



HAL
open science

Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes

Fatima Driouech

► **To cite this version:**

Fatima Driouech. Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2010. Français. NNT : 2010INPT0065 . tel-04274713

HAL Id: tel-04274713

<https://theses.hal.science/tel-04274713v1>

Submitted on 8 Nov 2023

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

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



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace

Présentée et soutenue par

Fatima Driouech

Le mercredi 6 octobre 2010

Titre :

Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes

JURY

Olivier Thual (Président)

Hubert Gallée (Rapporteur)

Gil Mahé (Rapporteur)

Laurent Li (Examineur)

Michel Déqué (Directeur de thèse)

Ecole doctorale :

Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)

Unité de recherche :

CNRM/Météo-France

Directeur(s) de Thèse :

Michel Déqué

Rapporteurs :

Hubert Gallée

Gil Mahé

Remerciements

Ces remerciements sont avant tout l'expression de ma reconnaissance envers tous ceux qui se sont montrés disposés à collaborer à ce travail et à le soutenir.

Je présente toute ma gratitude à mon directeur de thèse, Michel Déqué, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour la qualité de son encadrement et pour l'aide et le soutien qu'il m'a apporté tout au long de cette thèse. J'ai été à la fois très heureuse et honorée d'avoir travaillé avec lui.

Je présente mes sincères remerciements à Abdalah Mokssit pour m'avoir permis de m'inscrire en thèse, pour son aide et son soutien.

Je remercie Emilia Sánchez-Gómez pour sa contribution à ce travail et ses conseils précieux.

Je remercie les collègues d'HydroSciences Montpellier, dont particulièrement Claudine Dieulin, Marianne Milano et Natalie Rouché, qui m'ont beaucoup apporté en matière d'hydrologie.

Je remercie Alain Braun pour toute l'aide qu'il n'a pas hésité à m'apporter tout au long de cette thèse.

Je remercie Laurent Jacquin pour son soutien à cette thèse.

Je remercie Noureddine Semane dont la présence et le soutien à la fin des travaux de cette thèse m'ont beaucoup apporté.

Je remercie Rachida El Ouaraini, Rachid Sebbari, M. El Hamly et Tarik El Hairech pour leur aide et soutien.

Je remercie Jean-Philippe Piedelièvre, Samuel Somot et Jean-François Guérémy pour les discussions fructueuses et pour leur soutien à cette thèse.

Je remercie l'ensemble des membres du jury de thèse : Olivier Thual qui a bien voulu présider le jury, Hubet Galée et Gil Mahé qui ont accepté d'être rapporteurs, ainsi que Laurent Li.

Ma gratitude va à Météo-France et la Direction de la Météorologie Nationale qui m'ont permis d'entreprendre ce travail dans les meilleures conditions qui soient.

Je voudrais enfin remercier ma famille et tout particulièrement mon mari Mohamed Laghdaf qui m'a continuellement soutenu et encouragé.

Résumé

Dans le contexte du changement climatique, il est nécessaire d'affiner les informations relatives à l'évolution du climat dans un pays, susceptible d'être négativement impacté par le réchauffement global, comme le Maroc. En effet, les différentes études de projections futures, dont celles du GIEC, sont basées majoritairement sur les sorties de modèles climatiques à faible résolution qui ne permettent pas d'aborder les échelles régionales et locales.

La première partie de ce travail concerne l'étude des tendances et évolutions observées au niveau du climat du Maroc à travers un certain nombre d'indices climatiques. Outre la forte variabilité interannuelle des précipitations et l'augmentation de la fréquence des sécheresses depuis le début des années 1980, la distribution des précipitations du Maroc a bien connu un changement au cours de la période 1961-2008. Ce changement, consistant en une évolution vers des conditions plus sèches, a coïncidé avec une augmentation de la température moyenne en toutes saisons.

L'évaluation des changements futurs est réalisée tout d'abord à l'aide d'une descente d'échelle dynamique effectuée avec le modèle ARPEGE-Climat dans sa version à résolution variable. L'examen des capacités du modèle, dont la résolution est de l'ordre de 50km sur le Maroc, a montré son aptitude à simuler correctement la circulation de grande échelle ainsi que la variabilité interannuelle des précipitations marocaines en dépit d'une sous-estimation de leur quantité. A l'horizon 2021-2050, une baisse des cumuls généralisée à tout le pays concernerait la saison d'hiver (DJF). Si on se limite à la zone située à l'ouest des montagnes de l'Atlas, la baisse concernerait la partie la plus pluvieuse de l'année (ONDJFM). Cette baisse serait accompagnée d'une diminution du nombre de jours humides et du nombre d'événements de fortes précipitations ainsi que d'une augmentation de la persistance temporelle de la sécheresse. Ce changement de la distribution des précipitations coïnciderait avec un réchauffement qui se manifesterait à la fois aux échelles saisonnière et annuelle.

Les sorties d'une dizaine de modèles régionaux de climat (MRC) du projet FP6-ENSEMBLES, sont utilisées pour balayer une partie de la marge des incertitudes relatives aux changements climatiques et notamment celles inhérentes à la modélisation. Les changements futurs issus de ces MRC, compatibles dans l'ensemble avec ceux issus d'ARPEGE-Climat, optent dans la plupart des cas pour une réduction des cumuls pluviométriques de l'hiver accompagnée généralement d'une baisse du nombre d'événements de fortes précipitations et d'une augmentation du nombre maximal de jours consécutifs secs.

L'examen, réalisé à la fois à l'aide du modèle ARPEGE-Climat et des MRC d'ENSEMBLES, de la possibilité d'utilisation d'une méthode de réduction d'échelle statistique basée sur les régimes de temps de l'Atlantique nord pour la déduction des changements futurs des précipitations locales, montre la déficience de ce type d'approche dans le cas de la pluviométrie hivernale marocaine.

La méthode de correction par quantiles étendues aux régimes de temps de l'Atlantique nord et appliquée aux sorties d'ARPEGE-Climat confirme le signe des changements issus de ce modèles, malgré un effet légèrement modérateur de leurs amplitudes.

L'évaluation des impacts potentiels sur l'hydrologie à l'aide du modèle hydrologique GR2M et des scénarios climatiques d'ARPEGE-Climat, montre une future réduction des débits mensuels au niveau du bassin versant de la Moulouya du fait de la concomitance de précipitations moins abondantes et d'une évapotranspiration potentielle accrue par l'augmentation de température.

Enfin, une descente d'échelle dynamique réalisée à l'aide du modèle à aire limitée ALADIN-Climat à très haute résolution (12km) sur la moitié nord du pays permet de confirmer dans l'ensemble les projections issues d'ARPEGE-Climat à la fois en termes de moyennes et d'extrêmes.

Abstract

In the context of climate change, it is important to improve climate information concerning countries that may be negatively impacted by global warming such as Morocco. Indeed, various studies of future projections, including IPCC ones, are mainly based on the outputs of low resolution climate models that do not allow accessing the regional and local scales.

The first part of this work focuses on the study and analysis of observed climate evolution and trends in Morocco through a set of climate indices. Moroccan rainfall is characterized by a high interannual variability and more frequent droughts have occurred since the early 1980s. Furthermore, a clear change is shown in the distribution of precipitation during the period 1961-2008. It consists in a shift towards warmer and drier conditions.

The assessment of future climate changes is done, firstly, using a variable resolution version of the global GCM ARPEGE-Climat with high resolution over Morocco (50km). The examination of this version capability shows the ability of the model to well reproduce the large scale circulation as well as the interannual variability of Moroccan rainfall despite an underestimation of its amount. A reduction of winter rainfall over the whole country is projected by the model for 2021-2050. In the region located west of the Atlas Mountains, the reduction could concern the wettest part of the year (ONDJFM). The changes in rainfall characteristics may also occur through a decrease in the number of wet days and the number of heavy precipitation events and by more persistent droughts. Furthermore, an increase of mean temperature is projected at annual and seasonal scales.

The outputs of ten RCMs of the FP6-ENSEMBLES (ENSEMBLES) project are used to assess the uncertainties associated to future climate change. The changes issued from ARPEGE-Climat are in the range covered by the ten RCMs. Most of the models agreed on a reduction of winter precipitation associated with a decrease in the number of heavy precipitation events and an increase in the number of maximum consecutive dry days.

The evaluation of a statistical downscaling approach that uses large scale fields such as North Atlantic weather regimes to construct local scenarios of future climate change shows the deficiency of this approach in the case of Moroccan winter precipitation. This result is obtained by both ARPEGE-Climat and the ENSEMBLES RCMs.

The quantile-quantile correction method extended to weather regimes and applied to the outputs of ARPEGE-Climat confirms the sign of the changes despite a slight reduction of their amplitudes.

The assessment of potential impacts on hydrology done using the hydrological model GR2M and the climate scenarios issued from ARPEGE-Climat shows a future reduction of the Moulouya watershed discharges. This is due to the combination of a rainfall decrease and an enhanced potential evapotranspiration induced by increasing temperature.

Finally, a dynamical downscaling achieved using the limited area model ALADIN-Climat with very high resolution (12km) on the northern half of the country allows a further assessment of future climate changes and related uncertainties. The projections issued from ARPEGE-Climat are generally confirmed both in terms of average and of extremes.

Table des matières

Introduction.....	7
1.Evolutions et tendances observées.....	11
1.1.Introduction.....	11
1.2.Données utilisées et analyse temporelle.....	14
1.3.Définition des indices climatiques considérés	18
1.4.Analyse des tendances observées des indices pluviométriques.....	20
1.4.1.Tendances des indices pluviométriques de la saison d’hiver (DJF).....	20
1.4.2.Tendances des indices pluviométriques de la saison du printemps (MAM).....	21
1.4.3.Tendances des indices pluviométriques de la saison d’été (JJA).....	22
1.4.4.Tendances des indices pluviométriques de la saison d’automne (SON).....	24
1.4.5.Tendances des indices pluviométriques à l’échelle annuelle.....	24
1.4.6.Tendances des températures.....	26
1.4.7.Types de climats.....	27
1.5.Conclusion.....	29
2.Description et évaluation de la version du modèle ARPEGE-Climat utilisée.....	31
2.1.Méthodes de réduction d’échelle statistiques.....	33
2.2.Méthodes de réduction d’échelle dynamiques.....	33
2.3.Description de la version utilisée du modèle ARPEGE-Climat.....	34
2.4.Evaluation de la version utilisée du modèle.....	36
3.Projections futures.....	61
3.1.Description des expériences.....	62
3.2.Projections futures de précipitation pour l’hiver étendu.....	65
3.3.Projections futures de précipitation pour les quatre saisons classiques et l’année.....	67
3.4.Projections futures de température.....	70
3.5.Conclusion.....	72
4.Réduction d’échelle statistique et évaluation d’incertitudes.....	75
4.1.Introduction.....	75
4.2.Evaluation des MRC d’ENSEMBLES	76
4.3.Résumé de l’article Driouech et al. (2010).....	80
4.4.Analyses supplémentaires.....	105
4.5.Effet de la correction par quantiles.....	106
4.6.Conclusion.....	109
5.Impacts potentiels sur l’hydrologie d’un bassin versant du Maroc.....	111
5.1.Introduction.....	111
5.2.Le bassin versant de la Moulouya.....	111
5.3.Description du modèle hydrologique.....	111
5.4.Données utilisées.....	112
5.5.Calage et validation du modèle hydrologique.....	113
5.6.Changements futurs des débits.....	114
5.6.1.Constitution des séries futures de précipitation et de l’ETP	114
5.6.2.Changements futurs.....	115
5.7.Conclusion.....	117
6.Réduction d’échelle dynamique à l’aide du modèle à aire limitée ALADIN-Climat tourné à très haute résolution	119
6.1.Introduction.....	119

6.2. Description de la version utilisée du modèle ALADIN-Climat	119
6.3. Evaluation du modèle ALADIN-Climat.....	120
6.4. Changements futurs issus d'ALADIN-climat.....	121
6.5. Conclusion.....	124
Conclusion générale.....	125
Références bibliographiques.....	129
Annexe A.....	139
Annexe B.....	141
Annexe C.....	143
Annexe D.....	145
Annexe E.....	147
Annexe F	149
Annexe G.....	151
Liste des illustrations	157
Liste des principaux acronymes.....	163

Introduction

« Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer. »

« Les observations effectuées sur tous les continents et dans la plupart des océans montrent qu'une multitude de systèmes naturels sont touchés par les changements climatiques régionaux, en particulier par la hausse des températures. »

« Les changements climatiques régionaux commencent à avoir d'autres effets sur le milieu naturel et l'environnement humain (degré de confiance moyen), bien que nombre de ces effets soient difficiles à cerner en raison de l'adaptation et des facteurs non climatiques. »

« L'essentiel de l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XXe siècle est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de GES anthropiques. Il est probable que tous les continents, à l'exception de l'Antarctique, ont généralement subi un réchauffement anthropique marqué depuis cinquante ans. »

GIEC, Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse

Depuis plus d'un siècle, l'homme altère la composition chimique de l'atmosphère en rejetant de façon croissante et ininterrompue des gaz à effet de serre (GES), comme le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux, et des particules comme les aérosols sulfatés. L'effet de serre ou piégeage du rayonnement infrarouge par l'atmosphère a été évoqué au XIX^{ème} siècle par Joseph Fourier : « C'est ainsi que la température est augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacles pour pénétrer l'air, étant à l'état lumière, qu'elle n'en retrouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure » (Fourier, 1890). Les GES, naturellement présents dans l'atmosphère, ont certes un rôle important qui est celui de maintenir une température moyenne globale vivable pour l'homme. Cependant, les rejets anthropiques de GES sont en train de renforcer l'effet de serre et d'induire un réchauffement du système climatique qualifié par le quatrième rapport du Groupe Intergouvernemental des experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) de sans équivoque.

La sonnette d'alarme tirée par le GIEC a contribué fortement, depuis quelques années déjà, à la prise de conscience par la communauté internationale de la nécessité d'agir. Le fait que plusieurs changements résultants sont perceptibles aux échelles continentale et régionale et ont concerné différents aspects dont les événements extrêmes comme la sécheresse, les fortes précipitations et les vagues de chaleur (IPCC, 2007a) y a fortement contribué.

Les actions pouvant être entreprises vis à vis de la problématique du changement du climat s'articulent autour de deux volets principaux: la réduction des émissions (atténuation) et l'adaptation. L'adaptation aux changements du climat peut être définie comme « l'ensemble des évolutions d'organisation, de localisation et de techniques que les sociétés devront opérer pour limiter les impacts négatifs de ces changements et maximiser leurs effets bénéfiques » (De Perthuis, 2009). Elle recouvre des formes d'actions très variées suivant les zones, les

échelles géographiques et les secteurs. Sa mise en œuvre interpelle ce qu'on appelle « capacité d'adaptation » qui n'est pas la même d'une région à l'autre ni d'un pays à un autre.

Si tous les pays sont concernés par au moins l'un des deux aspects (l'atténuation et l'adaptation), certains comme ceux de l'Afrique se trouvent pour la plupart obligés d'instaurer d'urgence des politiques et actions d'adaptation permettant de minimiser les impacts négatifs, sur les populations et les écosystèmes, qui résulteraient du changement du climat. En effet, même si les pays du continent africain ne font pas partis, jusqu'à présent, des plus gros émetteurs de GES, ils sont parmi les plus vulnérables au changement climatique (IPCC, 2007b). Plusieurs secteurs y sont menacés dont notamment celui de l'eau (accentuation du stress hydrique) et de l'agriculture (baisse des rendements et augmentation de la superficie des terres arides et semi-arides).

Pour pouvoir élaborer des stratégies d'adaptation, il est nécessaire de faire des évaluations des impacts potentiels du changement climatique sur les secteurs, ce qui nécessite la disponibilité d'informations climatiques plus détaillées que celles fournies par les modèles de circulation générale (MCG) à faible résolution. En effet, la plupart des MCG ont des résolutions spatiales de 200 à 300 km alors que les modèles d'impacts nécessitent des résolutions d'au moins une cinquantaine de km dans de nombreux cas.

Dans le cas du Maroc par exemple, une caractérisation fine du régime des précipitations aux échelles régionales et locales est capitale pour les spécialistes de l'adaptation et programmation. La pluviométrie est, en effet, une donnée à valeur socio-économique très importante et différents secteurs en dépendent dont notamment les ressources en eau et l'agriculture. En année sèche comme celle de 1994-95, réputée pour être l'une des sécheresses les plus générales ayant touché le pays au cours du 20^{ième} siècle, les réserves d'eaux dans les barrages se sont trouvées diminuées au point de menacer non seulement l'agriculture irriguée mais aussi l'approvisionnement en eau potable et la production électrique. Durant les périodes humides comme celle de novembre 2009 à février 2010, les stocks d'eau dans les barrages et les nappes phréatiques sont convenablement alimentés mais des vies et des infrastructures peuvent être détruites par les inondations.

Plusieurs régions du Maroc ont été confrontées à des séries de périodes sèches depuis le début des années 1980 (Ministère des Travaux Publics, 1997 ; Knippertz et al., 2003 ; Esper et al., 2007) et qui ont eu des conséquences non négligeables sur l'économie du pays. En outre, différentes études de projections climatiques futures, quoique fondées majoritairement sur les sorties de modèles climatiques à faible résolution, pointent le Maroc comme étant un des pays les plus susceptibles d'être menacé par le changement climatique (Hulme et al. 1999 ; Battisti et Naylor, 2009).

Tenant compte des expériences vécues et des projections futures, dont notamment celles du GIEC qui indiquent une réduction des cumuls pluviométriques marocains d'ici la fin du siècle courant (IPCC, 2007a), il n'est pas surprenant d'assister au lancement de différents travaux d'adaptation permettant de minimiser le plus possible les impacts potentiels que pourraient induire les changements climatiques sur l'homme, l'économie et les écosystèmes. Par voie de conséquence, on assiste également à une montée continue de questions de plus en plus exigeantes en réponses détaillées, posées par les différents acteurs socio-économiques régionaux et même locaux, sur le degré avec lequel le climat de leur région (zone ou territoire) serait touché.

A l'heure actuelle où la plupart des scénarios accessibles aux spécialistes d'impacts sont à des résolutions bien en deçà de ce que requièrent leurs modèles, tout travail permettant l'accès à l'information climatique à une échelle plus fine ne serait que d'un apport certain. En particulier, l'évaluation des incidences du changement climatique sur les précipitations marocaines à des échelles spatiales plus fines que ce que permettent la plupart des scénarios couvrant le pays, dont ceux du GIEC, est de nature à participer au comblement du manque existant en matière d'informations climatiques fines et détaillées requises par les modèles d'impacts. En effet, si les études de simulations numériques ayant ciblé le Maroc ne sont pas très nombreuses (on peut en citer à titre d'exemple Born et al., 2008), celles relatives à la régionalisation des scénarios futurs le sont encore moins. Ce genre de travaux a pourtant une grande importance dans le cas de zones à caractéristiques physiographiques particulièrement complexes comme le Maroc dont les chaînes montagneuses occupent une partie non négligeable du territoire.

Dans ce contexte, la présente thèse a pour objectif de contribuer à l'affinement des connaissances relatives au changement du climat au niveau du Maroc. Ce mémoire, qui se focalise notamment sur l'aspect pluviométrique, se subdivise comme suit :

- Etant donné que toute question sur le climat futur entraîne celle sur les évolutions passées et inversement, nous regardons dans le premier chapitre les tendances qu'ont connues les précipitations marocaines à travers un certain nombre d'indices de changement climatique relatifs aux moyennes et extrêmes. Même si le plus gros du travail concerne la pluviométrie, nous abordons aussi l'aspect thermique à travers l'évolution de la température moyenne. Une augmentation non négligeable de la température risque, par exemple, d'amplifier l'assèchement des sols en diminuant leur contenu en eau par évaporation ou évapotranspiration.
- Avant de procéder à l'élaboration de scénarios climatiques régionalisés, il est important d'évaluer les performances du modèle utilisé. C'est l'objet du deuxième chapitre qui contient une description de la version du modèle ARPEGE-Climat utilisée ainsi qu'un résumé long en français de l'article Driouech et al. (2009), publié dans la revue *Climate dynamics*, et l'article lui-même.
 - **Driouech F., Déqué M., Mokssit A., 2009:** Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco, *Climate dynamics*, 32, 1055-1063.
- Le troisième chapitre concerne l'évaluation des changements futurs projetés pour la pluviométrie au Maroc. Elle donne aussi un aperçu sur les changements futurs de la température moyenne.
- Dans le chapitre 4, nous examinons la possibilité de l'utilisation d'une approche statistique de réduction d'échelle par les régimes de temps de l'Atlantique nord et évaluons une partie des incertitudes liées au changement climatique. Enfin, nous évaluons l'effet d'une méthode de correction par quantiles sur les changements projetés. Ce chapitre contient aussi un résumé long en français de l'article Driouech et al. (2010), publié dans la revue *Global and Planetary change*, et de l'article lui-même.

- **Driouech F.**, Déqué M., Sánchez-Gómez E., 2010: Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Glob Planet Change*. DOI:10.1016/j.gloplacha.2010.03.004.

- Le chapitre 5 aborde l'aspect évaluation des impacts potentiels du changement climatique sur l'hydrologie d'un bassin versant du Maroc. Si le taux de ressources en eau naturelle par habitant et par an avoisine déjà au Maroc 1.000m³ (Bzioui, 2004), le seuil communément admis comme indiquant l'apparition de pénuries et de crise latente d'eau, toute réduction des ressources en eau dans le futur ne serait pas sans effets négatifs sur les différents secteurs socio-économiques.
- La plus grande menace qui viendrait du changement du climat serait l'amplification des extrêmes. Ceux-ci étant généralement des phénomènes d'échelle fine, leur simulation de façon réaliste nécessite parfois des modèles ayant la résolution la plus fine possible. D'un autre côté, certains modèles d'impact requièrent des données climatiques à des résolutions bien plus fortes que la cinquantaine de kilomètres couramment utilisée dans les travaux de réduction d'échelle. Dans le dernier chapitre nous réalisons une descente d'échelle dynamique à l'aide du modèle à aire limitée ALADIN-Climat avec une résolution de 12km. Après un examen des capacités du modèle à simuler la pluviométrie au Maroc, nous évaluons sa réponse à une augmentation des gaz à effet de serre et la comparons avec celle d'ARPEGE-Climat.

Enfin, la conclusion générale synthétisera les principaux résultats de cette thèse, et ouvrira sur quelques perspectives susceptibles de permettre un enrichissement de nos connaissances sur l'évolution future du climat au Maroc.

1. Evolutions et tendances observées

«Le climatologue est comme un observateur devant la plage, les vagues vont et viennent, il n'est pas facile de voir au premier abord que la mer monte.» C'est par cette image qu'Hervé Le Treut, directeur de l'institut Pierre-Simon-Laplace, fédération des laboratoires français sur le climat, et auteur de *Nouveau climat sur la Terre* (1) veut couper court aux propos qui, ces derniers temps, font la part belle aux doutes sur le réchauffement d'origine anthropique.

1.1. Introduction

Situé au nord-ouest du continent Africain, le Maroc s'ouvre à la fois sur l'océan Atlantique et la mer Méditerranée, ce qui lui fait un total d'environ 3000 km de côte. Avec une extension latitudinale allant du 37^{ème} au 21^{ème} parallèle, il s'étend sur une superficie de 700 000 km², du détroit de Gibraltar jusque pratiquement aux confins sud du grand Sahara Africain. Il se caractérise par une géographie bien diversifiée : les plaines, de hautes chaînes montagneuses où de nombreux massifs dépassent les 3000 mètres (chaînes du Rif et de l'Atlas) et le désert.

L'appartenance du Maroc au bassin méditerranéen fait qu'il bénéficie, à l'exclusion des régions sud et sud-est à climat plutôt saharien, d'un climat de type méditerranéen : doux et relativement humide en hiver et chaud et sec en été. Rappelons que le bassin méditerranéen se trouve sous l'influence de la branche descendante de la circulation de Hadley en été et des flux d'ouest de l'océan Atlantique en hiver (Bolle, 2002). C'est une zone de transition dans laquelle les systèmes extratropicaux et tropicaux sont en concurrence influençant l'occurrence d'événements climatiques modulés par le voisinage de la mer Méditerranée. Selon Xoplaki (2002) les mois d'octobre à mars avec les plus forts cumuls de précipitations constituent la saison humide méditerranéenne. Etant donné que le climat du Maroc est plus influencé par l'océan Atlantique à l'ouest, par la Méditerranée au nord et le désert (Sahara) au sud et qu'il est localement modulé par l'orographie, la durée de la saison pluvieuse présente de légères différences spatiales (notamment entre le nord et le sud). Les mois d'octobre à mars constituent, néanmoins, la période la plus humide dans la majeure partie du pays, et les mois d'hiver (décembre-janvier-février) reçoivent le maximum de la pluviométrie. Les mois d'été ont une pluviométrie faible et à caractère orageux en général. Selon Lamb et Pepler (1987), les cumuls pluviométriques varient de moins de 200mm au sud à environ 900mm au nord (Tanger). La Fig 1.1 met en exergue la décroissance du nord au sud et d'ouest en est des cumuls pluviométriques annuels moyennés sur la période 1971-2000. Seules les hautes montagnes et l'extrême nord-ouest reçoivent des cumuls annuels dépassant les 800mm. La majeure partie du pays n'excède pas 400mm en moyenne annuelle. La forte variabilité interannuelle est aussi une caractéristique des précipitations méditerranéennes. Le coefficient de variabilité (rapport de l'écart-type à la moyenne) varie sur le Maroc de 30% à 40% à l'ouest à plus de 70% dans les régions sud (Knippertz et al., 2003, Driouech et al., 2009).

Différentes études antérieures ont montré l'influence des modes de la circulation extratropicale sur la variabilité interannuelle des précipitations marocaines et nord africaines. En particulier, l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) exerce une grande influence sur les précipitations hivernales marocaines qui lui sont négativement corrélées. Durant la phase positive de l'ONA (creusement de la dépression d'Islande et gonflement/intensification de

l'anticyclone des Açores), le renforcement du gradient de pression méridional contribue à l'intensification de la circulation d'ouest sur le nord-est atlantique et le continent européen. Dans cette configuration, l'axe du rail des dépressions est orienté sud-ouest – nord-est et migre vers le nord (Fig. A.1 de l'annexe A), déviant ainsi les perturbations se formant au-dessus de l'atlantique vers le nord-ouest du continent européen (Hurrell, 1995; Wanner et al., 2001) qui bénéficie de conditions humides et douces. Les précipitations se trouvent alors réduites sur le Maroc comme sur le sud de l'Europe. A l'inverse, la phase négative correspond à un affaiblissement du gradient de pression méridional dans l'Atlantique Nord induisant une diminution de l'intensité des vents d'ouest. L'axe du rail des dépressions est alors clairement zonal, permettant le passage des perturbations atlantiques vers le sud de l'Europe et le bassin méditerranéen. La phase négative de l'ONA se trouve ainsi en faveur des précipitations au Maroc et au nord ouest de l'Afrique (Ward et al., 1999 ; Glueck et Stockton, 2001; Herrera et al., 2001; Knippertz, 2003).

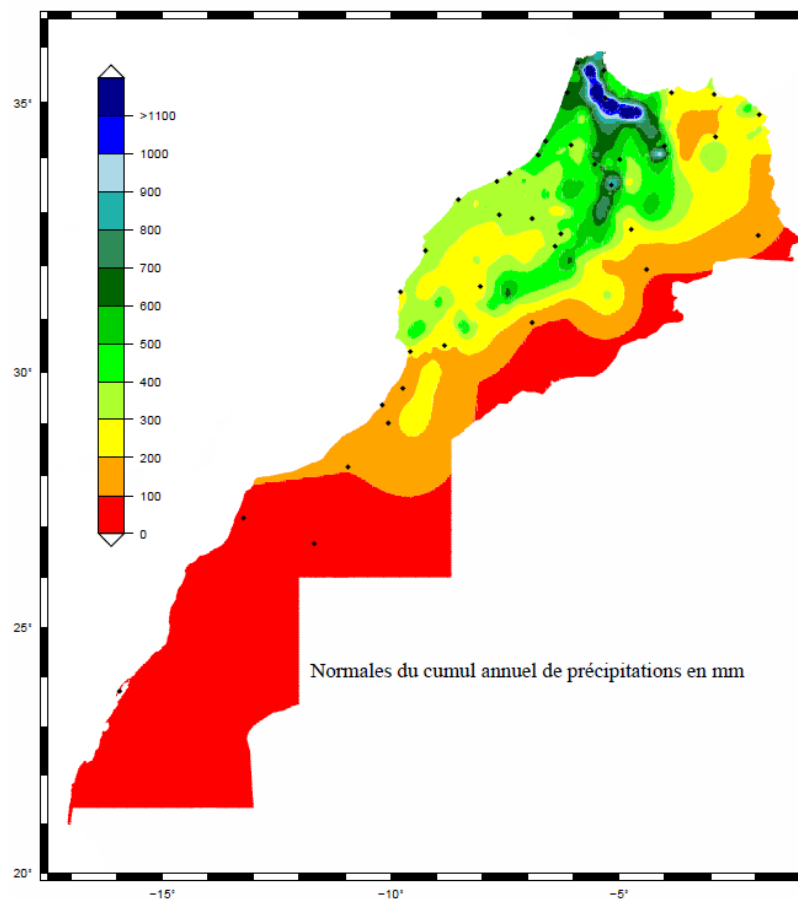


Fig. 1.1 Pluviométrie annuelle moyenne au Maroc calculée sur la période 1971-2000 (Source : Direction de la Météorologie Nationale, Maroc).

Néanmoins, l'influence de l'ONA sur la pluviométrie au Maroc se trouve affaiblie par la barrière de l'Atlas qui la limite principalement aux régions situées à l'ouest de cette chaîne montagneuse. Knippertz et al. (2003) ont attribué la plus grande part de la variabilité des précipitations de la partie méditerranéenne du pays à la température de surface de la méditerranée et aux dépressions locales. Rappelons qu'en utilisant les données issues du GHCN (Global Historical Climatology Network) (Vose et al., 1992), Knippertz et al. (2003)

ont distingué trois régions homogènes du point de vue pluviométrique (Fig. B.1 de l'annexe B) reflétant la grande influence de l'orographie sur les caractéristiques spatiales de la pluviométrie au Maroc. La région I appelée ATL et couvrant la zone à l'ouest des montagnes de l'Atlas a une pluviométrie hivernale, influencée, en plus de l'ONA, par le déplacement vers le sud de la trajectoire des perturbations des moyennes latitudes, les dépressions locales et les advections d'ouest ramenant de l'air humide. Les précipitations hivernales de la région II, appelée MED et correspondant au nord-est marocain, sont renforcées par les dépressions ouest-méditerranéennes, et par les advections d'air humide du nord-ouest. La région 3, appelée SOA, couvre les zones situées au sud des montagnes de l'Atlas. Sa pluviométrie hivernale, plus complexe, résulte entre autres du transport d'humidité de l'Atlantique au long du flanc sud des montagnes Atlas via un flux de sud, de l'activité cyclonique renforcée sur les îles Canaries et de l'occurrence de cyclones au sud ouest de la péninsule ibérique (Knippertz et al., 2003).

L'influence des tropiques sur la pluviométrie nord africaine a été aussi examinée par différents auteurs à travers le phénomène ENSO (El Niño-Southern Oscillation). Nicholson et Kim (1997) et Ward et al. (1999) ont mis en évidence une certaine influence de l'ENSO sur les précipitations du nord-ouest de l'Afrique. La phase chaude (positive) du phénomène ENSO favoriserait, au Maroc, une réduction des précipitations notamment printanières.

Si certaines études se sont intéressées à la variabilité de la pluviométrie marocaine et à sa relation avec différentes composantes de la circulation générale, d'autres, quoique moins nombreuses, ont abordé l'évolution du climat observé à l'échelle du Maroc ou de certaines régions. Parmi celles-ci on peut citer Born et al. (2008) qui ont mis en évidence, en utilisant la classification climatique de Köppen (Köppen, 1936)¹, une tendance à l'évolution du climat du Maroc, au cours du 20^{ème} siècle, vers des conditions plus chaudes et plus sèches. Dans une analyse des cumuls pluviométriques mensuels au niveau des bassins de l'Oum er Rabia et du Tensift, Chaponniere et Smakhtin (2006), ont constaté un déclin des précipitations au niveau de l'Atlas depuis les années 1980. A l'aide d'une analyse de l'Indice de Sévérité de la Sécheresse de Palmer (PDSI)² (Palmer, 1965) à l'échelle globale, Dai et al. (2004) montrent que la sécheresse a augmenté au Maroc sur la période 1950-2002 (Fig. C.1 de l'annexe C). Cette tendance est due à la fois à l'évolution des précipitations et des températures. La tendance positive du PDSI calculé en négligeant l'évolution de la température, est un indicateur d'une tendance vers la baisse des pluies.

¹ La classification de Köppen est une classification des climats fondée sur les précipitations et les températures. Elle a été inventée par Wladimir Peter Köppen durant les années 1920. Une nouvelle version de cette classification a été présentée par Rudolf Geiger en 1961. Selon la carte des types de climats de Köppen-Geiger de la période 1950-2000 (Peel et al., 2007), on rencontre au Maroc en allant du nord au sud les climats suivants : méditerranéen chaud, semi-aride chaud, désertique froid et désertique chaud.

² L'indice de sévérité de la sécheresse de Palmer (PDSI) est un indice météorologique de sécheresse qui se base sur la résolution de l'équation du bilan d'eau. Il a été mis au point par W.C. Palmer, en 1965, afin de mesurer les écarts dans la quantité d'eau disponible par rapport aux conditions moyennes. Le PDSI fournit une mesure des conditions d'humidité qui sont " normalisées " de manière à se prêter aux comparaisons dans l'espace et dans le temps. En plus de la température et des précipitations, il prend en compte d'autres paramètres tels que l'évapotranspiration. Il est obtenu à partir des différences cumulées pondérées entre la précipitation réelle et la quantité calculée comme étant requise pour l'évapotranspiration, la recharge du sol et le ruissellement. Il tient compte des effets de la persistance des situations de sécheresse.

Dans un objectif de mettre à jour et d'affiner davantage les résultats des études sur les évolutions observées au niveau du climat du Maroc, nous nous concentrons dans la suite de ce chapitre sur les tendances calculées, à l'aide des données observées, sur un certain nombre d'indices climatiques. Même si le plus gros du travail concerne la pluviométrie, nous abordons aussi l'aspect thermique. Une augmentation non négligeable de la température moyenne risque, par exemple, d'amplifier l'assèchement des sols en diminuant leur contenu en eau par évaporation ou évapotranspiration.

1.2. Données utilisées et analyse temporelle

Les données quotidiennes de précipitations et de température de 14 stations météorologiques issues de la base de données de la Direction de la Météorologie Nationale marocaine sont utilisées pour le calcul des indices climatiques et de leurs tendances. Elles couvrent la période 1961-2008. Les 14 stations sont toutes situées au nord du Sahara marocain et dans la plupart à l'ouest des montagnes de l'Atlas. Outre le critère de la disponibilité des séries de données avec le moins de lacunes possibles (moins de 4% de valeurs manquantes pour chacune des 14 stations), le choix de ces stations est aussi justifié par le fait qu'elles couvrent relativement bien la zone agricole qui est en même temps la zone la plus humide du pays et la plus importante en apports pluviométriques et hydrologiques.

Les 14 stations sont réparties sur les trois régions trouvées par Knippertz et al. (2003) à l'aide d'une régionalisation de la pluviométrie de l'hiver et sur les cinq zones pluviométriques trouvées par Ward et al. (1999) et par El Hamly et al. (1997) (Fig. B.2 de l'annexe B) à l'aide de la régionalisation des précipitations de la saison des pluies allant de septembre à avril. Le tableau 1.1 représente les noms des 14 stations utilisées, leurs coordonnées géographiques, leurs altitudes ainsi que le nom de la région pluviométrique à laquelle elles appartiennent selon chacune des régionalisations précitées ; celle de Knippertz et al. (2003) et celle d'El Hamly et al. (1997).

Afin d'avoir une idée plus précise sur la forte variabilité interannuelle des précipitations, la Fig. 1.2 présente l'évolution des anomalies relatives de la précipitation moyenne annuelle au niveau des 14 stations météorologiques. Pour chacune des stations et chaque année, l'anomalie est obtenue en retranchant la moyenne, calculée sur la période 1961-1990, de la précipitation moyenne à la valeur annuelle de cette quantité (en mm/j). L'anomalie relative est obtenue en divisant l'anomalie par la moyenne. Pour cette partie ainsi que pour tout le chapitre, les valeurs manquantes ne sont pas reconstituées mais tout simplement ignorées. Dans le cas de ce paragraphe, le fait de travailler avec la précipitation moyenne, revient à remplacer les valeurs quotidiennes manquantes dans l'année I par la valeur moyenne calculée à l'aide des données quotidiennes existantes de cette année. Le coefficient de variabilité calculé sur la période 1961-1990 varie de 26% à 45% sur la côte atlantique en allant du nord au sud. Il vaut 35% sur le nord-est (Oujda) et 46% à Midelt. La variabilité interannuelle s'est accentuée durant les trente dernières années de la période d'étude. En effet, à l'exception du nord-est (Oujda), du sud-est (Ouarzazate) et des deux stations montagneuses (Ifrane et Midelt), le coefficient de variabilité a augmenté partout durant 1979-2008 comparativement à 1961-1990. Ce résultat est compatible avec ce qui a été trouvé par Hulme (1992). En effet, il a constaté, en étudiant les données de précipitations spatialisées sur une grille, une augmentation de la variabilité relative des précipitations annuelles au sud des montagnes de l'Atlas entre 1931-1960 et 1961-1990.

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Régions d'appartenance Selon A	Régions d'appartenance Selon B
Tanger	35.72	-5.90	15	ATL	I (nord-ouest)
Oujda	34.78	-1.93	465	MED	V (nord-est)
Kenitra	34.30	-6.60	5	ATL	I (nord-ouest)
Rabat	34.05	-6.77	75	ATL	I (nord-ouest)
Fès	33.97	-4.98	571	ATL	I (nord-ouest)
Meknès	33.88	-5.53	548	ATL	I (nord-ouest)
Casablanca	33.57	-7.67	57	ATL	I (nord-ouest)
Ifrane	33.50	-5.17	1664	ATL	I (nord-ouest)
Safi	32.28	-9.23	34	ATL	II (ouest)
Midelt	32.68	-4.73	1508	ATL	III (centre)
Essaouira	31.52	-9.78	7	ATL	II (ouest)
Marrakech	31.62	-8.03	463	ATL	II et III (ouest et centre)
Agadir	30.38	-9.57	23	ATL	II (ouest)
Ouarzazate	30.93	-6.90	1136	SOA	IV (sud-est)

Tableau 1.1 Noms des 14 stations utilisées, leurs coordonnées géographiques, leurs altitudes ainsi que le nom de la région pluviométrique à laquelle elles appartiennent selon chacune des régionalisations précitées ; celle de Knippertz et al. (2003) notée A (voir Fig. B.1 de l'annexe B) et celle d'El Hamly et al. (1997) notée B (voir Fig. B.2 de l'annexe B). La région ATL couvre l'ouest des montagnes de l'Atlas, la région MED le nord-ouest et la région SOA le sud des montagnes de l'Atlas.

La comparaison, sur les différents graphiques de la Fig. 1.2, des valeurs en dessous de l'axe 0 et de celles au dessus, montre que le nombre d'années à déficit pluviométrique est partout plus important que le nombre d'années excédentaires. Cette remarque est valable même en ne considérant que les déficits et excédents supérieurs à 5%. Quatre stations ont enregistré un déficit durant au moins les deux-tiers de la période totale (Meknès, Casablanca, Ifrane, Midelt et Agadir). Un déclin des précipitations est visible à partir du début des années 1980 dans la plupart des stations. Ce déclin coïncide avec une augmentation de la fréquence des sécheresses aussi visible à partir des années 1980. Comme trouvé par différentes études antérieures (dont celle du Ministère des travaux publics, 1997), on distingue deux périodes particulièrement sèches ; 1980-1985 et 1990-1995. Les années 2000 sont aussi caractérisées par de fréquentes sécheresses malgré la survenue de temps en temps d'années non déficitaires. Les déficits les plus élevés enregistrés sur toute la période varient entre -84% à Agadir (en 1992) et Ouarzazate (en 2000) et -42% à Ifrane (en 2007). Si la plupart des records sont enregistré entre 1981 et 2007, la période 1981-1984 en a enregistré 6 : -67% à Midelt en 1981 et 1984, -66 à Marrakech et Oujda respectivement en 1981 et 1983, -65% à Casablanca en 1981 et -45% à Fès en 1983.

L'importance des différentes périodes de sécheresse précitées est aussi clairement repérable au niveau de la moyenne nationale calculée sur les 14 stations (moyenne des anomalies relatives, des cumuls pluviométriques annuels, calculée sur les 14 stations) (Fig. D.1 de l'annexe D). Les années des périodes 1980-1985 et 1990-1995 sont toutes en dessous de la normale avec un maximum de déficit de -45% en 1981 et de -38% en 1994. Les seules années qui ne sont pas descendues en dessous d'un déficit de 10% sont 1982 (avec -1%) et 1991 (avec -4%). La période 2000-2008, a connu 5 années sèches (en moyenne nationale) sur

9 avec un maximum de -35% en 2001. Le déficit moyen de chacune des trois périodes est de 20% pour 1980-1985 et 1990-1995 respectivement, et de 14% pour 2000-2008.

