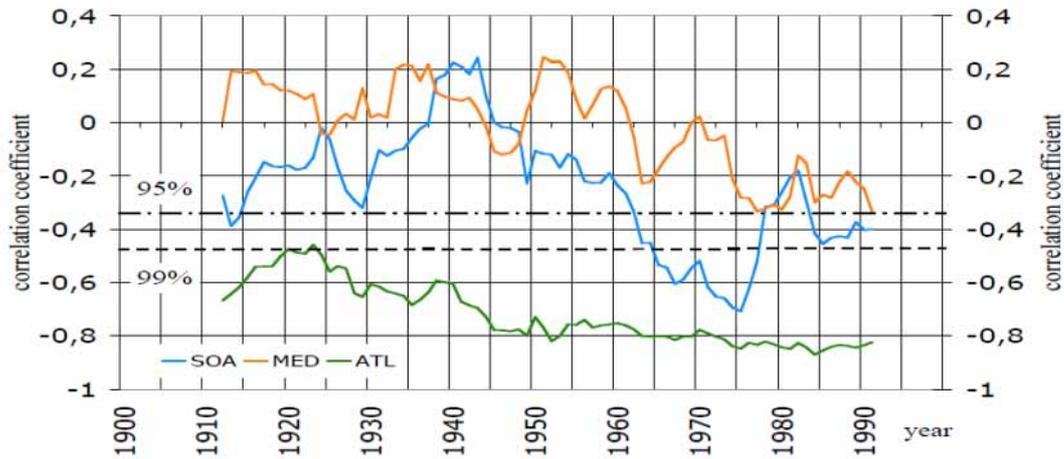
## ANNEXE 6 :

Tableau montrant l'envasement des barrages en 2003 au Maroc (Bzioui, 2004)

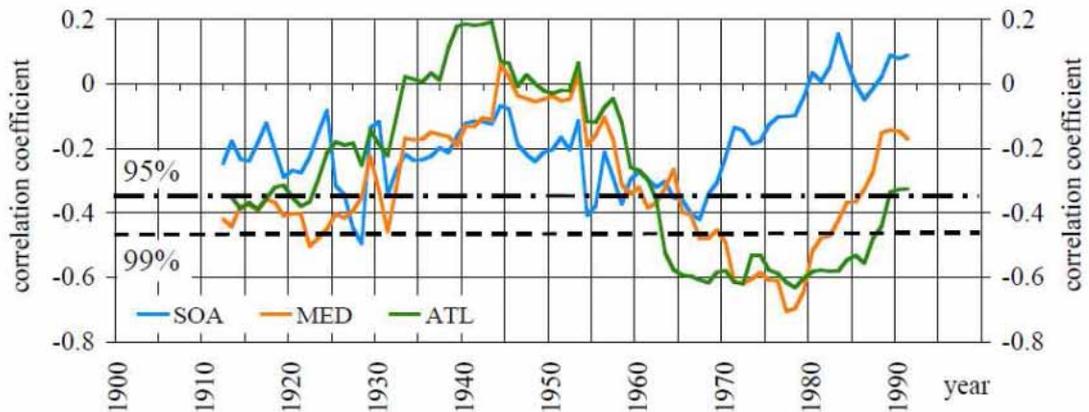
Bassin	Barrage	Capacité initiale	Volume perdu	% Volume perdu	Volume moyen perdu/ an
		Mm3	Mm3		Mm3
Bassin du Nord Loukkos, M'Harhar, Hachef Cotiers Méditerranéens et Neckor	Oued El Makhazine	807,0	35,6	4,4	3,2
	Ibn Battouta	43,6	8,5	19,5	0,6
	Nakhla	13,0	7,3	56,2	0,2
	Smir	43,0	---	---	0,2
	9 Avril 1947	300,9	---	---	0,5
	M.B. Al Khattabi	43,0	9,5	22,1	1,0
	<b>Total</b>	<b>1250,5</b>	<b>60,9</b>	<b>4,9</b>	<b>5,2</b>
Moulouya	Mohamed V	725,0	314,0	43,3	11,6
	M. Hommadi	42,0	35,4	84,3	1,0
	<b>Total</b>	<b>767,0</b>	<b>349,4</b>	<b>45,6</b>	<b>13,0</b>
Sebou	Idriss 1er	1217,0	40,0	3,3	1,9
	Allal El Fassi	81,5	7,3	9,0	3,6
	Al Wahda	3770,4	---	---	11,0
	Sidi Echahed	170,0	---	---	0,24
	El Kansera	330,0	69,6	21,1	1,2
	<b>Total</b>	<b>5568,9</b>	<b>116,9</b>	<b>33,3</b>	<b>17,7</b>
Oum Er Rbia, Cotier Atlantique et Tensift	S.M.B Abdellah	509,0	52,0	10,2	2,5
	Bin El Ouidane	1484,0	183,7	12,4	4,5
	Moulay Youssef	197,0	39,6	20,1	2,5
	Hassan 1er	272,0	24,9	9,2	2,5
	Sidi Driss	7,0	3,3	47,1	0,4
	Al Massira	2785,0	25,0	0,9	3,1
	Lalla Takerkoust	78,0	9,2	11,8	0,2
	<b>Total</b>	<b>5332,0</b>	<b>337,7</b>	<b>6,3</b>	<b>15,7</b>
Souss, Issen, Massa Draa, Ghir et Ziz	Abdelmoumen	216,0	1,0	0,5	0,1
	Aoulouz	108,0	---	---	1,2
	Y.B. Tachfine	320,0	17,9	5,6	0,8
	Mansour Eddahbi	592,0	106,0	17,9	4,8
	Hassan Eddakhil	369,0	22,0	6,0	1,2
	<b>Total</b>	<b>1605,0</b>	<b>146,9</b>	<b>9,2</b>	<b>6,9</b>
Autres	Petits barrages				6,5
<b>Total général</b>		<b>14523,4</b>	<b>1011,8</b>	<b>7,0</b>	<b>65,0</b>

## ANNEXE 7 :

### Corrélations entre précipitations, NAO et El Niño



Graphique représentant les corrélations entre l'indice NAO-G et les précipitations de Décembre-Janvier-Février dans les régions climatiques atlantique, méditerranéenne et du Sud de l'Atlas (Ward *et al*, 1999).

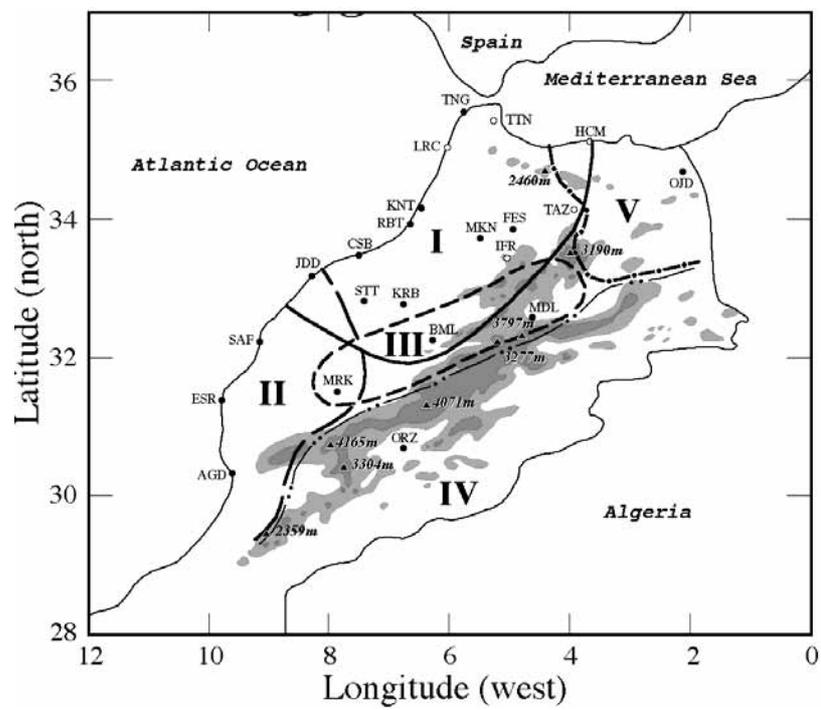


Graphique représentant les corrélations entre les SST de l'indice Niño et les précipitations de Décembre-Janvier-Février dans les régions climatiques atlantique, méditerranéenne et du Sud de l'Atlas (Ward *et al*, 1999).

## ANNEXE 8

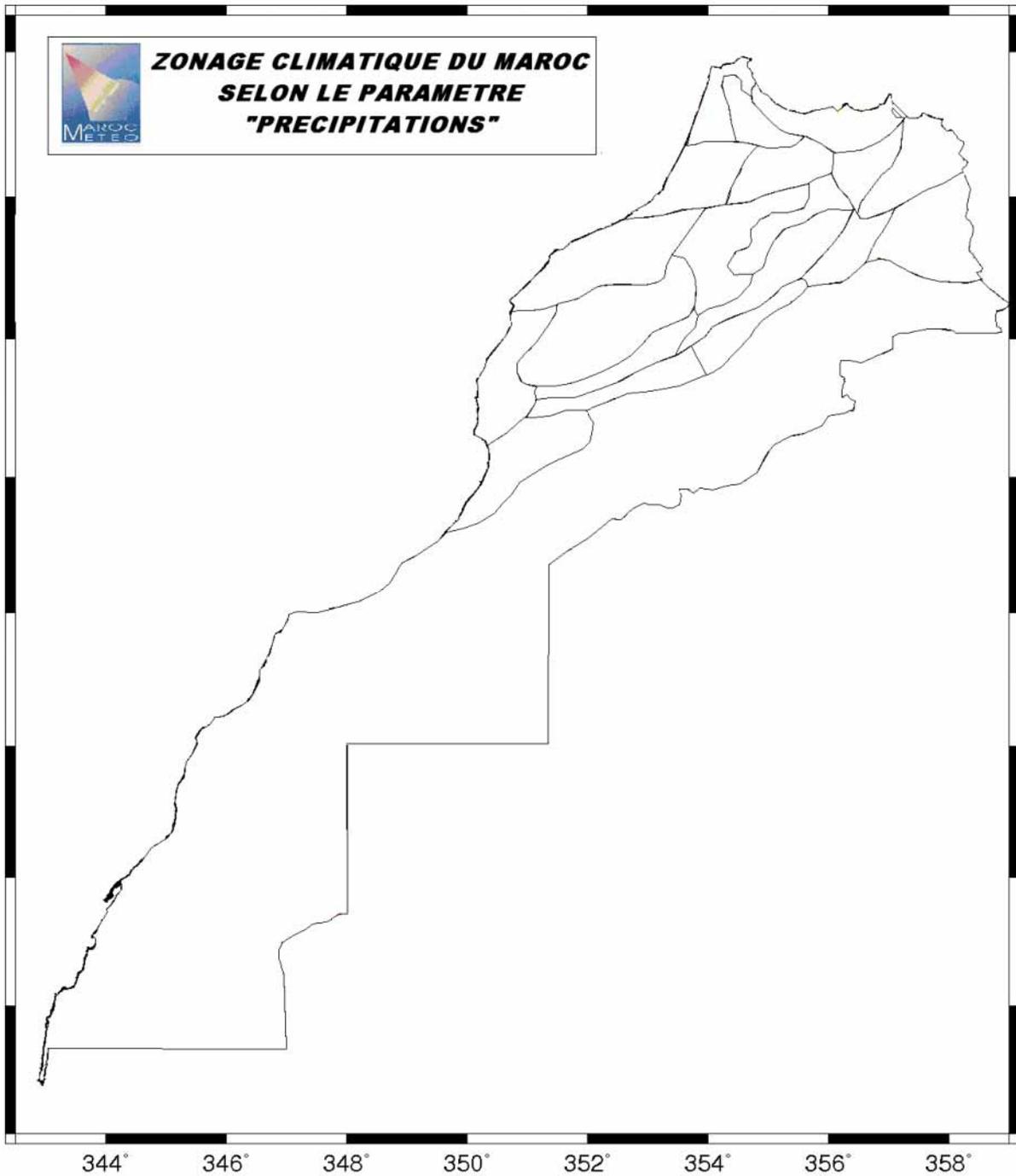
Carte représentant 5 régions climatiques homogènes à partir des analyses de composantes principales

(Lamb *et al.*, 1999)



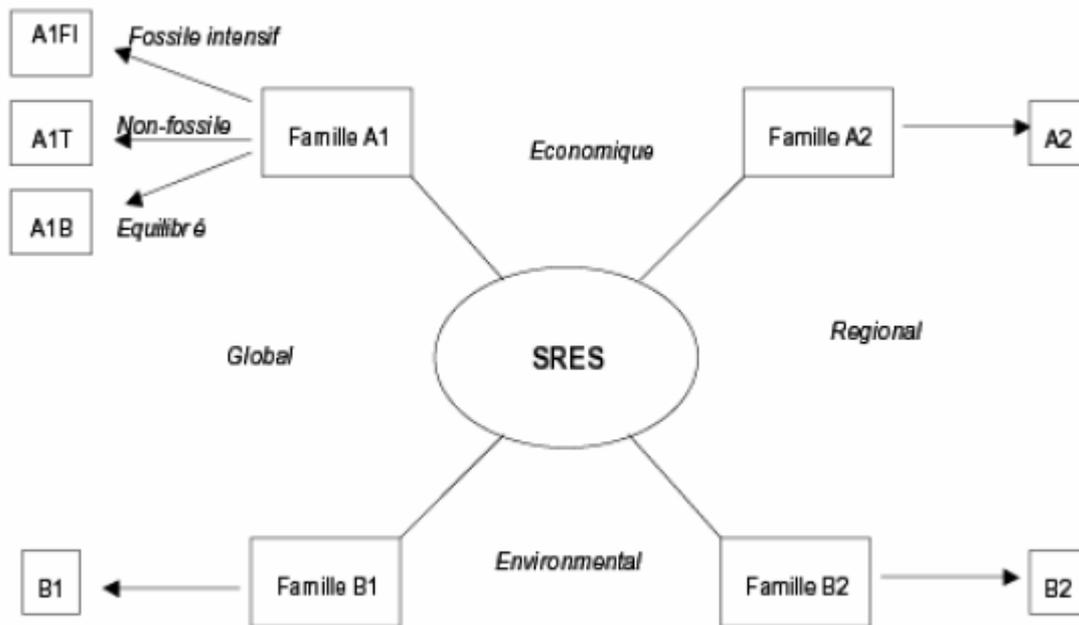
## ANNEXE 9

Carte représentant les unités climatiques homogènes effectuées par la méthode des nuées dynamiques par Mme Fatima Zohra El Guelai.



ANNEXE 10 :

Schéma représentant les quatre familles de scénarii (Ardoin-Bardin, 2004)



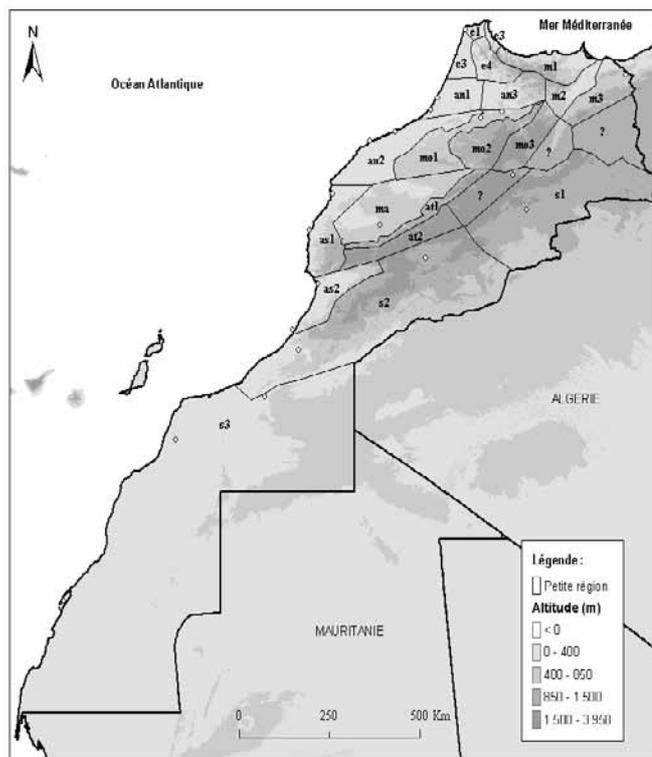


## ANNEXE 12 :

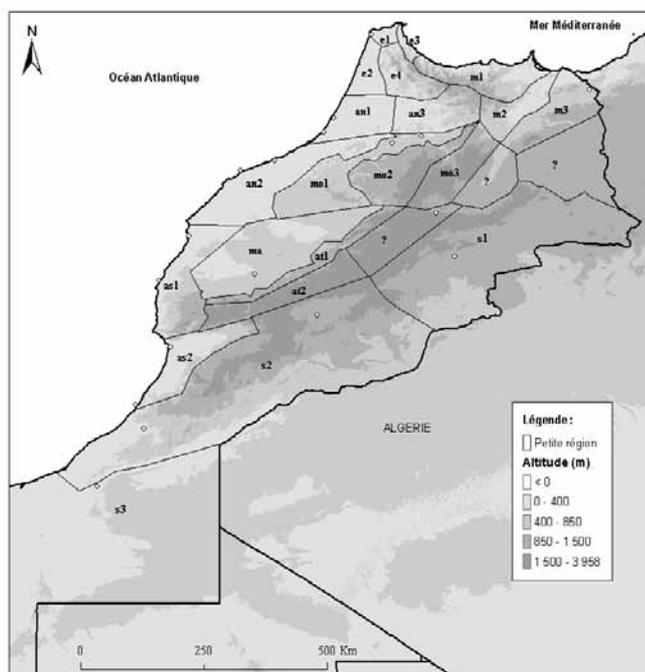
### Régionalisation à l'échelle « micro »

Abréviation	Nom de la région
an1	Atlantique/Kénitra
an2	Atlantique/Casablanca
an3	Rif/Moyen Atlas
as1	Atlantique/Essaouira
as2	Atlantique/Anti-Atlas
at1	Atlas/Atlantique
at2	Haut Atlas ouest
e1	Extrême Nord/Nord
e2	Extrême Nord/Atlantique
e3	Extrême Nord/Méditerranée
e4	Rif Nord
ma	Atlantique/Marrakech
m1	Méditerranée Rif
m2	Méditerranée Basse Moulouya
m3	Méditerranée Est
mo1	Moyen Atlas/Atlantique
mo2	Moyen Atlas
mo3	Moyen Atlas/Méditerranée
s1	Atlas présaharien est
s2	Atlas présaharien ouest
s3	Sahara Occidental
?	une ou aucune station présente dans la région

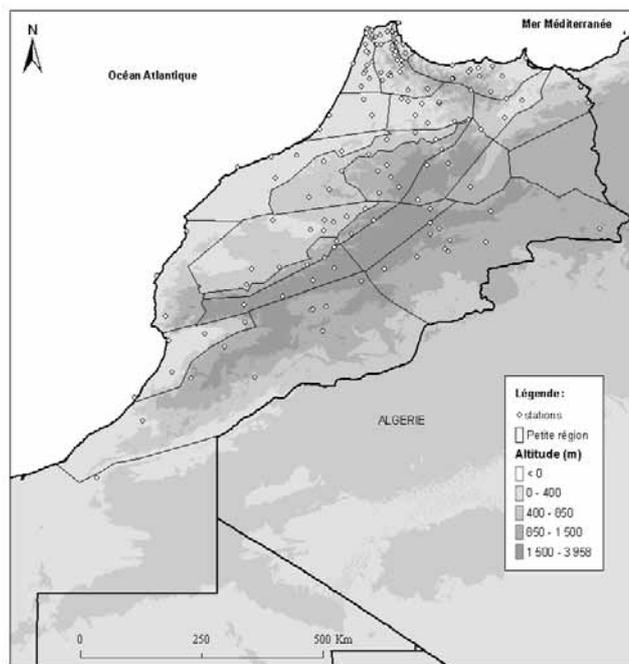
Tableau légende des cartes 1 et 2



Carte 1 des « micro » régions ou 23 unités climatiques



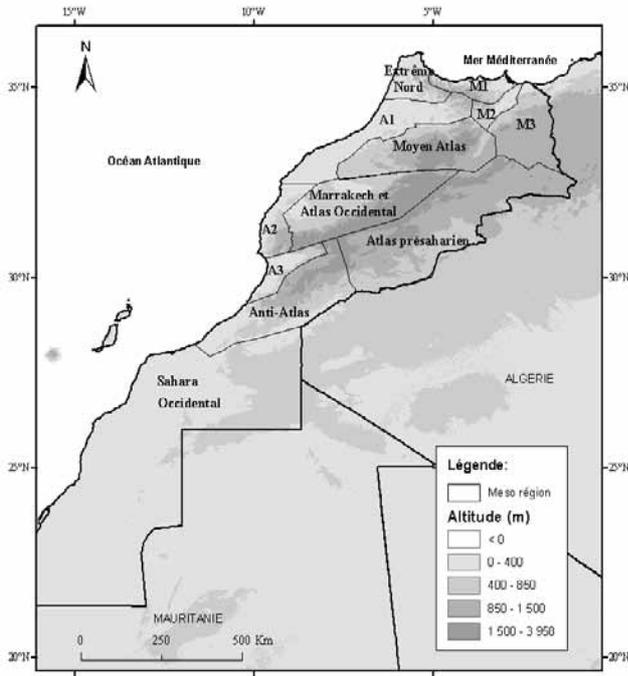
Carte 2 : zoom sur les « micro » régions