Les séries de sécheresse auxquelles ont été confrontées différentes régions du Maroc depuis le début des années 1980 sont aussi repérées par Esper et al. (2007). La fin des années 1980 et le début des années 1990 sont connues pour des conditions sèches généralement sur une grande partie du bassin méditerranéen (Kutiel et al., 1996) et selon Hurrell et Van Loon (1997), les années 1981 à 1995 ont été particulièrement sèches au sud de l'Europe et au nord du Maroc. La récurrence de conditions sèches sur la zone méditerranéenne depuis le début des années 1980 a été attribuée à la persistance de la phase positive de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) (Lamb et Pepler, 1987 ; Xoplaki et al., 2004, Visbeck et al., 2001). La Fig. A.2 de l'annexe A, présente l'évolution de l'indice de l'ONA jusqu'à l'an 2000. La persistance de la phase positive de l'ONA observée durant les 20 dernières années du XXe siècle peut être simulée par une diminution de la température de surface de l'océan Atlantique tropical nord (Cassou et al., 2004) soulignant l'importance des connexions tropiques - latitudes tempérées.

Nos résultats sont généralement en accord avec les conclusions tirées par Knippertz et al. (2003) notamment pour les régions ATL (ouest des montagnes de l'Atlas) et SOA (sud des montagnes de l'Atlas). Knippertz et al. (2003) ont, cependant, repéré une baisse (plus précoce) de la pluviométrie dans la région MED dès la moitié des années 1970. Ceci est probablement dû au fait que la région MED contient d'autres stations algériennes situées plus à l'est que la station d'Oujda. En outre, ils ont trouvé curieux le fait que les années à phase positive de l'ENSO (1982-1983 et 1991-1992) ont été sèches dans les trois régions (ATL, MED et SOA) alors qu'El Niño de 1997-1998 n'a coïncidé avec des conditions en dessous de la normale que sur la région MED. Cette constatation n'est probablement due qu'au fait que Knippertz et al. (2003) ont considéré les indices pluviométriques calculés sur la période août-septembre, ce qui fait que l'indice de 1983 par exemple est calculé à l'aide des précipitations des mois de septembre à décembre 1982 et des mois de janvier à août 1983. En effet, en analysant les graphes de la Fig. 1.2, on constate que pour les trois épisodes EL Niño, c'est la deuxième année (respectivement 1983, 1992 et 1998) qui est sèche dans la plupart des stations. Ceci semble en cohérence avec le fait que l'ENSO a une influence significative (diminution des précipitations) sur le nord-ouest de l'Afrique et le sud de l'Europe au printemps de la deuxième année du phénomène (Nicholson et Kim, 1997 ; Mariotti et al., 2002). En étendant l'analyse aux années EL Niño 2002-2003, 2004-2005 et 2006-2007, nous constatons que les printemps 2003, 2005 et 2007 ont été secs au niveau de la plupart des stations.

Même si la période 1961-2008 a connu plus d'années humides à son début (durant les années 1960 et le début des années 1970) qu'à sa fin, l'année 1996 a été excédentaire dans la plupart des régions. C'est, en effet, une année record tout au long de la côte Atlantique jusqu'à Essaouira et à Agadir elle est classée deuxième sur toute la période. Les excédents enregistrés dépassent les 100% dans la plupart des stations atlantiques et ont atteint 210% à Essaouira. Ils ont varié entre 40% et 85% sur les stations de l'intérieur se trouvant à l'ouest des montagnes de l'Atlas. Contrairement aux stations de l'ouest, Oujda a été déficitaire. Ceci est probablement dû au fait que les systèmes ayant causé l'augmentation des précipitations à l'ouest du pays sont originaires de l'Atlantique. Signalons que les stations de Midelt et Ouarzazate n'ont pas enregistré de record cette année malgré une pluviométrie au dessus de la moyenne.

Après cette analyse de la variabilité des précipitations des différentes stations ainsi que des différentes périodes sèches et particulièrement humides, nous nous concentrons dans la

suite de ce chapitre sur les tendances observées au niveau de différents indices climatiques relatifs à la pluviométrie après les avoir définis dans le paragraphe 1.3.

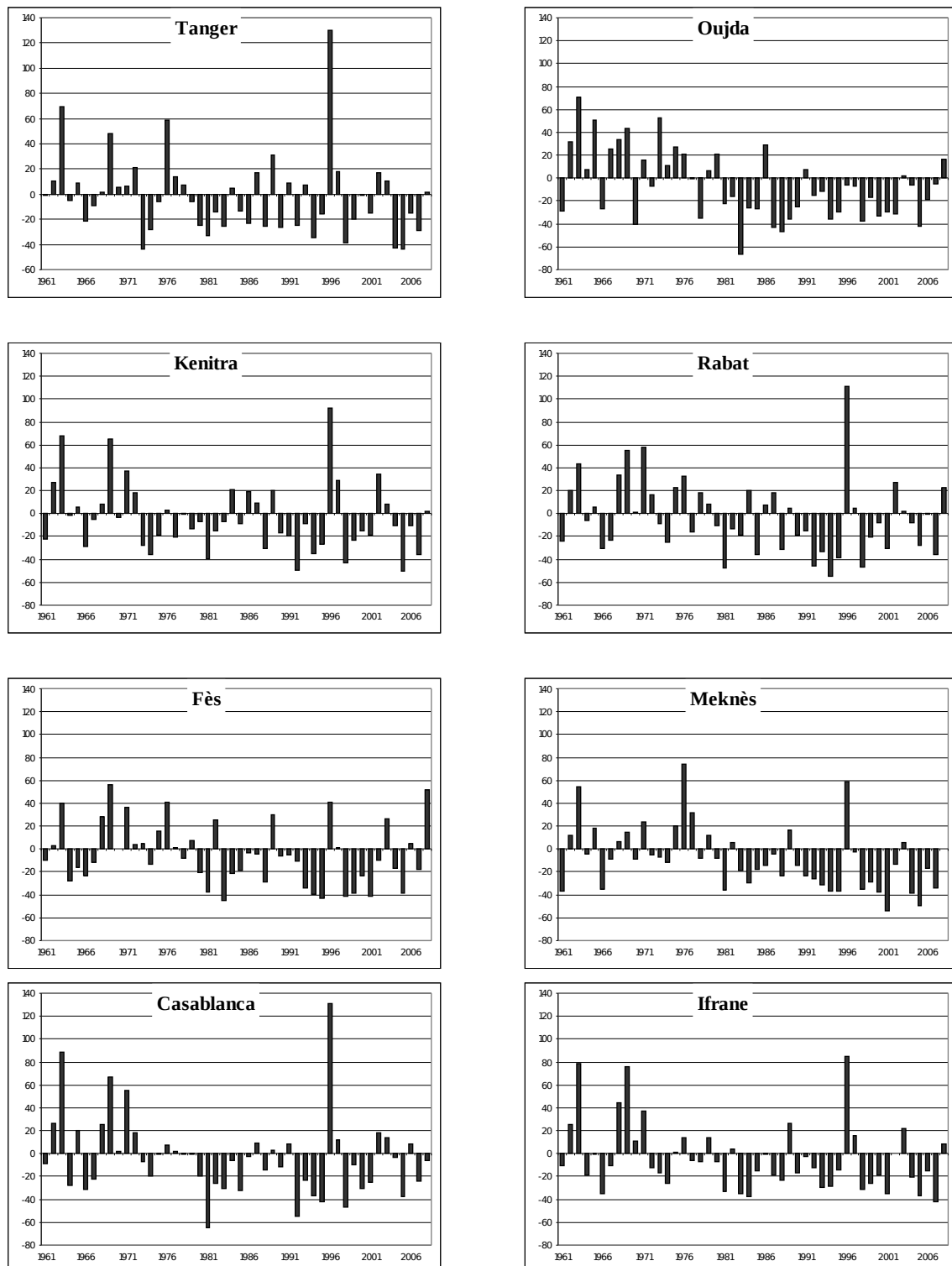


Fig. 1.2 Anomalies relatives (en %) de la précipitation moyenne annuelle au niveau des 14 stations météorologiques marocaines. Période 1961-2008.

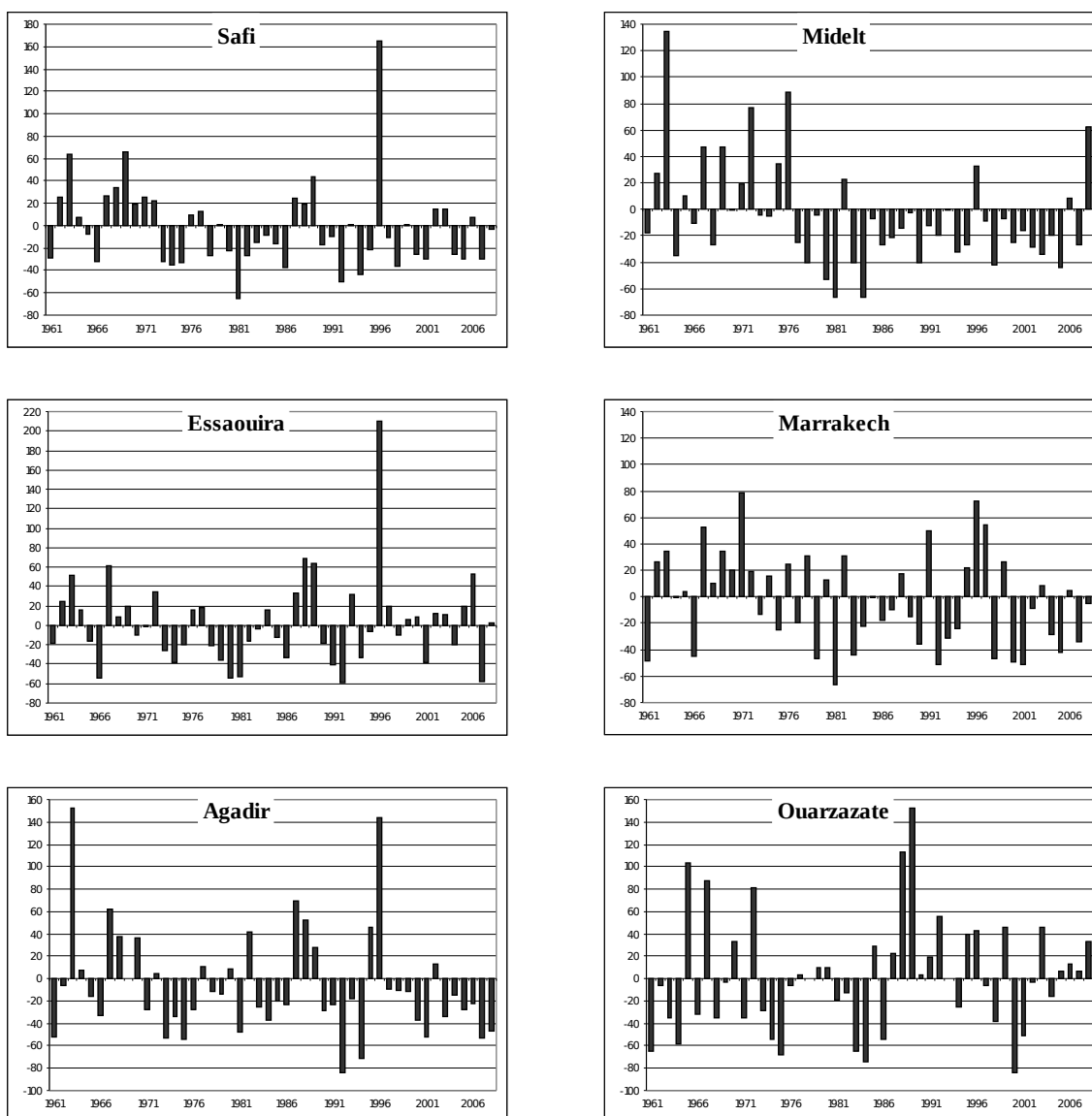


Fig. 1.2 Suite

1.3. Définition des indices climatiques considérés

Si les changements de la pluviométrie et la température moyennes sont informatifs sur différents aspects, ils ne permettent pas de répondre aux questions relatives aux évolutions des événements extrêmes tels que sécheresses, fortes précipitations ou vagues de chaleur et de froid. En effet, ce sont souvent les changements des extrêmes qui ont les impacts les plus importants sur les sociétés. Dans plusieurs régions du monde, l'impact du réchauffement global serait plus néfaste en se manifestant sous forme d'événements extrêmes. Pour le cas du Maroc, un pays à ressources hydrologiques limitées, il est certain que la diminution des cumuls pluviométriques ne serait pas sans effet, mais l'impact serait plus lourd dans le cas où elle serait accompagnée par exemple d'une augmentation d'événements extrêmes de sécheresse. Tout changement dans les événements de fortes précipitations, ne passerait pas non plus inaperçu.

Différents indicateurs d'extrêmes climatiques ont été définis à travers un certain nombre de workshops internationaux (Folland et al., 2001 ; Nicholls et Murray, 1999, Manton et al., 2001) et un certain nombre d'études (Karl et al., 1999 ; Peterson et al., 2001). En effet, depuis plus d'une dizaine d'années, les études de détection attribution de changement climatique s'intéressent de plus en plus aux changements des événements extrêmes (Easterling et al. 2000). Actuellement on peut rencontrer dans la littérature plusieurs définitions de plusieurs séries d'indices climatiques dont certaines sont plus recommandées par l'Organisation de la Météorologie Mondiale (OMM) et la communauté scientifique internationale. Parmi celles-ci, il y a la série de 27 indices climatiques de ClimDex (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>) qui a été développée en différentes étapes (Frich et al., 2002 ; Peterson et al., 2002 ; Zhang et Yang, 2004). L'évolution d'un certain nombre de ces indices a été étudiée pour le cas du Maroc sur la période 1961-2005 par Driouech et al. (2006). Une autre série de 57 indices climatiques a été définie par le projet Européen SRATDEX (Goodess, 2003) réalisé durant la période février 2002 à juillet 2005 et coordonné par l'université d'East Anglia (<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/Stardex>). Outre leur utilisation dans le projet STARDEX, ces indices ont été utilisés dans le projet IMFREX (IMPact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations) dédié à l'étude des changements des événements météorologiques extrêmes sur la France.

Parmi les indices de STARDEX relatifs à la pluviométrie, nous nous focalisons sur: la précipitation moyenne (en mm/jour), la période maximale de sécheresse (en jour) et le nombre d'événements de fortes précipitations. Le nombre de jours pluvieux est aussi étudié. La tendance de la température moyenne, qui est un autre indice climatique de STARDEX, est abordée. Dans le dernier paragraphe précédant la conclusion, nous regardons les changements qui ont eu lieu en termes d'aridité du climat à l'aide de l'indice d'aridité de De Martonne (Beltrando et Chémery, 1995).

Précipitation moyenne (pav):

La précipitation moyenne d'une saison (ou une année) donnée, est égale à la moyenne des précipitations quotidiennes calculées sur le nombre total de jours de cette saison (ou année).

Nombre de jours humides (pn05mm):

Pour une saison (ou une année) donnée, le nombre de jours humides est le nombre total de jours avec cumul pluviométrique supérieur à 0.5mm. Dans la littérature on peut rencontrer différents seuils comme, notamment, 1mm ou même 0.1mm. Dans le cas de la pluviométrie relativement modeste du Maroc, le seuil 0.5mm nous semble plus adéquat.

Période maximale de sécheresse (pxcdd):

La période maximale de sécheresse d'une saison (ou année) donnée est le nombre maximal de jours consécutifs secs durant cette saison (ou année). Un jour est considéré sec si son cumul pluviométrique est inférieur à 0.5mm.

Nombre d'événements de forte précipitation (pn190):

C'est le nombre total de jours avec précipitation supérieure au 90^{ième} centile calculé sur les jours humides de la période de référence. Dans le cas de ce chapitre, la période de référence est 1961-1990. Le choix d'une autre période (postérieure) comme 1971-2000 ne permettrait pas de détecter convenablement les éventuels changements survenus durant la période d'étude (1961-2008).

1.4. Analyse des tendances observées des indices pluviométriques

Les 4 indices climatiques (pluviométriques) prédéfinis dans le paragraphe précédent ont été calculés, pour chacune des 14 stations, pour chaque saison (hiver, printemps, été et automne) et pour chaque année de la période 1961-2008. Les tendances linéaires de chacun de ces indices ont été ensuite calculées. Rappelons que la tendance indique une augmentation, une diminution ou une stagnation au niveau de l'indice considéré. La tendance linéaire peut être modifiée au cours du temps puisqu'elle est étroitement dépendante des bornes de la série choisie (Sneyers, 1990). Afin d'évaluer la significativité d'une tendance, différents tests peuvent être utilisés dont celui de Spearman, le test de Student et le test de Mann-Kendall.

La significativité des tendances est évaluée, dans notre étude, à l'aide du test Mann-Kendall se référant à la courbe progressive du test de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). Ce test a l'avantage d'être non paramétrique (ne fait aucune hypothèse sur la distribution sous-jacente des données) et il est recommandé à l'heure actuelle par l'OMM. Plus de détail sur le test de Mann-Kendall, désigné dans ce qui suit par K-test, est donné sur l'encadré. Une tendance est considérée significative si la p-value relative au test est inférieure à 0.05 (voir encadré) ; soit une significativité au seuil 95%.

1.4.1. Tendances des indices pluviométriques de la saison d'hiver (DJF)

La saison d'hiver (Fig. 1.3) montre des tendances négatives de la précipitation moyenne (pav) sur toutes les stations à l'exception de Midelt et Ourazazate qui n'ont pas connu d'évolution notable et d'Essaouira qui a plutôt une tendance positive. Les baisses varient de 0.1mm/jour à 0.3mm/jour par décennie. Seule la tendance de -0.3mm/jour par décennie est significative selon K-test, elle concerne l'extrême nord-ouest (Tanger) et la plaine du Sais (Meknès), une des régions les plus importantes de point de vue agricole. Comparativement aux cumuls moyens, calculés sur la période 1961-1990, de ces deux stations respectivement, cette tendance revient à une diminution des précipitations hivernales, par décennie, de 8% à Tanger et de 11% à Meknès. La tendance de -0.2mm/j par décennie enregistrée à Oujda, quoique statistiquement non significative, correspond à une baisse en pluviométrie hivernale de 16% par décennie. Les tendances négatives de pav sont associées en même temps à une tendance à la baisse du nombre de jours humides (pn05mm), à une tendance à la hausse du nombre maximal de jours consécutifs secs (pxcdd) et à une tendance à la baisse du nombre de jours à fortes précipitations (pnl90). Les tendances partout positives de pxcdd varient de 1.4j/décennie (à Kenitra et Fès) à 2.8j/décennie (à Safi), soit des allongements de la période maximale de sécheresse hivernale allant environ de 5 à 11 jours en 40 ans. Les tendances négatives de pn05mm vont de -2.1j/décennie (à Tanger) à -0.4 j/décennie (à Essaouira), soit des diminutions du nombre total hivernal de jours humides allant de moins de deux jours à plus de 8 jours en quarante ans. Les tendances négatives de pnl90, même si elles sont toutes inférieures à un événement par décennie, reviennent à des baisses, par rapport aux moyennes climatologiques (de 1961-1990), allant de 16% (à Casablanca) à 66% (à Tanger) en quarante ans. Signalons, cependant, que la plupart des tendances hivernales restent statistiquement non significatives pour tous les indices.

Significativité de la tendance à l'aide du test de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall est un test non paramétrique sur les rangs permettant de détecter la significativité d'une tendance. Les valeurs des données sont évaluées en tant que série ordonnée temporelle.

Chaque donnée de la série est comparée à celles qui lui succèdent. La valeur initiale de la statistique S est initiée à 0 ; soit aucune tendance n'est décelée encore. Elle est ensuite incrémentée de 1 ou décrétementée de 1 comme suit :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sig}(x_j - x_k) \quad (1.1)$$

Avec

$$\begin{aligned} \text{sig}(x_j - x_k) &= 1 \text{ si } x_j - x_k > 0 \\ \text{sig}(x_j - x_k) &= 0 \text{ si } x_j - x_k = 0 \\ \text{sig}(x_j - x_k) &= -1 \text{ si } x_j - x_k < 0 \end{aligned} \quad (1.2)$$

Le résultat de toutes les augmentations et les diminutions est la valeur finale de S. Une forte valeur non nulle de S indique l'existence d'une tendance.

Cependant pour trancher vis-à-vis de la significativité de la tendance on calcule la probabilité associée à S et n (taille de l'échantillon). Ceci est effectué à l'aide de la statistique Z comme suit :

$$\begin{aligned} Z &= (S - 1) / [\text{VAR}(S)]^{1/2} \text{ si } S > 0 \\ Z &= 0 \text{ si } S = 0 \\ Z &= (S + 1) / [\text{VAR}(S)]^{1/2} \text{ si } S < 0 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Z suit une loi normale de moyenne 0 et d'écart-type 1. L'hypothèse nulle est rejetée si la probabilité est supérieure au seuil $\alpha\%$ (p-value). Cela signifie que la tendance a moins de $\alpha\%$ de chance d'être obtenue par un simple hasard. Elle est donc statistiquement significative à « 100- $\alpha\%$ ».

Dans notre cas, il s'agit de tester la nullité de la tendance des données c.à.d. aucune tendance significative.

La pvalue (α) est prise égale à 0.05.

1.4.2. Tendances des indices pluviométriques de la saison du printemps (MAM)

À l'exception de Ouarzazate et Agadir qui ne montrent pas d'évolutions notables, toutes les stations ont des tendances négatives de la pluviométrie moyenne (pav) (Fig. 1.3). Ces tendances varient de -0.1mm/jour par décennie à -0.3mm/jour par décennie ; soit des baisses décennales comprises dans la plupart des cas entre 5% et 15% des cumuls moyens printaniers de 1961-1990. Les tendances à la baisse au niveau de Midelt, de la région est-méditerranéenne (Oujda) et du Sais (Meknès et Ifrane) sont statistiquement significatives. Elles correspondent respectivement à des baisses par décennie d'environ 23%, 15% et 10% des cumuls moyens printaniers. Signalons que les printemps des années 1983, 1992 et 1998, correspondant respectivement aux années El Niño 1982-1983, 1991-1992 et 1997-1998, sont

globalement caractérisés par des sécheresses plus importantes et plus générales que ceux des années 1982, 1991 et 1997 (Figures non montrées). Comme pour l'hiver, la tendance à la diminution du nombre de jours humides et à l'allongement de la période maximale de sécheresse est quasi-générale. Les tendances de pn_{05mm} , significatives au niveau de 9 stations (sur 14), vont de $-0.1j/décennie$ (à Ouarzazate) à $-1.8j/décennie$ (à Oujda et Midelt) ; soit des pertes allant jusqu'à 7 jours humides en quarante ans. Les tendances à la hausse de $pxcdd$ varient entre $0.4j/décennie$ et $3.5j/décennie$. Le maximum de la hausse enregistré à Marrakech correspond à une augmentation de $pxcdd$ de 14 jours en quarante ans. Les tendances de $pxcdd$ sont cependant toutes non significatives selon K-test et restent généralement plus faibles que celles de l'hiver. Les tendances à la baisse de pn_{90} varient entre -0.5 et -0.1 événement par décennie, ce qui revient à des baisses allant de 6% à 33% par décennie par rapport aux normales climatologiques. Elles ne sont cependant statistiquement significatives qu'à Casablanca et Midelt avec une baisse décennale par rapport aux normales climatologiques de -22% et -33% respectivement. La tendance positive, non significative, affichée par Ouarzazate correspond à une augmentation décennale de 23% par rapport à sa normale climatologique.

1.4.3. Tendances des indices pluviométriques de la saison d'été (JJA)

Seules les stations météorologiques de Fès et Ifrane ont une tendance non nulle en précipitation moyenne (Fig. 1.4). Elle vaut $-0.1mm/j$ par décennie pour les deux stations et elle est statistiquement significative pour la première. Le nombre de jours humides a une tendance négative sur la plupart des stations : tout au long de la côte atlantique, au nord-est et sur le Sais (Fès, Meknès et Ifrane). La majorité de ces tendances sont statistiquement significatives. L'unique tendance à la hausse est enregistrée à Ouarzazate avec $+1j/décennie$, et elle est significative selon K-test. La période maximale de sécheresse estivale a tendance à augmenter dans la plupart des stations. Les tendances positives varient entre $0.2j/décennie$ (à Kenitra) et $3.6j/décennie$ (à Fès). Les tendances à la baisse concernent les stations du sud ; Marrakech avec $-1.4j/décennie$, Agadir avec $-2.4j/décennie$ et Ouarzazate avec $-6.7j/décennie$. En terme de significativité, seulement trois stations ont des tendances significatives selon K-test ; Essaouira ($+1.7j/décennie$), Safi ($+1,3 j/décennie$) et Ouarzazate. Le nombre d'événements de fortes précipitations a tendance à augmenter au niveau des trois stations les plus au sud du domaine d'étude; Marrakech, Agadir et Ouarzazate. Les seules tendances statistiquement significatives sont, cependant, celles de Fès (-0.1 événement par décennie), Ifrane (-0.1 événement par décennie) et Oujda (-0.2 événement par décennie).

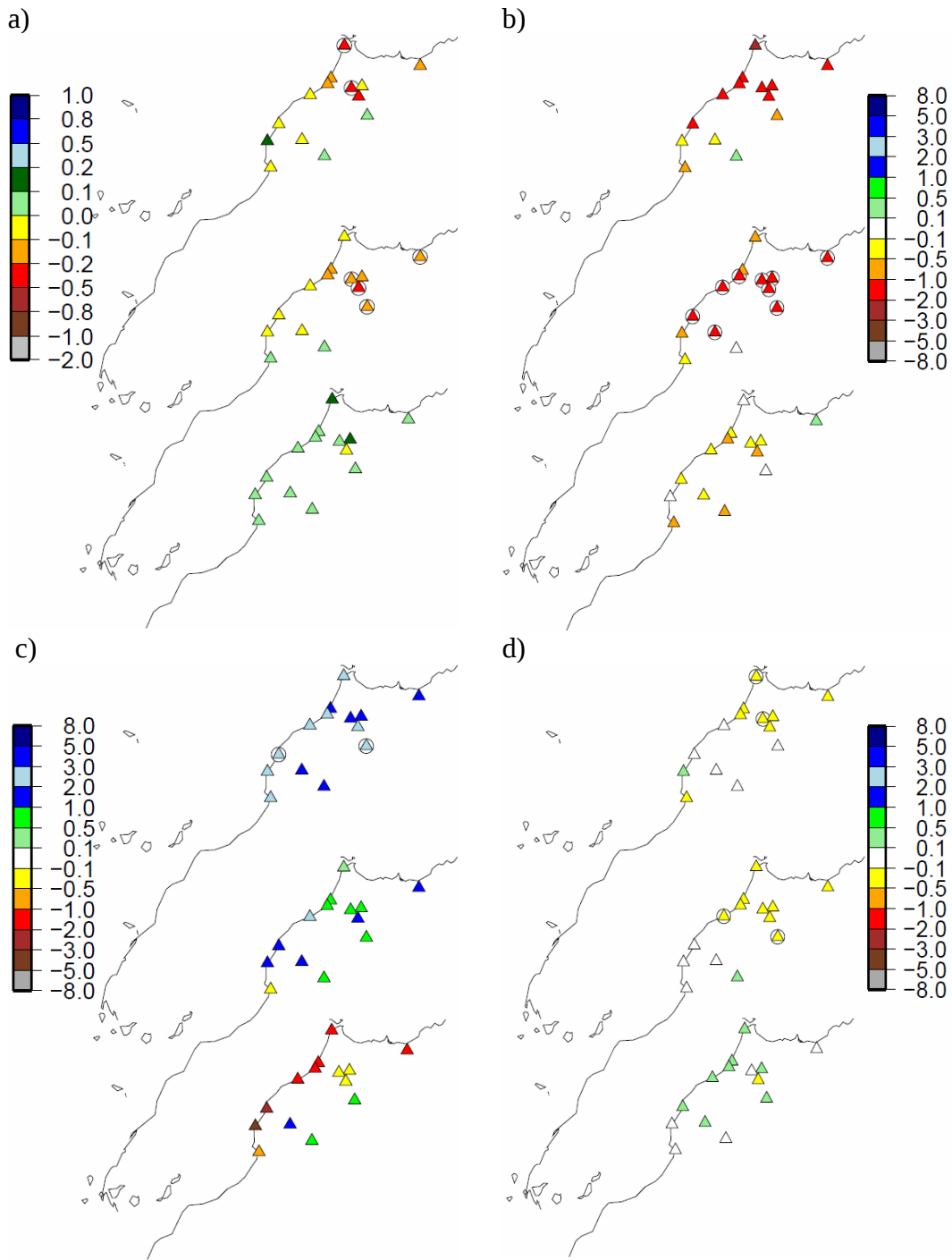


Fig. 1.3 Tendances des indices climatiques calculées sur la période 1961-2008 pour les 14 stations météorologiques marocaines. a) précipitation moyenne (mm/j par décennie), b) nombre de jours humides (j/décennie), c) : période maximale de sécheresse (j/décennie), d) : nombre d'événements de fortes précipitations (par décennie). Pour chaque indice, on a, du haut en bas, la saison d'hiver, le printemps et l'automne. Les cercles entourant les triangles indiquent les tendances statistiquement significatives selon K-test.

1.4.4. Tendances des indices pluviométriques de la saison d'automne (SON)

Une des premières remarques qui peut être faite sur les tendances automnales des différents indices pluviométriques est qu'aucune d'entre elles n'est statistiquement significative et ceci quelque soit la station considérée (Fig. 1.3). En outre, à la différence des deux saisons d'hiver et du printemps, la précipitation moyenne (p_{av}) de l'automne ne montre pas d'évolution notable dans la plupart des stations. L'unique tendance négative est enregistrée à Ifrane (-0.1mm/j par décennie); elle correspond à une baisse décennale, par rapport à la moyenne de 1961-1990, d'environ 4%. Les seules stations ayant une tendance positive sont Fès et Tanger (0.1mm/j par décennie chacune). Elles correspondent à une baisse par rapport à la climatologie de 1961-1990, respectivement de 7% pour la première et de 4% pour la deuxième. La majorité des tendances de p_{05mm} sont négatives et la plus importante est égale à -0,7j/décennie à Ifrane. L'unique tendance positive est celle d'Oujda avec 0.4j/décennie. Contrairement aux saisons d'hiver et du printemps, la période maximale de sécheresse montre des tendances au raccourcissement dans la plupart du territoire étudié. La baisse équivalente au cours d'une quarantaine d'années, par rapport à la moyenne de 1961-1990, varie le long de la côte Atlantique de 4 jours à Tanger à 12 jours à Essaouira. Les stations de Midelt, Marrakech et Ouarzazate ont des tendances positives mais qui ne dépassent pas 1.6 jour/décennie. Le nombre d'événements de fortes précipitations automnales montre des tendances positives, mais non significatives selon K-test, dans 8 stations (sur 14). Celles-ci correspondent à des augmentations décennales allant de 5% (à Tanger) à 19% (à Rabat et Fès) par rapport aux climatologies de 1961-1990. Les tendances à la baisse sont enregistrées à Meknès (-0.1 événement par décennie), Ifrane (-0.2 événement par décennie) et à Ouarzazate (-0.1 événement par décennie).

1.4.5. Tendances des indices pluviométriques à l'échelle annuelle

A l'échelle annuelle, toutes les stations au nord de Safi montrent des tendances négatives en précipitation moyenne. Celles-ci sont comprises entre -0.1mm/j et -0.2mm/j par décennie, ce qui revient à des baisses décennales de 5% (à Tanger) à 17% (à Midelt) par rapport à la moyenne climatologique de 1961-1990. Les tendances statistiquement significatives sont celles du Sais (Meknès et Ifrane), celle de la station est-méditerranéenne (Oujda) et celle de Midelt. Les tendances au niveau des stations côtières et des stations de la moitié sud du domaine ne sont pas significatives. Les évolutions de la plus longue période sèche annuelle montrent des tendances positives au niveau de la majorité des stations (10 stations sur 14). Les tendances positives relativement élevées (de +4 à +6 jours par décennie) au niveau de certaines stations sont probablement dues à une fin de plus en plus précoce de la saison des pluies ou à un début de plus en plus tardif de celle-ci. Signalons, cependant, qu'aucune des tendances relatives à p_{xcdd} n'est statistiquement significative. Le nombre annuel de jours humides a des tendances négatives significatives au niveau de la plupart des stations. L'unique station ayant une tendance positive est celle de Ouarzazate. Cette tendance, statistiquement non significative, est due aux augmentations de p_{05mm} de l'hiver et de l'été. Le nombre d'événements de fortes précipitations montre des tendances à la baisse dans la plupart des stations (10 stations sur 14) mais elles ne sont statistiquement significatives qu'au niveau de 4 d'entre elles (Tanger, Kenitra, Meknès et Midelt). Des tendances positives, mais non significatives, sont affichées par Ouarzazate (0.2 par décennie) et Essaouira (0.4 par

décennie). Elles résultent des tendances à l'augmentation au printemps et en été pour la première, et en hiver pour la seconde.

En étendant l'analyse des tendances aux cumuls pluviométriques des 12 saisons glissantes [JFM (janvier-février-mars), FMA, ..., DJF (décembre-janvier-février)] et à ceux de l'hiver étendu (octobre à mars), nous constatons que parmi les tendances significatives de la saison pluvieuse, celle de FMA (février-mars-avril) est la plus élevée ; elle est de -9% par décennie. L'hiver étendu vient en deuxième lieu avec une tendance à la baisse significative de 6% par décennie (Fig. D.2 de l'annexe D). Il convient de noter que la tendance annuelle est de l'ordre de 5%. Signalons que le constat relatif à la saison FMA est compatible avec ce qui a été trouvé par Driouech (2006).

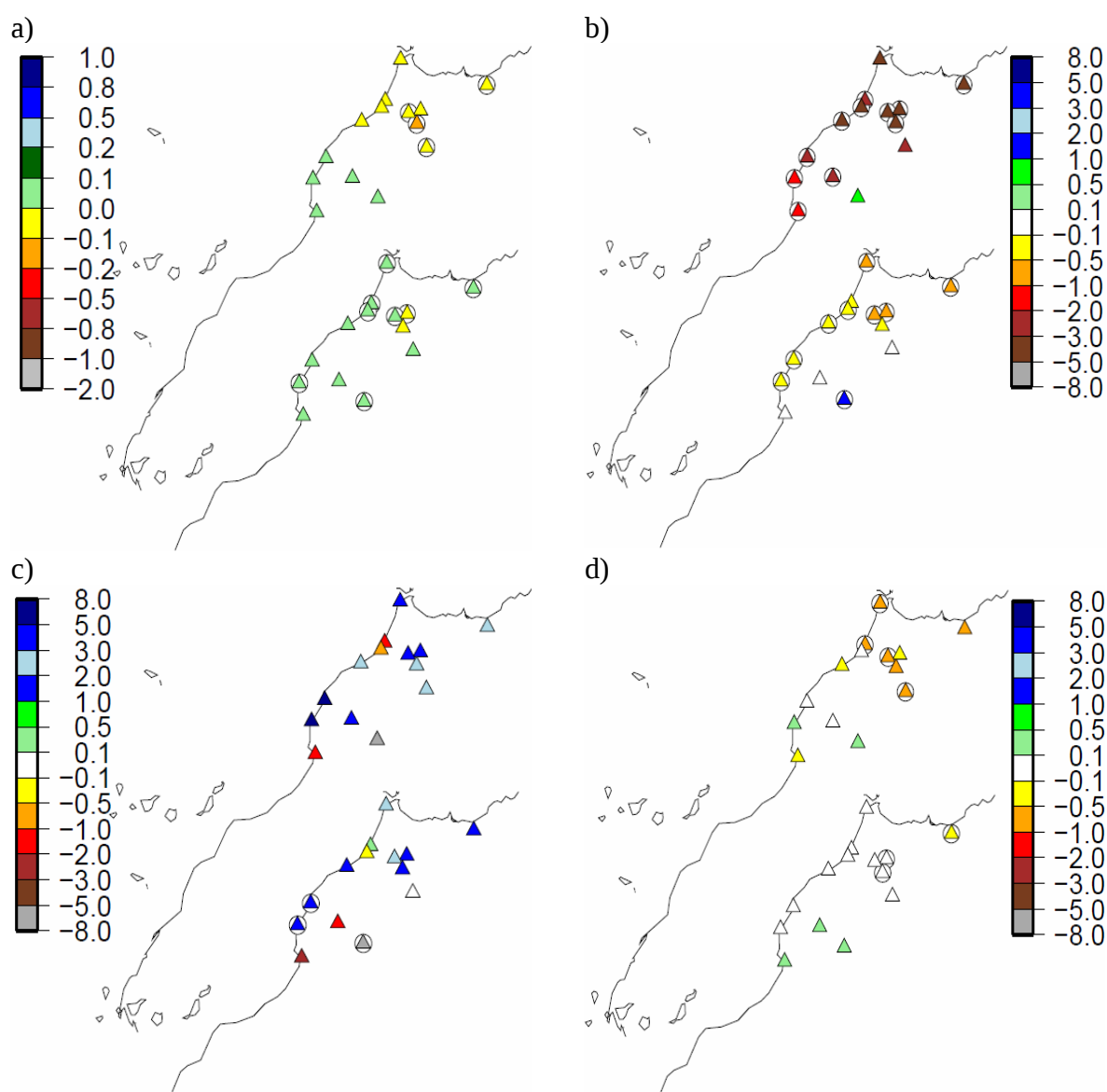


Fig. 1.4 Tendances des indices climatiques calculées sur la période 1961-2008 pour les 14 stations météorologiques marocaines. a) précipitation moyenne (mm/j par décennie), b) nombre de jours humides (j/décennie), c) : période maximale de sécheresse (j/décennie), d) : nombre d'événements de fortes précipitations (par décennie). Pour chaque indice, on a l'année (carte du haut) et l'été (carte du bas). Les cercles entourant les triangles indiquent les tendances statistiquement significatives selon K-test.

1.4.6. Tendances des températures

La température moyenne quotidienne est définie comme la demi-somme de la température minimale et maximale quotidienne. La température moyenne d'une saison (ou une année) donnée est égale à la moyenne des températures quotidiennes de tous les jours de cette saison (ou année).

En termes climatologiques par rapport à la période 1961-1990, les températures annuelles moyennes varient entre 17°C et 18 °C sur la côte atlantique et entre 16°C et 20°C à l'intérieur. Elles augmentent quand on s'éloigne des côtes, en allant du nord au sud et de l'ouest en est. Les stations montagneuses ont des températures plus fraîches ; 11°C à Ifrane et 14°C à Midelt. En hiver, les températures moyennes vont de 10°C à 15 °C en basses altitudes et descendent jusqu'à 4°C en montagne. En été, elles varient entre 19°C et 28°C. Les stations de Ouarzazate et Marrakech ont les plus fortes températures estivales ; respectivement 28°C et 27°C

La Fig. 1.5 représente les tendances calculées sur la période 1961-2008, au niveau de chacune des 14 stations météorologiques, pour la température saisonnière estivale et pour la température annuelle.

Le réchauffement du climat au niveau des 14 stations durant la période 1961-2008 est bien clair à la fois à l'échelle annuelle et estivale. Les tendances de l'été, toutes statistiquement significatives selon K-test, varient entre +0.1°C/décennie (à Tanger et Essaouira) et 0.3°C/décennie (à Casablanca, Oujda, Midelt et Ouarzazate). Le réchauffement annuel varie entre 0.1°C/décennie (à Essaouira) et 0.4°C/ décennie (à Oujda, Ifrane et Midelt). A l'exception d'Essaouira (une presqu'île Atlantique), les tendances annuelles sont significatives pour toutes les stations. Dans le cas de certaines stations (Oujda, Ifrane et Midelt), le réchauffement annuel est plus accentué que celui de l'été ; ceci est dû principalement aux fortes tendances à la hausse des saisons intermédiaires l'automne et le printemps (Fig. E.1 de l'annexe E).

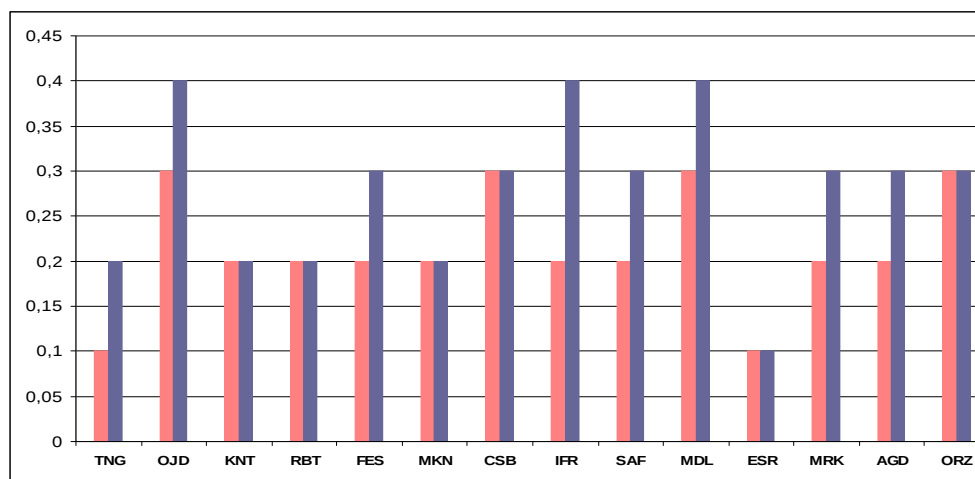


Fig. 1.5 Tendances de la température moyenne estivale (barres rouges) et annuelle (barre bleues) calculées sur la période 1961-2008 au niveau des 14 stations météorologiques. En °C/décennie.