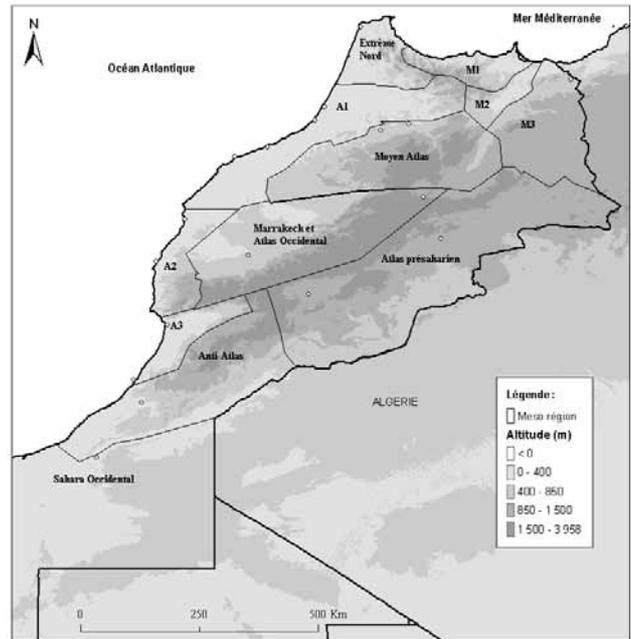
Carte 3 avec toutes les stations observées

## ANNEXE 13

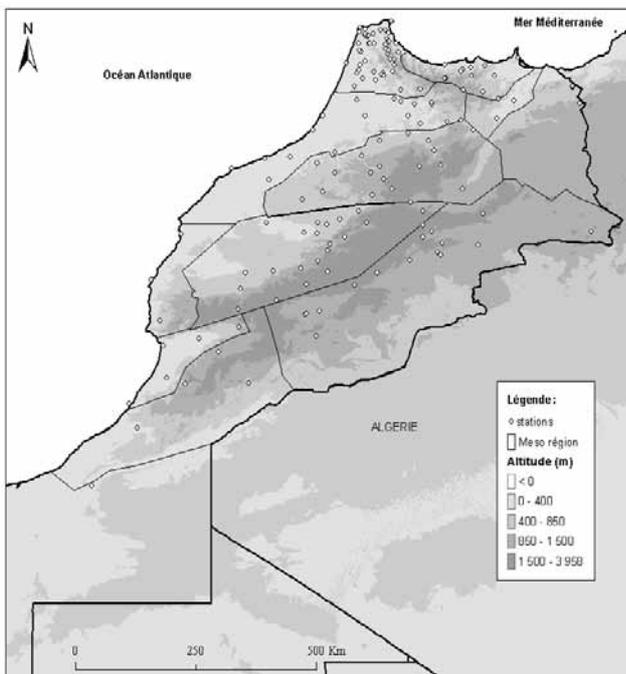
### Régionalisation à l'échelle « méso »



Carte 4 des « méso » régions



Carte 5 : zoom de la carte 4



Carte 6 : zoom avec toutes les stations observées

Abréviation	Nom de la région
M1	Méditerranée Rif
M2	Méditerranée Basse Moulouya
M3	Méditerranée Est
A1	Atlantique Nord
A2	Atlantique Sud
A3	Atlantique/Anti-Atlas

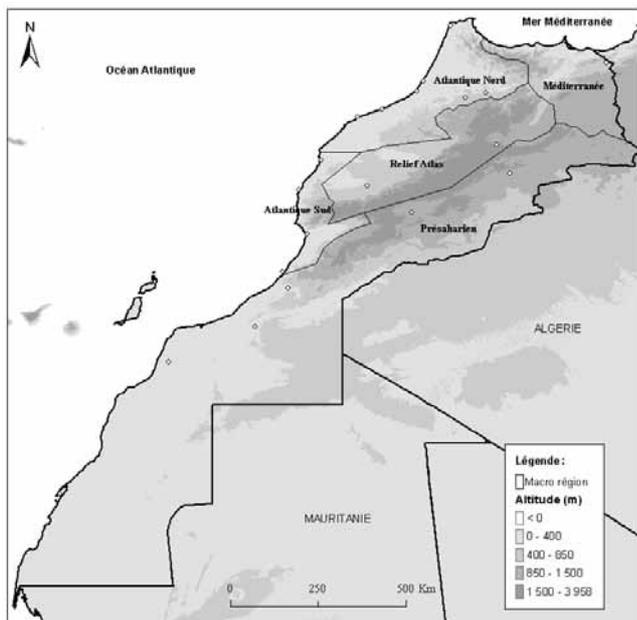
- M1 et M2 constituent la « méso » région « Méditerranée Rif et Basse Moulouya » ;
- M2 et M3 constituent la « méso » région « Méditerranée Est et Basse Moulouya » ;

Du fait d'un nombre insuffisant de stations observées dans les régions de l'Anti-Atlas et du Sahara Occidental, nous avons constitué deux « méso » régions telles que :

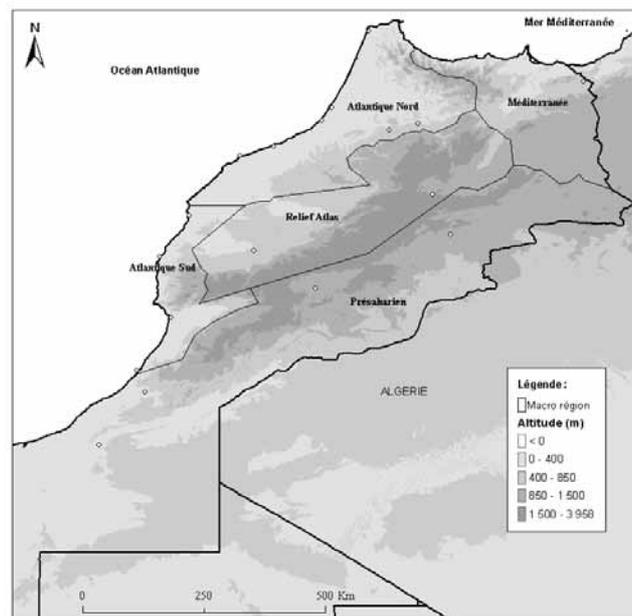
- Anti-Atlas et Sahara Occidental constituent une région ;
- Atlas présaharien et Anti-Atlas constituent une autre région.

## ANNEXE 14 :

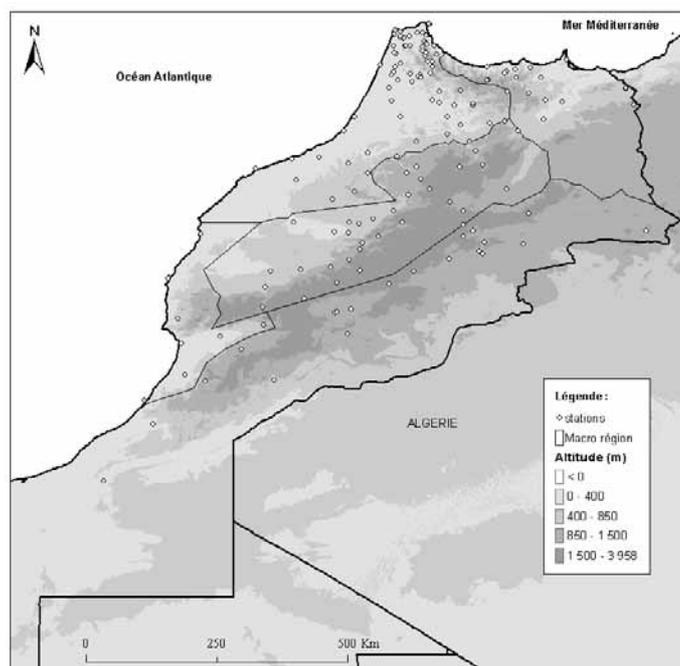
### Régionalisation à l'échelle « macro »



Carte 7 représentant les « macro » régions



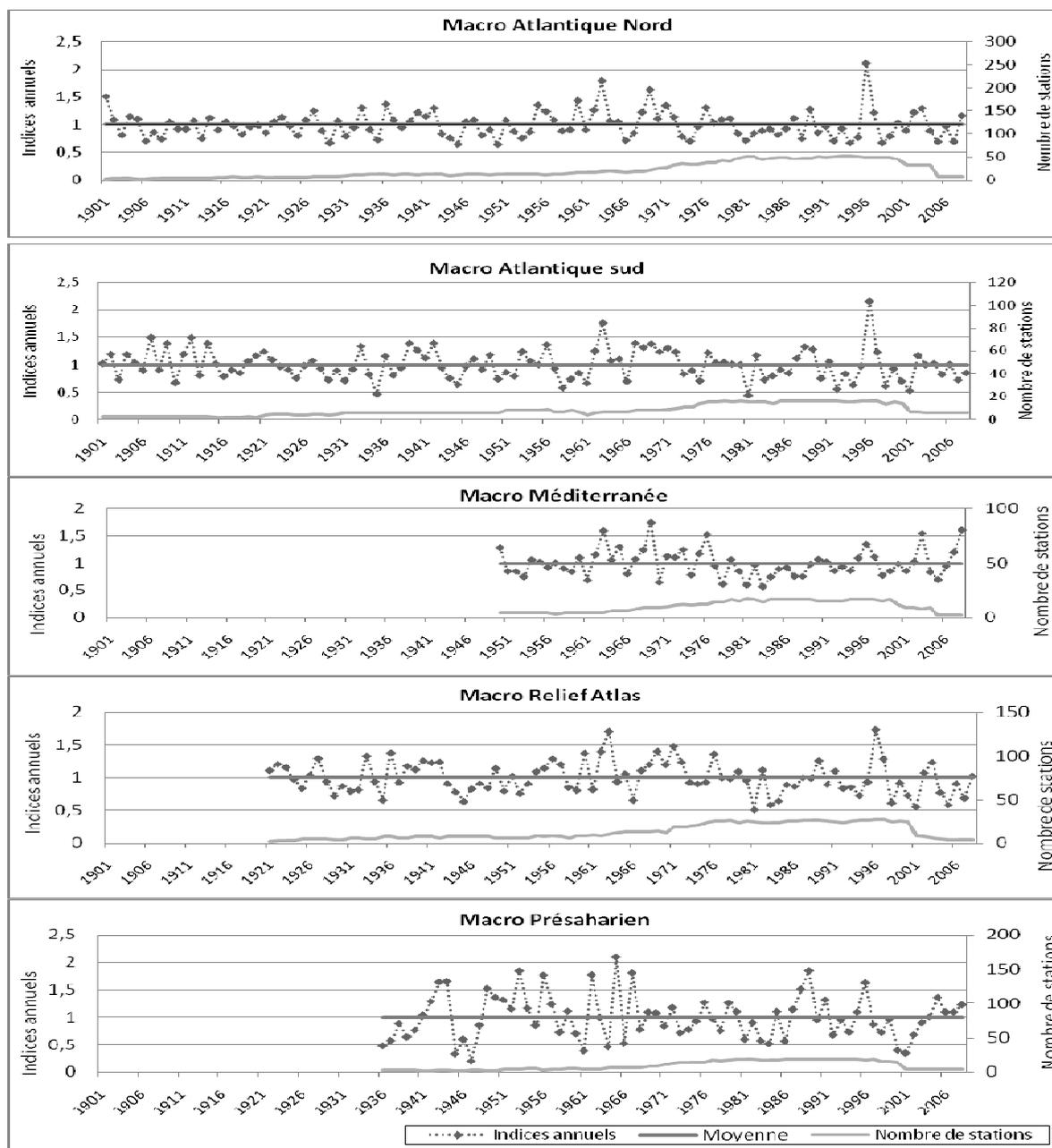
Carte 8 : zoom sur la carte 7



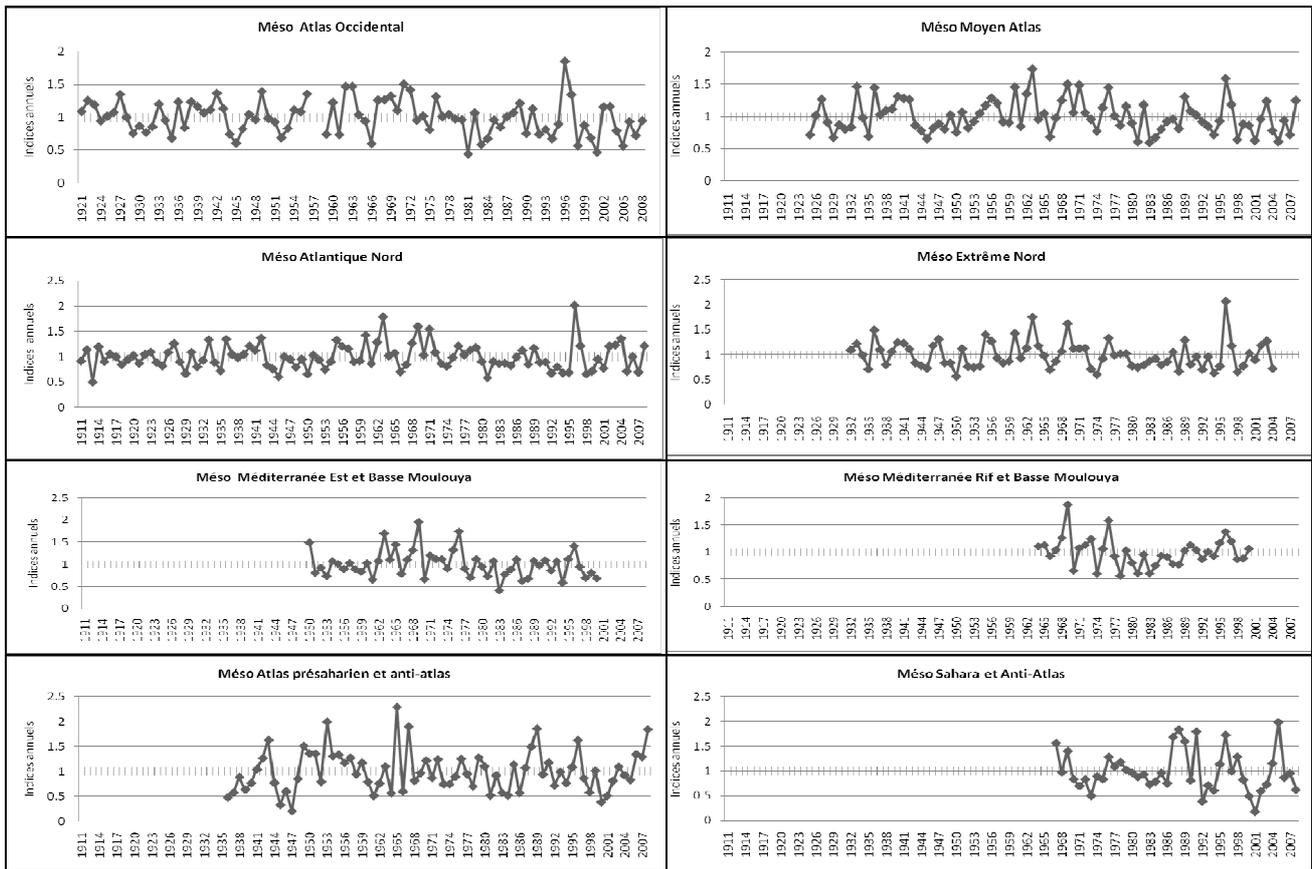
Carte 9 : zoom avec toutes les stations observées

## ANNEXE 15 :

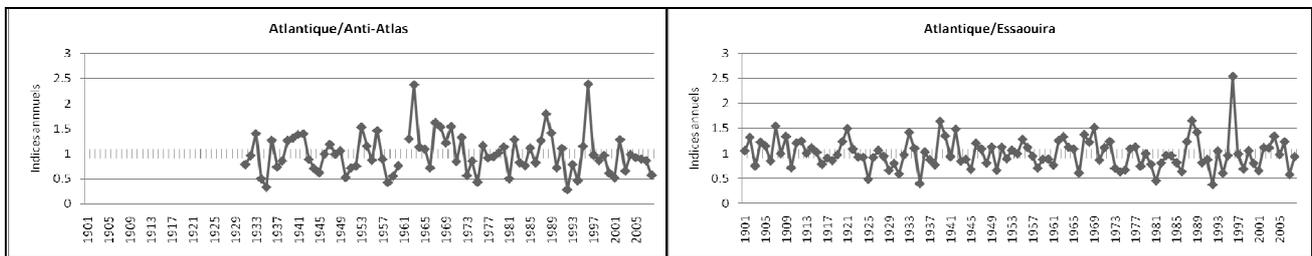
### Indices annuels



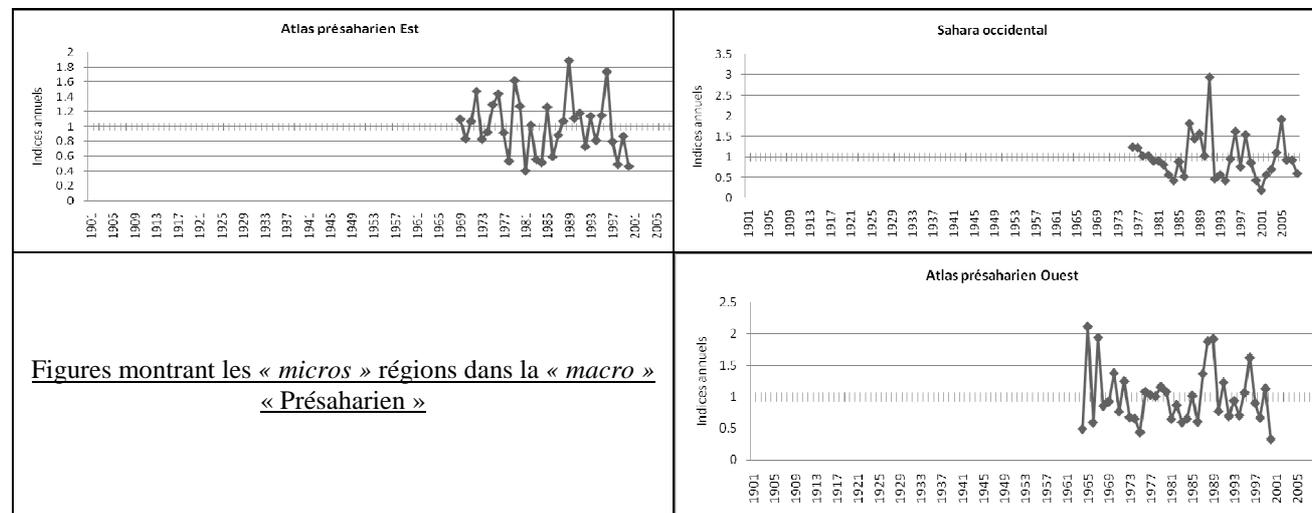
Graphiques représentant les indices annuels des précipitations des « macros » régions du Maroc, ainsi que le nombre de stations observées par année