1.4.7.Types de climats

En considérant à la fois les évolutions obtenues précédemment pour la température et celles des précipitations, une des questions qui peut se poser est : à quel point cela peut-il influencer les types de climats au Maroc ? Nous abordons ce point à l'aide de l'un des indices d'aridité les plus connus ; l'indice d'aridité de De Martonne (Beltrando et Chémery, 1995). Cet indice considéré aussi comme un indice de sécheresse (Moisselin et al. 2002), se base à la fois sur les précipitations et la température annuelles et se calcule comme suit :

$$I = P/(T + 10) \quad (1)$$

I est l'indice de De Martonne en mm/°C, T est la température moyenne annuelle en °C et P le cumul des précipitations annuelles en mm.

De Martonne a classifié les climats selon les valeurs de l'indice I. Plus l'indice I est élevé, plus le climat est humide et plus I est faible plus le climat est aride³.

Le tableau 2 montre les tendances de l'indice de De Martonne calculées sur la période 1961-2008 au niveau des 14 stations météorologiques ainsi que les types de climats au début et à la fin de cette période. Il est clair que la tendance générale est vers l'aridification du climat. Plusieurs régions à climat semi-humide durant 1961-1980 sont devenues semi-arides entre 1981 et 2008, et d'autres à climat semi-aride, comme Oujda et Midelt, sont devenues arides. La répartition géographique (Fig. E.2 de l'annexe E) des différents types de climat durant les années 1961-1980 et les années 1981-2000 indique une progression de climats à caractères semi-aride vers le nord du pays. Les deux stations d'Essaouira et Ouarzazate montrent des tendances positives de l'indice, ce qui veut dire une évolution vers l'humidification ou plutôt la diminution de l'aridité. Ces tendances sont cependant statiquement non significatives contrairement à la majorité des régions évoluant vers l'aridification du climat. Le fait que le changement des types de climats a eu lieu déjà entre 1980 et 2000, est révélateur de l'importance des sécheresses de la fin du siècle précédent.

³ Les types de climats en fonction des valeurs de l'indice de De Martonne sont comme suit:

Entre 0 et 5 : hyperaride ; entre 5 et 10 : aride ; entre 10 et 20 : semi-aride ;
entre 20 et 30 semi-humide ; entre 30 et 55 : humide.

Stations	Types de climat durant 1961-1980	Types de climat durant 1981-2000	Types de climat durant 1981-2008	Tendances sur 1961-2008
Tanger	Semi-humide	Semi-humide	Semi-humide	-0,13
Oujda	Semi-aride	Aride	Aride	<u>-0,13</u>
Kenitra	Semi-humide	Semi-aride	Semi-aride	<u>-0,12</u>
Rabat	Semi-humide	Semi-aride	Semi-aride	<u>-0,11</u>
Fès	Semi-humide	Semi-aride	Semi-aride	<u>-0,10</u>
Meknès	Semi-humide	Semi-aride	Semi-aride	<u>-0,19</u>
Casablanca	Semi-aride	Semi-aride	Semi-aride	<u>-0,10</u>
Ifrane	Humide	Humide	Humide	<u>-0,37</u>
Safi	Semi-aride	Semi-aride	Semi-aride	-0,07
Midelt	Aride	Aride	Aride	<u>-0,09</u>
Essaouira	Aride	Semi-aride	Semi-aride	0,01
Marrakech	Aride	Aride	Aride	-0,05
Agadir	Aride	Aride	Aride	-0,07
Ouarzazate	Hyperaride	Hyperaride	Hyperaride	0,01

Tableau 2 Types de climats, selon l'indice d'aridité de De Martonne, au niveau des 14 stations météorologiques durant les périodes 1961-1980, 1981-2000 et 1981-2008. La quatrième colonne représente les tendances annuelles de l'indice de De Martonne sur la période 1961-2008 (en mm/°C par an). Les tendances significatives, selon K-test, sont en gras et soulignées.

1.5.Conclusion

Au cours de ce chapitre nous nous sommes focalisés sur l'évolution et les tendances observées au niveau du climat du Maroc au cours de la période 1961-2008. Même si l'essentiel de l'analyse a porté sur différents indices pluviométriques, l'évolution de la température moyenne et des types de climat ont été aussi abordés. Les principaux résultats peuvent être résumés de façon très synthétiques dans les points suivants :

- La pluviométrie marocaine se caractérise par une forte variabilité interannuelle.
- Depuis le début des années 1980, le Maroc a connu de fréquentes périodes de sécheresse. Les années 1980-1985 et 1990-1995 étaient particulièrement déficitaires.
- Tendances quasi-générale vers la diminution des précipitations moyennes et des cumuls durant les saisons d'hiver et du printemps. L'hiver étendu présente une tendance négative significative plus élevée que celle de l'année prise en entier.
- La baisse des précipitations hivernales et printanières a été accompagnée dans la plupart des cas de tendances à la baisse du nombre total de jours humides, de tendances vers l'allongement de la période maximale de jours consécutifs secs et de tendances à la baisse du nombre total d'événements de fortes précipitations. Excepté pour le nombre de jours humides au printemps, la majorité de ces tendances restent, cependant, statistiquement non significatives.
- La saison d'automne montre des tendances à la hausse au niveau du nombre d'événements de fortes précipitations dans différentes régions du Maroc. Cependant, aucune de ces tendances n'est statistiquement significative.
- Outre la tendance générale vers l'assèchement, le climat du Maroc s'est réchauffé de façon significative au cours de la période 1961-2008. Le réchauffement concerne l'année ainsi que toutes les saisons. La plupart des tendances annuelles sont comprises entre 0.2°C et 0.4 °C par décennie. Rappelons que selon le quatrième rapport du GIEC, la tendance de la température annuelle calculée sur la période 1975-2005 varie dans la fourchette 0.3-0.5 °C par décennie.
- L'assèchement associé au réchauffement s'est manifesté en termes de changements au niveau des types de climats de différentes régions du Maroc. Une progression de climats à caractère semi-aride vers le nord est, en effet, constatée.

A l'issu de ce chapitre qui a permis de mettre à jour et d'approfondir un certain nombre de résultats d'études précédentes ayant ciblé le Maroc tout en les confirmant dans l'ensemble, et d'analyser les évolutions et tendances des précipitations marocaines sous différents angles (moyennes et extrêmes), on peut conclure que la distribution temporelle des précipitations marocaines a connu un changement indéniable au cours de la période 1961-2008.

2. Description et évaluation de la version du modèle ARPEGE-Climat utilisée

« La poursuite des émissions de GES au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au XXI^e siècle. Il est très probable que ces changements seront plus importants que ceux observés pendant le XX^e siècle »

GIEC, Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse

Tenant compte des tendances (vers l'assèchement) affichées par les observations relatives au climat du Maroc (voir chapitre 1) et des projections futures, quoique issues de modèles de faible résolution pour la plupart, notamment celles du GIEC, qui indiquent une réduction des cumuls pluviométriques marocains d'ici la fin du siècle courant (IPCC, 2007a), il n'est pas surprenant d'assister au lancement de différents travaux d'adaptation permettant de minimiser au mieux possible les impacts potentiels que pourraient induire les changements climatiques sur l'homme, l'économie et les écosystèmes. Il est aussi tout à fait normal de faire face à une montée continue de questions de plus en plus exigeantes en réponses détaillées, posées par les différents acteurs socio-économiques régionaux et même locaux, sur le degré avec lequel le climat de leur région (zone ou territoire) serait touché.

Le meilleur outil permettant l'étude de l'évolution du climat sous forçage anthropique est les modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère (MCGOA)⁴. De tels modèles fournissent, à l'heure actuelle, une des représentations les plus complètes du système climatique. Cependant, la majorité des MCGOA ont une résolution de l'ordre de 200km à 300km. Ils ne permettent pas, ainsi, d'accéder aux résolutions requises par les modèles d'impacts ni de fournir l'information nécessaire pour étudier les climats régionaux et locaux de façon fiable, fine et détaillée. En outre, ils ne représentent pas les processus physiques du climat régional et ne simulent pas de façon satisfaisante les phénomènes météorologiques extrêmes, indispensables pour évaluer les nombreuses incidences des changements climatiques. Ceci est d'autant plus vrai quand il s'agit de zones à caractéristiques physiographiques particulièrement complexes comme le Maroc dont les chaînes montagneuses occupent une partie non négligeable du territoire. Le climat, en effet, peut varier à des échelles spatiales fines en fonction de différents facteurs dont notamment la topographie, les contrastes terre-mer, les types et l'usage des sols, ... etc. Le climat régional

⁴ Les modèles de circulation générale se sont beaucoup développés depuis l'apparition des premiers modèles numériques de l'atmosphère développés dans les années 1970 et qui étaient tout d'abord limités aux prévisions météorologiques. Des améliorations ont été ensuite apportées grâce à l'intégration du relief et du rôle des nuages et de la cryosphère (calottes glaciaires, glaciers, banquise, neige...). Les avancées se sont ensuite succédées (Magnan et al., 2009) commençant par la prise en compte d'un océan « plat » et de ses interactions avec l'atmosphère (cas des modèles utilisés dans FAR; le premier rapport du GIEC apparut en 1990), puis de l'activité volcanique, de quelques aérosols et d'un océan en trois dimensions avec certaines circulations (second rapport du GIEC ; SAR, 1995). L'incorporation du cycle du carbone, du cycle de l'eau, de l'ensemble des aérosols et d'une circulation océanique plus complexe ont accompagné le troisième rapport (TAR, 2001). Les modèles du dernier rapport du GIEC (AR4, 2007) ont vu l'introduction de la modélisation partielle de la végétation et de ses interactions avec le climat ainsi que de la chimie atmosphérique (Magnan et al., 2009).

Les MCGOA sont les plus complexes des modèles numériques de climat. Ils associent les circulations générales atmosphériques aux circulations générales océaniques en y ajoutant la biosphère, le cycle de carbone et la composition chimique de l'atmosphère. On en compte actuellement plus d'une vingtaine et leur nombre est en nette progression ; entre 2001 et 2007 leur nombre a augmenté de 13.

peut être vu schématiquement comme résultant de l'interaction d'un état atmosphérique de grande échelle et de contraintes physiographiques locales (von Storch, 1995, 1999).

Afin de pouvoir étudier les climats régionaux de façon relativement fine et de combler l'écart existant entre ce que permettent les MCGOA et ce que les modèles d'impacts requièrent (Fig. 2.1), les méthodes de réduction d'échelle spatiale, appelée aussi descente d'échelle, régionalisation, désagrégation ou « downscaling » en anglais sont utilisées. Ces méthodes, développées depuis la fin des années 1980 et le début des années 1990, consistent à dériver l'information climatique contenue dans les scénarios climatiques globaux à basse résolution en scénarios régionaux à haute résolution. Autrement dit, elles permettent d'affiner l'information provenant des MCGOA et de produire des données utiles pour les évaluations des impacts. Les techniques de réduction d'échelle se scindent en deux familles : les méthodes de réduction d'échelle statistiques (Mearns et al., 1999, Wilby et al. 1998, 2002) et les méthodes de réduction d'échelle dynamiques (Déqué et Pièdelièvre, 1995, Giorgi, 1990; Mc Gregor, 1996; Jones et al., 1995).

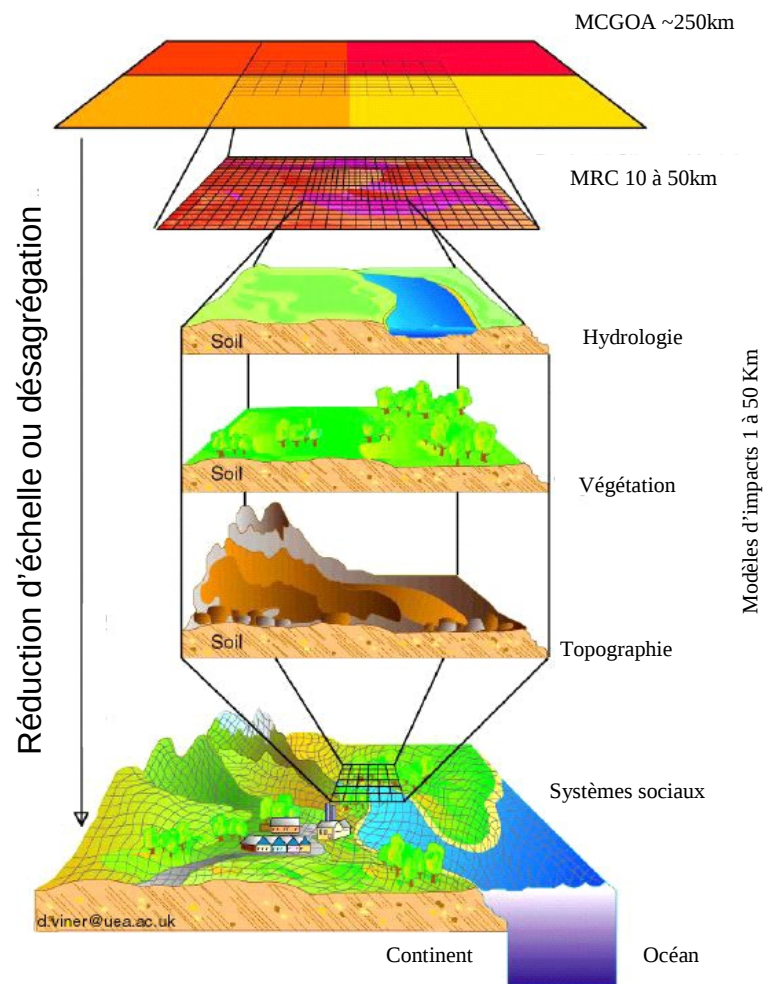


Fig. 2.1 Schématisation de la différence d'échelles entre les MCG et les modèles d'impacts. (Adapté d'une représentation de David Viner, Climatic Research Unit, University of East-Anglia. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/modelcc/>).

2.1.Méthodes de réduction d'échelle statistiques

Les méthodes de réduction d'échelle statistiques (Hewitson et Crane, 2006) incorporent les techniques de typologie météorologique, les fonctions de transfert ou régression et les générateurs stochastiques de données météorologiques. Leur technique consiste à établir une relation statistique reliant une ou plusieurs variables caractérisant l'état de l'atmosphère à grande échelle (champs de grande échelle comme le géopotential à 500hPa) dites variables « prédictives » ou « prédicteurs » à une ou plusieurs variables climatiques locales (comme les précipitations ou la température en un lieu donné) dites variables prédites ou prédictands. Cette relation, ou modèle statistique, établie sur les observations (pour les variables prédites et les réanalyses pour les champs de grande échelle) est ensuite utilisée pour dériver les variables climatiques locales (ou régionales) à partir de champs de grande échelle simulés par un modèle climatique à faible résolution. En plus de la méthode de base qui vient d'être décrite, on peut trouver diverses variantes.

Les méthodes de réduction d'échelle statistique sont peu coûteuses en moyens de calcul et peuvent facilement être appliquées aux résultats des MCG à condition de disposer de longues séries d'observations de paramètres météorologiques comme les précipitations ou la température. Elles reposent, cependant, sur l'hypothèse fondamentale que la relation statistique « prédictand – prédicteurs » établie à l'aide de l'information sur le climat actuel est également valide pour le futur (Hewitson et Crane, 2006 ; Solman et Nuñez, 1999). Cette hypothèse, dite « hypothèse de stationnarité », constitue la limitation principale de ce type de méthodes puisqu'elle est difficile à vérifier dans le cas d'un climat perturbé par les forçages anthropiques. En effet, les conditions climatiques sous un forçage de gaz à effet de serre accru devraient être différentes de celles que l'on retrouve dans les archives de données anciennes utilisées pour établir les modèles de réduction d'échelle statistique.

2.2.Méthodes de réduction d'échelle dynamiques

Les méthodes de réduction d'échelle dynamiques permettent d'affiner l'information climatologique produite par les MCGOA à l'aide de modèles à aire limitée (Giorgi et Mearns, 1991 ; Leung et al., 2003 ; Wang et al., 2004), de modèles de circulation générale atmosphériques (MCGA) de haute résolution à tranches temporelles (Cubasch et al., 1995), ou de circulation générale atmosphérique à résolution variable (MCGA-RV) (Fox-Rabinovitz et al., 2001; McGregor et al., 2002 ; Gibelin et Déqué, 2003).

Les modèles climatiques à aire limitée, appelés aussi modèles régionaux de climat (MRC) à grilles emboîtées, constituent probablement la méthode de réduction d'échelle dynamique la plus largement utilisée. Ils sont, en effet, les moins coûteux de leur catégorie en moyens informatiques et de ce fait les plus accessibles. Leur hypothèse de base (Giorgi, 2008) repose sur le fait que le MCGOA simule la réponse de la circulation générale à des forçages à grande échelle (par exemple, forçage radiatif GES) alors que le MRC à grilles emboîtées simule l'effet des forçages régionaux à une échelle inférieure à celle du MCG (par exemple, topographie). Ils consistent à réaliser des simulations à haute résolution sur uniquement une région donnée, dite région d'intérêt. Les modèles à aire limitée nécessitent la connaissance à chaque instant des conditions aux bords de leur domaine d'intégration. Celles-ci sont fournies par le modèle dit de forçage qui est en général un MCGOA. Cette dépendance des modèles climatiques à aire limitée d'un modèle de forçage, constitue leur limitation principale.

L'approche des MCGA de haute résolution consiste à simuler à l'aide d'un modèle de circulation générale atmosphérique certaines périodes données ou tranches temporelles (par

exemple 1971-2000 ou 2021-2050) d'une simulation (à faible résolution) faite à l'aide d'un MCGOA dite simulation transitoire (Giorgi, 2008). La température de surface de l'océan (TSO) nécessaire pour ces simulations est fournie par les MCGOA. L'hypothèse de base de cette approche est que le forçage TSO issu du MCGAO soit cohérent avec la climatologie du MCGA de haute résolution. Les MCGA de haute résolution ont l'avantage de s'affranchir de tout forçage aux bords et de fournir des informations sur tout le globe au même degré de précision. Ils ont cependant une limitation principale qui réside dans leur coût informatique qui les rend difficilement accessibles.

Les modèles de circulation générale atmosphériques à résolution variable (MCGA-RV), développés depuis les années 1980 (Déqué et Li, 2007), ont le même principe que les MCGA à haute résolution. La seule différence qui existe entre les deux approches est que les MCGA-RV utilisent une grille horizontale à résolution variable. Leur technique consiste à prendre une haute résolution sur la région d'intérêt puis la diminuer graduellement jusqu'à l'antipode (point de minimum de résolution). Comme pour les MCGA de haute résolution, les températures de surface de l'océan leurs sont fournies par un MCGOA. Ce type de modèles, même s'il ne permet, comme les modèles à aire limitée, d'avoir une haute résolution que sur une région particulière, il a l'avantage de s'affranchir de la tutelle d'un modèle global et de garder la cohérence de la circulation de grande échelle. Son coût informatique reste intermédiaire entre les deux autres approches de réduction d'échelle dynamique.

Outre la prise en compte de la majeure partie des processus physiques, la réduction d'échelle dynamique a l'avantage de s'affranchir de types d'hypothèses de stationnarité supposés par l'approche statistique. Elle permet d'avoir accès à toutes les variables météorologiques possibles, et donc d'étudier les différents mécanismes de façon bien plus fine et plus poussée. Si son implémentation est beaucoup plus complexe que celle des méthodes statistiques, elle n'exige pas nécessairement les longues séries d'observations de qualité qui ne sont pas forcément disponibles dans les régions les plus vulnérables au changement climatique.

En comparant les méthodes de réduction dynamiques entre elles, on constate que chacune a ses points forts et ses limitations. Celle utilisant les MCGA de haute résolution reste cependant la moins accessible de point de vue coût informatique.

Si les travaux de réduction d'échelle dynamique qui ont ciblés le Maroc sont très peu nombreux (on peut en citer à titre d'exemple Born et al., 2008), à notre connaissance ceux utilisant la méthode à résolution variable sont inexistantes.

A l'aide de la configuration à résolution variable du modèle ARPEGE-climat, nous réalisons dans les deux chapitres suivants une évaluation des projections futures à haute résolution sur le Maroc.

2.3. Description de la version utilisée du modèle ARPEGE-Climat

Le MCGA ARPEGE-Climat, développé par Météo-France au début des années 1990 (Déqué et al., 1994), est la version climatique du modèle numérique spectral ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) destiné à la prévision courte et moyenne échéance. Il se caractérise par une grille ayant la capacité d'être basculée et étirée pour permettre d'augmenter la résolution dans une zone d'intérêt particulière; c'est ce qui permet à ce modèle d'être à la fois un MCGA et un MRC. La version basculée étirée (ou version à résolution variable), initialement décrite par Déqué et Piedelièvre (1995), a évolué avec le

temps. La capacité d'un modèle à résolution variable à simuler de façon réaliste les variations saisonnières et géographiques des principaux paramètres météorologiques a été mise en évidence par Machenhauer et al. (1998) dans le cas de l'Europe.

Dans cette étude nous utilisons la nouvelle version 4 du modèle dans sa configuration à résolution variable. Cette version utilise un schéma semi-lagrangien d'advection et un schéma de discrétisation temporelle semi-implicite à deux pas de temps. La discrétisation verticale est faite à l'aide d'une coordonnée hybride sigma-pressure. Les 31 niveaux verticaux du modèle sont ceux des réanalyses ERA15 (Gibson et al., 1997) et se situent entre la surface et le niveau 10 hPa. La majorité des niveaux se trouvent dans la troposphère et seulement 4 sont au dessus de 80hPa. La troncature spectrale correspond à une T106 et le facteur d'étirement, relativement faible, est égal à 3. La grille contenant 21692 points a son maximum de résolution au niveau du pôle de 0.5° et une résolution minimale à l'antipode de 4.5°. Le pas de temps de calcul utilisé par le modèle est de 30 minutes.

Le schéma de convection du modèle est proche de celui décrit dans Bougeault (1985) et le schéma radiatif est issu de Morcrette (1990) et inclut, en plus de la vapeur d'eau et de l'ozone, l'effet des quatre principaux GES (CO₂, CH₄, N₂O et CFC) et de cinq types d'aérosols (de surface, marins, urbains, désertiques et de sulfate). Le schéma nuage-précipitation-diffusion verticale utilise l'approche statistique de Ricard et Royer (1993) et le modèle de sol est ISBA (Noilhan et Mahfouf, 1996) amélioré par Douville et al. (2000).

Les paramétrisations physiques de la version 4 sont les mêmes que celle de la version 3 (Gibelin et Déqué, 2003) à deux exceptions. La première est relative aux aérosols qui suivent dans la nouvelle version un cycle annuel (Tegen et al. 1997). La deuxième différence consiste en l'utilisation, dans la diffusion verticale au niveau de la couche limite planétaire (CLP), d'un profil parabolique pour la longueur de mélange. Le profil parabolique permet, en effet, une diffusion plus efficace dans la partie supérieure de la CLP que le profil cubique utilisé dans la version 3. Une description complète de la version 4 incluant la dynamique se trouve sur le site du Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France « http://www.cnrm.meteo.fr/gmgec/site_engl/index_en.html ».

A la différence de toutes les études précédentes ayant porté sur ARPEGE-Climat dans sa configuration à résolution variable (Déqué et al., 1998 ; Frei et al., 2003; Gibelin et Déqué, 2003; Terray et al. 2004; Déqué, 2007), le pôle d'étirement (pôle de maximum de résolution) est placé sur le Maroc à 28°N, 8°W. Cela permet de couvrir tout le territoire marocain (du 37^{ème} au 21^{ème} parallèle) d'une résolution comprise entre 50km et 60km. Les travaux antérieurs avec ARPEGE plaçaient le pôle d'étirement au centre du bassin méditerranéen (40°N-12°C) ce qui donnait des résolutions comprises entre 75km et 87km pour un facteur d'étirement égal à 3.

Avant de procéder à l'élaboration et évaluation des projections futures, l'étape de l'évaluation est nécessaire et incontournable dans tout travail se voulant rigoureux. Pour cet objectif, nous avons réalisé à l'aide d'ARPEGE-RV une première simulation de 31 ans couvrant la période 1970-2000. Cette simulation, appelée dans la suite ARPG-SIM1, utilise des températures de surface de l'océan mensuelles observées. La première année (1970) a servi comme période de spin-up du modèle. Aux moyennes latitudes, un cycle annuel est en effet suffisant pour faire oublier au modèle sa situation de départ (Douville et al., 2000 ; Déqué, 2007)

Le travail d'évaluation du modèle a fait l'objet d'un article publié en 2009 dans la revue *Climate Dynamics*. Le résumé de cet article est donné dans le paragraphe suivant.

2.4. Evaluation de la version utilisée du modèle

Ce paragraphe est un résumé de l'article Driouech et al. (2009) publié dans la revue *Climate Dynamics*.

Driouech F., Déqué M., Mokssit A., 2009: Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco, *Climate dynamics*, 32, 1055-1063.

La précipitation revêt un caractère socio-économique important au Maroc, un pays à ressources hydrologiques modestes. Sa mesure, le suivi de son évolution et sa prévision à toutes échelles temporelles (courte, moyenne et longue) permettent d'apporter des réponses à un nombre de questions qui ne cessent d'augmenter. En particulier, l'évaluation des incidences du changement climatique sur les précipitations marocaines à des échelles spatiales plus fines que ce que permettent la plupart des scénarios couvrant le pays, dont ceux du GIEC, est de nature à participer au comblement du manque existant en matière d'informations climatiques fines et détaillées requises par les modèles d'impacts. En effet, si les études de simulations numériques ayant ciblé le Maroc ne sont pas très nombreuses, celles relatives à la régionalisation des scénarios futurs le sont encore moins.

Notre étude Driouech et al. (2009) concerne l'évaluation de la version d'ARPEGE-Climat (ARPEGE-RV) décrite ci-dessus dans l'objectif de l'utiliser pour l'élaboration de scénarios futurs de changements climatiques à haute résolution sur le Maroc. Cette évaluation, faite sur la simulation ARPG-SIM1 de la période 1971-2000 (décrite plus haut), a porté sur trois aspects : la circulation de grande échelle, la distribution temporelle des précipitations et un nombre d'indices pluviométriques. Elle s'est focalisée principalement sur la saison pluvieuse allant d'octobre à novembre (appelée hiver étendu) à la différence de la plupart des études de la région qui examinent, plus traditionnellement, la température puis les précipitations de l'hiver et de l'été. En effet, la plus grande menace qui viendrait des changements climatiques serait la restriction des précipitations de cette saison si importante de point de vue apports hydrologiques (nécessaires pour l'approvisionnement en eau potable, pour l'agriculture, la production électrique, ...). En plus, durant cette période de l'année, les événements de fortes précipitations peuvent être très violents et induire des dégâts humains et matériels comme c'était le cas d'octobre 2008 et février 2009.

La circulation de grande échelle est examinée principalement sur l'Atlantique nord extratropical vu sa grande influence sur la pluviométrie au Maroc et notamment celle de la zone située au nord du Sahara marocain, une région à grande importance de point de vue agricole et hydrologique. La pluviométrie simulée par le modèle est évaluée au niveau des quatorze stations météorologiques appartenant à cette région et qui ont fait l'objet d'analyses de tendances dans le chapitre 1.

La comparaison du champ de la pression réduite au niveau de la mer (MSLP) simulé par le modèle à celui issu des ré-analyses ERA40 du CEPMMT, montre qu'ARPEGE-RV simule globalement bien ce champ représentatif de la circulation de grande échelle malgré une petite surestimation du centre de la dépression d'Islande et un décalage de l'anticyclone des azores vers l'est. A l'aide d'une analyse temporelle des principaux modes de variabilité du géopotential à 500hPa (Z500), il s'est avéré que le modèle reproduit globalement correctement la variabilité de basse fréquence (6 à 90 jours) notamment en ce qui concerne la position des centres représentatifs de la téléconnexion entre le Groenland et les moyennes latitudes. La variabilité de haute fréquence, examinée à l'aide des écart-types temporels de Z500 filtré avec un filtre passe-bande 2-6 jours, est cependant sous-estimée. Un focus particulier sur les principaux régimes de temps de l'Atlantique nord a mis en exergue la capacité du modèle à reproduire correctement à la fois la fréquence et la structure spatiale

relative à chacun des quatre régimes (le régime zonal, le régime de blocage, le régime de l'anticyclone groenlandais et la dorsale atlantique).

L'évaluation de la distribution des précipitations au niveau des stations météorologiques à travers la fonction de densité cumulative considérant chaque régime de temps à part, montre que l'attitude du modèle diffère d'un régime à l'autre en dépit de sa tendance générale à être plus sec sur la côte Atlantique en relation probablement avec la sous-estimation de la variabilité de haute fréquence. L'extension de l'analyse à un certain nombre d'indices pluviométriques (STARDEX ; cf. chapitre 1), relatifs à la sécheresse et aux événements de fortes précipitations, montre que le modèle a tendance à être plus persistant au en terme de sécheresse au sud, une région habituée aux longues périodes sèches. L'amplitude des fortes précipitations évaluée à travers le 90^{ième} centile, est sous-estimée dans la majorité des régions. Les stations du centre sont en revanche mieux reproduites en terme à la fois de fortes précipitations et de périodes sèches. L'évaluation d'ARPEGE-RV a démontré aussi sa capacité à bien simuler la variabilité interannuelle.

Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco

Fatima Driouech¹, Michel Déqué² and Abdalah Mokssit¹

¹ Direction de la Météorologie Nationale/CNRM, Casablanca, Maroc

² Météo-France/CNRM, CNRS/GAME, Toulouse, France

Abstract

A variable resolution version of the global GCM ARPEGE is constructed, so that Morocco has maximum resolution. A 30-year simulation, driven by observed sea surface temperature 1971-2000, is carried out. This paper examines the precipitation over northern Morocco during the extended winter season (from October to March), comparing model simulations with daily values at 14 stations. An approach utilising weather regimes has been adopted. The model is successful in representing the frequency and the interannual variability of the regimes. The precipitation over Morocco differs from one regime to another, but the model is not enough rainy along the Atlantic coast in general. The model is too persistent with too long dry spells, but is able to produce heavy rainfall as well as long dry periods in the centre of the area.

Keywords: Precipitation; Morocco; Probability distribution function; Regional climate modeling; Variable resolution model.

1. Introduction

Working Group I of the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has concluded that warming of the climate system is unequivocal and numerous long-term changes in climate at continental, regional and ocean basin scales have been observed (IPCC, 2007a). Changes have affected aspects of extreme weather like droughts and heavy rainfall. African countries are the most vulnerable to climate change and are exposed to more negative impacts in the future (IPCC, 2007b). Evaluations of climate change and impact assessment are then necessary in these countries. Climate information with local detail is of greatest importance in regions with complex topography.

Since General Circulation Models (GCMs) have relatively coarse resolutions (around 150 km in some cases, 250 km more frequently), they cannot resolve the finest scales that are required for many climate impact and adaptation studies. Such models cannot give a detailed distribution of climate in mountainous regions like the Atlas Mountains (North-West Africa). Downscaling techniques are then used to allow provision for regional climate information. If one wants to explore possible future climates, the most confident techniques are the numerical ones. They include variable resolution atmospheric GCMs (Déqué and Piedelievre, 1995; Mc Gregor, 1996, Fox-Rabinovitz et al., 2008) and limited area models nested within a GCM (Giorgi, 1990; Jones et al., 1995; Rummukainen et al., 2001).

Morocco has rarely been the main subject of climate numerical simulation studies. Among those investigations one can cite Knippertz et al. (2003) who have focused on the link of long-term Moroccan precipitation variability to the large-scale circulation using observed monthly precipitation of Morocco taken from the global historical climatology network (GHCN) and the European Centre model HAMburg version Model (ECHAM) (Roeckner et al., 1996).

Paeth et al. (2005) have also briefly mentioned Morocco by evaluating precipitation simulated by the limited area climate model REMO (Jacob, 2001) driven by ECMWF (European Centre for Medium range Forecasts) reanalysis data ERA15 (Gibson et al., 1997). This work was carried out within the framework of the IMPETUS (Integratives Management-Projekt für einen Effizienten und Tragfähigen Umgang mit Süßwasser in Westafrika) project (see <http://www.impetus.uni-koeln.de>).

The present study focuses on the variable resolution GCM method which, although requiring high computing resources, provides global fields and does not depend on any driving model. Meanwhile, it remains less expensive than the use of uniform high resolution GCMs (Cubasch et al. 1995; Wild et al., 1997; Duffy et al., 2003). We use herein the most recent version of the variable resolution atmospheric GCM ARPEGE-Climate. The purpose of the present study is to evaluate how well the model is able to reproduce the statistical distribution of Moroccan precipitation at the regional scale, keeping in mind that this model will be used to investigate the response to possible anthropogenic climate change.

The model is described in Section 2. The simulated large scale circulation over the western Atlantic basin is then examined in Section 3. The simulated probability distribution function (PDF) of precipitation is then compared with observations in Section 4. Section 5 focuses on extreme events of precipitation and finally Section 6 is dedicated to discussion of results and conclusion.

2. Description of the Model

A new version (Version 4) of the variable resolution atmospheric GCM ARPEGE-Climate is used with the pole of stretching placed over Morocco at 28°N, 8°W and with a stretching factor of 3. As a result, horizontal resolution is between 50 km and 60 km over the whole country (Fig. 1). The vertical resolution is based on 31 vertical levels between the surface and 10 hPa (those of ERA15).

A short description of Version 3 can be found in Gibelin and Déqué (2003). Version 3 has been used in IPCC-AR4 contribution of Météo-France. Version 4 is very similar to Version 3. It uses cycle 24 of ARPEGE/IFS (the numerical software developed jointly by ECMWF and the French Meteorological service (Météo-France) for short- and medium-range weather forecasting) instead of cycle 18. The physical parameterizations are the same with two small differences. The prescribed aerosols follow an annual cycle (Tegen et al., 1997). The vertical diffusion in the planetary boundary layer (PBL) uses a parabolic profile for the mixing length, instead of a cubic one, allowing a more efficient diffusion in the upper part of the PBL. A full description of Version 4 algorithms, including dynamics, can be found at: http://www.cnrm.meteo.fr/gmgec/site_engl/index_en.html

In the previous works using ARPEGE-Climate with variable resolution (Frei et al., 2003; Gibelin and Déqué, 2003; Terray et al., 2004; Déqué, 2007), the pole of stretching was placed in the centre of the Mediterranean Basin (40°N, 12°E) with a stretching factor of 3, or even 3.5 (in Déqué et al., 1998). The resulting resolution over Morocco ranges between 75 km and 85 km from North-East to South-West (with a stretching factor of 3). With the Déqué et al. (1998) version, the resolution was even coarser over Morocco.

A 31 year simulation has been performed in this present study for the period 1970-2000. The boundary conditions are monthly observed sea surface temperature (SST), yearly global concentration of the main greenhouse gases (carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and CFC), and decadal concentration of sulphate aerosols. The first year (1970) was discarded from the analysis as it is considered as a spin-up phase. The 1st January 1970 situation came from ERA40 reanalysis.

3. Large scale circulation

The Moroccan region located north of the Sahara desert comprises the main agricultural zone of the country. This subtropical region has a climate similar to that of south-western Europe (Spain and Portugal), especially in the winter season. The north Atlantic large scale circulation (extratropical circulation modes of the north Atlantic) exerts a strong influence on the climate of this region. The rainy season extends from October to March and will be referred to, hereafter, as extended winter. During the peak of this season (November to February), most precipitation is generated as a result of low pressure weather systems being steered southward during mid-latitude blocking episodes (Ward et al., 1999).

The rainy season is of vital importance for the country. The great fear regarding climate change is the possible reduction of this rainy season. On the other hand, extended winter rains can be very violent and flooding is also a concern when climate change is investigated. This is why we concentrate the study on extended winter precipitation, in contrast to most climate studies of the region that have typically examined first temperature, then winter and summer precipitation (e.g., Jacob et al., 2007).

Before going into details of the precipitation over Morocco, we need to investigate the main engine of the extended winter precipitation. The large-scale circulation is examined first through the mean sea level pressure (SLP) field on a domain covering the extratropical North Atlantic, Western Europe and north-western Africa (80 °N-20° N, 90° W-30° E). Extended winter (ONDJFM) mean SLP simulated by the model is compared with the ECMWF reanalysis ERA40 (Uppala et al., 2005) for the same period (1971-2000). Fig. 2 compares the SLP field for the model and ERA40. The centre of the Icelandic low is correctly located although the central pressure is slightly lower in the ERA40. The Azores high is well estimated but it is weaker and shifted eastward in the model simulation. When comparing December-February (DJF) means (not shown), this new version of the model is better than Version 3 (Gibelin and Déqué, 2003) which shifted the Icelandic low eastward and made it too deep. The Azores high was overestimated inducing errors reaching 4 hPa over Morocco. If the circulation were stationary as shown by Fig. 2, the Azores high would prevent any substantial precipitation systems from reaching northern Morocco. It is therefore essential that the model reproduces the intraseasonal and interannual climate variability. In addition, the atmosphere does not merely evolve through a season around its mean state, but spends more time around a few characteristic recurrent large-scale states, called weather regimes, with specific consequences for local weather (Plaut and Simonnet, 2001). It is then interesting to assess how the model is able to simulate correctly the four main classical weather regimes over the region (Vautard, 1990). We use for such an approach the 500 hPa geopotential height (Z500) over the same domain as for mean SLP.

a- Low and high frequency variability

The pattern of low frequency variability (LFV) is examined through an EOF analysis of daily values. The variability ranging from 6 to 90 days has been first isolated by applying a digital bandpass filter (Doblas-Reyes and Déqué, 1997) to daily time series. The first mode of variability explains 15.7% of the total Z500 variance for ERA40 and 15.8% for the model simulation. Fig. 3 indicates a teleconnection between Greenland and midlatitudes. The model reproduces well the position of centers but overestimates the eastern maximum and underestimates the western minimum and maximum, so the main pattern of low frequency variability is slightly different in the model than in ERA40, although both patterns can be related to the NAO index.

To assess the ability of the model to simulate high frequency variability (HFV) and the associated synoptic activity, variability ranging from 2 to 6 days has been isolated in the same

way as for the LFV. An EOF analysis is not best suited in this case because the main phenomena are non-stationary and the first two eigenvectors degenerate. Fig. 4 illustrates the extended winter standard deviation of the 2-6-day bandpass filtered geopotential height (sometimes referred to as depicting the storm tracks) for the model simulation (top) and ERA40 (bottom). The model reproduces well the position of the maximum but underestimates the high frequency variability. Variability ranging from 6 to 90 days is also underestimated by the model.

b- Weather regimes

The centroids of weather regimes are obtained by applying the dynamical cluster algorithm of Michelangeli et al. (1995) to the ERA40 geopotential height (Z500) for the period 1958-2001 (Sanchez-Gomez et al., 2008). The use of a longer period ensures the robustness of the centroids as well as their stability. To classify the daily Z500 data of the ERA40 and of the model simulation (for the study period 1971-2000) into the four regimes, the seasonal cycle has been first removed (for each extended winter day we remove the mean of this calendar day calculated over the entire period) and the data have been filtered by removing periods smaller than 15 days. Filtered anomaly fields for the model simulation and ERA40 are then both projected onto the first 15 EOFs of ERA40, which explain more than 88% of the total variance over the study period. Classification of daily data has been done using the euclidean distance calculated, for each day, between the regime centroids and projected fields. Fig. 5 illustrates the anomaly composites obtained by the model simulation (left-hand column) and ERA40 (right-hand column) for the four regimes which are (from top to bottom): Zonal (ZO), Blocking (BL), Greenland Anticyclone (GA) and Atlantic Ridge (AR). Similarities between the composites of the model and the corresponding ones in ERA40 are obvious although the minima of ZO and GA are underestimated by the model. The mean frequency of the four regimes and their interannual standard deviations for both the model and ERA40 are also shown in Fig. 5. ZO is the most dominant regime for both the model and ERA40. The frequencies and the interannual variability are generally well reproduced by the model.

4. Probability distribution function of precipitation

One of the major concerns of climate change in Morocco (and more generally in North African and Mediterranean countries) is the possible change of precipitation characteristics and related extreme events. Observations show that total precipitation amounts have generally decreased since the 1960s. Knippertz et al. (2003) showed that the Mediterranean region of Morocco (here represented by the station of Oujda) has exhibited a pronounced decrease of precipitation since the 1970s. Morocco has experienced drought events which have had negative impacts across socio-economic sectors and the whole national economy (Mansouri, 2004). The country has also been confronted with flooding events, resulting in loss of life and significant damage; for example Mohammadia in November 2002 and Al Houceima in November 2003.

We focus on daily precipitation for the region north of the Moroccan Sahara desert; a region covering the most important agricultural zones and the main rainy regions of Morocco. Fourteen stations are concerned (Fig. 1 indicates the location of such stations, entire names of the stations are given in Tab. 1). The stations have been clustered into five rainfall regions by Ward et al. (1999) and El Hamly et al. (1997), but here we will be working on individual stations since we are interested in precipitation extremes. The months from April to September in Morocco are generally dry and the limited precipitation received is mainly convective: the GCM we use here, as well as the density of our observation network, are not very well suited to studying this period of the year. In addition, none of the recent IPCC

scenarios indicates that this season could become wet over the region in the future; on the contrary GCM simulated rainfall would decrease in the southern Mediterranean basin. As mentioned above, we will concentrate on the extended winter which coincides with the agricultural season.

GCM precipitation output is for grid boxes, whereas observations are point station values. The model precipitation then corresponds to an area-mean value over a model grid box. One appropriate way to compare observations and GCM output can be to apply a spatial averaging of stations on the one hand and the GCM output on the other hand over sub regions as in Déqué (2007), or through the use of an area equivalent to grid boxes as in Huntingford et al. (2003) and Durman et al. (2001). However, this averaging method requires an observation network that is denser than GCM grid, as is the case for traditional GCMs with mesh size of about 200-300 km, but not for our study. In addition, spatial averaging tends to mask extreme phenomena, which are one important concern of our study. Hence, we compare stations with the output for the nearest grid point (center of the nearest grid box). Daily data observations in the 14 stations are issued by the Direction de la Météorologie Nationale (Moroccan national meteorological service). The data set contains about 0.04 % of missing values for the study period.