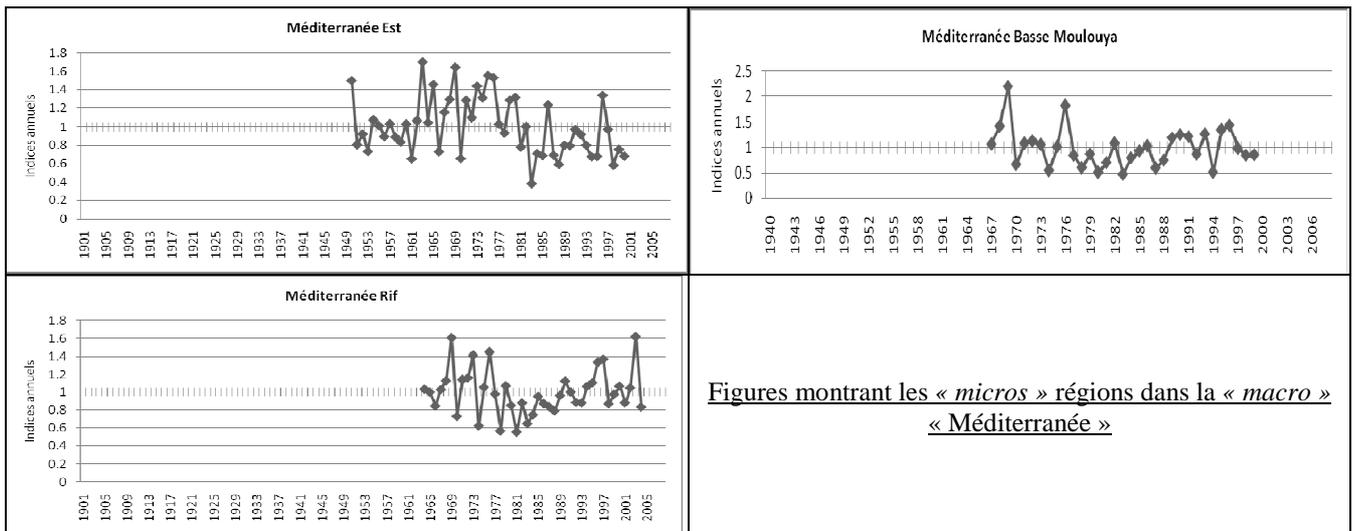
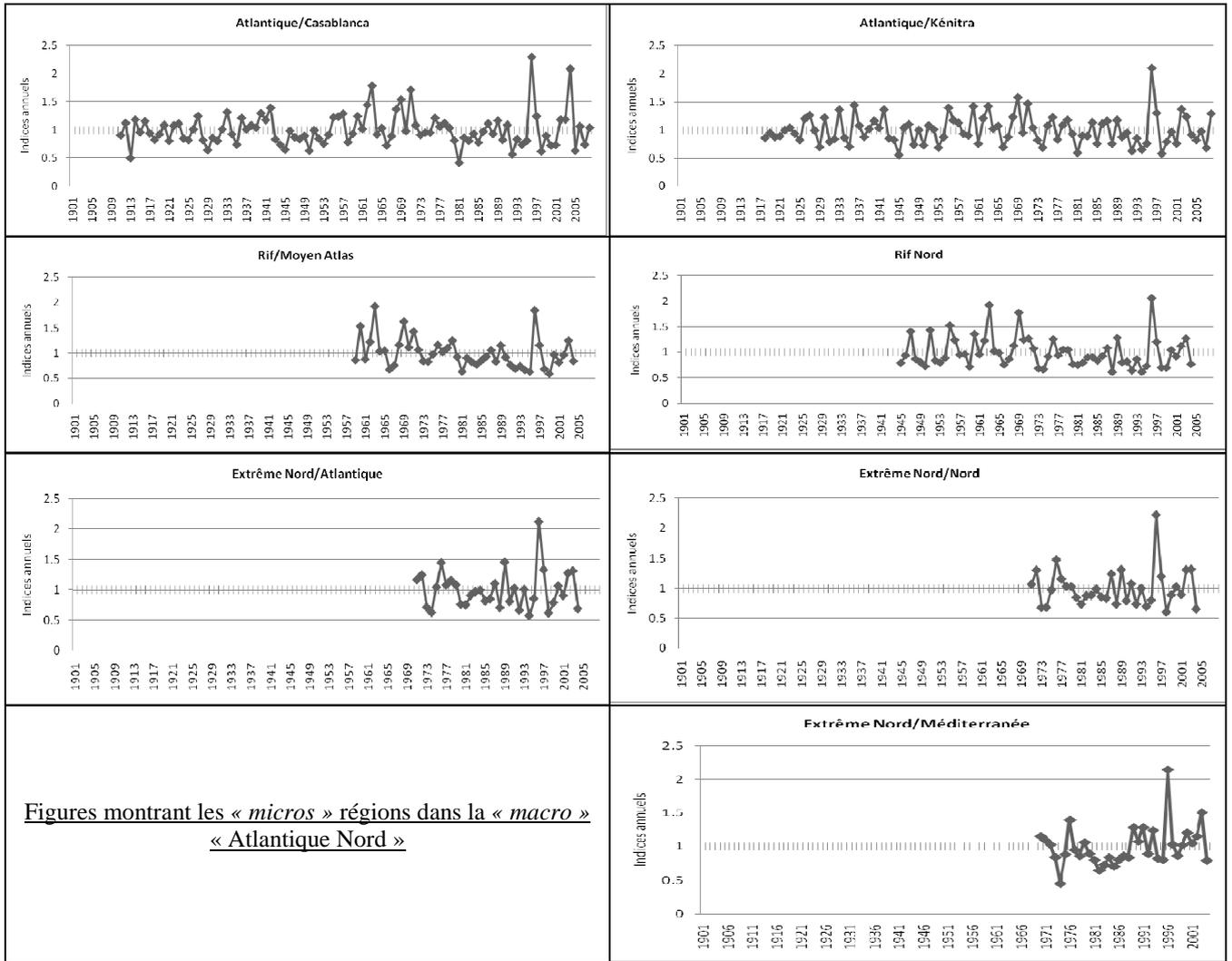
Graphiques représentant les indices annuels des « *mésos* » régions

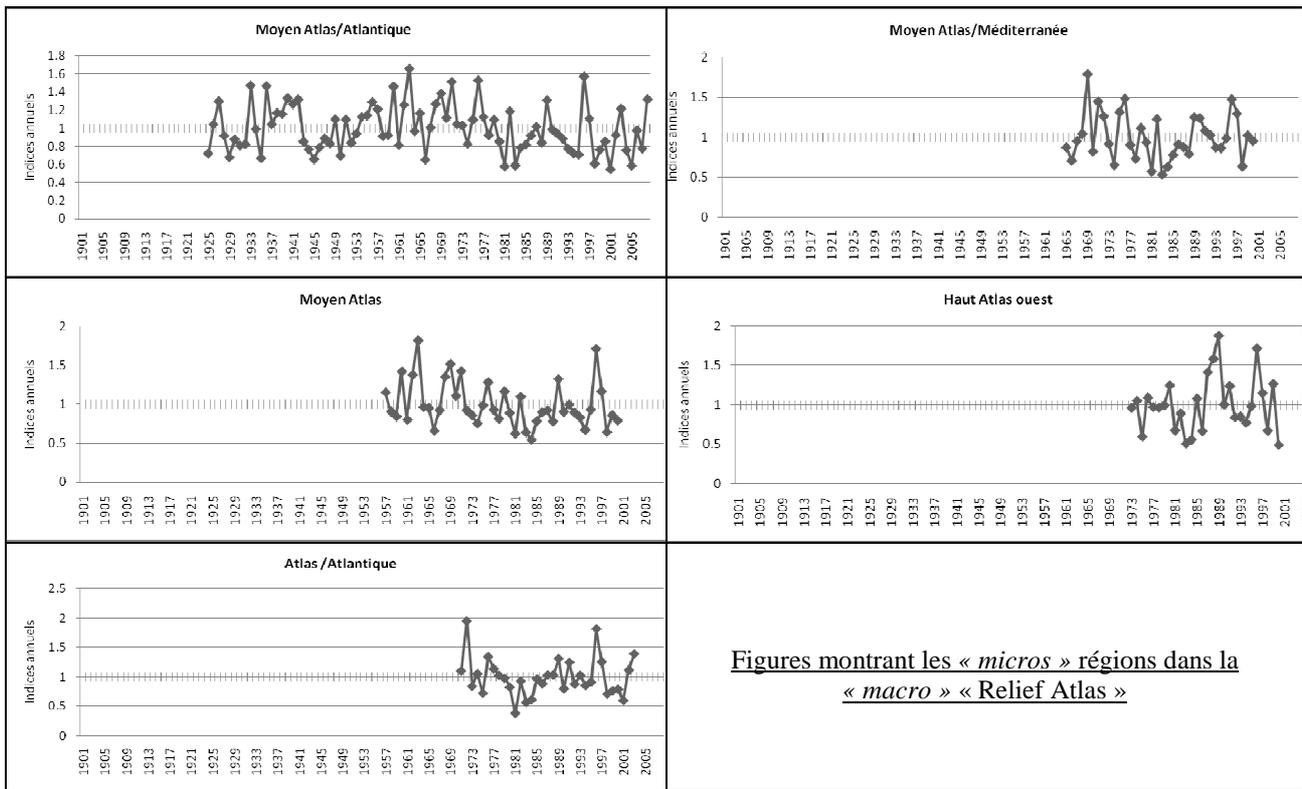


Graphiques des « *micros* » région de la « *macro* » « Atlantique Sud »



Figures montrant les « *micros* » régions dans la « *macro* » « Présaharien »





## ANNEXE 16 :

### Test de détection de ruptures (Lubès *et al.*, 1994)

#### **Test de Pettit :**

Pettit propose de tester l'hypothèse nulle qui définit l'absence de rupture dans la série chronologique. Sous l'hypothèse nulle la probabilité de dépassement de la valeur  $k$  est donnée approximativement par :

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6k^2 / (N^2 + N^3))$$

Avec :

- $K_N$  : le maximum en valeur absolue de  $U_{t,n}$  pour  $t$  variant de 1 à  $N-1$  ;
- $k$  : la valeur de  $K_N$  prise sur la série étudiée ;

Pour un risque  $\alpha$  de première espèce donné, si  $\text{Prob}(K_N > k)$  est inférieur à  $\alpha$ , l'hypothèse nulle est rejetée. La série comporte alors une rupture localisée au moment où est observé  $\max |U_{t,N}|_{t=1, N-1}$

#### **Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian :**

La méthode fournit la probabilité que le changement se produise à un moment  $t$ , dans une série chronologique où on suppose à priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé. De même, cette procédure donne une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement ait la valeur du changement éventuel de la moyenne.

#### **Procédure de segmentation d'Hubert :**

Cette méthode consiste à découper la série en  $m$  segments ( $m > 1$ ) de telle sorte que la moyenne calculée sur un segment soit significativement différente de la moyenne du segment voisin. Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de la moyenne.