Interannual variability is documented through the variability coefficient (i.e., the standard deviation divided by the mean) calculated for the annual (extended winter) total amounts. Tab. 1 shows the variability coefficient for the observations (at each individual station) and for the model simulation (the nearest grid point to each station). It can be concluded that the model estimates rather well the interannual variability of precipitation.

To compare the statistical distributions of the observed and simulated daily rainfall amounts at the 14 locations, a natural way would be to plot on the same diagram the empirical probability distribution function (PDF) from the observed and simulated samples. This quantity is harder to estimate than the simple mean, and the resulting curves are noisy, unless a special smoothing technique such as the kernel method is applied. The cumulative density function (CDF) is then preferred. It is obtained here by the 99 percentiles, which are calculated by ranking daily values. We looked at the CDF for each weather regime separately (percentiles are calculated for the days of a given regime) and for the entire daily time series. The daily rainfall observed (simulated) data is sampled according to the regimes of corresponding observed (simulated) Z500 data.

Percentile mean bias calculated for each regime and for each station (not shown) shows that values differ depending on the regimes. BL, which is the most rainy regime for our region (both in terms of numbers of rain days and mean amounts) has the higher absolute values of mean bias. ZO has the lowest bias (less than 0.8 mm/day). This result is not surprising since ZO is most associated with low precipitation and it is the least rainy regime if we exclude the stations of Oujda and Midelt.

Fig. 6 presents quantile-quantile (q-q) plots corresponding to the four regimes; each point is obtained by the k-th percentile of the simulation (abscissa) and the k-th percentile of the observation (ordinate). If the curve follows the diagonal (dotted line), the two CDFs are identical. Although the results differ between the regimes, a general result is that the model is too dry in the Atlantic coastal stations during all four weather regimes. This can be explained by the model underestimation of the HFV (storm tracks). Nevertheless, one can see that the model performs well in the centre of the area.

5. Extreme events

In addition to the CDF we will focus here on the extreme events of precipitation: high precipitation and drought. The STARDEX European project (Goodess, 2003) proposes a set

of 33 indices related to precipitation. As high precipitation indices we use the 90th percentile of rain day amounts (pq90) and the fraction of total precipitation from events above this percentile (pfl90). The 90th percentile has been computed for the whole 30-year period rather than on an annual basis, for a better consistency with Section 4. The drought aspect is examined through the maximum number of consecutive dry days (pxcdd) and the mean dry spell length (psmed) indices. The STARDEX threshold has been reduced from 1 mm/day to 0.5 mm/day. This threshold discriminates a wet day from a dry day. For the climate of Morocco, such a lower value is a better choice. Figs. 7, 8 display the indices for the observation (bars) and the model simulation (circles).

The model underestimates the 90th percentile for all stations, except for Fès, Meknès and Midelt where it performs well (Fig. 7, top panel). The fraction of total precipitation from events above the 90th percentiles is rather well estimated by the model, with some modest exceptions (Fig. 7, bottom panel). The highest difference is 9% in Agadir station. The model underestimation of the 90th percentile can be linked with the general trend of the model to underestimate total amounts.

Dry spell duration is generally slightly longer in the model simulation than in observation (Fig. 8), though the model performs better in the north than the south, where the dry spell persistence is climatologically larger. The model also reproduces well the dry spell duration in the centre of the area. Compared to the longest dry spell statistic, the model generally performs better for the mean dry spell length (Fig. 8, top panel).

6. Conclusion

This study is a first step toward regional climate assessment over Morocco. A model is not exact or wrong. It is just more or less accurate, and this often depends on the questions we wish to investigate with the model.

The model we have considered here reproduces well the spatial characteristics of the four classical North Atlantic weather regimes, as well as their frequency. The magnitude of the interannual variability of the weather regimes frequencies and extended winter precipitation is also well simulated. This ability of the model could not be related to trends since the model does not show significant trends either for regime frequencies or for precipitation during the thirty year period. The high frequency variability (storm tracks) is however underestimated, resulting in the general attitude of the model to be too dry along the Atlantic coast. The model is also too persistent with too long dry spells (especially in the south). Nevertheless, it is able to produce heavy rainfall as well as long dry periods in the centre of the area; this can be explained by a better representation of surface topographic effects by this RCM model.

The weather regime approach shows that the model behavior is regime dependent. The biases in precipitation CDF differ from one weather regime to another.

RCM simulations are not perfect reproductions of reality. To allow model data to enter impact models most effectively, the use of model correction methods can be useful. Déqué (2007) has proposed a method for postprocessing model data using quantile-quantile plots. Extending this method to simulated data according to weather regimes will be done in future work. It is also planned to carry out a similar experiment with the IPCC-A1B forcing for the middle of the twenty-first century, comparing model response with that of other regional models over the region (e.g. ENSEMBLES regional scenarios).

Acknowledgements

The authors are indebted to the Moroccan meteorological service for providing station daily data, to ECMWF for providing ERA40 reanalyses and to STARDEX for providing a list of indices widely adopted and a fortran library to compute them. Special thanks to Emilia Sanchez-Gomez for computing centroids of Atlantic regimes and for useful advices. Special thanks also for Dr. Neil Ward for fruitful comments. This study was partly supported by European Commission FP-6 project ENSEMBLES (GOCE-CT-2003-505539).

References

- Cubasch U, Waszkewitz J, Hegerl G, Perlwitz J (1995) Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Clim Change* 31: 273-304
- Déqué M (2007) Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change* 57:16-26
- Déqué M, Marquet P, Jones RG (1998) Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Clim Dyn* 14: 173-189
- Déqué M, Piedelievre JPh (1995) High resolution climate simulation over Europe. *Clim Dyn* 11: 321-339
- Doblas-Reyes FJ, Déqué M (1998) A flexible bandpass filter design procedure applied to midlatitude intraseasonal variability. *Mon Wea Rev* 126: 3326-3335
- Duffy PB, Govindasamy B, Iorio JP, Milovich J, Sperber KR, Taylor KE, Wehner MF, Thompson SL (2003) High-resolution simulations of global climate, part 1: present climate. *Clim Dyn* 21: 371-390
- Durman CF, Gregory JM, Hassell DC, Jones RG, Murphy JM (2001) A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates. *Q J R Meteorol Soc*, 127: 1005-1015
- El Hamly M, Sebbari R, Portis DH, Ward MN, Lamb PJ (1997) Regionalization of Moroccan precipitation for monitoring and prediction. *Proc. of the 7th Conference on Climate Variations of the Amer Meteor Soc*, Long Beach, CA, USA, Feb 2-7: 354-357
- Fox-Rabinovitz M, Coté J, Dugas B, Déqué M, McGregor JL, Belochitski A (2008) Stretched-Grid Model Intercomparison Project: Decadal Regional Climate Simulations with Enhanced Variable and Uniform-Resolution GCMs. *Meteorology and Atmospheric Physics* (in press)
- Frei C, Christensen JH, Déqué M, Jacob D, Jones RG, Vidale PL (2003) Daily precipitation statistics in regional climate models: evaluation and intercomparison for the European Alps. *J Geophys Res* 108:1-19
- Gibelin AL, Déqué M (2003) Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dyn* 20: 327-339
- Gibson R, Kallberg P, Uppala S, Hernandez A, Nomura A, Serrano E (1997) Re-Analysis Project Report Series No. 1, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Reading, UK
- Giorgi F (1990) Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J Climate* 3: 941-963
- Goodess C (2003) STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions: STARDEX. European Geophysical Union Information Newsletter 6, available on line at <http://www.the-eggs.org/articles.php?id=37>
- Huntingford C, Jones RG, Prudhomme C, Lamb R, Gash JHC, Jones DA (2003) Regional climate-model predictions of extreme rainfall for a changing climate. *Q J R Meteorol Soc* 129: 1607-1621
- IPCC, 2007a: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

- IPCC, 2007b: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.
- Jacob D (2001). A note to the simulation of annual and interannual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteor Atmos Phys* 77: 61-74
- Jacob D, Bärring L, Christensen OB, Christensen JH, de Castro M, Déqué M, Giorgi F, Hagemann S, Hirschi M, Jones R, Kjellström E, Lenderink G, Rockel B, Sánchez ES, Schär C, Seneviratne SI, Somot S, van Ulden A, van den Hurk B (2007) An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. *Climatic Change* 81: 31-52
- Jones R. G., Murphy JM, Noguer M (1995) Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I. Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Q J R Meteorol Soc* 121: 1413-1449
- Knippertz P, Christoph M, Speth P (2003) Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorol Atmos Phys* 83: 67–88
- Mansouri B (2004) Impact of drought and fiscal policy on private consumption, private investment and economic growth in Morocco: an empirical analysis. Workshop on The Prospects of Arab Economic Cooperation To Boost Savings and Investment Alexandria, Egypt, June 22-24, 2004. The Arab Academy for Sciences and Technology and The Islamic Research & Training Institute (IRTI) of the Islamic Development Bank (IDB)
- McGregor JL (1996) Semi-Lagrangian advection on conformal-cubic grids. *Mon Wea Rev* 124: 1311-1322
- Michelangeli PA, Vautard R, Legras B (1995) Weather Regimes: Recurrence and Quasi Stationarity. *J Atmos Sci* 52: 1237-1256
- Paeth H, Born K, Podzun R, Jacob D (2005) Regional dynamical downscaling over West Africa: model evaluation and comparison of wet and dry years. *Meteorologische Zeitschrift* 14: 349-367
- Plaut G, Simonnet E (2001) Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Clim Res* 17: 303-324
- Roeckner E, Arpe K, Bengtsson L, Christoph M, Claussen M, Dümenil L, Esch M, Giorgetta M, Schlese U, Schulzweida U (1996) The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate. Report No. 218, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
- Rummukainen M, Räisänen J, Bringfelt B, Ullerstig A, Omstedt A, Willén U, Hansson U, Jones C (2001) A regional climate model for northern Europe: model description and results from the downscaling of two GCM control simulations. *Clim Dyn* 17: 339-359.
- Sanchez-Gomez E, et al. 2008, Multi-model signature of the Indian and Western Pacific oceans warming in the occurrence of the North Atlantic weather regimes. Submitted to GRL.
- Tegen I, Hollrig P, Chin M, Fung I, Jacob D, Penner J (1997) Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results. *J Geophys Res* 102: 23895–23915

- Terray L, Demory ME, Déqué M, de Coetlogon G, Maisonnave E (2004) Simulation of late-twenty-first-century changes in wintertime atmospheric circulation over Europe due to anthropogenic causes. *J Climate* 17: 4630-4635
- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ, Andrae U, da Costa Bechtold V, Fiorino M, Gibson JK, Haseler J, Hernandez A, Kelly GA, Li X, Onogi K, Saarinen S, Sokka N, Allan RP, Andersson E, Arpe K, Balmaseda MA, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Caires S, Chevallier F, Dethof A, Dragosavac M, Fisher M, Fuentes M, Hagemann S, Hólm E, Hoskins BJ, Isaksen L, Janssen PAEM, Jenne R, McNally AP, Mahfouf J-F, Morcrette J-J, Rayner NA, Saunders RW, Simon P, Sterl A, Trenberth KE, Untch A, Vasiljevic D, Viterbo P, Woollen J (2005) The ERA-40 re-analysis. *Q J R Meteorol Soc* 131: 2961-3012
- Vautard R (1990) Multiple Weather Regimes over the North Atlantic: Analysis of Precursors and Successors. *Mon Wea Rev* 118: 2056-2081
- Ward MN, Lamb PJ, Portis DH, El Hamly M, Sebbari R (1999) Climate Variability in Northern Africa: Understanding Droughts in the Sahel and the Maghreb. In: Navarra A (ed) *Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability*. Springer Verlag, Berlin, pp 119-140
- Wild M, Ohmura A, Cubash U (1997) GCM simulated surface energy fluxes in climate change experiments. *J Clim* 10: 3093-3110

Table legends

Tab. 1: Variability coefficients of annual (extended-winter) total amounts of precipitation for the 14 stations: model and observation.

Figure captions

Fig. 1: Map of northern Morocco, with location of the 14 stations and of the model grid-points (land only). Grid-point elevation is indicated as follows: black dot is under 1000 m, grey dot is between 1000 m and 2000 m, open circle is above 2000 m.

Fig. 2: Mean sea level pressure in extended winter (ONDJFM) for the model (a) and ERA40 analysis (b). Contour interval is 3 hPa, values below 1015 hPa are shaded.

Fig. 3: First EOF of 6-90-day bandpass filtered 500 hPa height in extended winter for the model (a) and ERA40 analysis (b). Contour interval is 20 m; 0-contour omitted, shading above 10 m.

Fig. 4: Standard deviation of the 2-6-day bandpass filtered 500 hPa height in extended winter for the model (a) and ERA40 (b). Contour interval is 10 m, values above 30 m are shaded.

Fig. 5: Composites of 500 hPa height anomalies in extended winter for the model (left-hand column) and ERA40 (right-hand column) for the four weather regimes. ZO: Zonal; BL: Blocking ; GA: Greenland Anticyclone; AR: Atlantic Ridge. Numbers shown by each panel are the mean frequency of the regime (Thick number) and standard deviation of the annual frequency (Thin number).

Fig. 6: Quantile-quantile plot of extended-winter precipitation (mm/day) for the 14 Moroccan stations; model (x-axis) versus observation (y-axis). ZO: dash-dot line, BL: Thick line, GA: dashed line, AR: thin line.

Fig. 7: STARDEX indices for extended winter; the long-term 90th percentile of rain day amounts (pq90, upper panel) and the fraction of total precipitation from events above this percentile (pfl90, lower panel) for the 14 stations. Observation (bars) and model (circles).

Fig. 8: STARDEX indices for extended winter; the mean dry spell length (psmed, upper panel) and the maximum number of consecutive dry days (pxcdd, lower panel) for the 14 stations. Observation (bars) and model (circles).

<i>Stations</i>	<i>Model</i>	<i>Observation</i>
Tanger (TN)	0.5	0.4
Oujda (OJ)	0.4	0.4
Kenitra (KN)	0.4	0.4
Rabat (RB)	0.4	0.4
Fès (FE)	0.3	0.3
Meknès (MK)	0.4	0.3
Casablanca (CS)	0.4	0.4
Ifrane (IF)	0.4	0.3
Safi (SA)	0.4	0.5
Midelt (MD)	0.6	0.6
Essaouira (ES)	0.5	0.6
Marrakech (MR)	0.4	0.4
Agadir (AG)	0.6	0.6
Ouarzazate (OR)	0.8	0.7

Table 1

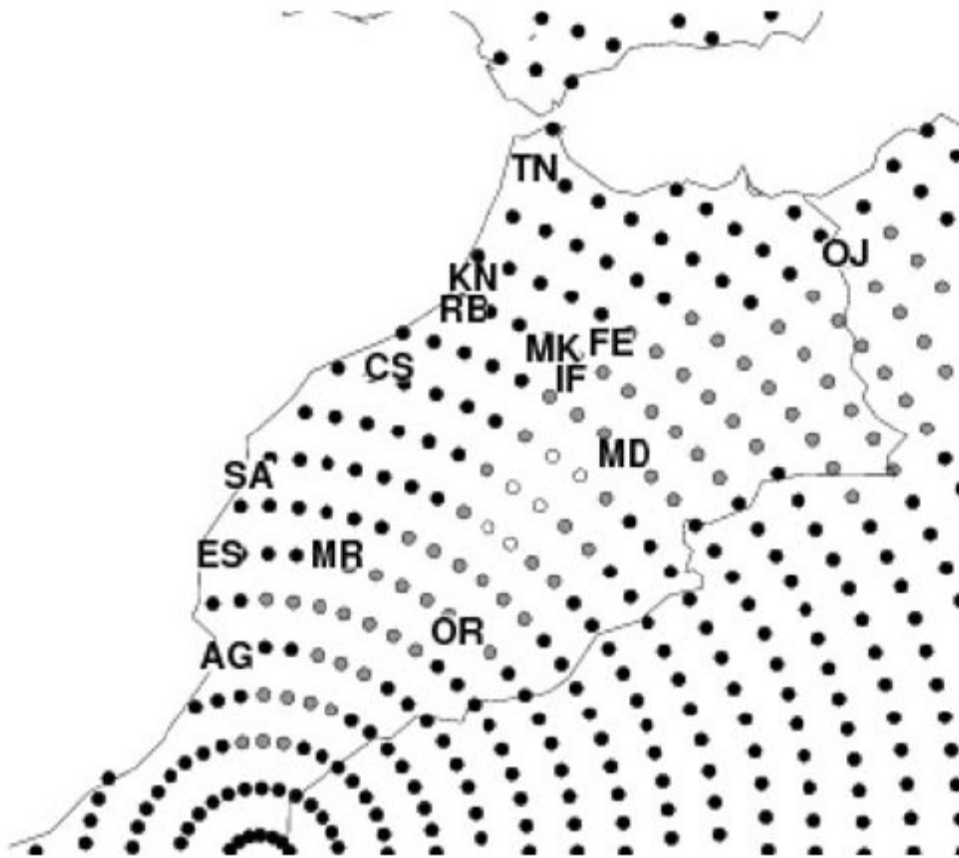
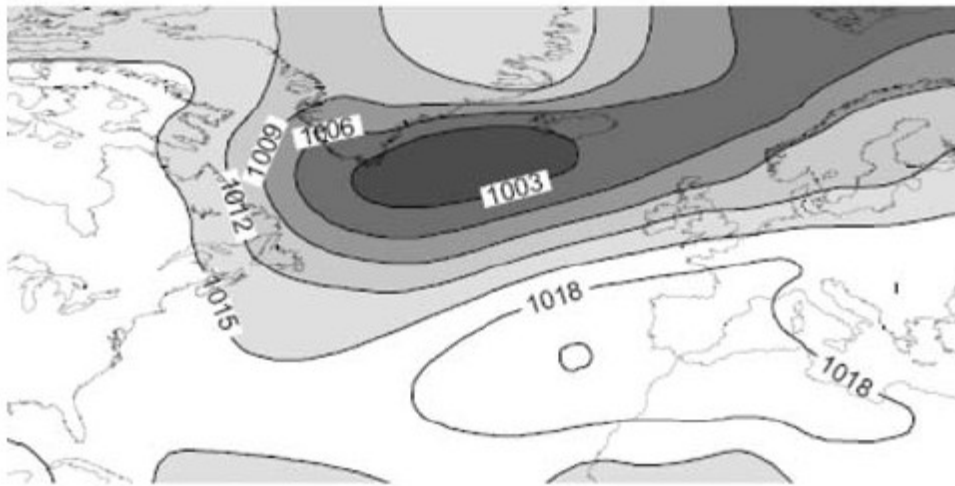


Fig. 1

(a)



(b)

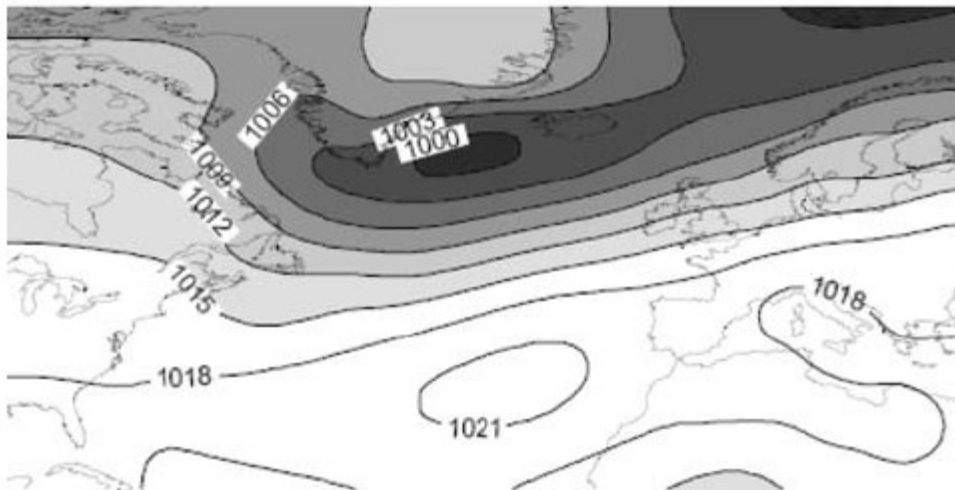


Fig. 2

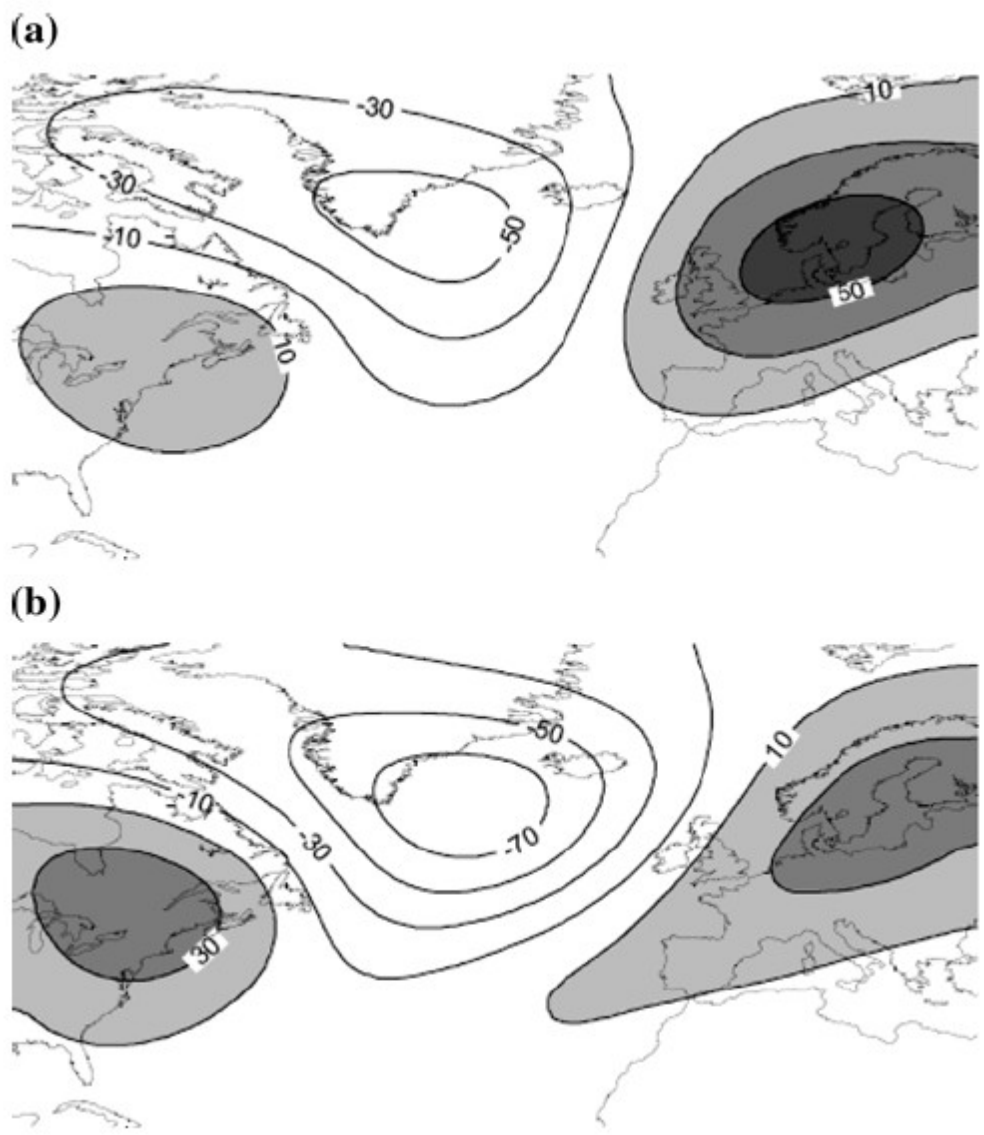


Fig. 3

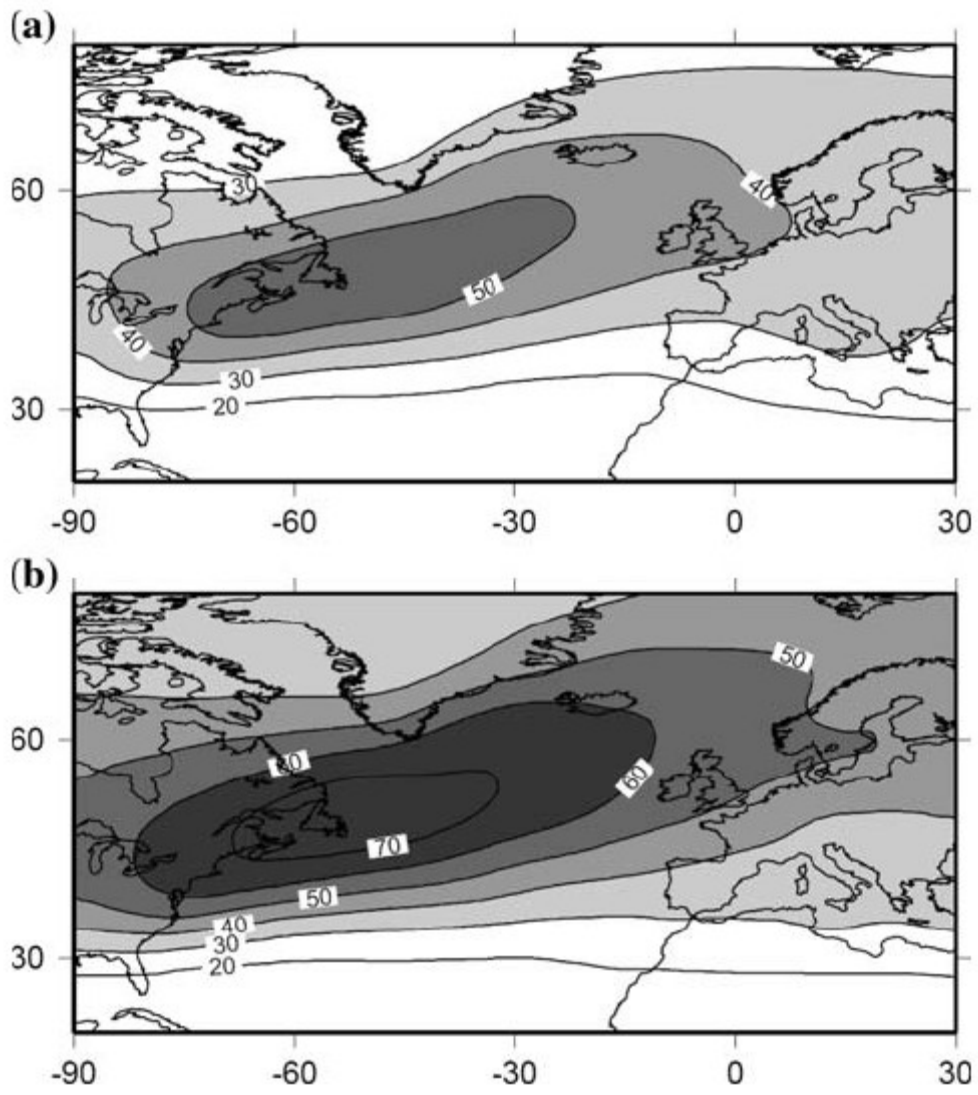


Fig. 4

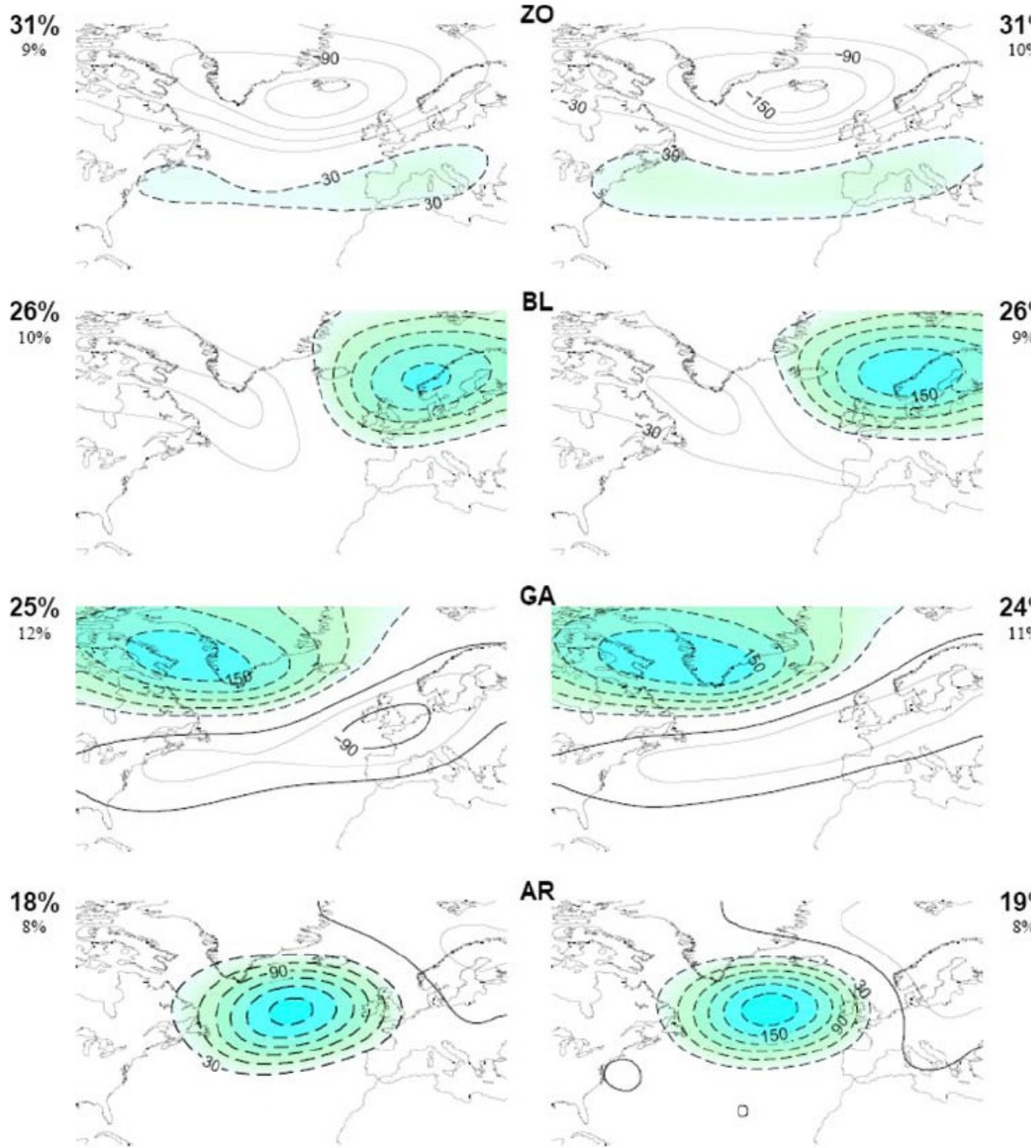


Fig. 5

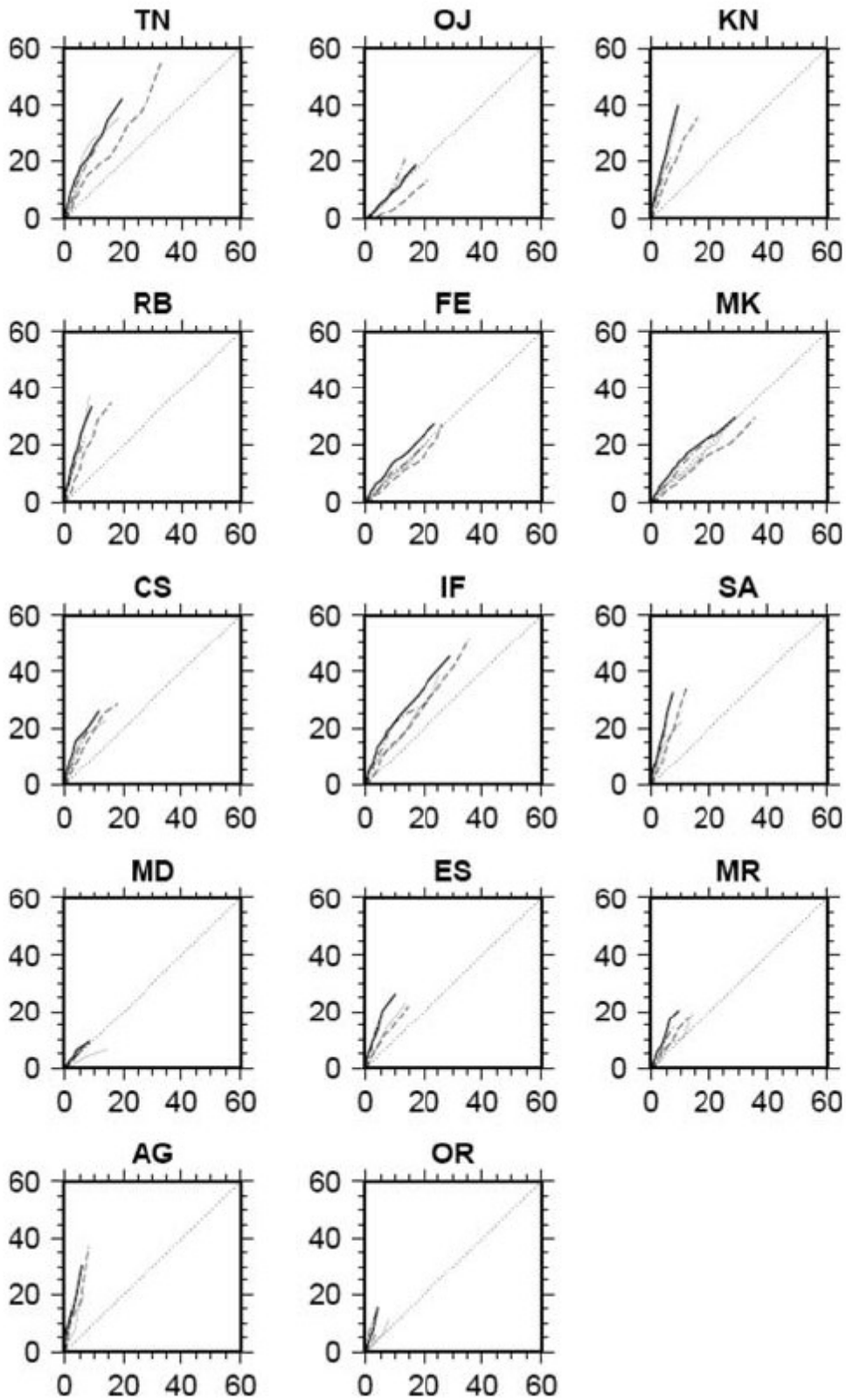


Fig. 6

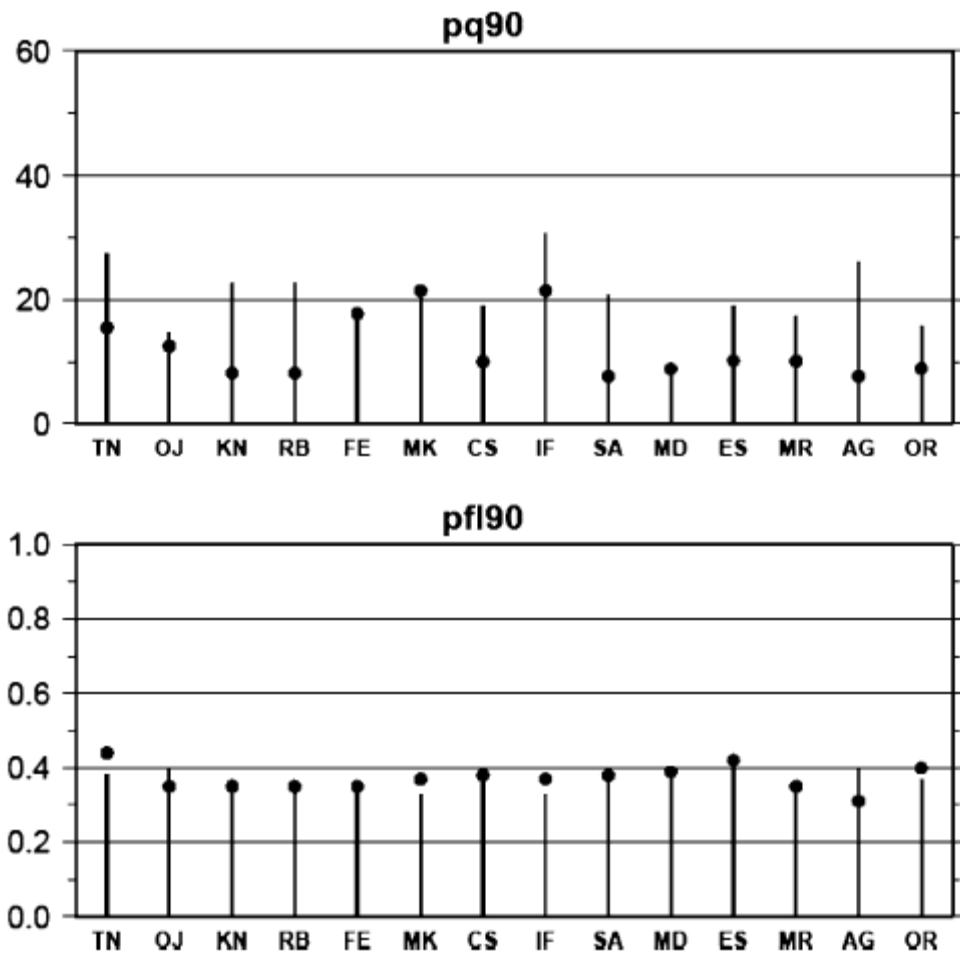


Fig. 7

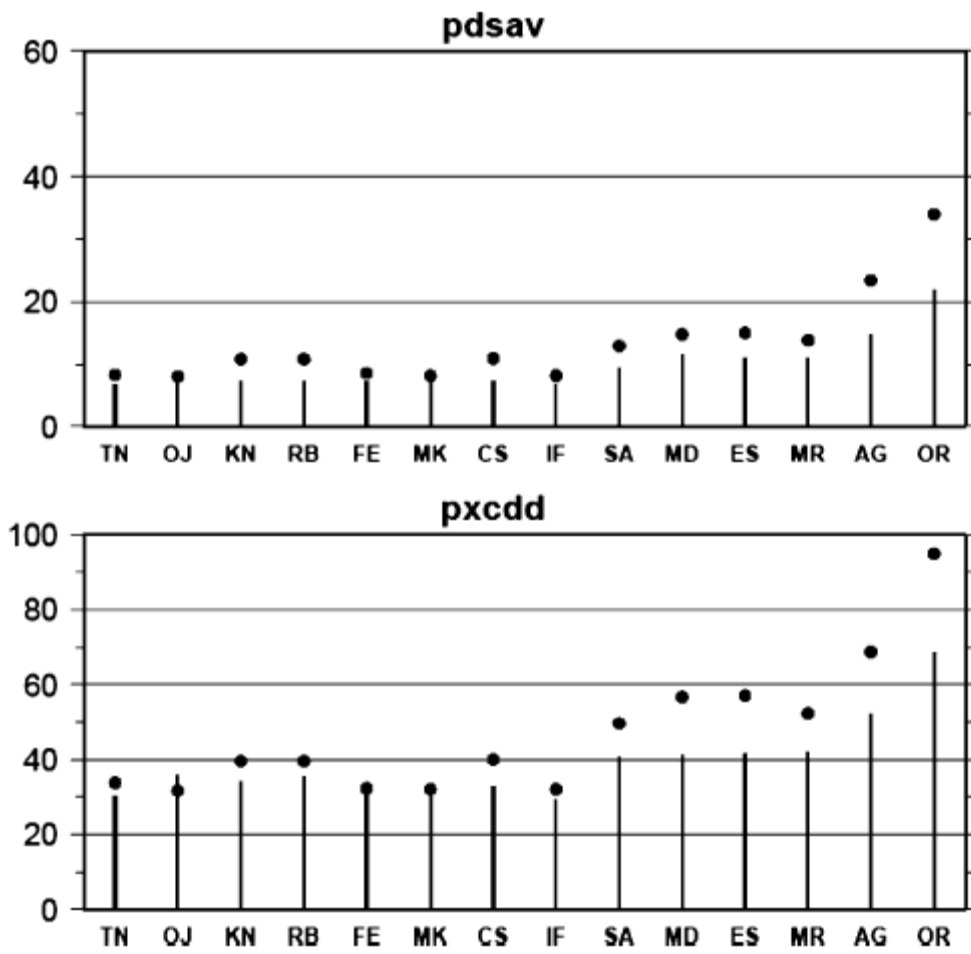


Fig. 8

3. Projections futures

« Warming is very likely to be larger than the global annual mean warming throughout the continent and in all seasons, with drier subtropical regions warming more than the moister tropics. Annual rainfall is likely to decrease in much of Mediterranean Africa and the northern Sahara, with a greater likelihood of decreasing rainfall as the Mediterranean coast is approached. »

GIEC, Regional Climate Projections 2007 (chapitre 11)

Cette conclusion du GIEC distingue bien le continent africain par son réchauffement qui serait, tenant compte des tendances actuelles et futures des émissions de GES, plus accentué qu'à l'échelle globale et ceci indépendamment de la saison considérée. Elle distingue aussi et particulièrement sa région méditerranéenne dont les précipitations diminueraient, selon les projections faites pour la fin du siècle, en termes de cumuls annuels.

Si à l'échelle globale, et selon le quatrième rapport du GIEC, les scénarios climatiques indiquent pour le 21^{ème} siècle une légère augmentation des précipitations, les changements aux échelles régionales sont parfois très contrastés. Les précipitations augmentent ainsi aux hautes latitudes et de façon générale au niveau de la ZCIT tandis qu'elles ont tendance à diminuer dans les régions subtropicales aussi bien en été qu'en hiver. Ce contraste spatial traduit un certain accord entre les différents modèles climatiques dans la simulation du renforcement des cellules convectives de Hadley dans un climat plus chaud. Il en résulte une augmentation de la pluviosité dans la branche ascendante de la cellule de Hadley près de l'équateur et un assèchement des zones de subsidence qui sont dans la plupart des zones à climat semi-aride (Le Treut, 2003).

La région méditerranéenne fait partie des zones où il y a le plus de consensus entre les modèles en ce qui concerne la diminution dans le futur des cumuls pluviométriques. En particulier, l'Afrique du nord subirait d'ici la fin du siècle courant, selon les projections, des baisses de 15% à 30% en hiver et à l'échelle annuelle, et de 20% à 50% en été (Fig. 3.1). Cette évolution vers l'assèchement serait liée au déplacement de la trajectoire des systèmes perturbés vers le nord, accompagné de changements dans la configuration des vents, des précipitations et des températures. Les résultats du GIEC concernent bien d'autres aspects de la pluviométrie comme les événements extrêmes, le nombre de jours secs et l'intensité de précipitation. Cependant, la résolution des modèles du GIEC, ne permet pas d'avoir suffisamment de détail régional. Dans le cas du Maroc par exemple, les mêmes changements de précipitation hivernale sont projetés pour l'extrême nord-ouest et le sud-est.

Certaines études, quoique très peu nombreuses, ont évalué les scénarios futurs issus de modèles à aire limitée tournés à haute résolution sur le Maroc. Il s'agit en particulier de Born et al. (2008) qui projettent, en utilisant la classification de Köppen, à l'aide du MRC REMO (Jacob, 2001) tourné avec une résolution de 0.5°, une évolution vers un climat plus sec et plus chaud dans le futur (2036-2050 par rapport à 2086-2000). Paeth et al. (2005) ont auparavant abordé dans leur étude, à l'aide du même modèle, le climat du Maroc mais dans un objectif d'analyse de la variabilité.

Si, comme déjà dit dans le chapitre 2, aucune étude antérieure n'a usé d'un modèle à résolution variable comme méthode de réduction d'échelle dynamique appliquée au cas du Maroc, les quelques travaux ayant utilisé les modèles à aire limitée n'ont pas forcément abordé la pluviométrie en terme de plusieurs indices climatiques à la fois et couvrant

différents aspects de la distribution de ce paramètre si important pour les secteurs socio-économiques. Il s'agit en l'occurrence des indices définis dans le chapitre 1 et qui sont : la précipitation moyenne, le nombre de jours humides, le nombre maximal de jours consécutifs secs et le nombre d'événements de fortes précipitations.

Dans ce chapitre nous évaluons les scénarios futurs projetés par la version du modèle ARPEGE-Climat (ARPEGE-RV) décrite et examinée dans le chapitre 2 en termes de différents indices pluviométriques relatifs aux moyennes et aux extrêmes et en termes de températures moyennes.

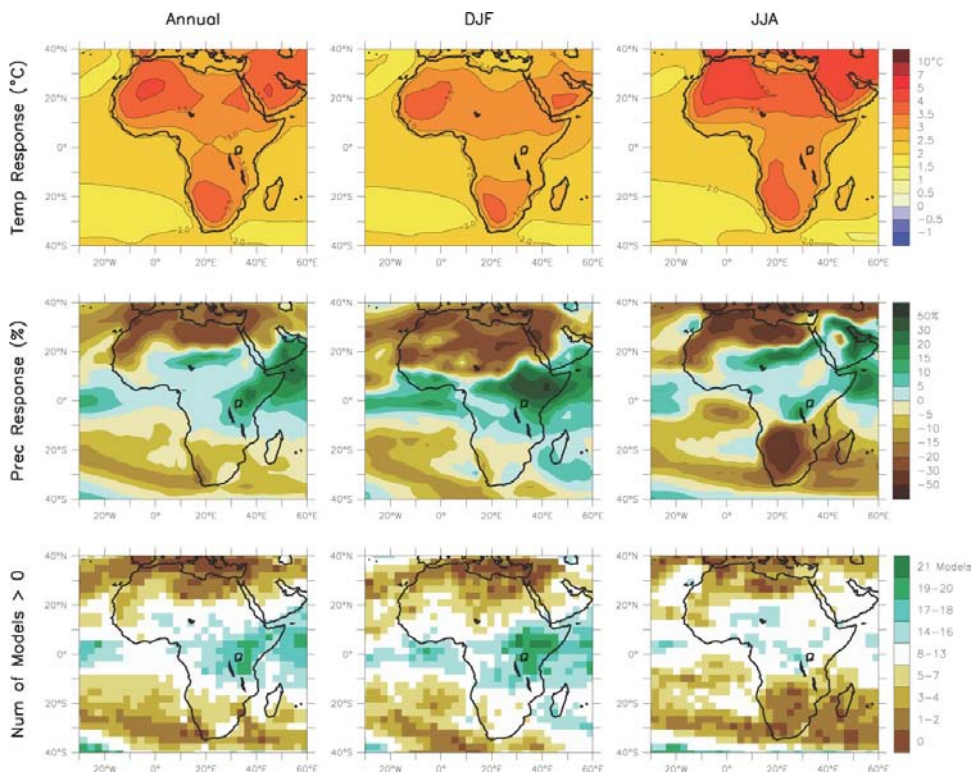


Fig. 3.1 Changements de température (cartes du haut) et de précipitations (cartes du milieu) projetés, selon le scénario SRES-A1B, pour l'Afrique pour la période 2080-2099 par rapport à 1980-1999. Les changements sont moyennés sur 21 modèles du GIEC. Les figures du bas représentent le nombre de modèles projetant une augmentation des précipitations. La colonne 1 représente l'année, la colonne 2 l'hiver et la troisième colonne l'été. Source : GIEC, 2007.

3.1. Description des expériences

A l'aide d'ARPEGE-RV, nous avons élaboré, en plus de la simulation (ARPG-SIM1) qui a servi pour l'évaluation du modèle (cf. chapitre 2), deux simulations de 30 années chacune. La première couvrant la période 1971-2000 est exactement la même que ARPG-SIM1 à la seule différence que le forçage en termes de températures de surface de l'océan, de GES et d'aérosols est issu du modèle couplé océan-atmosphère CNRM-CM3⁵ (Salas-Melia et

⁵ Le modèle CNRM-CM3 de Météo-France utilise comme composante atmosphérique ARPEGE-climat avec une résolution horizontale de 2,8° x 2,8° ; soit environ 320km x 320km. Le modèle atmosphérique est couplé d'une part à un modèle de surface continentale incluant une représentation de la végétation et d'autre part à un modèle

al., 2005) qui est l'un des modèles utilisés pour le quatrième rapport du GIEC. La deuxième simulation couvre la période future 2021-2050 et son forçage est aussi issu du CNRM-CM3.

Le choix de la période 2021-2050 pour horizon n'est pas venu par hasard mais tenant compte de différents facteurs. Pour des fins de programmations socio-économiques, les acteurs de décisions et les spécialistes d'impact manifestent des intérêts particuliers pour les informations climatiques couvrant les horizons les plus proches comme celui de 2015 ou 2020. D'un autre côté, les climatologues et spécialistes de modélisation climatique, avertis sur le fait qu'à des horizons proches la variabilité naturelle, notamment dans le cas des précipitations, est encore dominante et qu'elle n'est pas très bien simulée par les modèles (ce qui augmente la marge des incertitudes liées aux changements climatiques), optent plus pour des scénarios visant la fin du siècle. C'est dans un sens de compromis que nous ciblons donc la période 2021-2050 choisie par le projet européen FP6-ENSEMBLES (noté ENSEMBLES dans ce qui suit).

Vu que nous ne comptons pas aborder, dans cette étude, les projections futures sous différents scénarios d'émission, nous avons opté pour le scénario SRES-A1B (noté dans ce qui suit A1B) qui est un scénario intermédiaire (Fig. 3.2). Ce scénario (SRES, 2000 ; Nakićenović et Swart, 2000) fait partie de la famille de scénarios A1 qui décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide avec une population globale qui plafonne en 2050 et l'introduction rapide de technologies plus efficaces; les grandes régions du monde convergent économiquement et interagissent fortement. Le scénario A1B se distingue des deux autres scénarios de la famille A1 (A1T et A1FI) par l'évolution technologique dans le secteur énergétique. Le scénario A1FI correspond en effet à un recours très intense aux ressources fossiles, A1T a recours rapide et exclusif à des sources non fossiles et A1B correspond à un recours équilibré aux deux sources énergétiques.

Le choix de l'horizon 2021-2050 et du scénario A1B nous permettent aussi d'aborder une partie de la marge des incertitudes entourant le domaine des changements climatiques (voir encadré) en considérant les projections issues d'ARPEGE-VR dans un ensemble de simulations récentes issues de différents MRC et disponibles pour cette période.

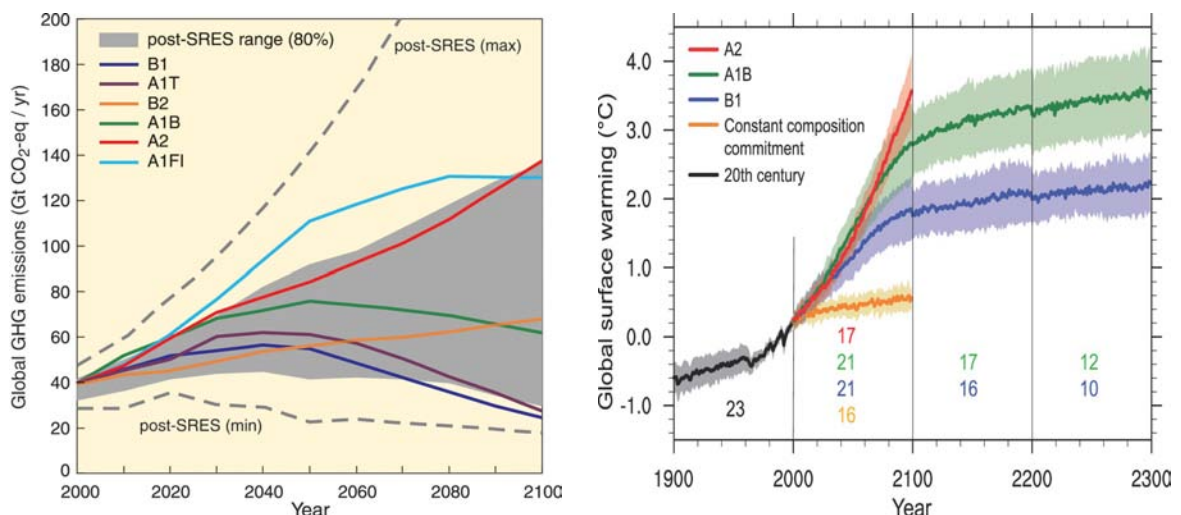


Fig. 3.2 Evolution des émissions de GES et de la croissance de la température globale suivant les scénarios d'émission du GIEC. Source : GIEC, 2007.

océanique qui gère aussi la glace de mer (Salas-Melia et al., 2005). Le modèle océanique OPA (Madec et al., 1998) a une résolution de $2^\circ \times 2^\circ$ avec raffinement près de l'équateur.

Principales sources d'incertitudes liées aux changements climatiques

Quantifier et comprendre de la façon la plus précise possible les changements climatiques aux échelles globale et régionale est un des problèmes majeurs dans le débat actuel sur le changement global. Les projections climatiques restent en effet entachées d'incertitudes qui tiennent à la fois aux caractéristiques des systèmes naturels, qui ne sont pas entièrement prévisibles, et aux choix socio-économiques qui seront faits dans les années à venir (Le Treut, 2003). On distingue ainsi quatre grandes sources d'incertitude (Terray et Braconnot, 2008 ; Magnan et al., 2009) :

- 1 les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols reposant sur des considérations socioéconomiques et donc dépendant des comportements futurs des sociétés et leurs avancées en termes d'innovation dans divers domaines à empreintes sur le climat (énergie, industrie, agriculture, transport, ... etc.) constituent la première et la plus grande source d'incertitude liée aux changements climatiques futurs.
- 2 Si La communauté scientifique s'est attachée à prendre en compte de plus en plus de processus physiques régissant la circulation océano-atmosphérique et les interactions des différentes composantes du système climatique et à augmenter la résolution spatiale des modèles, ceux-ci restent limités par la performance informatique et par le degré de compréhension des phénomènes physico-chimiques. La deuxième source d'incertitude est ainsi liée à la modélisation du climat et elle est inhérente à ce qui n'est pas représenté dans le modèle, soit parce que trop complexe (même si un comportement peut être modélisé, ses effets peuvent ne pas l'être), soit parce que mal connu, et aux simplifications introduites par les paramétrisations physiques.
- 3 Vu les résolutions que permettent les MCGOA et celles nécessaires pour aborder les échelles régionales et locales et les impacts du changement climatique, la réduction spatiale ou descente d'échelle est une étape incontournable. Elle constitue cependant une source supplémentaire d'incertitudes liée notamment aux difficultés de la prise en compte des processus locaux et de leurs interactions (sols, végétation, hydrologie, ...). Les limitations et points forts des différentes méthodes de réduction d'échelle ont été évoquées au chapitre 2.
- 4 Une quatrième source relève des difficultés de prévision sur le long terme de la variabilité climatique naturelle et de sa prédominance à plus court terme sur le signal du changement climatique. Cette variabilité peut être attribuée, par exemple, à la façon dont les transferts de chaleur s'opèrent autour du globe. Elle comprend des changements épisodiques de la circulation océanique et atmosphérique tels que le phénomène El Niño-Oscillation australe (ENSO) et l'oscillation nord-atlantique (ONA).

Toutes ces sources d'incertitudes existant à tous les niveaux du processus d'évaluation des changements climatiques futurs ne doivent pas pour autant conduire à l'inaction, mais plutôt à les prendre en considération et à essayer de les évaluer. Différents moyens permettent en effet de balayer les marges d'incertitudes. A titre d'exemples, les incertitudes aux émissions de GES sont parcourues par l'utilisation de différents scénarios et celles relatives à la modélisation sont réduites à travers l'utilisation de différents modèles climatiques.

Concernant les modèles climatiques, rappelons qu'au moins quatre éléments permettent de leur accorder un crédit certain (Randall et al., 2007). Le premier élément est que ces modèles numériques sont fondés sur des lois physiques établies (comme la conservation de la masse et de l'énergie) et sur une profusion d'observations. Le second tient dans l'excellente capacité des modèles à simuler des aspects importants du climat actuel. Le troisième élément de confiance réside dans l'aptitude de ces modèles à simuler les climats et les changements climatiques passés. Enfin, la complexification graduelle des modèles ne contredit pas les résultats obtenus avec des modèles plus simples. Au cours de plusieurs décennies de développement, les modèles ont systématiquement et sans ambiguïté montré qu'une augmentation des émissions de gaz à effet de serre s'accompagnait d'un réchauffement significatif à l'échelle du globe (Magnan et al., 2009).

3.2. Projections futures de précipitation pour l'hiver étendu

Si l'estimation de l'évolution future des précipitations est essentielle pour une très grande part des planifications socio-économiques, il faut noter que c'est la composante la plus incertaine et la plus difficile à prévoir notamment à cause de la complexité des processus physiques dont elle dépend et de l'importance de sa variabilité interannuelle et saisonnière. S'ajoute à cela la grande variation à l'échelle spatiale ; deux stations aussi proches l'une de l'autre n'observent pas forcément les mêmes cumuls ni la même distribution. Malgré tout cela, les évaluations faites sur les modèles climatiques, montrent leur aptitude à simuler de façon plus ou moins satisfaisante la pluviométrie dans différentes régions du globe. En particulier, la région méditerranéenne est l'une des zones où la plupart des simulations effectuées à partir des différents modèles climatiques parviennent à reproduire globalement correctement la variabilité naturelle actuelle des précipitations en termes de cumuls. Rappelons que l'évaluation d'ARPEGE-RV faite dans le chapitre 2, a démontré la capacité de ce modèle à bien simuler la variabilité interannuelle.

L'importance de l'hiver étendu (octobre à mars) en termes de pluviométrie a été évoquée dans les chapitres précédents. Dans cette partie nous évaluons les projections futures pour cette saison à travers les indices pluviométriques définis dans le chapitre 1 : la précipitation moyenne (pav), le nombre de jours humides (pn05), le nombre maximal de jours consécutifs secs et le nombre d'événements de fortes précipitations.

La Fig. 3.3 montre les changements futurs projetés par ARPEGE-RV pour les quatre indices pluviométriques de l'hiver étendu. L'examen des quatre graphiques fait ressortir un gradient nord-ouest – sud-est bien marqué notamment pour pav, pn105 et pn190. Trois zones se distinguent ainsi ; l'Ouest des montagnes de l'atlas dont le climat s'assècherait dans le futur, l'est du pays où les précipitations ne subiraient pas de changements notables et les régions désertiques du sud qui au contraire tendraient vers une certaine humidification.

L'assèchement de la région couvrant l'ouest des montagnes de l'Atlas, la partie la plus importante de point de vue pluviométrique, se manifesterait à la fois en termes de moyennes et d'extrêmes. Cela constituerait une sorte de continuité de la situation actuelle déjà illustrée et analysée dans le chapitre 1. La baisse de la précipitation moyenne, estimée atteindre 5 à 10%, peut-être liées en partie à une intensification de la phase positive de l'ONA. En effet, selon le quatrième rapport de GIEC (Meehl et al., 2007), la pression réduite au niveau de la mer pourrait selon les projections augmenter durant la saison d'hiver (DJF) dans les régions

subtropicales et aux moyennes latitudes en association avec l'extension vers le pôle de la circulation de Hadley. Cependant, et comme nous le verrons dans le chapitre 4, l'ONA comme composante de la circulation de grande échelle ne serait pas l'unique source de la baisse pluviométrique dans le cas du Maroc ; D'autres facteurs probablement plus locaux auraient une part d'influence.

Afin d'évaluer la significativité de la différence des moyennes des précipitations entre le présent et le futur nous avons appliqué le test de Student aux cumuls pluviométriques de l'hiver étendu. Les cumuls répondent en effet au critère de normalité. A un degré de confiance de 95%, le changement des moyennes n'est cependant pas statistiquement significatif.

Le changement au niveau de la zone à l'ouest des montagnes de l'Atlas toucherait aussi la distribution temporelle de la pluviométrie avec une perte en nombre de jours humides (jours à cumul pluviométrique supérieur à 0.5mm) allant de 4% à 8%, une augmentation du nombre maximal de jours consécutifs secs de l'ordre de 3 à 7 jours et une diminution, quoique relativement faible, du nombre d'événements de fortes précipitations (pnl90). Les changements s'accroîtraient en se déplaçant vers le nord-ouest notamment dans le cas de pnl05 et de pnl90 dont l'augmentation dépasserait les 5%. Les événements extrêmes diminueraient aussi en termes d'amplitude notamment sur les montagnes de l'Atlas avec environ 5% et le désert marocain avec des valeurs jusqu'à 10% (voir annexe F, Fig. F.1). L'augmentation de la sévérité de la sécheresse évaluée à travers pxcdd, quand à elle, se prolonge au quart nord-est du pays et couvre toute la côte méditerranéenne avec des allongements de l'ordre de 3 à 5 jours. Le sud-est et le sud marocains ne connaîtraient pas de changements notables de ce côté. Signalons que le nombre moyen de jours consécutifs secs ne changerait pas de façon notable sur tout le territoire (voir annexe F, Fig. F.2).

Les résultats trouvés dans cette partie sont généralement en conformité avec ceux des études précédentes. En particulier le quatrième rapport du GIEC projette pour la moitié nord du Maroc, sous le scénario A1B, une augmentation du nombre annuel de jours secs pour 2080-2099 par rapport à 1980-1999. Cette évolution est significative selon la majorité des MCG utilisés pour cet aspect ; soit au moins 5 modèles sur 9 (Meehl et al., 2007). Kharin et al. (2007) ont étudié le changement des précipitations extrêmes (considérées à travers les extrêmes annuels des précipitations quotidiennes) dans les simulations de 16 modèles climatiques du GIEC. Ils ont ainsi mis en évidence une certaine aptitude des modèles à simuler relativement correctement les extrêmes au niveau des moyennes et hautes latitudes contrairement aux régions tropicales et subtropicales. Ils projettent, cependant, sous le scénario A1B, une baisse significative des précipitations extrêmes limitée à une partie restreinte des régions subtropicales. Le Maroc, en faisant partie, connaîtrait selon eux des diminutions à la fois de l'amplitude des précipitations extrêmes et de leur durée de retour. Plus récent, Born et al. (2009) projettent, à l'horizon 2031-2050 sous les scénarios A1B et B1 combinés, une augmentation de la fréquence des périodes sèches, considérées à travers l'indice de sécheresse SPI (Standardised Precipitation Index, McKee et al., 1993 ; Gutnam, 1999), pour toute la zone au nord du désert marocain.

En considérant, les changements projetés pour la pluviométrie de l'hiver étendu ; une période de l'année correspondant à l'essentiel de la saison agricole, nous pouvons imaginer d'ores et déjà les incidences que pourrait avoir le changement climatique sur l'agriculture avec un scénario intermédiaire d'émission de GES. En utilisant les scénarios issus de réduction d'échelle statistique, certaines études ont évalué les impacts éventuels du changement climatique sur l'agriculture. A titre d'exemple, Gomme et al. (2009) projettent une diminution, pour le moins non négligeable, des rendements des cultures pluviales.

Afin de compléter notre analyse, nous considérons les changements futurs de la précipitation moyenne pour les quatre saisons classiques et l'année dans le paragraphe suivant. Ceci nous permettra aussi de comparer nos résultats avec ceux des études antérieures ayant porté sur le Maroc et qui se sont focalisées plus classiquement sur les saisons d'hiver et d'été puis l'année.

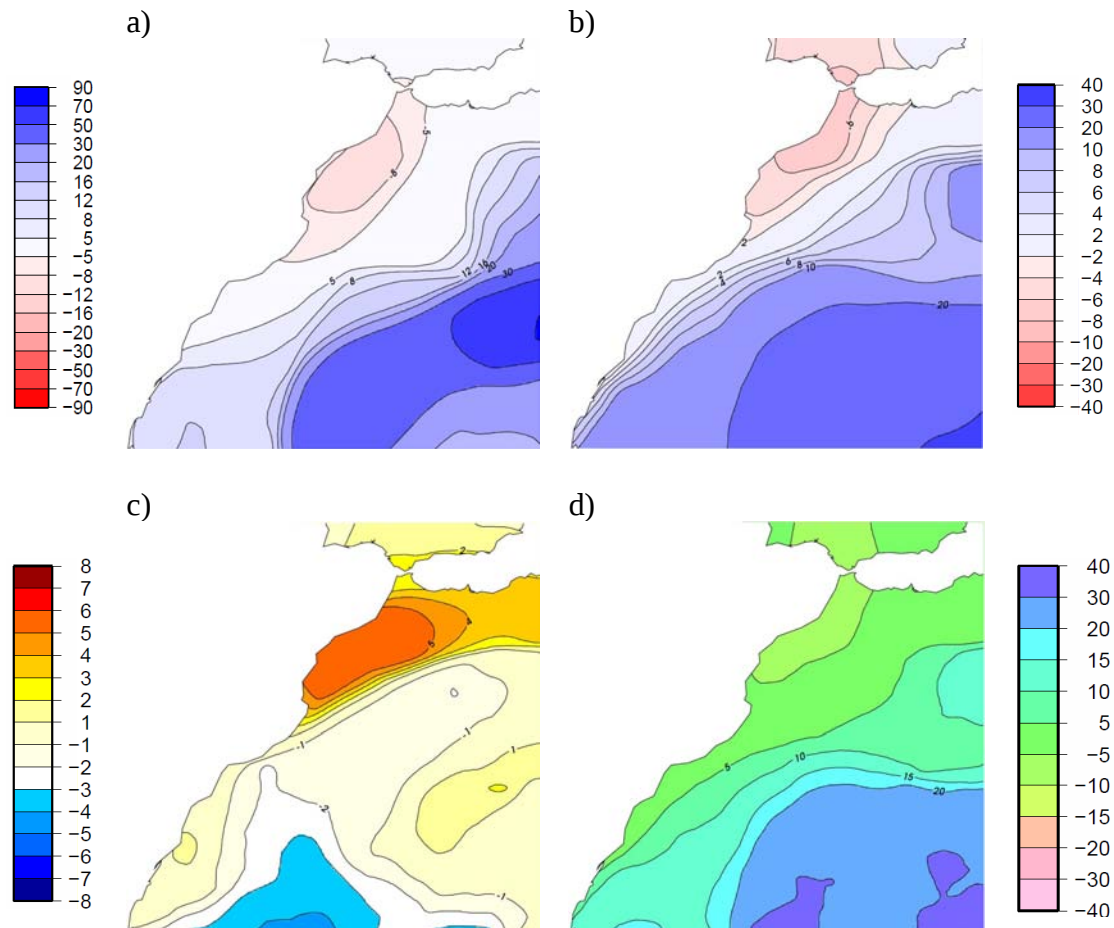


Fig. 3.3 Changements projetés par ARPEGE-RV sous le scénario A1B pour : a) la précipitation moyenne (en %), b) le nombre de jours humides (en %), c) le nombre maximal de jours consécutifs secs (en jours) et d) le nombre d'événements de fortes précipitations (en %). Hiver étendu (octobre à avril). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

3.3. Projections futures de précipitation pour les quatre saisons classiques et l'année

L'analyse des changements projetés par ARPEGE-RV pour la précipitation moyenne (Fig. 3.4) montre que la baisse de la pluviométrie qui concernerait l'hiver étendu vient principalement de la saison d'hiver (décembre-janvier-février). La réduction des précipitations hivernales, généralisée à tout le territoire marocain, serait de 5% à 25% par rapport aux moyennes de la période 1971-2000. Conformément à l'interprétation donnée dans le paragraphe précédent, l'assèchement projeté pour l'hiver pourrait être dû en partie à une augmentation de la persistance de la phase positive de l'ONA. En effet, durant cette saison

l'ONA est négativement corrélée à la pluviométrie marocaine notamment celle de la partie à l'ouest des montagnes de l'Atlas. La baisse de la pluviométrie hivernale est projetée aussi, sous le scénario A1B, par la plupart des modèles du GIEC (quatrième rapport, 2007) pour la fin du siècle courant. Selon Christensen et al. (2007), au moins 99% des simulations s'accordent sur le signe de l'évolution des précipitations en hiver sur le quart nord-ouest du pays et la côte méditerranéenne.

Contrairement à la structure spatiale de l'hiver étendu, la baisse s'adoucit en se déplaçant vers la côte. Ceci est dû aux changements projetés pour le printemps (MAM) et l'automne (SON) et qui permettraient de compenser une part des réductions hivernales à l'est et au sud du pays. En effet, la saison du printemps (MAM) serait plus humide dans le futur sur l'ensemble du territoire; une évolution presque contraire aux tendances actuelles (calculées sur la période 1961-2008; cf. chapitre 1). La hausse des précipitations printanières serait de 5% à 20%. Les précipitations de la saison d'automne ne changeraient pas de façon notable à l'ouest des montagnes de l'Atlas et augmenteraient de 5% à 30% sur le reste du pays. A notre connaissance aucune étude de projections futures sur le Maroc n'a ciblé auparavant les deux saisons du printemps et d'automne, ce qui rend difficile la comparaison de nos résultats avec d'autres et peut mettre en cause leur robustesse, compte tenu de la variabilité interannuelle.

En conformité avec les projections faites pour le bassin méditerranéen dont celles du GIEC, le nord-ouest du Maroc serait plus sec dans le futur durant la saison d'été (JJA); la baisse de la pluviométrie varierait selon ARPEGE-RV entre 5% et 10%. Le reste du territoire, notamment le sud, est censé s'humidifier durant cette saison habituellement sèche. Signalons, cependant que les fortes hausses concernant le désert marocain ne reflètent que des augmentations n'atteignant même pas la dizaine de mm par saison dans la plupart des cas. Selon Christensen et al. (2007), seulement 66% des simulations du GIEC s'accordent sur la réduction des précipitations estivales au Maroc à l'exception de la côte méditerranéenne où il y a un accord à 99% sur la baisse.

A l'échelle annuelle (voir annexe F, Fig. F.3), seules les régions du sud subiraient des augmentations de cumul pluviométrique estimées varier entre 5% et 25%. Le reste du territoire ne connaîtrait pas de changement notable. La baisse des cumuls hivernaux serait en quelque sorte compensée par les augmentations des autres saisons.

En combinant les scénarios A1B et B1, Born et al. (2008) projettent une baisse des cumuls annuels qui pourrait atteindre 25% en 2036-2050 comparativement à 1986-2000. Ils estiment cependant que le signal serait biaisé partiellement par la variabilité interannuelle et décennale. Ils projettent des baisses équivalentes entre l'hiver et l'été alors, que selon leurs résultats, la baisse observée est plus importante en hiver. Ils évoquent en relation avec ce point la sous-estimation par le modèle REMO de la variabilité décennale. Rappelons que les tendances que nous avons calculées dans le chapitre 1 sur les précipitations observées de la période 1961-2008, montrent une prédominance des baisses hivernales; les tendances estivales sont nulles dans la plupart des cas. A un horizon plus lointain que 2021-2050 d'une vingtaines d'années (2041-2070) et en appliquant une méthode de réduction d'échelle statistique aux sorties du MCG à faible résolution HadCM3, Wilby (2007) projette des diminutions des cumuls pluviométriques au niveau de différentes stations météorologiques situées à l'ouest des montagnes de l'Atlas et de façon plus faible au niveau de la région nord-est. Cette baisse, estimée par rapport à 1961-1990, concerne les quatre saisons de l'année et les deux scénarios A2 et B2. Elle varie entre -5% et -30% en hiver et au printemps, et atteindrait 35% en automne sous le scénario A2 et 55% à 66% en été sous les scénarios A2 et B2 respectivement (notamment sur l'extrême nord-ouest; Tanger). Les valeurs importantes des baisses projetées sont probablement dues en partie au choix de la période de référence qui est plus humide par rapport à 1971-2000. A l'horizon 2080-2099 et comparativement à 1980-

1999, selon le quatrième rapport du GIEC les cumuls pluviométriques marocains diminueraient, sous le scénario A1B (Fig. 3.1) de 20% à 30% en hiver et à l'échelle annuelle et de 20% à 50% en été.

Signalons que, comme pour l'hiver étendu, le test de Student appliqué aux cumuls pluviométriques ne révèle pas de significativité à 95% pour les changements issus d'ARPEGE-RV ni pour les quatre saisons classiques ni pour l'année prise entière.

Vu l'importance des réductions projetées par ARPEGE-RV pour la saison d'hiver qui intègre les mois les plus pluvieux de l'année, un focus particulier est porté sur cette saison dans le chapitre 4.

Dans le paragraphe 3.4 nous évaluons les changements projetés pour la température moyenne. Un réchauffement du climat durant la saison d'hiver par exemple accentuerait l'assèchement des sols et rendrait les impacts sur l'agriculture plus néfastes.

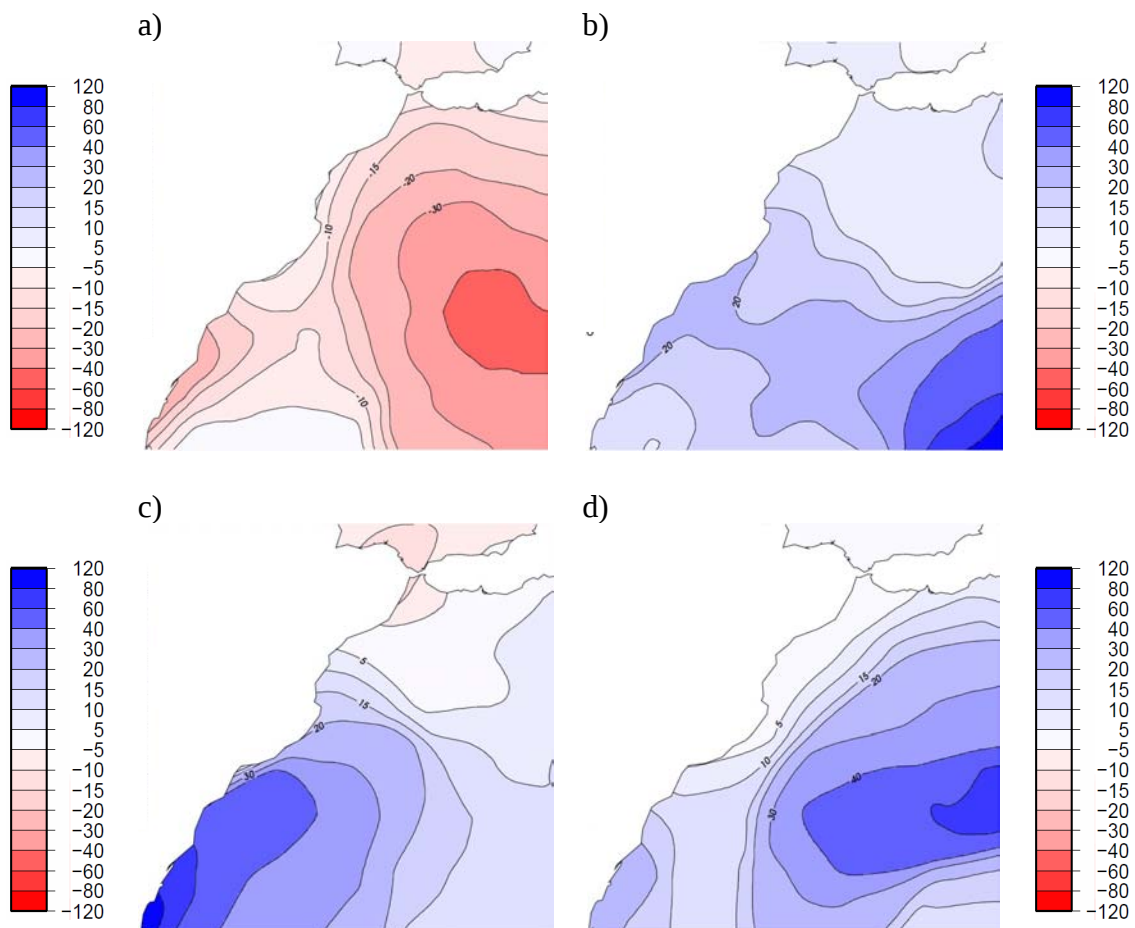


Fig. 3.4 Changements (en %) projetés par ARPEGE-RV pour la précipitation moyenne saisonnière sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000. a) hiver, b) printemps, c) été, d) automne.

3.4. Projections futures de température

La quasi-totalité des MCG s'accorde sur un réchauffement supplémentaire de la planète quel que soit le scénario considéré. Selon le quatrième rapport du GIEC, la température moyenne globale s'accroîtrait d'ici la fin du siècle courant, sous le scénario A1B, d'environ 2.8°C. Le continent africain, comme signalé en introduction et au début de ce chapitre, se réchaufferait davantage et en particulier au niveau de ses régions subtropicales (Fig. 3.1). Sous le scénario A1B et à l'horizon 2046-2065, la température moyenne annuelle augmenterait, comparativement à 1980-1999, au Maroc de 2°C à 3°C (Meehl et al., 2007). Elle augmenterait en fin du siècle (Fig. 3.1) de 2°C à 3.5°C en hiver, de 3°C à 5°C en été et de 3°C à 4°C à l'échelle annuelle.

Les changements projetés par ARPEGE-RV, sous le scénario A1B pour 2021-2050 par rapport à 1971-2000, pour la température moyenne saisonnière sont présentés sur la Fig. 3.5. Le réchauffement serait, bien évidemment et conformément aux différentes simulations antérieures, plus accentué en été qu'en hiver. La structure spatiale diffère suivant les saisons avec notamment un gradient nord-sud en saison froide et une accentuation du réchauffement en fonction de l'éloignement de la côte durant les autres saisons. La température moyenne augmenterait en hiver avec une fourchette de 1°C à 1.4°C et de 1.4°C à 2°C en été. L'augmentation de la température concernerait aussi les saisons intermédiaires. Au printemps, le réchauffement serait de 1.3°C à 1.7°C avec un maximum sur le centre du pays et notamment les montagnes de l'Atlas. En automne, il varierait de 1.4°C à 1.8°C en allant des côtes vers l'intérieur. A l'échelle annuelle, le réchauffement résultant serait de 1.3°C et 1.7°C (voir annexe F, Fig. F.4).

Le test de Student appliqué aux températures moyennes saisonnières et annuelles montre que le changement projeté par ARPEGE-RV est significatif à 95% sur tout le pays.

Le réchauffement plus important en été qu'en hiver et projeté auparavant par les modèles du quatrième rapport du GIEC, l'est aussi par Born et al. (2008) qui estiment pour la période 1960-2050 des tendances de 1.37°C à 1.75°C respectivement en hiver et en été au niveau de la région ouest des montagnes de l'Atlas.

L'idée que les projections de température sont en quelque sorte moins influencées que celles des précipitations par les hétérogénéités spéciales serait valable aussi longtemps que l'effet des montagnes est supposé connu et peut être déduit assez facilement. Les projections d'ARPEGE-RV confirment en quelque sorte cette idée et reflètent plus l'effet de proximité de la mer notamment en été et en automne. Le réchauffement printanier, accentué sur le haut et moyen Atlas induirait la fonte des neiges qui tendrait à le renforcer à travers une modification des propriétés radiatives de la surface terrestre ; une diminution de l'albédo entraîne une absorption du rayonnement solaire accrue, et au final un réchauffement. L'eau stockée dans le couvert neigeux est une source non négligeable pour l'écoulement de surface et contribue à l'irrigation et aux besoins domestiques au début de la saison sèche. Une fonte précoce des neiges implique donc une limitation des apports en eau en fin du printemps et au début de l'été. Le réchauffement accentué de l'Atlas marocain est projeté aussi par Somot et al. (2008), pour 2070-2099 par rapport à 1961-1990, à l'aide d'une version couplée du modèle ARPEGE-RV avec le pôle de maximum de résolution situé en Méditerranée, destinée à l'étude de l'évolution du climat sur l'Europe et la région méditerranéenne.

La question sur les types de climat déjà abordée en termes d'observations surgit aussi ici tenant compte des changements futurs projetés par ARPEGE-RV pour les précipitations et la température notamment au niveau de la zone située à l'ouest des montagnes de l'Atlas qui verrait sa température moyenne augmenter et son cumul pluviométrique rester inchangé à l'échelle annuelle (en dépit d'une réduction hivernale). Le changement projeté pour l'indice

d'aridité de De Martonne (voir chapitre 1) et présenté sur la Fig. 3.6 fait ressortir une faible diminution de cette indice sur la moitié nord du pays indiquant une tendance éventuelle vers des climats plus arides. Cette évolution, même si elle est plus accentuée à l'ouest, resterait cependant insuffisante pour faire migrer complètement la région d'un type de climat vers un autre définis selon l'indice de De Martonne. Des résultats globalement compatibles avec les nôtres ont été trouvés auparavant par Born et al. (2008) qui projettent pour 2030-2050 et comparativement avec 1986-2000 une transition vers des climats plus arides. La migration, de certaines parties de la moitié nord du Maroc (en particulier les plus au sud) d'un climat de type modéré vers un climat de type « Steppe » pourrait être justifiée par le fait que la classification réduite de Köppen utilisée par Born et al. (2008) se base plus sur la température notamment pour le type modéré et le sous-type « BSh » (du type Steppe) vers lequel la migration se ferait.

Selon le quatrième rapport du GIEC, l'humidité du sol diminuerait de façon significative d'ici la fin du siècle courant (2080-2099 par rapport à 1980-1999), avec un consensus de 80% des modèles, de 5 à 15% sur la moitié nord du Maroc (Meehl et al. 2007). En combinant les projections de précipitation et de température obtenues par ARPEGE-RV, on pourrait s'attendre à des manifestations de ce genre déjà à l'horizon 2021-2050 notamment en hiver. Ceci pourrait induire des incidences sur l'agriculture pluviale et l'hydrologie.