La segmentation retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure est celle qui minimise  $D_m$ .  $D_m$  étant l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée.

Selon les auteurs, cette procédure de segmentation peut être vue comme un test de stationnarité. L'hypothèse nulle de ce test est donc que la série est stationnaire, c'est-à-dire en rapport avec les durées d'observations.

## ANNEXE 17 :

### Notice explicative des tests de détections de ruptures appliqués

- **rupture faible** : rupture détectée par un seul test, qui indique donc une probabilité plus faible de rupture ou un événement de moindre amplitude.
- **rupture probable** : rupture détectée par au moins deux tests statistiques.
- **rupture avérée** : rupture détectée par les trois tests de détections de rupture, qui indique donc une probabilité importante de rupture ou un événement de grande amplitude.

\*date détectée par le test de Pettit

\*\*date détectée par la méthode Bayésienne de Lee et Heghinian

\*\*\*date détectée par la segmentation de Hubert : correspond à la date de fin de la première segmentation

(++) Rupture où la série montre une année positive des précipitations, du débit ou du coefficient d'écoulements suivant la série concernée. Si l'absence de ce signe est constatée, alors la rupture correspond à une diminution.

## ANNEXE 18 :

### Ruptures sur les indices annuels pluviométriques

Echelle	Nom des régions	Reconstitution	Rupture	Période	Nombre de stations
<b>Macro</b>					
	Atlantique Sud	oui	aucune	1901-2008	17
		non	aucune	1921-2008	-
<b>Micro</b>					
	Atlantique/Anti-Atlas	oui	aucune	1931-2008	5
		non	aucune	1951-2000	-
	Atlantique/Essaouira	non	1986**	1979-2000	3
		oui	aucune	1901-2008	-
<b>Séries de références</b>					
	Agadir	oui	2006**	1922-2008	1
	Essaouira	oui	2006**	1901-2008	1
	Marrakech	oui	1999**	1901-2008	1
	Safi	oui	aucune	1901-2008	1
	Sidi Ifni	oui	aucune	1951-2008	1

\*Test de Pettit, \*\*Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian, \*\*\*Segmentation de Hubert

Détection des ruptures des indices annuels des régions et des séries de référence appartenant à la « macro » « Atlantique Sud »

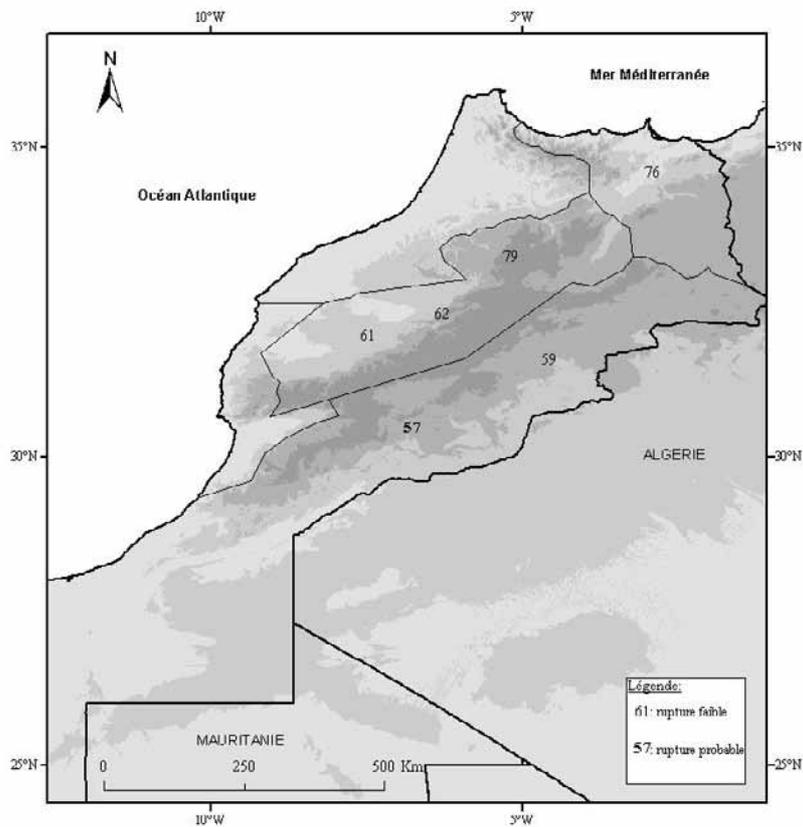
Echelle	Nom des régions	Reconstitution	Rupture	Période	Nombre de stations
<b>Macro</b>					
	Méditerranée	oui	1976*	1950-2004	-
	non reconstituée	non	aucune	1950-2004	18
<b>Méso</b>					
	Méditerranée Rif et Basse Moulouya	non	1969*	1964-2004	-
		oui	aucune	1964-2004	15
	Méditerranée Est et Basse Moulouya	non	aucune	1950-2000	-
		oui	aucune	1950-2001	7
<b>Micro</b>					
	Méditerranée Est	non	1980* ; 1980** ; 1980***	1969-2000	-
		oui	1980** ; 1961*** ; 1980***	1950-2000	3
	Méditerranée Rif	non	aucune	1968-2004	-
		oui	aucune	1964-2004	11
	Méditerranée Moulouya	non	1968**	1967-2000	-
		oui	1969** ; 1969***	1967-2000	3
<b>Séries de références</b>					
	Oujda	oui	1980* ; 1980** ; 1980***	1931-2008	1

\*Test de Pettit, \*\*Procédure Bayésienne de Lee et Heghinian, \*\*\*Segmentation de Hubert

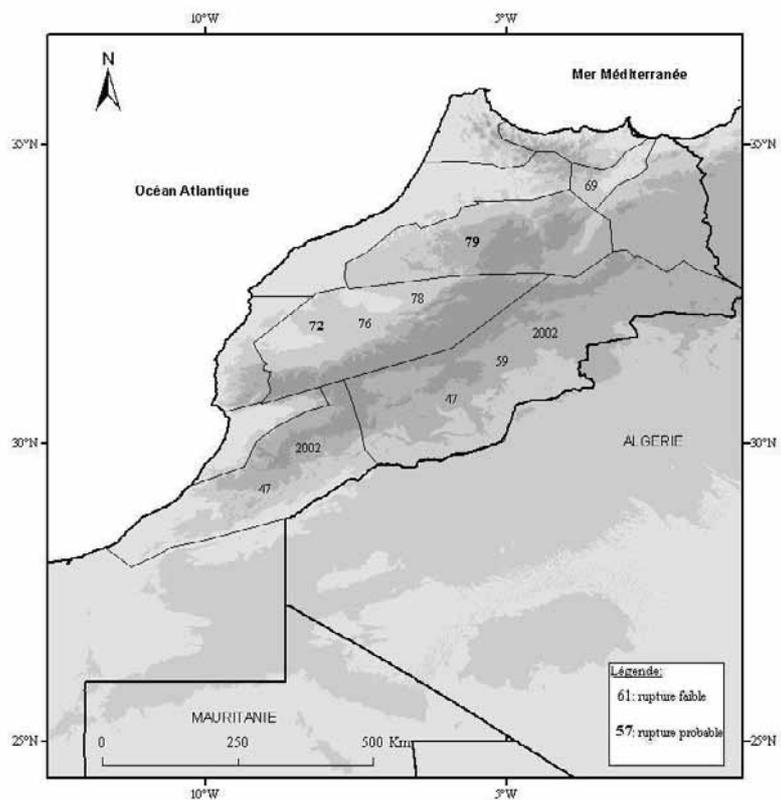
Détection des ruptures des indices annuels des régions et des séries de référence appartenant à la « macro » « Méditerranée ».

## ANNEXE 19 :

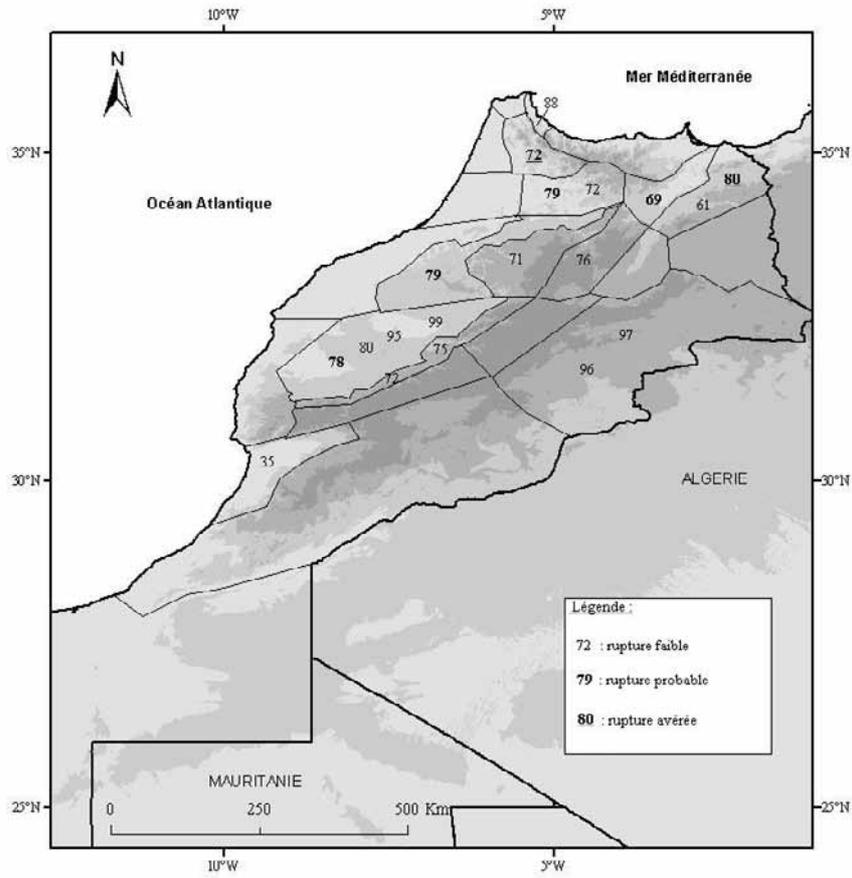
### Carte des ruptures sur les régions climatiques