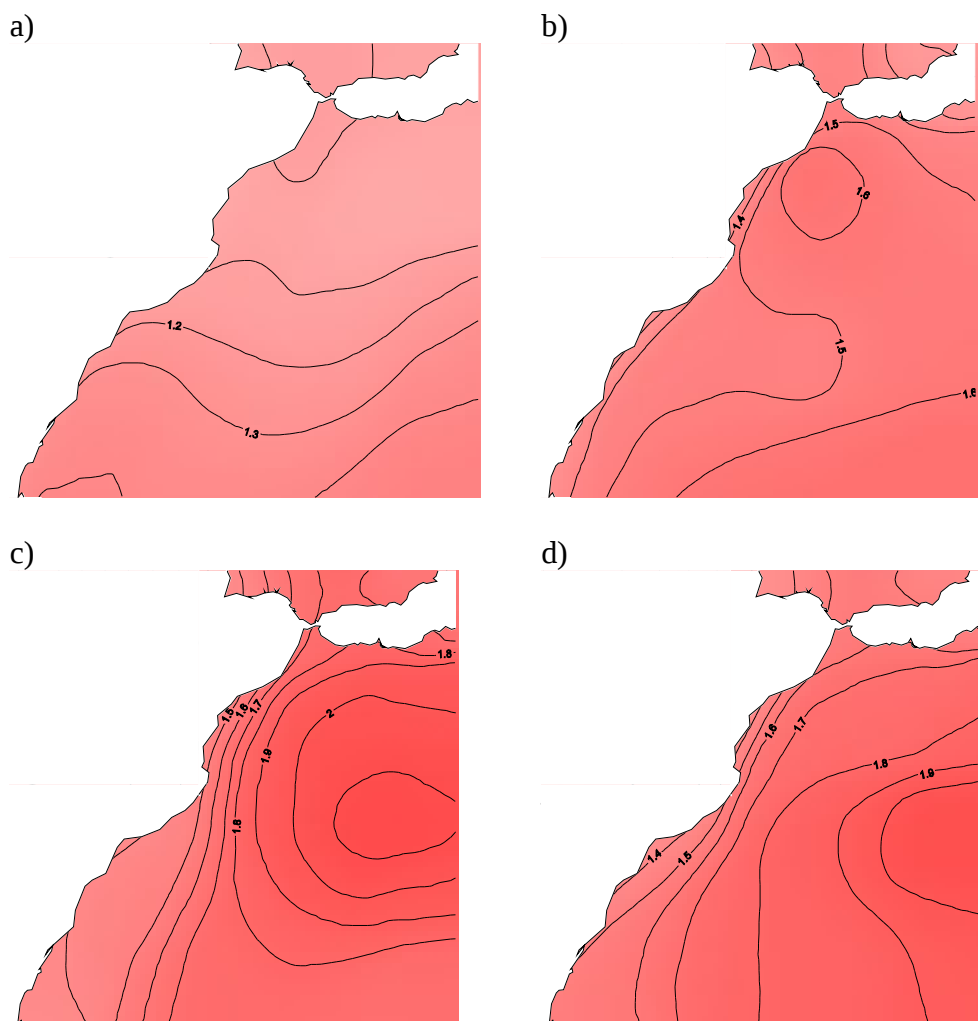


Fig. 3.5 Changements (en °C) projetés par ARPEGE-RV pour la température moyenne saisonnière sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000. a) hiver, b) printemps, c) été, d) automne.

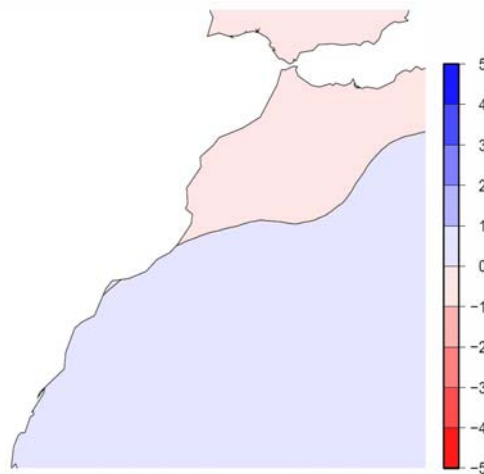


Fig. 3.6 Changements (en mm/°C) projetés par ARPEGE-RV pour l'indice d'aridité de De Martonne sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

3.5. Conclusion

Selon différentes projections issues de modèles de circulation générale à faible résolution dont ceux du GIEC, le Maroc connaîtrait une réduction de ses cumuls pluviométriques, déjà modestes en climat présent, d'ici la fin du siècle courant. Cette diminution concernerait à la fois l'hiver et l'été et serait associée à un réchauffement estimé de 3°C à 4°C à l'échelle annuelle.

Dans ce chapitre nous avons évalué les changements futurs projetés par ARPEGE-RV pour le climat du Maroc. Vu l'importance de l'hiver étendu (octobre à mars) de point de vue à la fois pluviométrique et agricole, le premier focus a porté sur cette période de l'année. Les évolutions futures considérées en termes d'indices pluviométriques relatifs aux moyennes et aux événements extrêmes montrent que la distribution des précipitations de la zone située à l'ouest des montagnes de l'Atlas connaîtrait un changement à l'horizon 2021-2050 comparativement à 1971-2000. Ce changement se manifesterait à la fois en termes de réduction de cumuls, de diminution du nombre total de jours humides, d'augmentation du nombre maximal de jours consécutifs secs (et donc de la persistance temporelle de la sécheresse) et de diminution d'événements de fortes précipitations.

L'extension de l'analyse aux quatre saisons classiques montre que la baisse des cumuls de l'hiver étendu estimée atteindre 5% à 10%, serait principalement due à la baisse de la pluviométrie de la saison d'hiver (DJF). La saison du printemps serait plus humides sur la l'ensemble du pays et la saison d'été serait plus sèche qu'actuellement de 5% à 10% sur le nord-ouest. Les précipitations automnales ne changeraient pas de façon notable à l'ouest des montagnes de l'Atlas et augmenteraient partout ailleurs. En résultat, les cumuls annuels ne subiraient pas d'évolution notable sur toute la moitié nord. Les régions désertiques tendraient plutôt vers une humidification.

La comparaison de nos résultats avec ceux des études antérieures ayant abordé le nord-ouest de l'Afrique en tant que partie du bassin méditerranéen ou à plus grande échelle, montre que les évolutions projetées par ARPEGE-RV sont de façon générale compatibles avec ceux d'autres modèles notamment en hiver; la saison la plus pluvieuse. Cette compatibilité concerne aussi les quelques rares simulations faites à haute résolution sur le Maroc.

Même si elle ne constitue pas l'objectif principal de cette thèse, la température moyenne a été aussi analysée en termes de projections futures vu l'effet qu'elle peut avoir par exemple sur l'hydrologie des sols à travers l'évaporation. Le réchauffement concernerait les quatre saisons de l'année et, conformément aux projections du GIEC, serait plus accentué en été qu'en hiver. L'augmentation de la température des saisons intermédiaires n'est pas des moindres et ses effets sont redoutables. A titre d'exemple le réchauffement printanier pourrait induire une fonte précoce des neiges de l'Atlas et donc une diminution des réserves d'eau utiles notamment en début d'été.

L'évaluation des changements futurs en termes de types de climats montre une faible évolution de la moitié nord du pays vers une aridification ; soit une sorte de continuité de la situation déjà observée. Notons, cependant, que cette évolution ne serait suffisante, à l'horizon 2021-2050, pour faire migrer complètement la région d'un type de climat à un autre.

4. Réduction d'échelle statistique et évaluation d'incertitudes

4.1. Introduction

Dans le chapitre 2 nous avons décrit les différentes méthodes de réduction d'échelle spatiale existantes ainsi que les points forts et les limitations de chacune d'entre elles. Dans le chapitre 3 nous avons évoqué les principales sources d'incertitudes liées aux changements climatiques dont notamment les scénarios d'émission et la modélisation.

Ce chapitre a trois objectifs dont le premier est d'évaluer la possibilité d'utiliser une méthode de réduction d'échelle statistique pour déduire, à partir de champs de la circulation de grande échelle, les précipitations locales. Le second objectif consiste à faire une estimation de la marge des incertitudes entourant les projections futures des précipitations marocaines. Dans la troisième partie, nous évaluerons l'effet d'une méthode de correction par quantiles sur les changements projetés.

Tenant compte des projections futures obtenues par ARPEGE-RV et qui sont compatibles avec différentes simulations antérieures, nous nous concentrons dans ce chapitre sur la saison d'hiver (DJF) dont les cumuls pluviométriques subiraient une diminution. Comme déjà expliqué dans les chapitres précédents, la circulation atmosphérique au niveau de l'Atlantique extratropical nord exerce une grande influence sur la pluviométrie hivernale au Maroc. En particulier, les phases positives ou négatives de l'ONA favorisent respectivement un déficit ou un excédent pluviométrique notamment au niveau de la zone située à l'ouest des montagnes de l'Atlas; la région la plus importante à la fois en termes de précipitations et d'agriculture. Dans ce sens, nous étendons l'analyse aux régimes de temps de l'Atlantique extratropical nord afin de les utiliser éventuellement pour l'estimation des changements futurs des précipitations locales; soit une réduction d'échelle statistique basées sur les régimes de temps.

A un horizon proche comme 2021-2050, les incertitudes inhérentes aux émissions des GES ne représentent pas un vrai problème et peuvent être négligeables devant celles liées à la modélisation. Les courbes d'émissions de GES ne commencent, en effet, à diverger qu'au-delà de 2050. L'approche multi-modèle étant la plus préconisée pour balayer la marge des incertitudes liées à la modélisation, nous utilisons, en plus de nos propres simulations faites à l'aide d'ARPEGE-RV, les sorties, sous le scénario A1B, d'une dizaine de modèles climatiques régionaux du projet européen ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org>)⁶ et qui ont tous une résolution horizontale de 25 km. Le tableau 4.1 présente les dix MRC d'ENSEMBLES utilisés dans ce chapitre et qui sont les modèles dont les sorties étaient disponibles au moment de la réalisation de cette partie de l'étude.

⁶ Ce programme de R&D a parmi les objectifs principaux d'affiner les projections climatiques du GIEC tout en quantifiant les incertitudes. ENSEMBLES a succédé au projet PRUDENCE [<http://prudence.dmi.dk>] qui a utilisé dix MRC européens de résolution 50 km pour estimer les changements futurs sur l'Europe à l'horizon 2071-2100 (Déqué et al. 2005). Les conditions aux limites des MRC de PRUDENCE provenaient principalement de deux modèles globaux; ce qui limitait la représentativité de l'incertitude par les résultats multi-modèles régionaux de PRUDENCE. Rowell (2006) a montré en effet qu'une grande part de l'incertitude dans le changement climatique régional simulé par les MRC provenait des conditions aux limites fournies par le modèle global qui les force. Le projet ENSEMBLES est alors venu remédier à cette problématique en utilisant un ensemble de couples MCGOA/ MRC et permettre la constitution d'une base de scénarios climatiques régionaux échantillonnant mieux l'incertitude. Une autre nouveauté d'ENSEMBLES est la résolution de 25 km des grilles des modèles ainsi que les domaines des simulations qui s'étendent pour la plupart sur une bonne partie de l'Afrique du nord et couvre ainsi le Maroc.

Le test de la méthode de réduction d'échelle statistique utilisant les régimes de temps ainsi que l'évaluation des incertitudes, notamment celles dues à la modélisation, entourant les projections futures des précipitations hivernales marocaines ont fait l'objet d'un papier accepté pour publication dans la revue *Global and Planetary Change*. Cet article, dont le résumé est donné au paragraphe 4.3, étend aussi l'étude des changements futurs des précipitations de l'hiver faites dans le chapitre 3 aux événements extrêmes de fortes précipitations et de sécheresse ainsi qu'au nombre de jours humides.

MRC	MCG de forçage	Acronyme	Nom dans le texte du chapitre	Institution
Aladin	ARPEGE	CNRM-RM4.5	CNR	CNRM
RACMO	ECHAM5-r3	KNMI-RACMO2	KNM	KNMI
CRCM	CGCM3	OURANOSMRCC4.2.1	OUR	OURANOS
REMO	ECHAM5-r3	MPI-M-REMO	MPI	MPI
HIRHAM	BCM	METNOHIRHAM	MTN	METNO
RCA3	HadCM3Q16	C4IRCA3	C4I	C4I
PROMES	HadCM3Q0	UCLM-PROMES	UCL	UCLM
CLM	HadCM3Q0	ETHZ-CLM	ETH	ETHZ
HadRM3Q0	HadCM3Q0	METO-HC_HadRM3Q0	MET	HC
HIRHAM	ARPEGE	DMI-HIRHAM5	DMI	DMI

Tableau 4.1 Liste des MRC (colonne 1) d'ENSEMBLES dont les données sont utilisées dans ce chapitre. La colonne 2 contient les modèles de forçage. Les colonnes 3 et 4 présentent respectivement les acronymes des MRC et les institutions dont ils sont issus.

4.2. Evaluation des MRC d'ENSEMBLES

Même si l'objectif principal de notre étude n'est pas d'évaluer les MRC d'ENSEMBLES cités dans le tableau 4.1, nous avons jugé intéressant d'examiner la capacité de ces modèles à reproduire la distribution des précipitations marocaines avant d'utiliser leurs sorties dans l'estimation des changements futurs. Cela permettra aussi de mieux situer ARPEGE-RV. Signalons tout d'abord que la résolution spatiale (qui est de 50 km) d'ARPEGE-RV n'est pas une vraie limitation pour ce modèle vu que le Maroc se situe au sud

des domaines des MRC d'ENSEMBLES et que la plus grande part des advections hivernales vient des bords latéraux.

Comme pour ARPEGE-RV (Driouech et al., 2009), nous utilisons l'approche régimes de temps et l'évaluation est faite sur les simulations du climat présent relatif à la période 1971-2000 qui est aussi la période de référence par rapport à laquelle les changements futurs sont calculés. Ceci est aussi justifié par le fait que la méthode de réduction d'échelle statistique évaluée dans Driouech et al. (2010) se base sur les régimes de temps. Le processus de calcul des régimes de temps⁷ est le même que dans Driouech et al. (2009). Le tableau 4.3 représente les fréquences moyennes des régimes obtenues pour le climat présent observé ainsi que celui simulé par chacun des dix MRC d'ENSEMBLES et par ARPEGE-RV. Tous les modèles ont un même type de comportement vis-à-vis de la fréquence moyenne du régime zonal (ZO) qu'ils sous-estiment et par rapport à celle du régime de l'anticyclone groenlandais (GA) qu'ils surestiment. En outre les biais les plus importants sont obtenus pour ces deux régimes de temps. ARPEGE-RV et CNR donnent la meilleure estimation du régime le plus fréquent. Rappelons que ZO et GA correspondent respectivement aux phases positive et négative de l'ONA. Les fréquences des deux autres régimes (dorsale atlantique ; AR et le blocage ; BL) sont généralement bien reproduites.

RT	OBS	C4I	CNR	DMI	ETH	KNM	MPI	MTN	MTO	OUR	UCL	ARPEGE-RV
ZO	34	21	32	30	29	28	27	26	27	26	27	32
AR	23	24	24	23	22	23	24	21	25	24	24	19
BL	25	28	24	25	26	25	25	23	23	28	23	25
GA	18	27	20	22	23	24	24	30	25	22	26	24

Tableau 4.2 Fréquences moyennes (en %) des régimes de temps pour le climat présent observé (colonne 2) ainsi que celui simulé par chacun des dix MRC d'ENSEMBLES et par ARPEGE-RV. ZO : régime zonale, AR : régime de la dorsale atlantique, BL : régime de blocage, GA régime de l'anticyclone groenlandais.

Outre les fréquences des régimes, l'évaluation des modèles est faite par rapport aux précipitations quotidiennes de chacune des 14 stations météorologiques considérées dans les chapitres précédents (voir tableau 1.1 du chapitre 1). Comme dans Driouech et al. (2009) nous comparons la distribution de chaque station avec celle de la maille la plus proche de chacun

⁷ Les centroïdes des 4 régimes classiques (Vautard, 1990) sont obtenus par application de l'algorithme des nuées dynamiques de Michelangeli et al. (1995) au champs du géopotentiel à 500 hPa (Z500) issu des réanalyses ERA40 (Uppala et al., 2005) sur la période 1958-2001 (Sanchez-Gomez et al., 2008). L'utilisation d'une période plus longue assure la robustesse des centroïdes ainsi que leur stabilité. Avant de les classer suivant chacun des régimes de temps, les données quotidiennes (pour la période d'étude 1971-2000) de Z500 issues des réanalyses et celles simulées par le modèle (dans le cas des MRC d'ENSEMBLES qui ne sont pas des modèles globaux, le champ de Z500 est issu de leurs modèles de forçage), sont tout d'abord désaisonnalisées (pour chaque jour nous enlevons la moyenne de ce jour calculée sur toute la période). Les champs d'anomalies filtrées (issus des simulations des modèles et d'ERA40) sont ensuite projetés sur les 15 premières composantes principales d'ERA40, qui expliquent plus de 88% de la variance totale au cours de la période étudiée (1971-2000). La classification des données quotidiennes est faite à l'aide de la distance euclidienne calculée, pour chaque jour, entre les centroïdes des régimes et les champs projetés. Les données de précipitation observée et simulée par les MRC sont classées selon les régimes en suivant la même répartition que les données de Z500 ; un jour appartenant à un régime l'est à la fois pour Z500 et la précipitation.

des modèles. Ce choix était justifié d'une part par la densité du réseau et d'autre part par le fait que nous nous intéressons aussi aux extrêmes; l'utilisation de moyennes aura tendance à lisser ces derniers. Après avoir réparti (comme dans Driouech et al., 2009) les séries des données de précipitations quotidiennes observées et celles simulées par chacun des 10 MRC d'ENSEMBLES selon les régimes de temps, nous avons calculé le biais moyen des centiles de chaque régime et de chaque station. Le tableau 4.2 représente la moyenne des biais moyens calculée pour chaque régime et chaque MRC sur les 14 stations. Les résultats obtenus par ARPEGE-RV sont aussi représentés. Dans le chapitre 3 nous avons noté que le comportement du modèle ARPEGE-RV diffère d'un régime à un autre. Ce résultat est aussi valable pour les MRC d'ENSEMBLES. La plupart des MRC donnent des valeurs négatives indiquant une tendance générale vers la sous-estimation des précipitations. Notons que cette tendance à la sous-estimation est aussi celle d'AREGE-RV déjà illustrée dans le chapitre 2. L'exception vient du modèle KNM qui donne une moyenne positive des biais moyens pour tous les régimes. Les MRC MPI et MTN donnent aussi des valeurs positives pour les régimes BL et GA.

RT	C4I	CNR	DMI	ETH	KNM	MPI	MTN	MTO	OUR	UCL	ARPEGE-RV
ZO	-85	-1	-75	-61	6	-9	-19	-63	-52	-63	-75
AR	-80	-62	-75	-71	5	6	-16	-39	-55	-24	-55
BL	-57	-56	-49	-26	60	58	46	-8	-52	2	-58
GA	-63	-47	-68	-55	50	37	13	-53	-36	-39	-18

Tableau 4.3 Moyenne (en %) des biais moyens calculée, pour chaque régime et chaque MRC (les 10 MRC d'ENSEMBLES en plus ARPEGE-RV), sur les 14 stations météorologiques.

Même si les calculs ont été faits pour toutes les stations, le détail ne sera donné que pour la station de Rabat qui fait l'objet d'analyse d'incertitudes dans le paragraphe suivant. La Fig. 4.1 montre les courbes quantiles-quantiles qui représentent, pour chacun des MRC d'ENSEMBLES et chacun des régimes de temps, les centiles simulés au niveau des mailles les plus proches de Rabat en fonction de ceux observés à Rabat. Les courbes relatives à ARPEGE-RV sont aussi présentées. Comme ARPEGE-RV, la plupart des modèles d'ENSEMBLES (huit sur dix) sous-estiment les précipitations malgré le changement de leurs performances en fonctions des régimes. Cette tendance à la sous-estimation est aussi démontrée par les courbes quantiles-quantiles obtenues sans répartition des précipitations selon les régimes de temps (voir Fig. G.1 de l'annexe G) ; soit en considérant les séries entières. Le MRC KNM reproduit bien la moitié inférieure de la distribution pour les régimes BL et GA mais sous-estime le reste des centiles. A l'exception du régime GA dont la distribution est bien simulée par le MRC MPI, les centiles des différents régimes sont soit sous-estimés soit surestimés par MPI et MTN.

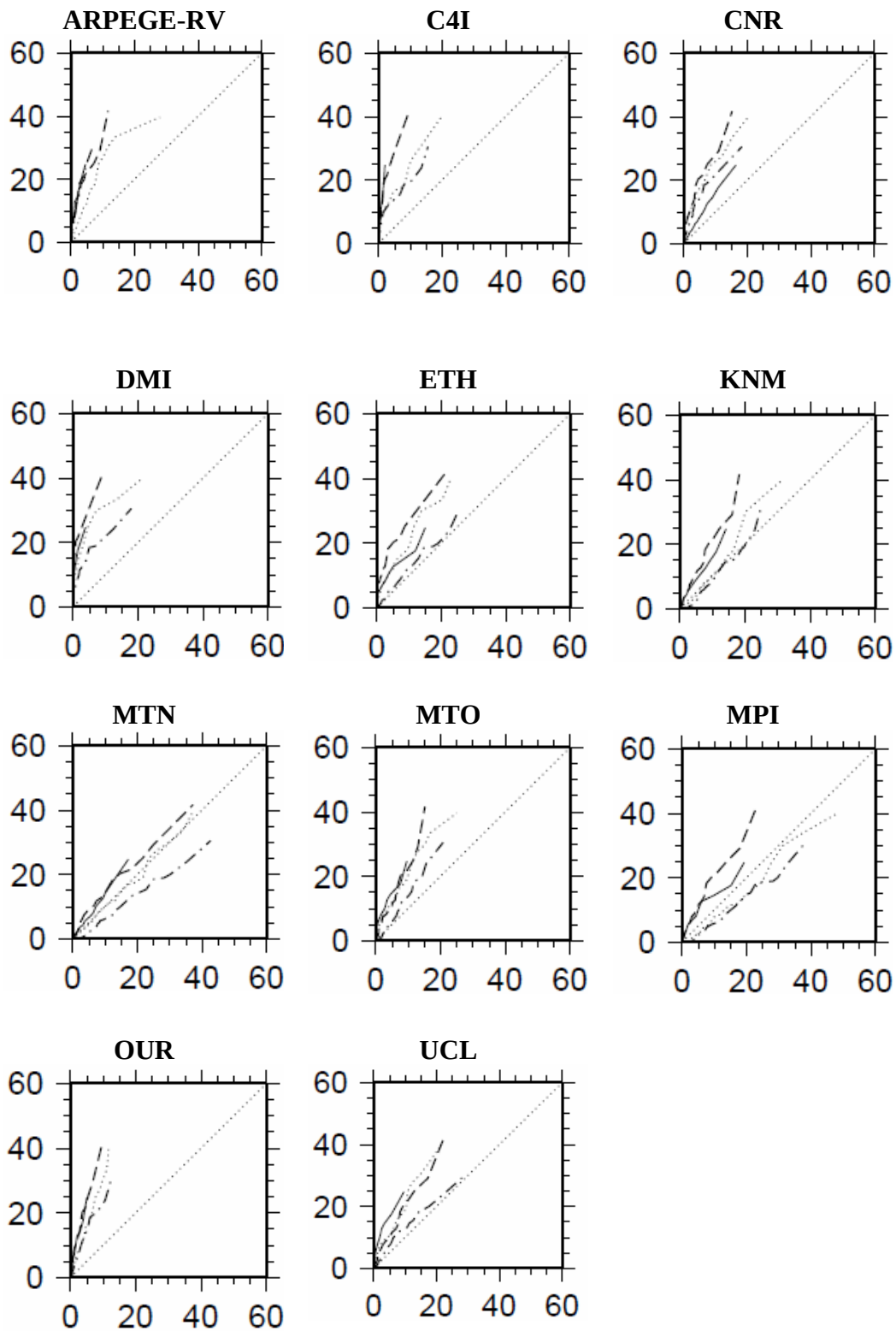


Fig. 4.1 Courbes quantile-quantile représentant les centiles de précipitation hivernale (DJF) observés à Rabat en fonction de ceux simulés, par les MRC d'ENSEMBLES et par ARPEGE-RV, au niveau des mailles les plus proches de Rabat. Régime zonal: ligne épaisse, régime de la dorsale atlantique: ligne en pointillé, régime de blocage : ligne tiret-point, régime de l'anticyclone groenlandais : ligne fine. La diagonale correspond à la simulation parfaite.

4.3. Résumé de l'article Driouech et al. (2010)

Driouech F., Déqué M., Sánchez-Gómez E. (2010) Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Glob Planet Change*. DOI:10.1016/j.gloplacha.2010.03.004.

La connaissance des relations liant les modes de variabilité de grande échelle et le climat local est importante pour la compréhension des changements et évolutions des précipitations marocaines. Notre étude Driouech et al. (2010) s'est intéressée à l'évaluation et analyse de l'influence des régimes de temps de l'Atlantique extratropical nord sur la pluviométrie de la région située au nord du Sahara marocain. Cette région, représentée dans l'étude par les 14 stations ayant fait l'objet d'analyse dans les chapitres 1 et 2 (voir Tableau 1.1 du chapitre 1), couvre la zone la plus importante de point de vue hydrologique et agricole comme déjà explicité auparavant. L'évaluation de la relation régimes de temps (RT) – précipitations locales a pour objectif aussi de vérifier la possibilité de son utilisation pour la réduction d'échelle statistique.

L'influence des RT sur les précipitations locales examinée à travers la précipitation moyenne et les fréquences d'occurrence de jours humides et de jours de forte précipitation (soit 3 indices pluviométriques), a été faite tout d'abord sur le climat présent (1971-2000) observé. Les séries des données des précipitations quotidiennes ont été réparties selon les régimes de temps obtenus (comme dans Driouech et al., 2009) à partir du champ de géopotential à 500 hPa issu des réanalyses ERA40. Chacun des quatre régimes a une empreinte sur la précipitation et induit soit des changements du même signe sur toutes les stations et pour les 3 indices, soit des changements qui diffèrent entre les sites et les indices. En particulier, le régime zonal qui est le régime le plus fréquent (34% des cas) s'avère en faveur de situations à déficit pluviométrique se manifestant à la fois dans les moyennes, le nombre de jours humides et le nombre de jours à fortes précipitations. Ce régime est caractérisé par la présence d'une cellule anticyclonique s'étendant de la péninsule ibérique jusqu'au large des côtes atlantiques marocaines. Cette configuration correspondant, en effet, à la phase positive de l'oscillation nord atlantique, empêche les systèmes perturbés de l'Atlantique nord d'atteindre le Maroc. Le régime de l'anticyclone Groenlandais de fréquence d'occurrence de 18% est généralement associé à un flux d'ouest renforcé sur le Maroc en faveur des situations pluvieuses à excédent pluviométrique notamment à l'ouest des montagnes de l'Atlas. Il est associé à une augmentation des fréquences d'occurrence des jours humides et des jours à fortes précipitations. Les deux autres RT ont des influences plus hétérogènes spatialement. Néanmoins le régime de blocage de fréquence de 23%, quoique de faible influence, est plus en faveur des situations à temps sec.

Après l'analyse de la relation RT-précipitation sur le climat observé, la capacité du modèle ARPEGE-RV à reproduire cette relation a été évaluée à l'aide de la simulation du temps présent (dites aussi de référence) décrite dans le chapitre 3. Rappelons que l'aptitude du modèle à simuler les RT a été établie dans le chapitre 2. Malgré quelques différences légères dans les amplitudes des changements induits par les RT sur la précipitation locale, ARPEGE-RV reproduit généralement bien la relation RT-précipitations locales au niveau des 14 stations. Cette partie confirme un résultat déjà trouvé dans le chapitre 2 et qui réside dans le fait que les performances du modèle ne sont pas exactement les mêmes d'un régime à un autre.

Le lien existant dans le climat présent entre les RT et les précipitations locales nous a incité à évaluer la possibilité d'utiliser ces champs de grande échelle dans une méthode de réduction d'échelle statistique. Cette méthode consiste à déduire les changements futurs des

précipitations locales à partir des changements de fréquence d'occurrence des RT et de la relation statistique qui relie ceux-ci aux précipitations.

L'évaluation de cette méthode a été faite à l'aide des données des simulations réalisées à l'aide d'ARPEGE-RV pour les climats présent et futur (voir chapitre 3). Pour chaque site, le changement projeté directement par le modèle a été réparti en un terme ne tenant compte que du changement des fréquences des RT et considérant donc la relation RT-précipitation inchangée entre le présent et le futur et en un terme ne considérant que le changement de cette relation. Le calcul, pour chaque station, de chacun des termes dont la somme est égale au changement futur issu du modèle, a montré la prédominance du deuxième terme mettant en exergue la non-validité de la méthode de réduction d'échelle statistique considérée puisque son hypothèse fondamentale, qui concerne la conservation de la relation statistique entre le présent et le futur, est remise en cause.

Ce résultat très important démontrant que la réduction d'échelle statistique utilisant les champs de grande échelle comme les régimes de temps n'est pas préconisée pour le cas des précipitations hivernales marocaines n'est pas dû au choix du modèle. Il est confirmé en effet par les 10 MRC d'ENSEMBLES. On en déduit aussi la valeur ajoutée des MRC dans l'évaluation des changements futurs aux échelles régionales et locales et par là l'importance des méthodes de réduction d'échelle dynamiques.

Une autre partie de l'étude Driouech et al. (2010) complète l'estimation des changements futurs de la saison d'hiver (DJF) déjà faite au chapitre 3 en considérant les événements extrêmes de sécheresse et de précipitation et le nombre de jours humides. Rappelons que dans le chapitre 3 l'évaluation des changements de la pluviométrie de l'hiver n'a concerné que la précipitation moyenne. En plus de la réduction des cumuls, le nombre de jours humides diminuerait, selon ARPEGE-RV, de 10% à 25% sur l'ensemble du territoire. Le nombre de jours consécutifs secs augmenterait sur une grande partie du pays et notamment à l'ouest des montagnes de l'Atlas (jusqu'à +4 jours). L'amplitude des événements de fortes précipitations, considérée à partir du 90^{ème} centile, n'évoluerait pas de façon homogène partout. Elle accuserait des augmentations de l'ordre de 5% à 10% au niveau de la zone côtière centre (notamment entre Casablanca et Agadir) et diminuerait au sud. Le reste du pays, notamment le nord, ne subirait pas de changement important.

L'évaluation des incertitudes entourant les projections futures hivernales est faite pour le cas du site de Rabat. En plus d'ARPEGE-RV, les changements sont estimés à l'aide des simulations des 10 MRC d'ENSEMBLES en termes de précipitation moyenne, du nombre de jours humides, du nombre maximal de jours consécutifs secs et du 90^{ème} centile. Les changements estimés à l'aide d'ARPEGE-RV se trouvent bien dans la marge couverte par ceux issus des autres MRC. Comme projeté par notre modèle, la plupart des MRC (soit 9 MRC sur 10, sans compter ARPEGE-RV) font diminuer les cumuls des précipitations et augmenter la période maximale de sécheresse saisonnière hivernale (8 MRC sur 10). Tous les MRC d'ENSEMBLES projettent, comme ARPEGE-RV, une réduction du nombre total de jours humides. L'amplitude des événements de fortes précipitations, quand à elle, obtient moins de consensus entre les MRC, mais diminue selon la plupart. ARPEGE-RV projette une augmentation de 5% qui reste cependant la plus faible parmi les augmentations projetées. Les fourchettes des changements estimés pour le site de Rabat par les 11 modèles (incluant ARPEGE-RV) pour les différents indices sont les suivantes : -9% à -38% pour la précipitation moyenne, -3% à -27% pour le nombre de jours humides, -0.1 jour à +7.3 jour pour le nombre de jours consécutifs secs et -24% à +18% pour le 90^{ème} centile représentatif des fortes précipitations. L'écart-type des changements futurs calculés sur les 11 modèles pour chacun des indices pluviométriques montre que c'est la précipitation moyenne qui obtient la plus grande dispersion. Le modèle ARPEGE-RV donne des changements bien inclus dans la marge couverte par les 10 MRC.

Weather regimes-Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation

Fatima Driouech ¹, Michel Déqué ² and Emilia Sánchez-Gómez ³

¹ Direction de la Météorologie Nationale/CNRM, Casablanca, Maroc

² Météo-France/CNRM, CNRS/GAME, Toulouse, France

³ Cerfacs/CNRS SUC URA1875, 42 av Coriolis 31057 Toulouse, France

Abstract

The local future climate conditions in Morocco under the SRES scenario A1B are studied by using two 30-year time-slice simulations performed by the variable resolution configuration of the global circulation model ARPEGE-Climate. The spatial resolution ranges between 50 and 60 km over the whole country. Firstly, the link between local precipitation and weather regimes in the North Atlantic basin is investigated in terms of mean precipitation and the frequencies of occurrence for wet and intense precipitation days. Then a statistical downscaling approach that uses large scale fields to construct local scenarios of future climate change is validated in the case of Moroccan winter precipitation. The outputs of experiments carried out from an ensemble of regional climate models are used to assess the uncertainties associated to future climate change. These dynamical downscaling outputs have been also used to test the robustness of the results related to the statistical downscaling technique. Our results concerning the future climate conditions over Morocco show not solely a decrease in mean precipitation but also a change in the precipitation distribution and in extreme events.

Keywords: Precipitation - Morocco – Extreme events - Regional climate modelling – Climate Change – Statistical downscaling

1. Introduction

Based on global general circulation (GCM) coarse-resolution models, the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) projects a warming and negative trends of precipitation for subtropical Africa (IPCC, 2007). In particular, total winter precipitation in Morocco, is likely to decrease of about 20% by the end of the 21st century. Water resources in Morocco depend on precipitation which influences also the agricultural production. To elaborate adapted strategies and manage future problems with water supply for different regions, decision-makers are interested in more detailed information such as precipitation features at local scale.

Following this idea, in Born et al. (2008), the impact of different climate periods on vegetation were studied from the experiments issued from the regional climate model (RCM) REMO (Jacob et al. 2001) over the Northwestern Maghreb, by means of Köppen climate classification (Köppen, 1936). They showed a climate shift of climates in three Moroccan regions (Knippertz et al. 2003) towards warmer and dryer conditions. In Knippertz et al. (2003), Moroccan winter precipitation association with North Atlantic Oscillation (NAO, Hurrell 2005) variability and circulation weather types were investigated by means of correlation and composite analysis. The negative correlation between the precipitation and the NAO is relatively strong during the high precipitation months (December, January, and

February) mainly in the north-western region. The influence of the NAO on precipitation in Morocco was primarily investigated by Lamb and Pepler (1987), Lamb et al. (1997), Portis et al. (2001). Terray et al. (2004) suggest, in a study based on an ensemble of climate change scenarios performed with a GCM, an increase of the positive phase of the NAO during wintertime and a reduction of the negative phase occurrence. In Driouech et al. (2008), hereafter D08, Moroccan rainfall simulated by the variable resolution configuration of the GCM ARPEGE-Climate has been examined by comparison with daily observed values from several Moroccan meteorological stations. D08 showed a rather well ability of the model in reproducing main precipitation features and also a set of climate indices (STARDEX indices, Goodess 2003) related to extreme events. The horizontal resolution of the model ranged between 50 and 60 km over the whole country. The links between Moroccan precipitation and large scale atmospheric dynamics (NAO in particular) were also investigated in D08 by using an approach based on circulation weather regimes (WR) (Vautard 1990, Michelangeli et al. 1995).

In this study we go further and we investigate whether the weather regimes approach is appropriate for estimating local changes of precipitation under global warming conditions using statistical downscaling methods (von Storch 1995). The goal of this work is also to improve our knowledge of the impact of climate change on precipitation and extreme events in Morocco using a high resolution model. Uncertainties related to the choice of the model are also investigated using a database built by the EU FP6-ENSEMBLES project (<http://www.ensembles-eu.org>).

In section 2 we give a short description of the numerical experiments. In section 3 we study the links between the weather regimes and the precipitation in Morocco. We present a statistical downscaling approach using weather regimes and then we assess the model response to anthropogenic climate change in section 4. The model dependence of the results is analyzed in section 5. The discussion of results and the conclusion are presented in section 6.

2. Model experiments

The recent version 4 of the GCM ARPEGE-Climate has been used in the variable resolution configuration with the pole of the stretched grid located over Morocco at 28°N, 8°W and with a stretching factor of 3. The resulting horizontal resolution ranges between 50 and 60 km over the whole country. We have performed a 30-year simulation of the present climate for the period 1971-2000 (hereafter MORC). This experiment was validated in D08 where also a short description of Version 4 of the model and the experimental setup can be found. A second 30-year time slice experiment for the future climate covering the period 2021-2050, (hereafter MORS), has been carried out with the SRES scenario A1B. The model was forced by monthly mean sea surface temperature (SST), produced by the CNRM-CM3 coupled model (Salas-Melia et al., 2005) contribution to the fourth IPCC report (IPCC-AR4). The greenhouse gases (GHGs) and sulfate aerosols concentrations used here are the same as in the CNRM-CM3 experiments. This forcing data was prescribed for both, MORC and MORS experiments.

3. Weather regimes and local precipitation

To understand changes in Moroccan precipitation, the knowledge of the links between the large-scale modes of variability and local climate is. Morocco is situated at the southern edge of the mid-latitude storm track. The region located north of the Moroccan Sahara desert comprises the main agricultural zone of the country and the main rainy regions of Morocco. The north Atlantic large scale circulation (extratropical circulation modes) exerts a strong

influence on the climate of this region. During wintertime, most precipitation is generated as a result of low pressure weather systems being steered southward during mid-latitude blocking episodes (Ward et al., 1999).

We focus, in this section, on daily precipitation in the region north of the Moroccan Sahara desert represented by fourteen stations (the names of the stations are given in table 1 and their locations are indicated in figure 1). These stations have been clustered into five rainfall regions by Ward et al. (1999). They have also been clustered into three regions by Knippertz et al. (2003). In this work we use the individual stations since we are interested also in precipitation extremes. We consider only winter months (DJF) when most of stations show a precipitation maximum. The daily observations at the fourteen stations are provided by the Direction de la Météorologie Nationale (Moroccan national meteorological service).

3.1 Classification into weather regimes

The centroids of the four main classical weather regimes (Vautard, 1990) over the North Atlantic basin are obtained by applying the dynamical cluster algorithm described in Michelangeli et al. (1995) to the geopotential height at 500 hPa (Z500) from the ERA40 reanalysis (Uppala et al., 2005). The calculations are done for the period 1958-2001 for winter months (DJF) and over a domain covering the extratropical North Atlantic, Western Europe and North-Western Africa (80°N-20°N, 90°W-30°E), (Sanchez-Gomez et al., 2008). These weather regimes are the Zonal regime (ZO), the Greenland Anticyclone (GA), the Blocking cell (BL) over Scandinavia and the Atlantic Ridge (AR) located in the centre of the North Atlantic Ocean. The classification for the daily observed and simulated data for the actual period (1971-2000) has been done basically in the same way as was described in D08, that is, the Z500 anomalies are projected on the weather regimes centroids from ERA40 by using the Euclidean distance. The attribution of days to a weather regime is then done by minimizing this distance. In this study the spatial average of Z500 has been also subtracted from the daily values of this field. This is an attempt to remove the thermal effect of the climate change: we hypothesize that the global warming will increase uniformly the geopotential height without impact on the Z500 gradient, and hence on atmospheric circulation. Observed (OBS) and simulated (MORC) weather regimes mean frequencies of occurrence are shown respectively in figure 2 and figure 3. As expected, in agreement with other North Atlantic weather regimes classifications including D08, the ZO regime is the most dominant with 34% of mean frequency of occurrence. However, it is more frequent during DJF than in extended winter (ONDJFM) where the frequency is 31% (see D08). ZO is also the most dominant weather regime for the MORC experiment, although the model slightly underestimates its mean frequency of occurrence (32%). As for extended winter, this version of the model ARPEGE-Climate reproduces well the BL mean frequency, but underestimates the AR mean frequency and overestimates the GA one. Observed and simulated weather regimes spatial structures for the Z500 anomalies are rather similar (not shown).

3.2 Links between weather regimes and local precipitation

In North Africa, and more generally in the Mediterranean countries, future climate conditions may come along with changes in precipitation characteristics and related extreme events. In the past, Morocco has experienced a set of drought periods that showed the vulnerability to water scarcity. The years from 1981 to 1994 were particularly dry in northern Morocco compared to 1950-1980 (Hurrell and Van Loon, 1997). A pronounced precipitation decrease is visible since 1970 in the North-east (Knippertz et al. 2003). Flooding events have also occurred resulting in loss of life and significant damage; for instance November 2008.

3.2.1. Observed links

We focus on daily precipitation in DJF for each of the 14 stations indicated in table 1. The link between weather regimes from ERA40 and local precipitation is assessed by considering the relative changes for the mean precipitation, the frequency of occurrence of wet days (WD), and the frequency of intense precipitation days (IPD). We define WD as the days in which total precipitation is exceeding 0.5mm. The intense precipitation days are those belonging to the last decile of the non-zero precipitation distribution. Following the methodology in Plaut and Simonnet (2001), for a given regime, the relative changes for the frequency of occurrence of WD is obtained by comparing the frequency of WD within the set of this given regime days to the overall frequency of all the WD. The changes are computed and expressed in percentages. For instance, let us suppose that for a given station the frequency of occurrence of WD is 30% considering all days, and 15% when we consider only the ZO days, the percentage of change is then -50%. This means a relative frequency of occurrence change for the WD of -50% when the ZO regime is activated. The relative changes for IPD frequency of occurrence are calculated in the same way.

The mean precipitation change for a given regime is obtained by comparing the mean precipitation calculated for the distribution of days within this regime with the mean precipitation calculated over the entire time series. The observed present-day relative changes for mean precipitation and WD, IPD frequencies of occurrence are shown in figure 2. One of the most outstanding features emerging from this figure is that the most dominant regime (ZO) shows (Figure 2, top left) negative changes in all the stations for both WD and IPD frequencies and also for mean precipitation. This means that the ZO regime is associated to dry conditions over the domain. This is not really surprising since ZO regime is characterized by an anticyclonic cell extending from Iberian Peninsula to the Atlantic near Moroccan coasts. The ZO regime is also identified as the positive phase of the NAO (Cassou et al. 2005). The NAO is negatively correlated to Moroccan winter precipitation, mainly over the region north of the Atlas Mountain. Although negative, the changes in frequencies of IPD, WD and also of mean precipitation for the stations east of the Atlas Mountains (Oujda, the Mediterranean station, and Ouarzazate) present absolute values lower than those of the remaining stations, mainly for IPD and mean precipitation. With the AR regime, coastal stations experience fewer WD (Figure 2, top right). In contrast, north-eastern Morocco (here represented by Oujda station) shows 10% more than average for WD occurrence. This region also records up to 72% more IPD and up to +37% for mean precipitation. This fact can be explained by the large scale atmospheric circulation associated with the AR regime. The trough located over the Iberian Peninsula and the cyclonic circulation are connected to a strong north-westerly moisture transport (Knippertz et al., 2003). The spatial structures of IPD and mean precipitation changes during AR days are not easy to interpret. This can be due to the additional influence of local phenomena. The BL regime is generally associated to an increase of mean precipitation and the frequencies of occurrence of IPD and WD (Figure 2, down left). An exception is observed for three western stations (Rabat, Casablanca and Meknes) for IPD. The BL regime shows, however, a marked contrast between the north half and the south half, the former reaching up to 72% more IPD and up to 44% more WD. The GA regime exhibits an East-Atlas / West-Atlas contrast for IPD, WD and mean precipitation (Figure 2, down right). The western part experiences an increase up to 148% and 70% for IPD and WD respectively, and up to 115% for mean precipitation. A relatively enhanced westerly flow over Morocco is generally associated with GA situations. During the winter season, the GA regime is reminiscent of the negative phase of the NAO. Oujda station (in north-eastern

Morocco) exhibits in contrary fewer IPD occurrence (-64%) and less precipitation (mean precipitation change is -17%).

3.2.2. Simulated links

Now we want to investigate whether the ARPEGE-Climate model is able to simulate the links characterized in the previous section between the weather regimes and the observed precipitation. On this purpose, we proceed in the same way as for observations, but considering now the precipitation and weather regimes from the MORC simulation. To validate the model performance, we compare each of the above fourteen stations to the nearest grid box. The use of the spatial averaging methods, as in Déqué and Somot (2008) or as in Huntingford et al. (2003) and Durman et al. (2001), requires a higher density in the observational network than in the model grid. In addition, spatial averaging techniques tend to smooth the extreme phenomena, which are one important concern of our study. Table 1 represents the location of the centre of each grid box from the ARPEGE-Climate grid and the name of the nearest station. Figure 3 displays the relative changes in the frequency of occurrence for WD and IPD, and the mean precipitation change for each of the weather regimes for the model. When comparing each graph in figure 3 with the corresponding one in figure 2, one can see that, in the case of ZO and GA regimes, the main features are generally well captured by the model, although the values of the relative changes are higher for the MORC data. ZO regime is again associated to a decrease in mean precipitation and in occurrence frequencies of IPD and WD. GA regime is associated with an increase in mean precipitation values, and in frequencies of occurrence of IPD and WD for the grid boxes corresponding to West-Atlas stations. For GA regime, IPD and mean precipitation simulated changes in the oriental (OJ grid box) have however an opposite sign than the observed ones. The most outstanding difference between observed and simulated relative changes during AR days comes from the eastern part of the country where MORC data gives -8% for IPD in OJ grid box instead of +72% as found with Oujda station observations. This results in the mean precipitation change of -6% in the model simulation; the observed change is 37% at the station. The relative changes during BL episodes are not well reproduced by MORC, mainly for the grid boxes corresponding to Atlantic coastal stations. An important outstanding remark emerging from both figures 2 and 3 is that the model ability depends on the weather regime. This regime dependence has been also observed in D08 for the probability distribution function of extended winter daily precipitation.

4. Future changes of Moroccan distribution of precipitation

4.1 Evaluating the statistical downscaling approach using weather regimes

The frequency of occurrence of weather regimes for the present-day (1971-2000) and future climate (2021-2050) are shown in figure 3 (values are between parentheses, left values for MORC and right values for MORS). A t-test applied to the annual weather regimes frequency of occurrence shows that the differences between the frequencies in the present (MORC data) and future (MORS data) climates are statistically significant at 95% confidence level for all the weather regimes. In particular for the winter season, the number of ZO regime days is increasing in the scenario simulation, whereas the GA regime days are decreasing. These results are in accordance with previous works that show an increase of positive NAO under global warming (Ulbrich and Christoph 1999, Hu et al. 2001, Hu and Wu 2004). Taking into account on the one hand the links obtained between the weather regimes and the local

precipitation, and on the other hand the changes in the frequency of occurrence of weather regimes in the future climate, we can estimate the changes in the future conditions for local precipitation over the model grid boxes the nearest to the stations. This is one of the goals of the statistical downscaling technique. The main idea of the statistical downscaling methods consists of using the observed relationships between the large-scale circulation and the local climate to set up statistical models (Wilby et al. 2002) that could translate anomalies of the large-scale flow into anomalies of local climate variable (von Storch 1995). These techniques (Solman and Nuñez 1999, Wilby et al. 1998) are based on the hypothesis that the relationship between local parameters and large scale fields is unchanged from the present to the future climates. If we consider this hypothesis (stationarity hypothesis) as valid in the case of this study, the link between the weather regimes and local precipitation characterized for the present climate is conserved for the future climate. The changes for the three indices (IPD, WD and mean precipitation) could be then deduced only from the changes in the frequency of occurrence of weather regimes. For example, if one considers only ZO and GA frequency of occurrence changes, it can be expected for the future a decrease in mean precipitation amount and in the frequency of IPD and WD in all the stations. However, in the case the previous hypothesis is not true, it is interesting to see which aspect is more dominant: the weather regime frequency of occurrence or the link weather regime-local precipitation. For the sake of brevity, the detail is given only for mean precipitation, although the same calculations have been done also for IPD and WD (not shown). In the case of mean precipitation, the changes in the link weather regimes-local precipitation are represented through the weather regime composites for the mean precipitation. These composites are obtained by averaging the precipitation over all days belonging to a weather regime. If the mean precipitation composites are the same in the present and the future, an estimation of the impact of global warming on mean precipitation can be deduced only from the weather regimes frequency of occurrence changes and present-day composite values. This case will be named case 1. In the opposite case (case 2), when supposing weather regime frequencies of occurrence are the same in the present and the future, the estimation of projected mean precipitation changes can be deduced from the composite value changes and the present-day weather regime frequencies. The changes in mean precipitation (PC) at each grid box can be obtained from the present and future weather regime frequency of occurrence values and from precipitation composites, as following:

$$PC_j = \sum_{i=1}^{NWR} g_i D_{ij} - \sum_{i=1}^{NWR} f_i C_{ij} = \sum_{i=1}^{NWR} (g_j - f_j) D_{ij} + \sum_{i=1}^{NWR} f_i (D_{ij} - C_{ij}) \quad (1)$$

Where g_i and D_{ij} are respectively the frequency of occurrence and the mean precipitation composite (at the grid box j) of the regime i in the future climate, and f_i and C_{ij} the frequency of occurrence and the mean precipitation composite (at the grid box j) of the regime i for the present-day climate. NWR is the total number of weather regimes; it is equal to 4 in this case study.

Table 2 allows the comparison between the direct approach which consists of computing the precipitation changes directly from the differences between the current and future climate simulations, and the weather regime approach for case 1 and case 2. The sum of changes obtained for case 1 and case 2 is also shown in table 2.

In the case the stationarity hypothesis is valid, the composites of mean precipitation are the same for the present and the future climates ($C_{ij}=D_{ij}$). The change (PC) at each grid box can be then obtained from the present and future weather regime frequency of occurrence values as following:

$$PC_j = \sum_{i=1}^{NWR} (g_j - f_j) D_{ij} = \sum_{i=1}^{NWR} (g_j - f_j) C_{ij} \quad (2)$$

However, the first outstanding remark from Table 2 is that mean precipitation composite values differ from the present to the future. Furthermore the case 1 precipitation changes are weaker than the case 2 changes. The results obtained with mean precipitation are generally valid for the WD and IPD categories (not shown). It can be then deduced that the links between the large scale weather regimes and the Moroccan precipitation are not completely conserved in the future climate. These results seem to contradict the stationarity hypothesis of the statistical downscaling approaches using large scale fields like North Atlantic weather regimes to address climate change at local scale. The dynamical downscaling is then most appropriate for this case since it does not suppose any conservation of the relationship existing between large scale fields and local precipitation. The robustness of this result will be discussed further in section 5.

4.2 Precipitation changes projected by the high resolution model

In this section the changes in Moroccan precipitation are addressed in terms of a set of STARDEX indices: mean precipitation, annual winter number of wet days (hereafter pn05mm), the 90th percentile (hereafter pq90), and the maximum number of consecutive dry days (hereafter pxcdd). Projected changes for the four indices over all the country are presented in figure 4. Mean precipitation (figure 4-a) and the number of wet days (figure 4-b) decrease in the future period over all the country. The decrease in mean precipitation exceeds -15% for most of the country and becomes more important from the north-west to the south-east. The pn05mm changes range between -10% and -25%. The model response for the maximum dry period (figure 4-c) shows a relative intensification of time persistence of drought in the region west of the Atlas Mountains. The pxcdd index increases by up to more than 4 days. In terms of intense precipitation, projected changes for the 90th percentile (figure 4-d) have not the same sign everywhere. The north and the centre of the country do not show important changes. Coastal regions between Casablanca and Agadir and the northern-west of the Sahara are, however, projected to experience more intense precipitation events in the future (+5 to +10%). At this stage, considering the projected evolutions, it is clearly shown that future climate conditions over Morocco may result in not solely a decrease in mean precipitation, but also in a change in precipitation distribution and extreme events.

5. Model dependence of the results using an ensemble of regional model simulations

To assess the uncertainties associated with climate change projections, especially those due to climate modelling, we use the dataset provided by the ENSEMBLES project. ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org>) is an FP6 European project whose goal is to address the future climate change and the uncertainties with an ensemble of regional climate models. At the time of writing the manuscript, the experiments performed by 10 RCMs were available in the ENSEMBLES database. The acronyms of the RCMs concerned are C4IRCA3 (hereafter C4I), CNRM-RM4.5 (hereafter CNR), DMI-HIRAM5 (hereafter DMI), ETHZ-CLM (hereafter ETH), KNMI-RACMO2 (hereafter KNM), MPI-M-REMO (hereafter MPI), METNOHIRHAM (hereafter MTN), METO-HC_HadRM3Q0 (hereafter MET),

OURANOSMRCC4.2.1 (hereafter OUR) and UCLM-PROMES (hereafter UCL). The present-day climate simulations are referred respectively as C4IC, CNRC, DMIC, ETHC, KNMC, MPIC, MTNC, METC, OURC and UCLC, and the future climate ones as C4IS, CNRS, DMIS, ETHS, KNMS, MPIS, MTNS, METS, OURS. Present and future daily precipitations issued from the 10 ENSEMBLES-RCMs are used to assess model dependence of the results regarding to future climate conditions over Morocco.

5.1 Evaluating the statistical downscaling approach using weather regimes

RCM daily precipitations have been classified into weather regimes in the same way as for MORC in the case of present-day data and as for MORS for future data. For each RCM, Z500 weather regimes are taken from its driving GCM. Simulated WR frequencies for present-day and future climate have been also calculated for the 10 ENSEMBLES-RCMs driving models (not shown). Even if the frequency of ZO is underestimated by all the driving models, as for ARPEGE-Climate, this weather regime is the dominant one in the observed climate. MORC and CNRC driving model give the best estimation for ZO frequency of occurrence. On the contrary, BL regime is the most dominant for the C4IC driving model and GA the most dominant one for MTNC driving model. We have computed the mean precipitation changes considering only WR frequency changes as was described in case 1 (section 3.1) and considering only precipitation composite changes as in case 2 (section 3.1). For each RCM, these computations have been performed for all the fourteen grid boxes corresponding to the 14 stations considered in section 3.2. For simplicity, only the results concerning the Rabat grid box is shown in table 3. For all the ENSEMBLES-RCMs, the mean precipitation composite values differ from the present to the future periods. Moreover, composite changes are largely more dominant than those connected to the frequency of occurrence. These results are also observed for almost all the grid boxes. In view of this, it can be confirmed that the statistical downscaling using large scale fields like the North Atlantic weather regimes to deduce local future changes for precipitation in Morocco may not be the most appropriate method. The fact that for all the RCMs we found the same behaviour indicates that the weak reliability of this approach is not related to a given model only. It is however important to point out that this result is limited to winter precipitation in Morocco and may be not valid for other aspects of climate change.

5.2 Future precipitation changes in Rabat station

The differences between current and future climate periods for the STARDEX indices described above and all the RCMs are displayed in figure 5. For the sake of shortness, the calculations are only shown for the grid boxes associated to Rabat station. The projected changes by the 10 ENSEMBLE-RCMs for the four climate indices (pav, pn05mm, pxcdd and pq90) are shown together with the ones provided by the ARPEGE-Climate model. Except for the C4I RCM, all the RCMs exhibit a decrease in mean precipitation (Figure 5-a). This decrease ranges between -9% (given by OUR) and -38% (given by DMI). The change for mean precipitation projected by ARPEGE-Climate is -24%. The number of wet days in general drops in the future climate whatever the RCM (figure 5-a). The strongest decrease is observed by the ETH model with -27%. C4I gives the smallest shift with -3%. Observed present-day pn05mm is around 25%. Pn05mm decrease projected by ARPEGE-Climate is -19%. Most of the 10 ENSEMBLE-RCM (8 RCMs) responses for the maximum dry period present an increase of up to 7.3 days (Figure 5-b). The pxcdd change projected by ARPEGE-Climate is 7.2 days. These pxcdd changes are not negligible considering the present-day values pxcdd (23.3 days). Concerning the 90th percentile, even though the RCMs do not agree on the sign of pq90 evolution, most of them presents a decrease which ranges between about -

2% and -24% (Figure 5-b). Only an increase is projected by 3 RCMs including ARPEGE-Climate which gives, however, the smallest increase (5%). At the end of this part, it can be seen that future changes issued from ARPEGE-Climate are in the range covered by the 10 ENSEMBLES-RCMs considered in this paper. To give a more precise idea on the range of uncertainties, the standard deviations for the four indices have been calculated over the projected changes given by all the models. The highest values of standard deviation are obtained for mean precipitation (15%) and the 90th percentile. The number of wet days presents a standard deviation of 8% and pxcdd a value of 2.9 days.

3. Conclusion

In order to assess the impacts of future climate change on Moroccan rainfall and to evaluate a statistical downscaling approach using large scale fields, two 30-years time slice experiments have performed with the Version 4 of the atmospheric GCM ARPEGE-Climate. This version has been run with a variable resolution configuration reaching 50 to 60 km over Morocco.

The link between north Atlantic weather regimes and Moroccan local precipitation has been investigated, in terms of precipitation average, and the frequencies of occurrence of wet and intense precipitation days. This analysis was performed with ERA40 reanalysis and observed station data. In a second step we considered the data produced the model. The weather regime approach extended to climate indices related to precipitation shows that the statistical downscaling technique using this large scale fields may not be the appropriate methodology in our case. The reason is that the results obtained do not agree with the main assumptions of the statistical downscaling approaches (stationarity hypothesis) using large scale patterns to address climate change at local scale. In fact, the links between weather regimes and local precipitation are not identical in the present and in the future climates. It is important, however, to take into account that this result concerns here Moroccan winter precipitation and may not be valid for other aspects of climate change. It also highlights the added value of RCMs in addressing climate change at local scale and the importance of the dynamical downscaling since it does not rely on this kind of assumption.

In the future scenario data for 2021-2050, it has been found that precipitation amounts and the occurrence frequency of wet days will decrease over all the country. The maximum dry spell length will increase over most of the country and especially in the regions western of the Atlas Mountains. The evolution of the highest percentiles of precipitation distribution is not spatially homogeneous. Coastal regions between Casablanca and Agadir may experience an increase in the 90th percentile of precipitation but no important changes are projected for the remaining part of the rainy region.

In order to assess a range of uncertainties due to climate modelling and compare the model results, present-day and SRES scenario A1B data issued from 10 ENSEMBLES-RCMs have been used. The statistical downscaling stationarity hypothesis using weather regimes to deduce local precipitation has been also evaluated using the outputs of this set of RCMs. We have show from several models that this hypothesis is not always validated; therefore we must be cautious when applying statistical downscaling schemes. In this case the stationarity hypothesis is not validated for all the models used in this study, indicating that our result is not model-dependent. Other methods for applying statistical downscaling like those using more local weather types as in Boé et al. (2006) could be evaluated in the case of Moroccan winter precipitation and might be more robust, because the pressure-precipitation link is more local. However, independently of the predictor used, direct RCM outputs are necessary to assess the validity of the statistical downscaling algorithm for the future climate and the

plausibility of the downscaled climate projections. The dynamical downscaling is then an approach that must be considered.

The assessment of future climate change impacts on Rabat rainfall using the 10 ENSEMBLES-RCMs has showed that ARPEGE-Climate results are in the range covered by these RCMs for all the considered climate indices. The spatial resolution of the GCM used (50 km versus 25 km in ENSEMBLES-RCMs) is not a real drawback considering that Morocco is located at the south-west corner of ENSEMBLES-RCMs domain and that in wintertime most advection comes from the lateral boundaries in these RCMs.

The weather regime analysis shows also the regime dependence of RCM performances; a result which can be taken into account for post-processing model data.

Acknowledgments

The authors are indebted to the colleagues from Météo-France and the ECMWF for developing the ARPEGE-IFS and to the Moroccan meteorological service for providing station daily data. This work was partly supported by the European Commission Programme FP6 under contract GOCE-CT-2003-505539 (ENSEMBLES). Special thanks are due to C. Goodess and D. Jacob for coordinating the ENSEMBLES experiments and to O.B. Christensen for making the data available.

References

- Boé, J., Terray, L., Habets, F., Martin, E., 2006. A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J Geophys Res*, 111, D23106, doi:10.1029/2005JD006889.
- Born, K., Christoph, M., Fink, A.H., Knippertz, P., Paeth, H., Steph, P., 2008. Moroccan climate in present and future: combined view from observational data and regional climate scenarios. In: Zeini, F., Hötzl, H. (Eds.), *Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa*. Springer, pp. 29-45.
- Déqué, M., Somot, S., 2008. Extreme precipitation and high resolution with Aladin. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 112(3-4):179-190
- Driouech, F., Déqué, M., Mokssit, A., 2008. Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco. *Climate Dynamics*. Springer. DOI 10.1007/s00382-008-0430-6.
- Durman, C.F., Gregory, J.M., Hassell, D.C., Jones, R.G., Murphy, J.M., 2001. A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates. *Q J R Meteorol Soc*, 127: 1005-1015
- Cassou, C., Terray, L., Phillips, A.S., 2005. Tropical Atlantic Influence on European Heat Waves, *J Climate*, 18: 2805–2811.
- Goodess, C., 2003. STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions: STARDEX. *European Geophysical Union Information Newsletter* 6, available on line at <http://www.the-eggs.org/articles.php?id=3>.
- Hu, Z.-Z., Bengtsson, L., Roeckner, E., Christoph, M., Bacher, A., Oberhuber, J. M., 2001. Impact of global warming on the interannual and interdecadal climate modes in a coupled GCM. *Climate Dyn* 17 : 361–374.
- Hu, Z.-Z., Wu, Z., 2004. The intensification and shift of the annual North Atlantic Oscillation in a global warming scenario simulation, *Tellus A*, 56: 112-124.
- Huntingford, C., Jones, R.G., Prudhomme, C., Lamb, R., Gash, J.H.C., Jones, D.A., 2003. Regional climate-model predictions of extreme rainfall for a changing climate. *Q J R Meteorol Soc*, 129: 1607-1621.
- Hurrell, J.W., van Loon, H., 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic oscillation. *Clim Change*, 36: 301–326.
- Hurrell, J.W., 2005. The North Atlantic Oscillation, *Encyclopedia of World Climatology*. J.E. Olivier, Ed. *Encyclopedia of earths Sciences*. Springer, pp 536-396.
- IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacob, D., Van den Hurk, B.J.J.M., Andrae, U., Elgered, G., Fortelius, C., Graham, L.P., Jackson, S.D., Karstens, U., Koepken, C., Lindau, R., Podzun, R., Rockel, B., Rubel, F., Sass, B.H., Smith, R., Yang, X., 2001. A comprehensive model intercomparison study investigating the water budget during the PIDCAP period. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 77: 19-44.
- Knippertz, P., Christoph, M., Speth, P. 2003. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorol Atmos Phys*, 83: 67–88.

- Köppen, W., 1936. Das geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie, Vol. 1, Part C, Gebr. Bornträger Verlag Berlin, 388 pp. (in German).
- Lamb, P.J., Pepler, R.A., 1987. North Atlantic Oscillation: concept and application. *Bull AmMet Soc*, 68: 1218–1225.
- Lamb, P.J., El Hamly, M., Portis, D.H., 1997. North-Atlantic Oscillation. *Geo Observateur*, 7: 103–113.
- Michelangeli, P.A., Vautard, R., Legras, B. 1995, Weather Regimes: Recurrence and Quasi Stationarity. *J Atmos Sci*, 52: 1237-1256.
- Plaut, G., Simonnet, E., 2001. Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Clim Res*, 17: 303-3.
- Portis, D.H., Walsh, J.E., El Hamly, M., Lamb, P.J., 2001. Seasonality of the North Atlantic Oscillation. *J Clim*, 14: 2069–2078.
- Salas-Mélia, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Guérémy, J.F., Marquet, P., Planton, S., Royer, J. F., Tyteca, S., 2005. Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model. *Note de Centre du GMGEC*, 103.
- Sanchez-Gomez, E., Cassou, C., Hodson, D.L.R., Keenlyside, N., Okumura, Y., Zhou, T., 2008. North Atlantic weather regimes response to Indian-western Pacific Ocean warming: A multi-model study. *GRL*, 35, L15706, doi:10.1029/2008GL034345.
- Solman, S. A., Nuñez, M.N., 1999. Local estimates of global climate change: a statistical downscaling approach. *International Journal of Climatology*, 19 (8): 835-861.
- Terray, L., Demory, M.E., Déqué, M., De Coetlogon, G., Maisonnave, E., 2004. Simulation of late-twenty-first-century changes in wintertime atmospheric circulation over Europe due to anthropogenic causes. *J Clim*, 17: 4630-4635.
- Ulbrich, U., Christoph, M., 1999. A shift of the NAO and increasing stormtrack activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing. *Clim Dyn* 15: 551–559.
- Uppala, S.M., Kållberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J-F, Morcrette, J-J, Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005. The ERA-40 re-analysis. *Q J R Meteorol Soc*, 131: 2961-3012.
- Vautard, R., 1990. Multiple Weather Regimes over the North Atlantic: Analysis of Precursors and Successors. *Mon Wea Rev*, 118: 2056-2081.
- von Storch, H., 1995. Inconsistencies at the interface between climate research and climate impact studies. *Meteor. Z.*, 4: 72–80.
- 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. In: Navarra A (ed), *Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability*. Springer Verlag, Berlin, pp. 119-14.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., Barrow, E.M., 2002. SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental and Modelling Software*, 17: 145-157.
- Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., Conway, D., Jones, P.D., Hewitson, B.C., Main, J., Wilks, D.S., 1998. Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research*, 34: 2995-3008.

Table legends

Table1: Name of the grid boxes from ARPEGE-Climate together with the location of the centre of each grid (longitude and latitude) box and the name of the nearest station.

Table 2: Changes simulated by the ARPEGE-Climate model for mean precipitation (mm/day) at the nearest grid box to each of the 14 stations. The first column represents the changes estimated by the direct approach (future minus present climate). The second and third columns represent respectively the changes for case 1 and case 2 computed from the weather regimes approach. In Case 1 only the changes in the weather regime frequencies are taken into account. In Case 2 only the changes in the composite of precipitation for each weather regime are taken into account. Sum column contains the sum of case 1 and case 2 estimations.

Table 3: Changes simulated by the 10 ENSEMBLES-RCM for mean precipitation (mm/day) at the nearest grid box of Rabat station. The second and third columns represent respectively the changes for case 1 and case 2 computed from the weather regimes approach. In Case 1 only the changes in the weather regime frequencies are taken into account. In Case 2 only the changes in the composite of precipitation for each weather regime are taken into account. Sum column contains the sum of case 1 and case 2 estimations.

Figure captions

Figure 1: Location of the 14 stations over Morocco and of the ARPEGE-Climate model grid-points (land only).

Figure 2: Observed present-day relative changes (%) in the frequency of intense precipitation days (map top of each square), in the frequency of wet days (map middle of each square) and in the mean precipitation (map down of each square) for each Z500 weather regime. Values between parentheses are the observed weather regime frequencies.

Figure 3: Present-day relative changes (%) in the frequency of intense precipitation days (map top of each square), in the frequency of wet days (map middle of each square) and in the mean precipitation (map down of each square) for each Z500 weather regime, as simulated by ARPEGE-Climate model (MORC). Values between parentheses are the simulated weather regime frequencies for present-day (left values) and for the future (right values).

Figure 4: Future changes projected by ARPEGE-Climate model for a): mean precipitation (in %), b) total number of wet days (in %), c) maximum number of consecutive dry days and d) 90th percentile (in %).

Figure 5: Future changes projected by ARPEGE-Climate model (MOR) and the 10 ENSEMBLES-RCMs at the nearest grid box to Rabat station. a): mean precipitation (red; in %) and pn05mm (violet; in %). b): pxcdd (orange; day, left axis) and pq90 (blue; %, right axis).

Box name	Latitude of the box centre	Longitude of the box centre	Nearest station
TN	35.41	-5.72	Tangier (TNG)
OJ	34.40	-1.65	Oujda (OJD)
KN	34.04	-6.61	Rabat (RBT)
RB	34.04	-6.61	Kenitra (KNT)
FE	33.69	-4.48	Fès (FES)
MK	33.46	-5.16	Meknès (MKN)
CS	33.16	-7.33	Casablanca (CSB)
IF	33.46	-5.16	Ifrane (IFR)
SF	32.34	-9.00	Safi (SAF)
MD	32.41	-4.51	Midelt (MDL)
ES	31.33	-9.34	Essaouira (ESS)
MR	31.22	-7.98	Marrakech (MRK)
AG	30.32	-9.31	Agadir (AGD)
OR	30.53	-6.48	Ouarzazate (ORZ)

Table1

Stations	PC	Case 1	Case 2	Sum
Tangier	-0.28	-0.12	-0.16	-0.28
Oujda	-0.36	-0.03	-0.33	-0.36
Kenitra	-0.19	-0.05	-0.14	-0.19
Rabat	-0.19	-0.05	-0.14	-0.19
Fes	-0.36	-0.08	-0.28	-0.36
Meknes	-0.43	-0.12	-0.32	-0.43
Casablanca	-0.18	-0.05	-0.12	-0.18
Ifrane	-0.43	-0.12	-0.32	-0.43
Safi	-0.04	-0.05	0.00	-0.04
Midelt	-0.05	-0.01	-0.04	-0.05
Essaouira	-0.08	-0.06	-0.03	-0.08
Marrakech	-0.09	-0.03	-0.07	-0.09
Agadir	-0.05	-0.04	-0.01	-0.05
Ouarzazate	-0.10	-0.01	-0.09	-0.10

Table 2

RCMs	Rc	Csf	Csc	Sum
MORC	-0.19	-0.14	-0.07	-0.21
C4IC	0.16	0.13	0.03	0.16
CNRC	-0.28	-0.31	0.02	-0.28
DMIC	-0.24	-0.25	0.00	-0.25
ETHC	-0.46	-0.43	-0.06	-0.49
KNMC	-0.50	-0.49	0.01	-0.48
MPIC	-0.48	-0.47	0.00	-0.47
MTNC	-0.98	-0.80	-0.22	-1.02
METC	-0.22	-0.19	-0.05	-0.23
OURC	-0.07	-0.14	0.06	-0.08
UCLC	-0.42	-0.42	-0.03	-0.45

Table 3

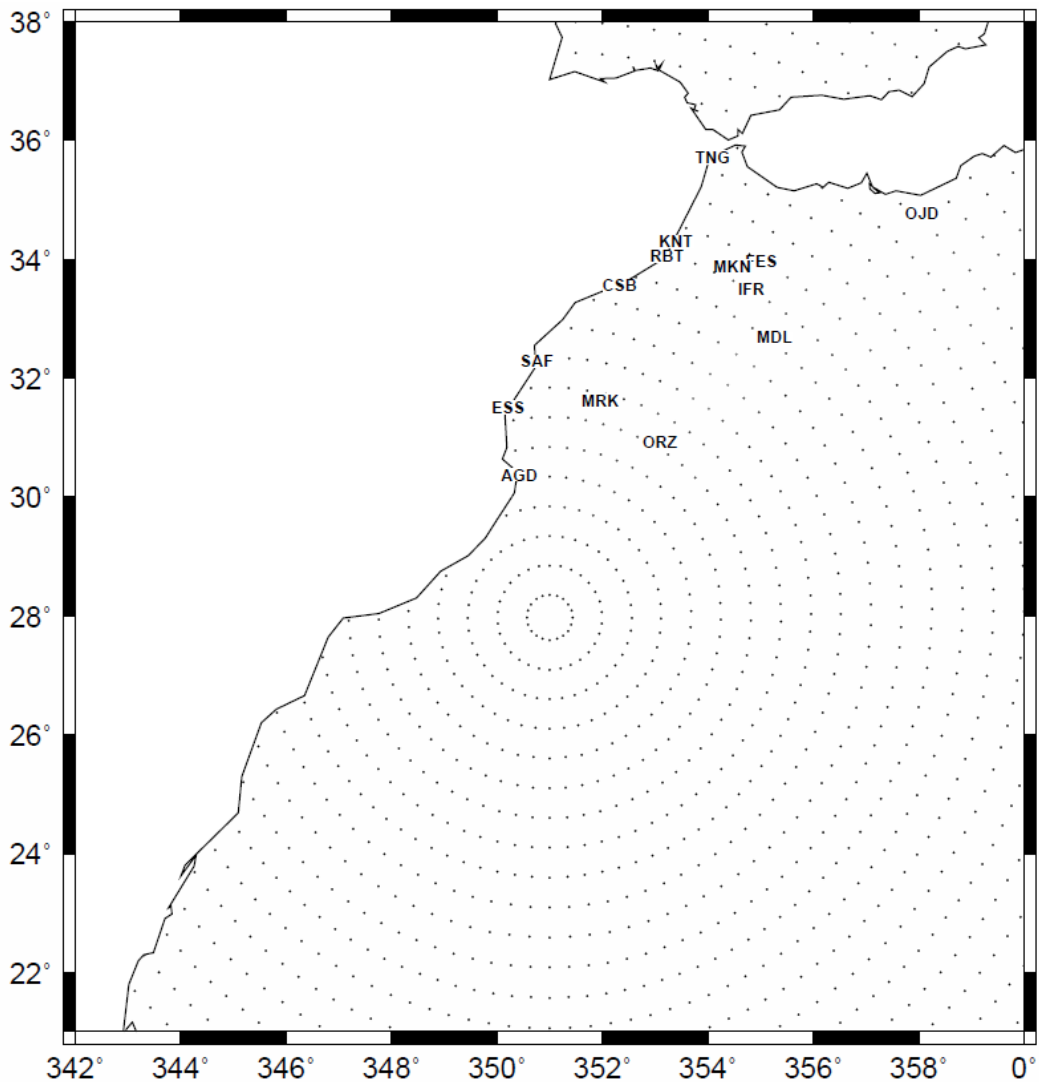


Fig.1

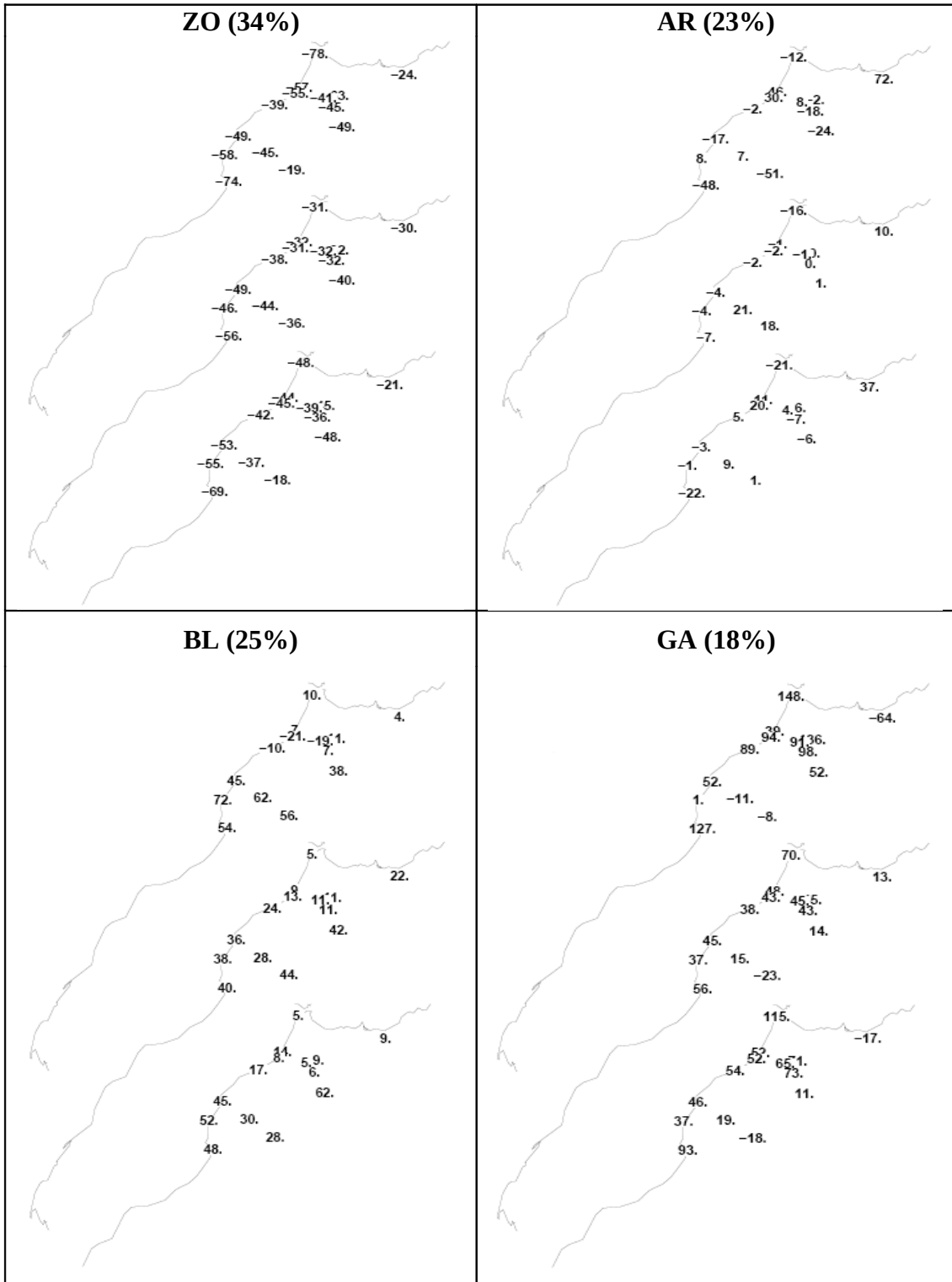


Fig. 2

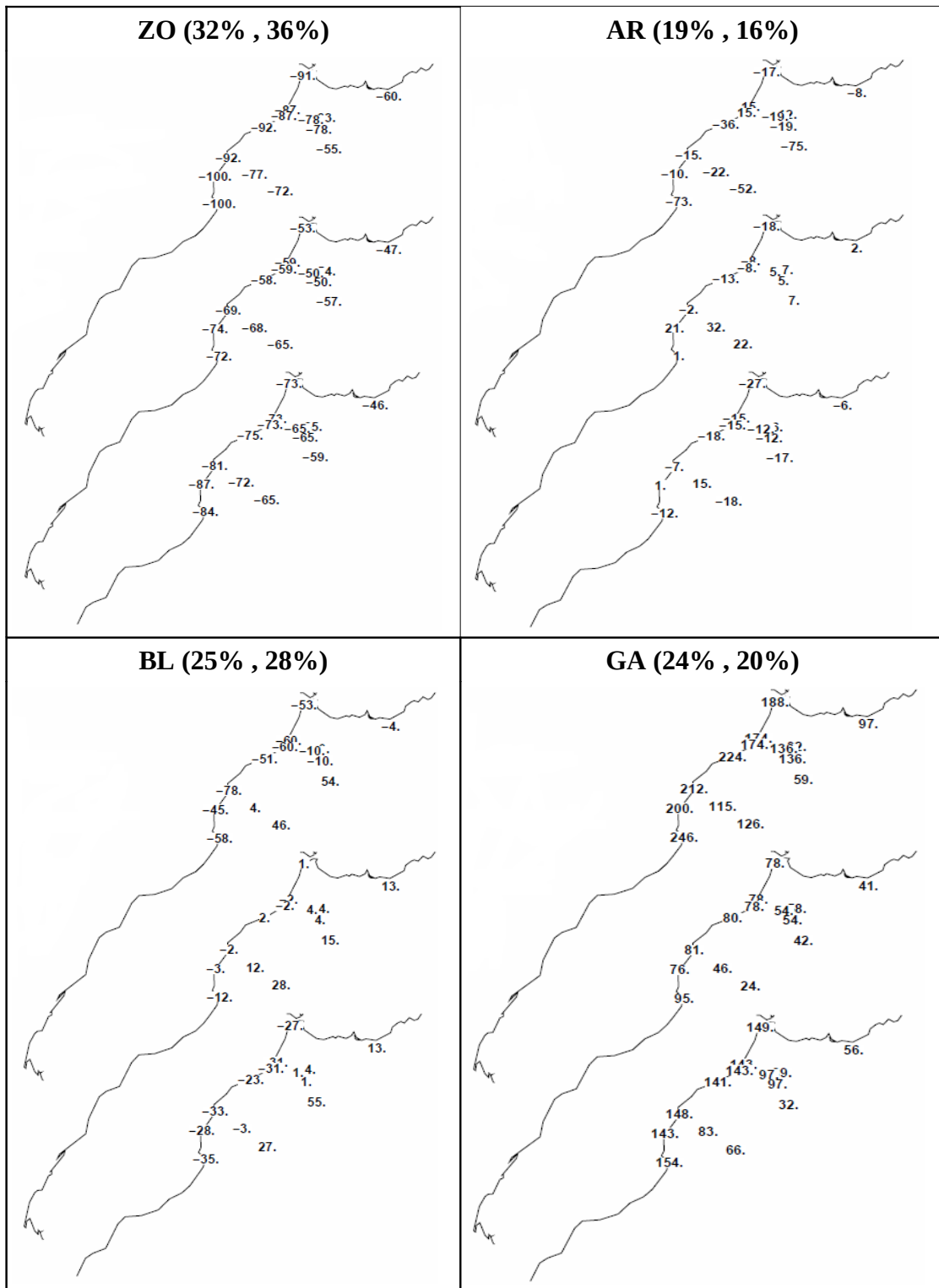


Fig. 3

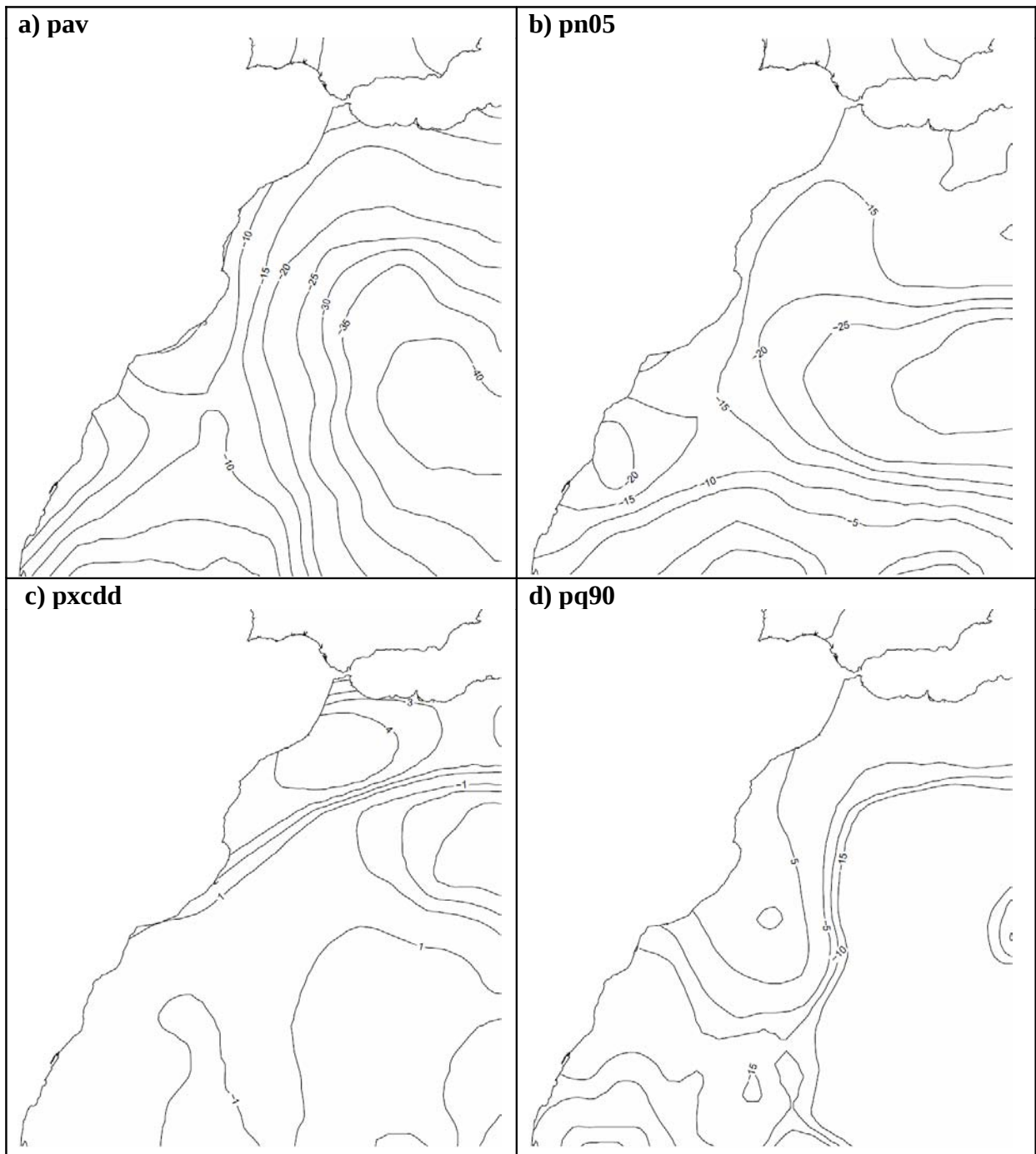


Fig. 4

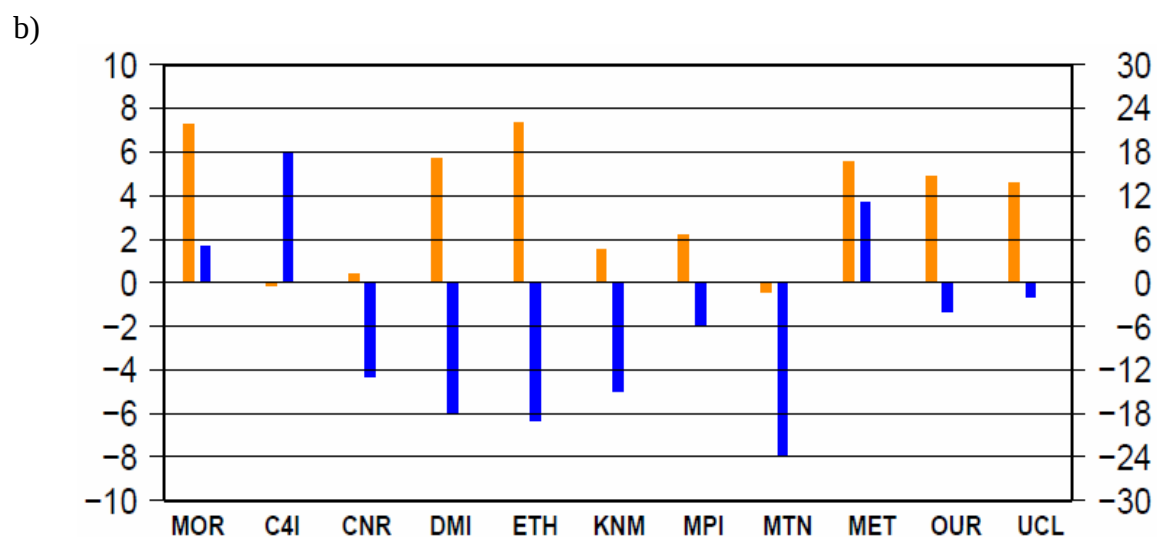
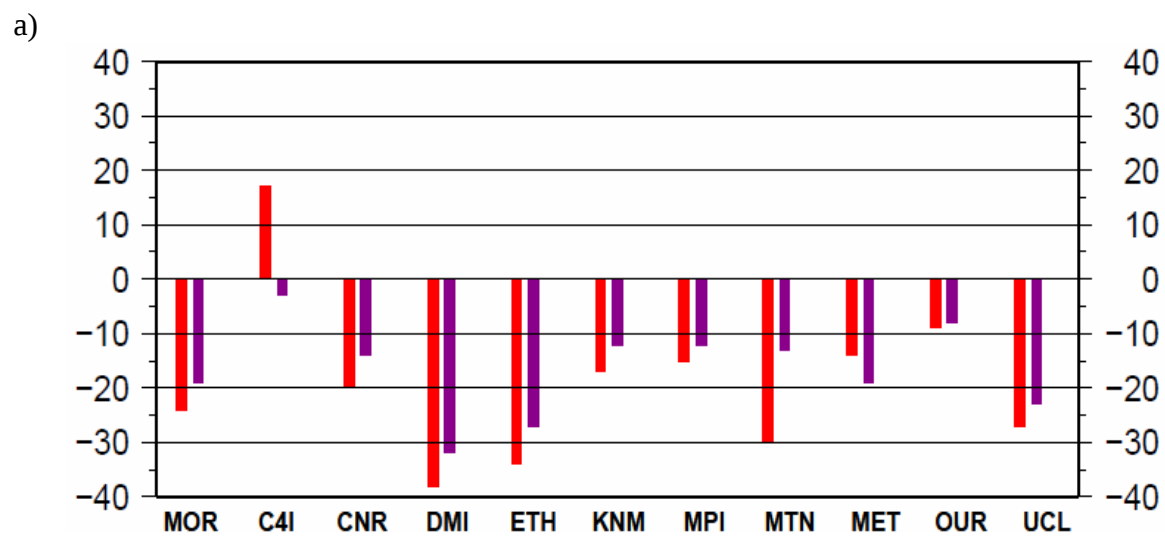