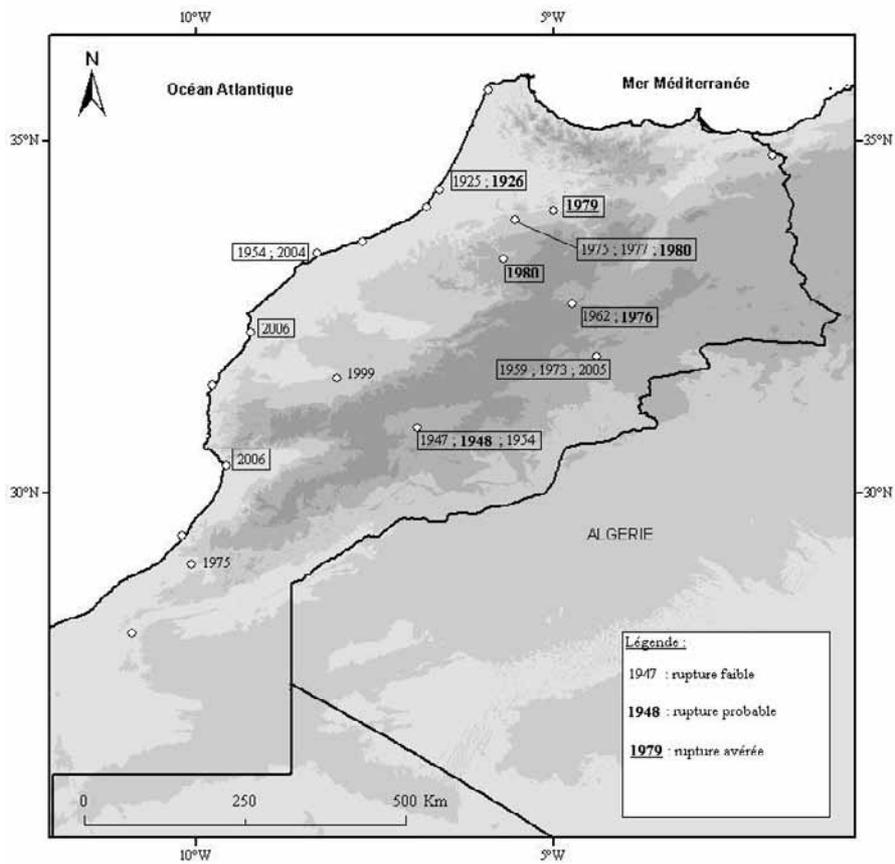
Carte représentant les dates de ruptures détectées à l'échelle « macro » régionale



Carte représentant les dates de ruptures détectées à l'échelle « méso » régionale



Carte représentant les dates de ruptures détectées à l'échelle « *micro* » régionale



Carte représentant les dates de ruptures détectées sur les séries de référence

## ANNEXE 20 :

### Inventaire des stations hydrologiques et bassins versants associés

Nom rivière	Nom station	Latitude	Longitude	Date de début	Date de fin	Durée (ans)	Area (km <sup>2</sup> )	Altitude (m)	Lacunes (mois)
Aguennour	Tsalat	33.33	-6.03	01/02/1977	01/04/1988	11	690	650	1
<b>Ait Amer</b>	<b>Aval Tamri</b>	<b>?</b>	<b>?</b>	<b>01/03/1980</b>	<b>01/08/1995</b>	<b>15</b>	<b>1741</b>	<b>?</b>	<b>aucune</b>
Amaghouss	Amaghouss	?	?	01/05/1976	02/08/1995	19	955	?	aucune
Ansegmir	Ansegmir	32.75	-4.9	01/02/1959	01/09/1988	29	960	450	aucune
Assan	Ouijjane	?	?	01/04/1976	05/08/1995	<b>19</b>	892	?	aucune
<b>Bouregreg</b>	<b>Lalla chafia</b>	<b>33.7</b>	<b>-6.54</b>	<b>01/01/1980</b>	<b>01/08/1984</b>	<b>4</b>	<b>3230</b>	<b>180</b>	<b>aucune</b>
<b>Dadès</b>	<b>Ait Moutade</b>	<b>31.41</b>	<b>-5.47</b>	<b>01/09/1970</b>	<b>01/06/1987</b>	<b>17</b>	<b>1550</b>	<b>1545</b>	<b>aucune</b>
<b>El Abid</b>	<b>Ait Ouchene</b>	<b>32.25</b>	<b>-6.08</b>	<b>01/01/1980</b>	<b>01/08/1984</b>	<b>4</b>	<b>2350</b>	<b>1070</b>	<b>aucune</b>
El Makhazine	Dar Khrofa	?	?	01/11/1975	01/08/1988	13	441	?	aucune
Emsa	Emsa	35.52	-5.3	01/04/1971	01/01/1988	17	110	5	aucune
<b>Grou</b>	<b>Oujlet Haboub</b>	<b>33.21</b>	<b>-6.23</b>	<b>01/09/1976</b>	<b>01/07/1988</b>	<b>12</b>	<b>1627</b>	<b>548</b>	<b>aucune</b>
<b>Guir</b>	<b>Tazzoughert</b>	<b>32</b>	<b>-3.75</b>	<b>01/09/1976</b>	<b>01/08/1989</b>	<b>13</b>	<b>2370</b>	<b>1052</b>	<b>2</b>
Issen	Aguenza	?	?	01/01/1980	04/08/1995	<b>15</b>	1130	?	aucune
Issen	Amsoul	?	?	01/04/1978	03/08/1995	<b>17</b>	480	?	aucune
Kert	Dar Driouch	34.9	-3.29	01/06/1959	01/08/1987	18	1353	273	1
Khobz	Kannoua	35.52	-5.84	01/10/1971	01/10/1988	17	220	6	1
Loukkos	Mdouar	35	-5.5	01/04/1969	01/09/1988	19	667	84	aucune
<b>Mdez</b>	<b>Pont du Mdez</b>	<b>33.67</b>	<b>-4.5</b>	<b>01/09/1956</b>	<b>01/02/1990</b>	<b>34</b>	<b>3435</b>	<b>725</b>	<b>2</b>
<b>Moulouya</b>	<b>Dar El Caïd</b>	<b>34.24</b>	<b>-3.32</b>	<b>01/02/1957</b>	<b>01/12/1988</b>	<b>31</b>	<b>24422</b>	<b>325</b>	<b>5</b>
<b>Moulouya</b>	<b>Zeïda</b>	<b>32.97</b>	<b>-4.9</b>	<b>01/09/1976</b>	<b>01/04/1988</b>	<b>12</b>	<b>1673</b>	<b>1450</b>	<b>aucune</b>
Nfis	Nkouris	31.08	-8.1	01/09/1976	01/08/1988	12	848	1100	1
<b>Ouergha</b>	<b>Bab Ouender</b>	<b>34.6</b>	<b>-4.55</b>	<b>01/01/1952</b>	<b>01/01/1990</b>	<b>38</b>	<b>1758</b>	<b>540</b>	<b>4</b>
<b>Ouergha</b>	<b>M'Jara</b>	<b>34.59</b>	<b>-5.25</b>	<b>01/09/1951</b>	<b>01/01/1990</b>	<b>39</b>	<b>6190</b>	<b>85</b>	<b>5</b>
<b>Ouergha</b>	<b>Ourtzagh</b>	<b>34.62</b>	<b>-5.01</b>	<b>01/09/1951</b>	<b>01/01/1989</b>	<b>38</b>	<b>4404</b>	<b>140</b>	<b>1</b>
Ouirine	Tizi N'Isly	32.44	-5.63	01/09/1976	01/09/1988	12	?	1000	aucune
<b>Oum Er Rbia</b>	<b>Dechra El Oued</b>	<b>32.68</b>	<b>-5.9</b>	<b>01/09/1953</b>	<b>01/02/1989</b>	<b>36</b>	<b>3330</b>	<b>591</b>	<b>4</b>
Oum Er Rbia	Tarhat	33	-5.67	01/01/1975	01/02/1987	12	1036	866	aucune
<b>Sebou</b>	<b>Ain Timedrine</b>	<b>33.75</b>	<b>-4.53</b>	<b>01/01/1965</b>	<b>01/07/1984</b>	<b>19</b>	<b>4392</b>	<b>645</b>	<b>aucune</b>
<b>Sebou</b>	<b>Azib Soltane</b>	<b>34.28</b>	<b>-5.43</b>	<b>01/09/1959</b>	<b>01/01/1989</b>	<b>30</b>	<b>17250</b>	<b>70</b>	<b>aucune</b>
<b>Souss</b>	<b>Aoulouz pont</b>	<b>?</b>	<b>?</b>	<b>01/01/1955</b>	<b>01/08/1991</b>	<b>36</b>	<b>4450</b>	<b>?</b>	<b>aucune</b>
Taifine	Kalaya	35.61	-5.73	01/09/1976	01/08/1987	11	40	30	aucune
Zia	Foum Tillich	32.23	-4.52	01/11/1974	01/09/1989	15	1240	1400	aucune

## ANNEXE 21 :

Tableau des dates de ruptures détectées sur les débits au pas de temps mensuel

Station	Aguenza	Amaghouss	Amsoul	Aval Tamri
Janvier	aucune	aucune	1979***	aucune
Février	aucune	aucune	1979**;1979***	1981**
Mars	aucune	aucune	aucune	1980*
Avril	1987(++)**	aucune	aucune	1994***
Mai	aucune	1976***	aucune	aucune
Juin	1987(++)**	aucune	aucune	aucune
Juillet	aucune	aucune	aucune	aucune
Août	aucune	aucune	1993***(++);1995***	aucune
Septembre	aucune	aucune	aucune	aucune
Octobre	aucune	aucune	aucune	aucune
Novembre	aucune	aucune	1979***	aucune
Décembre	aucune	aucune	aucune	aucune
Annuel	1986*	aucune	aucune	1991*

Station	Dar Driouch	Kannoua	N'Kouris	Ouijjane	Oujlet Haboub	Tazzoughert
Janvier	aucune	aucune	1979**;1977***; 1979***	aucune	1977***	aucune
Février	aucune	1984**	1987**;1987***	aucune	1979***	aucune
Mars	aucune	aucune	1987***	1993***	1985**	aucune
Avril	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune
Mai	aucune	aucune	1987***	1976***	aucune	aucune
Juin	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune
Juillet	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune
Août	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune
Septembre	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune	aucune
Octobre	aucune	aucune	aucune	1993***	aucune	aucune
Novembre	aucune	aucune	1986***	aucune	1982**	aucune
Décembre	aucune	aucune	1986***	aucune	1977***; 1986***	aucune
Annuel	1977*	1975**	1980**	aucune	1979**	aucune

## ANNEXE 22 :

### Explication du schéma de la figure 34 p 45

Du fait de la pluie  $P_k$ , le niveau  $S_k$  dans le réservoir de production devient  $S_1$  :

$$(1) S_1 = (S_k + X_1 \varphi) / (1 + \varphi * (S_k / X_1)) \text{ avec } \varphi = \tanh (P_k / X_1)$$

$X_1$ , soit la capacité du réservoir, est positif et exprimé en millimètres. Alors la pluie en excès  $P_1$  peut s'exprimer ainsi :

$$(2) P_1 = P_k + S_k - S_1$$

Puis, du fait de l'évapotranspiration potentielle, le niveau  $S_1$  devient alors  $S_2$ , nous avons alors :

$$(3) S_2 = (S_1 * (1 - \psi)) / (1 + \psi * (1 - (S_1 / X_1))) \text{ avec } \psi = \tanh (E / X_1)$$

$E$  étant l'évapotranspiration potentielle. Or, le réservoir se vidange ensuite par percolation  $P_2$ . Le niveau  $S_k$  pour le mois suivant est alors donné par la formule suivante :

$$(4) S_k = S_2 / (1 + (S_2 / X_1)^3)^{1/3}$$

Après  $P_2$ , soit la partie de l'eau du réservoir-sol qui a percolé s'écrit :

$$(4) P_2 = S_2 - S_k$$

Donc la pluie totale  $P_3$  peut s'écrire :

$$(5) P_3 = P_1 + P_2$$

Ensuite, dans le réservoir de routage, le niveau  $R$  devient alors  $R_1$  :

$$(6) R_1 = R + P_3$$

Le paramètre  $X_2$  est positif et adimensionnel et représente le coefficient d'échanges souterrains. Ainsi, le niveau dans le réservoir de routage devient :

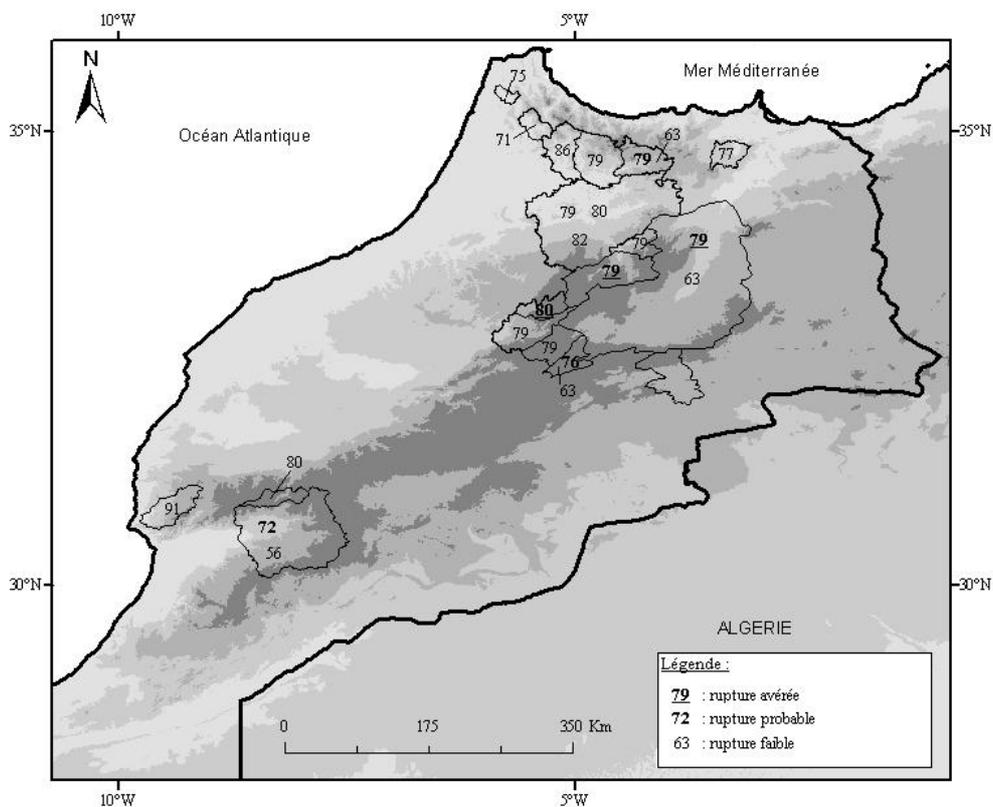
$$(7) R_2 = R * X_2$$

Enfin, le réservoir de routage se vidange et le débit  $Q_k$  est alors égal à :

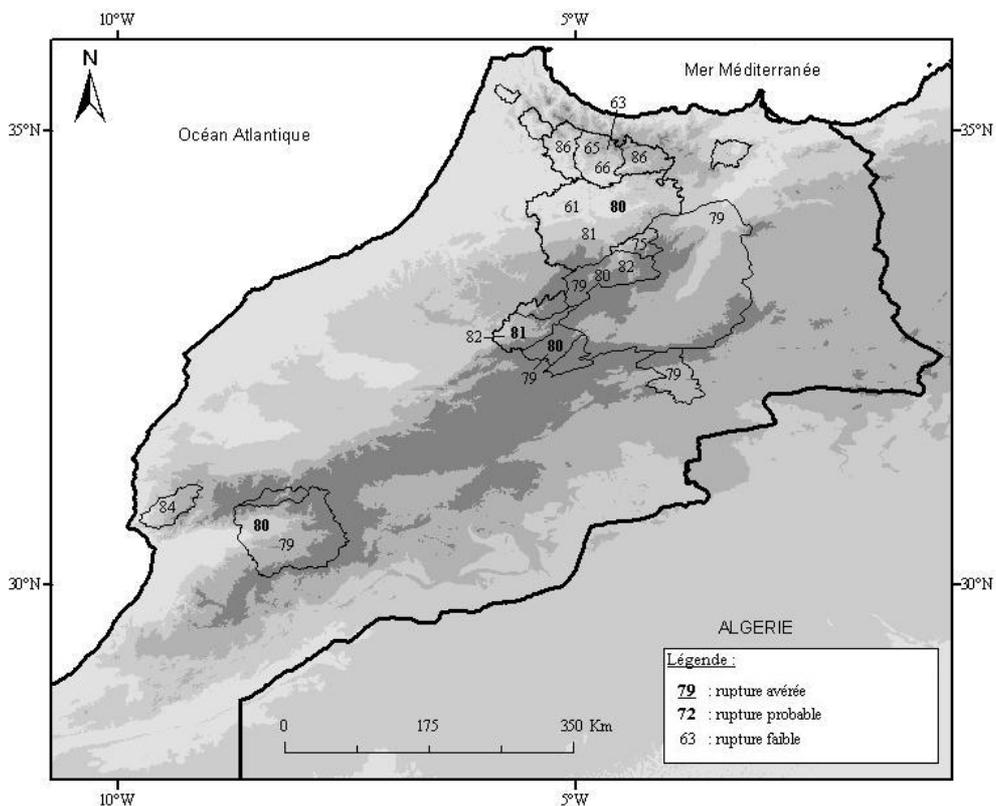
$$(8) Q_k = R_2^2 / (R_2 + X_3) \text{ avec } X_3, \text{ capacité du réservoir de routage après vidange.}$$

## ANNEXE 23 :

### Carte des ruptures sur les écoulements annuels



### Carte des ruptures des débits annuels



### Carte des ruptures des coefficients d'écoulements annuels

## **Résumé**

Le Maroc est un pays situé en région méditerranéenne. Son climat est essentiellement semi-aride. Sa situation géographique et sa grande variabilité climatique intrinsèque font de ce pays une zone très vulnérable au changement climatique global. Une modification des pluies va probablement entraîner une modification de la disponibilité des ressources en eau. Les impacts pour la population devraient donc être importants. Les ressources en eau font aussi l'objet d'une pression anthropique qui ne cesse de croître : changement d'occupation des sols, construction de barrages, prélèvements d'eau souterraine... Les objectifs de cette étude sont tout d'abord, d'étudier les régimes hydroclimatiques du Maroc, puis essayer d'évaluer la part anthropique et climatique influençant les écoulements superficiels. La régionalisation climatique nous a permis de constituer des unités climatiques sur plusieurs échelles d'espace emboîtées grâce à la méthode des vecteurs régionaux. Les précipitations au Maroc sont corrélées avec la NAO surtout dans les régions atlantiques. Nous observons une baisse des pluies sur la majeure partie du royaume à partir de 1976/80 (tests de ruptures), excepté en Méditerranée Nord, où les pluies montrent une tendance haussière depuis les années 80. En ce qui concerne les écoulements, une approche par bassin versant a été réalisée. Les dates de ruptures sont identiques à celle des pluies, avec cependant, des années plus tardives pour les coefficients d'écoulement. Ces dates de rupture ont été comparées aux dates de construction de grands barrages sans trouver de lien. Nous pouvons en déduire que la diminution des débits et des coefficients d'écoulement à partir de 1980 sur de nombreux bassins versants, est due à la diminution des précipitations, sur la période d'étude allant jusqu'en 1990 environ.

## **Abstract**

Morocco is a country located in the Mediterranean area. Its climate is mainly semi-arid. Its geographical situation and its great intrinsic climatic variability make this country, a very vulnerable zone to the global climatic change. A modification of the rains will probably involve a modification of the availability of water resources. The impacts for men in this area should thus be important. Water resources are also subject of an anthropic pressure which does not stop to grow: change of land, construction of dams, and taking away of groundwater... The objectives of this study are first of all, to study the hydroclimatic regimes of Morocco, then to try to evaluate the anthropic and climatic share influencing runoff. Thanks to the method of the regional vectors, climatic regionalization enabled us to constitute climatic units on several scales of space. Precipitations in Morocco are correlated with the NAO especially in the Atlantic areas. We also observe a diminution of rainfall on the major part of the kingdom from 1976/80 (tests of ruptures), except in the Northern Mediterranean, where the rains show an upward trend since the Eighties. With regard to the flows, an approach by catchment area was carried out. Dates of ruptures are identical to that of the rainfall, with however, later for the coefficients of flow. These dates of rupture were compared with the dates of construction of dam without finding bond. We can deduce from it that the reduction from runoff and coefficients of flow since 1980 on many catchments is due to the reduction in precipitations, over the period of study going until approximately 1990.