Fig. 5

4.4. Analyses supplémentaires

Dans le paragraphe précédent nous avons montré que la grande majorité des MRC (incluant ARPEGE-RV) donnent des évolutions vers la baisse de la pluviométrie hivernale au niveau de Rabat. Nous étendons dans ce paragraphe l'évaluation de la marge des incertitudes au reste des 14 stations. La Fig. 4.2-a montre le changement moyen calculé pour chacune des stations sur l'ensemble des 11 MRC ainsi que le nombre de modèles projetant une augmentation. Il est clair que partout la prédominance est à la baisse des cumuls. Le changement moyen revient à des réductions d'environ 10% à 20% pour toutes les stations à l'exception de Midelt dont le changement moyen ne dépasserait pas -2%. Rappelons que selon les modèles à faible résolution du GIEC, la baisse des précipitations marocaines sous le scénario IPCC-A2 serait de l'ordre de 20% en fin du siècle courant. La Fig. 4.2-b montre les changements maximal et minimal obtenus pour chacune des stations. Les plus fortes baisses sont comprises entre 27% et 42% et atteignent 57% à Ouarzazate. Les changements positifs les plus élevés couvrent une fourchette plus large et varient entre +3% et +70%. Les hausses, projetées, d'ailleurs par très peu de modèles, ne dépasseraient cependant pas 30% dans la plus part des cas. Comme pour Rabat, les changements futurs de la précipitation moyenne issus d'ARPEGE-RV se trouvent dans l'intervalle couvert par les 10 MRC d'ENSEMBLES. Ce résultat est aussi valable pour les autres indices pluviométriques relatifs au nombre de jours humides, au nombre d'événements de fortes précipitations et au nombre maximal de jours consécutifs secs (voir Tableau 1 de l'annexe G). Les changements moyens de chacun de ces trois indices vont dans le sens de l'assèchement pour toutes les stations. Les deux premiers indices diminueraient en moyenne respectivement de 8% à 20% et de 7% à 23%. La période maximale de sécheresse hivernale augmenterait en moyenne de 1 à 6 jours. En termes de dispersion, la précipitation moyenne a généralement les plus fort écart-types des changements futurs calculés sur les 11 modèles (voir Tableau 2 de l'annexe G). Pour toutes les stations, la plupart des modèles convergent vers des baisses pour la pluviométrie moyenne.

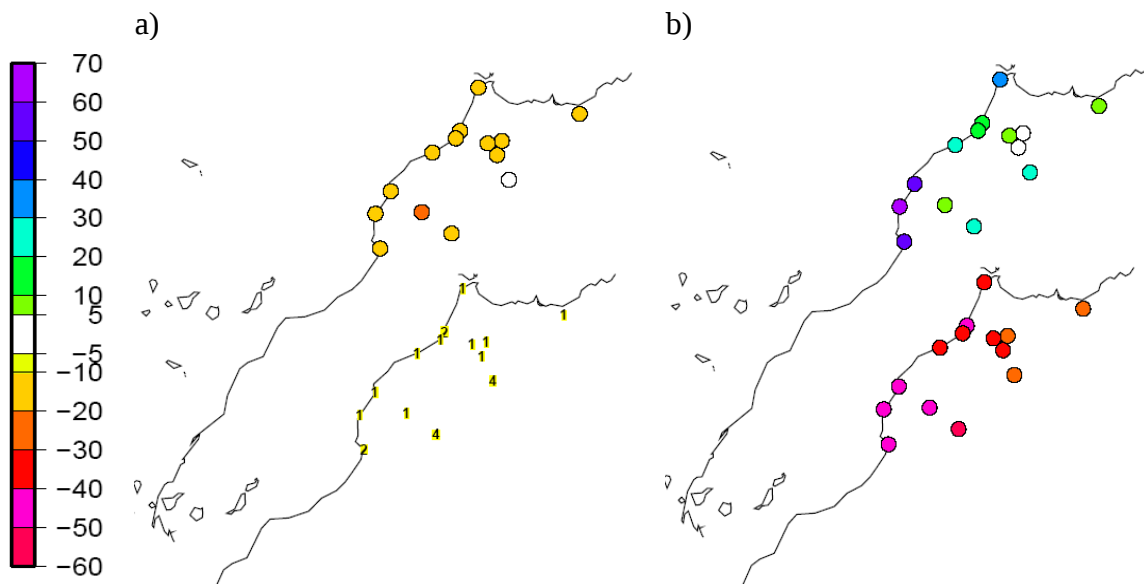


Fig. 4.2 a) Changement moyen (%) calculé, pour chacune des stations météorologiques, sur les 11 MRC incluant ARPEGE-RV (carte du haut) et le nombre de modèles projetant une augmentation (carte de bas). b) Changements maximal (carte de haut) et minimal (carte de bas) obtenus. Saison d'hiver (DJF).

4.5.Effet de la correction par quantiles

Comme vu précédemment, les simulations faites à l'aide des MRC, même si elles permettent d'améliorer la représentation du climat régional et d'approcher au mieux les phénomènes locaux, ne sont pas une reproduction parfaite de la réalité. D'autre part, les modèles d'impacts sont généralement des outils statistiques calibrés à l'aide d'observations météorologiques même s'ils peuvent contenir des formulations ou équations basées sur la physique. En outre, ils sont souvent non-linéaires et peuvent être très sensibles à des effets de seuil. Pour limiter cette « faiblesse » et permettre aux données des MRC d'être intégrées dans les modèles d'impact de façon plus efficace, des méthodes de correction (ou calibrage) des sorties de modèles peuvent être appliquées.

Nous nous focalisons dans ce paragraphe sur le modèle ARPEGE-RV, ce qui permettra d'évaluer l'effet de la correction sur les changements futurs estimés. Dans le chapitre 2 comme dans le paragraphe 4.3 précédent, nous avons montré que les performances d'ARPEGE-RV diffèrent d'un régime de temps à un autre (une constatation valable aussi pour les autres MRC considérés précédemment). Il est donc important de pouvoir appliquer une méthode de correction qui tient compte de cet aspect.

Plusieurs méthodes de correction existent dans la littérature mais beaucoup d'entre elles, dont notamment les méthodes de correction de biais (comme celle utilisée par exemple dans Durman al al. (2001), ne permettent de corriger que la moyenne et n'améliorent pas forcément les autres aspects de la distribution. Déqué (2007) a utilisé la méthode de correction par quantiles qui consiste à corriger la distribution de la variable simulée par le modèle de façon non-paramétrique, quantile par quantile en fonction des observations. Cette correction permet de faire coïncider la courbe de fonction de densité cumulative (cdf) de la variable simulée par le modèle avec celle issue des observations. En pratique nous utilisons les centiles et la correction revient à aligner la courbe quantiles-quantiles (voir Fig.G.1 de l'annexe G), obtenue en traçant les centiles du modèle en fonctions de ceux observés, sur la diagonale (droite $y=x$).

La méthode de correction par quantiles revient, dans le cas des précipitations par exemple, à supposer implicitement que le modèle est capable de simuler la catégorie et le rang d'un événement pluvieux mais pas forcément les valeurs quantitatives, c'est à dire que la « prévision » jour très pluvieux suivi par jour très sec est qualitativement juste et que le seul problème concerne les valeurs quantitativement associées aux événements « très pluvieux » et « très secs » dans le modèle. Le modèle est en quelque sorte considéré comme produisant plutôt des quantiles comparativement à sa climatologie que des mm. Il est important de signaler que si cette méthode est faite pour améliorer certaines caractéristiques de la distribution statistiques du paramètre, elle n'améliore pas forcément ses propriétés temporelles telles que la persistance (durée d'une séquence sèche ou humide par exemple) puisqu'elle ne tient pas compte de l'ordre chronologique de la série.

Dans notre étude, nous étendons cette méthode aux régimes de temps en l'appliquant aux données quotidiennes correspondant à chaque régime séparément. Ceci permet de prendre en compte le changement de l'aptitude du modèle en fonction des régimes et d'appliquer des corrections mieux adaptées à chacun de ces régimes. En outre, dans le cas d'un changement des fréquences d'occurrence des régimes (comme c'est projeté par ARPEGE-RV et les autres modèles considérés ci-dessus), la correction par régimes serait plus valable dans le futur que la fonction de correction construite de façon globale sur l'ensemble des jours du climat présent. A titre d'illustration, un régime trop sec dans le climat présent simulé par le modèle et dont la fréquence diminuerait en faveur d'un autre qui est trop humide dans le modèle par rapport à l'observation rendrait la correction établie sur l'ensemble des jours du climat présent moins valide pour le futur.

Pour chaque station météorologique et chaque régime de temps, une table de correction est construite en faisant correspondre à chaque centile de la précipitation simulée (pour le climat présent de la période 1971-2000) au niveau de la maille du modèle la plus proche, la valeur du centile correspondant pour la précipitation observée. Cette table de correction peut être ensuite utilisée pour corriger la variable simulée quelle que soit la période temporelle. Connaissant la valeur du modèle en un jour donné d'un régime donné, présent ou futur, on recherche dans la table de correction, correspondant à ce régime, les deux centiles du modèle qui l'encadrent, et on fait une interpolation linéaire des deux valeurs observées correspondantes pour trouver la valeur corrigée. Dans 1% des cas, les valeurs du modèle sont supérieures au 99ème centile et ne peuvent donc être encadrée par deux centiles. Au lieu de faire une extrapolation, nous ajoutons à la distribution un « centième » centile qui est la valeur maximale. Comme nous nous intéressons aux précipitations, le problème de la barre inférieure ne se pose pas dans notre cas puisque le premier centile est égal à 0. L'ajout du « centième » centile ne suffirait, cependant, pas dans le cas de la correction d'une simulation autre que celle à l'aide de laquelle la table de correction est construite (une simulation future par exemple) et dont certaines valeurs dépasseraient le « centième » centile. Comme dans Déqué (2007), nous appliquons aux valeurs dépassant le dernier « centile » de la fonction de correction (qui est égale au maximum de la simulation de référence) une correction constante égale au dernier coefficient de la fonction de correction.

Etant donné que les changements de précipitations sont dressés en termes de précipitation moyenne (p_{av}), du nombre de jours humides (p_{n05}), du nombre d'événements de fortes précipitations (p_{nl90}) et du nombre de jours consécutifs secs (p_{xcdd}), il est tout à fait logique d'évaluer cette méthode de correction par rapport à ces indices. Après correction, les 3 premiers indices qui décrivent les propriétés de la fonction de distribution de probabilité sont presque identiques à ceux observés. La Fig. 4.3 montre l'indice p_{xcdd} observé au niveau de chacune des 14 stations météorologiques ainsi que celui simulé par le modèle dans les mailles les plus proches avec et sans correction. A l'exception du site du nord-est (Oujda) la qualité du modèle se trouve améliorée dans toutes les stations. Signalons que nous avons aussi évalué l'apport de cette méthode de correction sur l'hiver étendu (octobre à avril) et nous l'avons comparé à la méthode de correction par quantiles qui ne tient pas compte des régimes (pas de répartitions des données quotidiennes selon les régimes) (non montré). Cette évaluation confirme non seulement l'amélioration de la qualité du modèle par la correction par quantiles étendue aux régimes de temps mais aussi l'apport, généralement positif, de celle-ci par rapport à la correction par quantiles qui ne tient pas compte des régimes.

Le tableau 4.4 montre les changements futurs au niveau des mailles les plus proches des 14 stations météorologiques obtenus après avoir appliqué la correction par quantiles tenant compte des régimes de temps aux sorties du modèle. Même après correction, la diminution, dans le futur, des cumuls pluviométriques hivernaux serait générale. Elle varierait de 10% à 25% pour la plupart des stations et atteindrait 35% à Ouarzazate. Cette baisse des cumuls serait, comme pour les données non corrigées, accompagnée généralement d'une réduction du nombre de jours humides, du nombre maximal de jours consécutifs secs et du nombre d'événements de fortes précipitations. Même si dans la majorité des cas la correction n'a pas changé le signe des changements elle a eu un effet légèrement modérateur. Les changements des indices ont, en effet, généralement diminué en amplitude avec la correction mais ils restent dans la marge des incertitudes couverte par les projections issues des MRC d'ENSEMBLES.

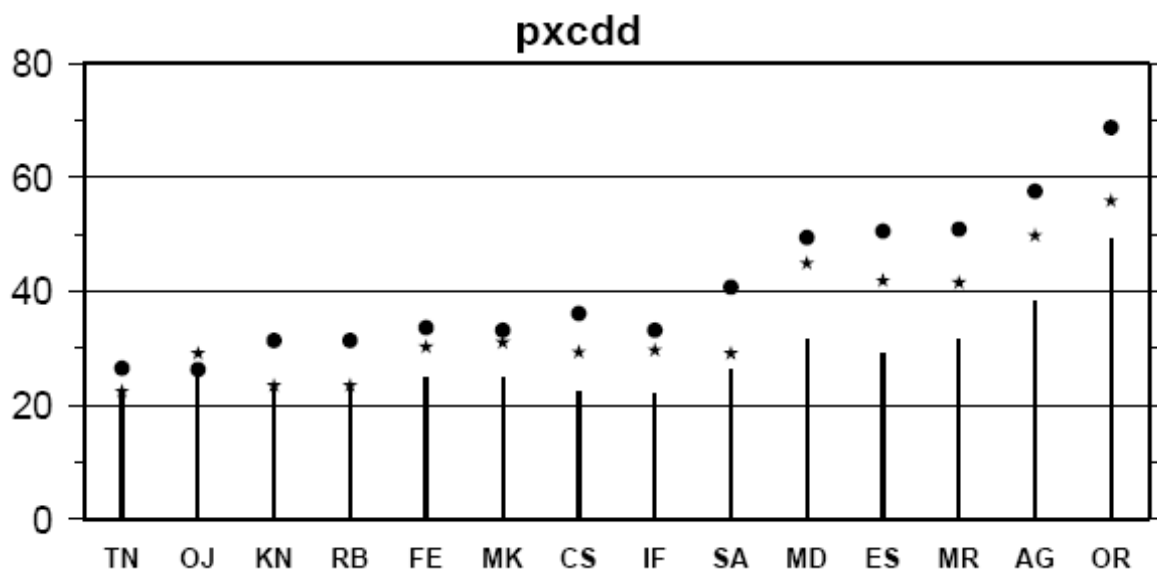


Fig. 4.3 Nombre de jours consécutifs secs (pxcdd) observé (barres) au niveau de chacune des 14 stations météorologiques ainsi que celui simulé par ARPEGE-RV au niveau des mailles les plus proches sans correction (ronds) et avec correction (étoiles). Saison d'hiver (DJF). Voir tableau 4.4 pour les noms des stations.

Stations	pav		pn05mm		pxcdd		pn190	
	Corr	Diff	Corr	Diff	corr	Diff	Corr	Diff
Tanger (TN)	-13	4	-16	-1	3.7	0,9	-18	-2
Oujda (OJ)	-26	1	-28	-5	9.5	1,5	-28	-4
Kenitra (KN)	-18	6	-16	3	3.8	-3,5	-15	5
Rabat (RB)	-18	6	-15	4	3.9	-3,4	-16	4
Fes (FE)	-21	1	-20	2	5.1	0,5	-19	4
Meknès (MK)	-21	-2	-20	-1	1.5	-1,5	-19	0
Casablanca (CS)	-14	5	-14	2	3.0	-4	-15	-1
Ifrane (IF)	-21	-2	-19	0	2.6	-0,4	-20	-1
Safi (SA)	-5	7	-12	2	1.6	-3,6	-13	1
Midelt (MD)	-12	3	0	10	-0.9	-3,6	0	8
Essaouira (ES)	-9	4	-11	4	-0.6	-2,1	-10	7
Marrakech (MR)	-13	4	-14	5	-1.7	-3,7	-12	6
Agadir (AG)	-12	-1	-13	9	0.9	-4,8	-17	4
Ouarzazate (OR)	-35	7	-4	17	0.4	3,4	-5	13

Tableau 4.4 Changements futurs (colonnes de gauche) au niveau des mailles les plus proches des 14 stations météorologiques obtenus après correction des sorties d'ARPEGE-RV. Les colonnes de droite montrent la différence entre les changements futurs obtenus avec les données corrigées et ceux issus des données brutes du modèle. pav (%), pn05mm (%), pxcdd (j), et pn190 (%).

4.6.Conclusion

L'évaluation de la marge des incertitudes liée aux changements climatiques et inhérente à la modélisation a été réalisée à l'aide des données d'une dizaine de modèles climatiques régionaux du projet ENSEMBLES, après un examen des capacités de ceux-ci à simuler la pluviométrie marocaine. Malgré une prédominance de la sous-estimation des précipitations, les performances des modèles varient en fonction des régimes de temps ; un résultat déjà obtenu aussi avec ARPEGE-RV. Les projections futures des MRC d'ENSEMBLES sont globalement compatibles avec celles d'ARPEGE-RV. Elles optent en effet plus pour une réduction des cumuls pluviométriques (en moyenne d'environ 10% à 20%) qui serait généralement accompagnée d'une baisse du nombre de jours humides et du nombre d'événements de fortes précipitations et d'une augmentation du nombre maximal de jours consécutifs secs. Certains MRC donnent des changements positifs pour certaines stations mais leur nombre reste très limité et n'excède pas 1 dans la plus part des cas. Que ça soit pour la pluviométrie moyenne ou pour les autres indices pluviométriques, les changements futurs issus d'ARPEGE-RV se trouvent dans l'intervalle couvert par les 10 MRC d'ENSEMBLES.

Un autre résultat principal issu de ce chapitre est lié la possibilité d'utilisation d'une méthode de réduction d'échelle statistique basée sur les régimes de temps de l'Atlantique nord. Le test de cette méthode, réalisé à la fois à l'aide d'ARPEGE-RV et des 10 autres MRC, pour la déduction des changements futurs des précipitations locales a montré la non-validité de cette approche pour le cas de la pluviométrie hivernale marocaine.

Enfin, l'apport de la correction par quantiles appliquée aux données d'ARPEGE-RV sur les changements futurs a été examiné pour les 14 stations météorologiques. Malgré un effet légèrement modérateur (légère diminution de l'amplitude des changements) la correction n'a pas changé le signe des changements et a maintenu l'évolution vers un assèchement du climat du Maroc.

5. Impacts potentiels sur l'hydrologie d'un bassin versant du Maroc

5.1. Introduction

Si la ressource en eau a une importance cruciale dans la vie de l'homme et la durabilité des écosystèmes, elle est aussi un élément-clé du développement, en particulier pour produire et entretenir la prospérité par le biais de l'agriculture, de la pêche, de la production d'énergie, de l'industrie, des transports et du tourisme. Dans le cas de pays à ressources hydrologiques modestes comme le Maroc, l'évaluation des impacts potentiels du changement climatique sur l'hydrologie est indispensable, d'autant plus quand la précipitation, l'une des principales origines de la dynamique des ressources en eau, risque de diminuer dans le futur.

Les trois derniers chapitres ont été dédiés en grande partie à l'estimation et à l'analyse des changements que subirait, sous le scénario SRES A1B, le climat du Maroc dans le futur selon le modèle ARPEGE-RV ainsi que d'autre MRC. Dans ce chapitre nous nous consacrons à l'évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur l'hydrologie de l'un des plus grands bassins hydrologiques du Maroc : le bassin versant de la Moulouya. Nous utilisons pour cela les sorties d'ARPEGE-RV qui, rappelons le, ont une résolution de l'ordre de 50km sur le Maroc.

L'hydrologie du bassin versant de la Moulouya, a fait l'objet de différentes études (Snoussi et al., 2002 ; Singla, 2009 ; Milano, 2009) antérieures, mais, à notre connaissance, les travaux qui ont abordé l'évaluation des impacts futurs en utilisant les scénarios climatiques résultants de méthodes de réduction d'échelle dynamiques sont rares ou inexistantes.

Après un bref aperçu sur le bassin versant de la Moulouya, nous décrivons le modèle hydrologique ainsi que les données utilisées. Nous procéderons ensuite au calibrage et validation du modèle et enfin à l'évaluation des impacts.

5.2. Le bassin versant de la Moulouya

Le bassin de la Moulouya s'étend sur une superficie de 55.500 km² (www.water.gov.ma) à l'est du Maroc. La rivière de la Moulouya de longueur d'environ 600 km prend sa source à Alemsid à une altitude de 1170m à la jonction du massif du moyen Atlas et du haut Atlas et se jette à Saidia (Ras el ma) en Méditerranée. L'apport moyen annuel à l'embouchure de la Moulouya est de l'ordre de 920 millions de m³/an (période 1970-98).

Le climat du bassin est de type méditerranéen avec une pluviométrie annuelle relativement faible et irrégulière (cumuls annuels de 200 à 400 mm). Le cumul annuel de précipitation peut varier de moins de 100 mm à plus de 600 mm. Les températures moyennes varient généralement entre 5°C et 18°C l'hiver et entre 18°C et 31°C l'été. La zone hydrographique de la Moulouya se trouve à la fois sous l'influence climatique de l'Atlantique et la Méditerranée et les plus fortes pluies sont généralement associées à une circulation cyclonique à l'ouest de cette dernière (Knippertz et al. 2003).

5.3. Description du modèle hydrologique

Un modèle hydrologique peut être défini comme étant une représentation mathématique des mécanismes de transfert entre les différentes composantes du cycle hydrologique d'un bassin versant. Les modèles hydrologiques se scindent en deux familles : modèles déterministes et modèles stochastiques. Parmi les modèles déterministes il y a les modèles hydrologiques conceptuels globaux qui schématisent le cycle hydrologique et, à

partir de données d'observations hydro-météorologiques, établissent des relations pluie-débit empiriques, sans lien direct avec des lois physiques.

Dans le cadre de cette étude nous utilisons comme modèle hydrologique le modèle conceptuel global GR2M (Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel) développé par le CEMAGREF. En termes historiques, parmi les premiers essais de modélisation à pas de temps mensuel avec un modèle pluie-débit simple, nous pouvons citer ceux effectués par Rifaat (1980) sur le bassin de l'Orgeval en France. Kabouya (1990) a ensuite mis au point un modèle mensuel GR3M, à trois paramètres, pour l'appliquer à des problèmes d'évaluation de la ressource en eau en Algérie septentrionale (Kabouya et Michel, 1991). Makhoulouf (1994) a également travaillé sur un modèle mensuel en proposant une version simplifiée de GR3M à deux paramètres, le modèle GR2M (Makhoulouf et Michel, 1994), qui a été par la suite améliorée par Mouelhi (2003) (<http://www.cemagref.fr/webgr/Historique.htm#Pas%20de%20temps%20mensuel>).

Le modèle GR2M fonctionne au pas de temps mensuel et ne comporte que deux paramètres de calage : X1 la capacité du réservoir de production (positif et exprimé en mm) et X2 le coefficient d'échanges souterrains (positif et adimensionnel). X1 permet de déterminer la répartition des volumes précipités entre infiltration, évaporation et écoulement et X2 la part du volume des eaux écoulées se retrouvant à l'exutoire et ainsi le débit délivré par le réservoir (Lavabre, 1997 ; Mouelhi et al., 2006). GR2M nécessite comme données en entrée la capacité en eau du sol, les précipitations mensuelles et l'évapotranspiration potentielle mensuelle au niveau de chacune des mailles incluses dans le bassin versant, ce qui représente peu de variables, et c'est ce qui rend GR2M intéressant, au-delà de sa robustesse prouvée par ailleurs dans maintes études (Paturel et al., 2003, Dezetter et al., 2008, par exemple). En effet, la disponibilité des données est la contrainte majeure à l'application de la plupart des modèles hydrologiques sur de très grands bassins versants. Les mailles ont une taille de 50km*50km. La pluie et l'évapotranspiration potentielle sont modulées par le paramètre X1. La détermination des paramètres X1 et X2 se fait sur une période dite de calage où les débits sont connus et au cours de laquelle le modèle GR2M effectue une série d'analyses et d'ajustements à l'aide de deux méthodes d'optimisation (Méthodes de Rosenbrock et du Simplex). Cette optimisation est ensuite évaluée par l'intermédiaire du critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) reliant les débits observés aux débits simulés par le modèle. La phase de calage consiste ainsi à sélectionner les deux paramètres X1 et X2 maximisant le critère de Nash. Après le calage, une phase dite de validation est nécessaire pour vérifier la validité des paramètres sélectionnés en appliquant le modèle sur une autre période d'observations qui n'a pas été utilisée pour la phase de calage.

5.4. Données utilisées

Les données de précipitations mensuelles sont issues du Climatic Research Unit – CRU- (New et al. 2000) disponibles sur la base de données SIREM de l'UMR HydroSciences Montpellier (Dieulin et al., 2006). Elles sont spatialisées sur une grille de 0.5° de résolution et couvrent la période 1901-2002. Les données de l'ETP sont calculées à l'aide de la formule de Thornthwaite (Réménieras, 1986; Milano, 2009) sur une grille de la même résolution et sur la même période.

Les données des débits mensuels sont issues de l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, elles couvrent la période 1956-2000. Nous nous focalisons dans ce qui suit sur les débits à la station hydrologique de Dar ElCaid située à 34,24° nord et 3.32° ouest. Cela revient à étudier une superficie de bassin d'environ 24 430 km². Le choix de cette station est dû, outre la disponibilité des données, à son emplacement à l'amont des barrages hydrauliques

susceptibles de biaiser l'estimation de la relation pluie-débit. Afin d'éviter un certain nombre de données manquantes, les deux années 1956 et 1957 sont écartées.

Les données issues du CRU ainsi que celles des débits observés relatifs au climat présent sont utilisées pour le calibrage et la validation du modèle hydrologique.

La forte variabilité interannuelle des pluies et débits est illustrée par la Fig. 5.1 qui met en relief une relative bonne relation pluies-débits sur pratiquement toute la période (1958-2000). Cette relation se traduit par un coefficient de corrélation entre les pluies et les débits de 0.8. Entre 1958 et 2000 les précipitations et les débits ont connu des tendances à la baisse annuelles respectivement de 2.8mm et 3.5m³/s. L'évapotranspiration potentielle (ETP) a aussi connu une évolution non négligeable ; à savoir une hausse d'environ 0.7 mm/an. Tous ces éléments reflètent l'importance de l'impact du climat et ses évolutions sur les débits du bassin.

Pour l'estimation des changements futurs des débits, nous utilisons les précipitations et températures simulées par ARPEGE-RV pour les climats futur (2021-2050) et présent (1971-2000).

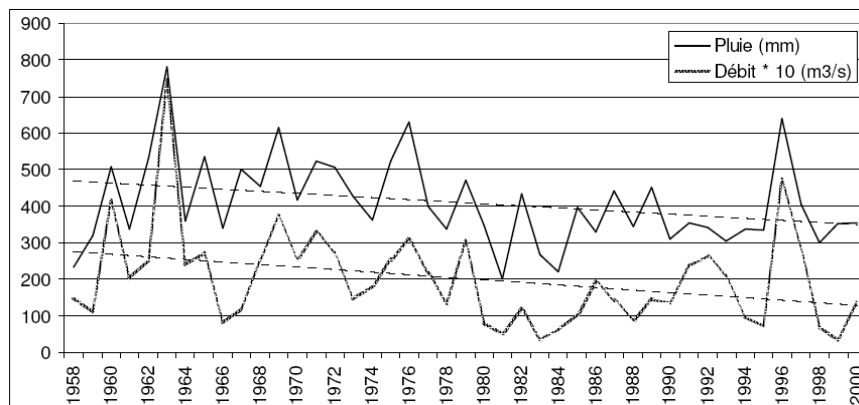


Fig. 5.1 Evolution des débits observés et des pluies moyennes (issues du CRU) au bassin versant de la Moulouya (Dar ElCaid) ; les débits sont multipliés par 10.

5.5. Calage et validation du modèle hydrologique

Avant d'utiliser le modèle GR2M pour le calcul des changements futurs, on a procédé à son calage à l'aide des débits observés et des précipitations du CRU. Le calage et la validation ont été effectués sur différentes périodes afin de trouver la formulation qui reproduit au mieux la relation pluies-débits. La qualité des différents calages et validations est évaluée à l'aide du critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970).

La meilleure période de calage trouvée est 1958-1972 avec un critère de Nash de 71%. La validation faite sur la période 1973-1990 donne un critère de Nash de 60% traduisant une qualité moyenne du modèle à représenter les débits observés. En effet, bien que la dynamique générale des écoulements soit assez bien reproduite, ce qui donne un coefficient de corrélation de 0.8 entre les débits observés et ceux calculés, le modèle montre des difficultés à reproduire les pointes de crue (Fig. 5.2). Au cours des périodes humides au sens hydrologique, les volumes écoulés sont généralement sous-estimés (jusqu'à 50 m³/s) tandis qu'au cours des périodes sèches le modèle a tendance à les surestimer. La prolongation de la période de validation jusqu'en 2000 fait baisser le critère de Nash à 45%. Ceci est probablement lié au renforcement des prélèvements à partir des années 1990.

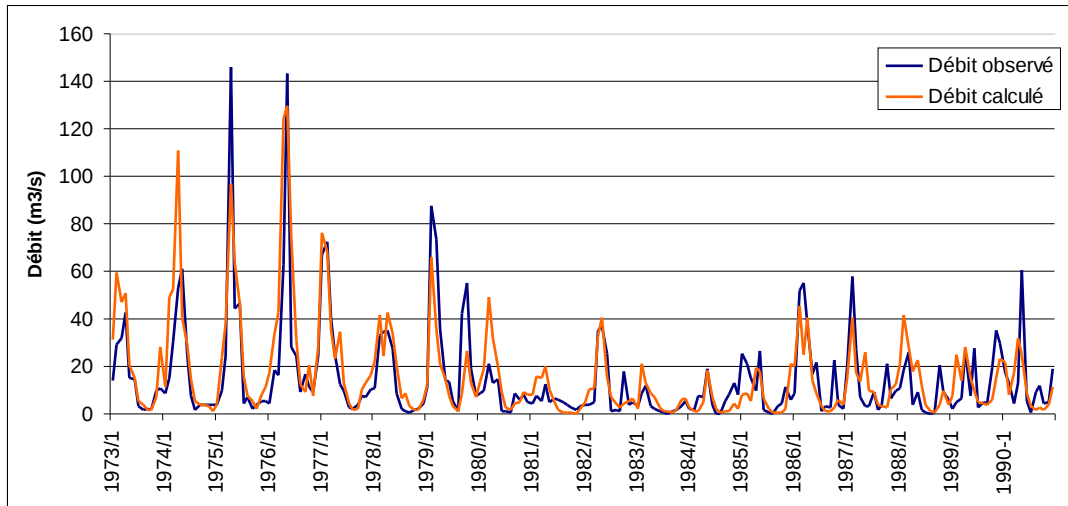


Fig. 5.2 Débits mensuels observés et simulés en validation sur la période 1973-1990 à Dar ElCaid

5.6. Changements futurs des débits

5.6.1. Constitution des séries futures de précipitation et de l'ETP

Le calcul des changements projetés pour les débits est effectué à l'aide des champs de variation, entre la période future et la période de référence, issus du modèle climatique. Ces champs de variation sont utilisés pour la constitution des séries chronologiques futures de précipitation et de l'ETP. Pour chaque cellule et chaque mois de l'année on calcul le changement des précipitations et de l'ETP à l'aide de l'expression suivante :

$$\Delta_i = 100 * (F_i - R_i) / R_i \quad (1)$$

avec Δ_i le changement de précipitation (ou ETP) projeté pour le mois i , F_i la moyenne de la précipitation (ou ETP) mensuelle pour le mois i calculée sur la période future et R_i la moyenne calculée sur la période de référence. F_i et R_i sont calculés à l'aide des données du modèle climatique. Les séries chronologiques pour le climat futur (période 2021-2050) sont alors construites en combinant celles représentant le climat observé (période 1971-2000) et le terme représentatif du changement (Δ_i). Pour chaque mois i et chaque année j de la période future, la précipitation (ou ETP) X_{ij} est obtenue à l'aide de la formule suivante:

$$X_{ij} = XP_{ik} * (1 + \Delta_i / 100) \quad (2)$$

avec XP_{ik} la valeur de la précipitation (ou ETP) mensuelle observée au mois i de l'année k . L'année k est tirée au hasard parmi les années de la période de référence.

Les débits futurs sont simulés par le modèle hydrologique conceptuel GR2M préalablement calé (section 4) et prenant comme entrée les valeurs de X_{ij} pour les précipitations et l'ETP. Ils sont alors comparés aux débits observés.

5.6.2.Changements futurs

Les projections du GIEC pour 2046-2065 comparativement à 1980-1990 donnent pour toute la moitié nord du Maroc une augmentation de la température moyenne de 1.5°C à 2°C (IPCC, 2007a). Selon le modèle ARPEGE-Climat, les températures mensuelles moyennes du bassin de la Moulouya augmenteraient dans le futur (2121-2050) de 1.5°C à 1.7 °C par rapport aux moyennes de 1971-2000 (Fig. 5.3). Le réchauffement concernerait toutes les saisons et attendrait 2°C en été.

L'ETP, étroitement liée à la température, connaîtrait des augmentations moyennes (Fig. 5.4) de 2% (en hiver) à 11% (en été). Les mois de décembre et janvier ne sont pas censé subir d'importants changements selon les projections.

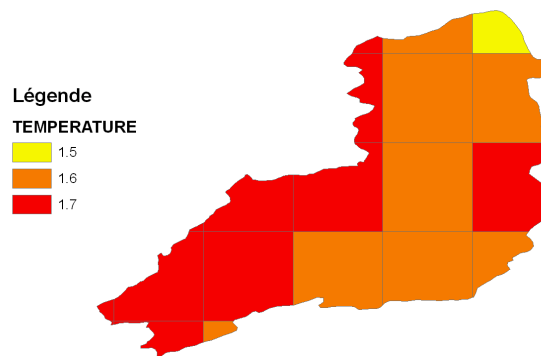


Fig. 5.3 Evolution future de la température mensuelle moyenne (calculée sur tous les mois de l'année) pour le bassin de la Moulouya (Dar ElCaid) ; en °C.

Les changements futurs projetés, pour la pluviométrie au Maroc, ont été évalués dans les chapitres précédents et par Driouech et al. (2010) sur la saison d'hiver. Le bassin de la Moulouya connaîtrait une diminution des cumuls pluviométriques de 10% à 20% durant cette saison bien importante en termes de précipitations reçues. Cette baisse serait accompagnée d'une diminution du nombre totale de jours pluvieux (-10% à -15%) et d'une augmentation de la persistance temporelle de la sécheresse. Le changement mensuel moyenné sur le bassin pour chacune des quatre saisons de l'année (Fig. 5.4) montre que la plus forte baisse projetée concerne l'hiver (-13%) et que les saisons d'automne et du printemps connaîtraient en moyenne plutôt des augmentations.

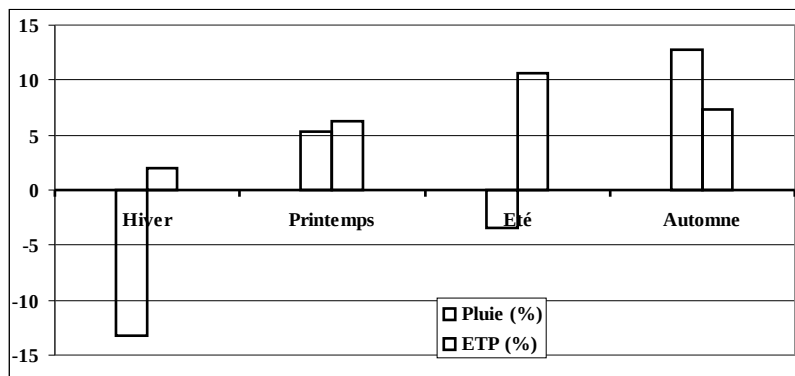


Fig. 5.4 Changements futurs des précipitations et ETP mensuelles moyennés sur les différentes saisons (Bassin de la Moulouya, Dar ElCaid).

Le calcul des changements projetés pour les débits mensuels moyens par comparaison des débits futurs et des débits observés comme dans Ardoin-Bardin et al. (2005, 2006) donne des évolutions parfois difficiles à analyser tenant compte des changements projetés pour les pluies et ETP (Tableau 5.1). En effet, à titre d'exemple, la saison d'automne obtient d'importantes baisses de débits malgré la hausse projetée pour les pluies (au niveau du bassin) et des changements peu élevés de l'ETP. Ceci peut être dû au fait qu'en comparant des débits futurs simulés à des débits observés revient à considérer le modèle hydrologique comme étant parfait, ce qui n'est pas le cas en réalité.

La comparaison des débits futurs et actuels (période de référence) simulés par le modèle hydrologique est plus appropriée pour estimer le changement futur de débits puisqu'elle considère deux quantités issues du même processus. Elle permet en plus de corriger certaines erreurs du modèle comme celles relatives au biais moyen. En résultats, le mois de mai devrait connaître une augmentation de débits mais qui reste relativement faible (5%) (Tableau 5.1, colonne 5). Le mois d'avril, correspondant à la période de pointe de crue, et le mois de novembre ne montrent pas d'évolutions notables. Les débits des 9 autres mois sont projetés diminuer de 10% à 30%, ce qui est considérable. A l'échelle saisonnière, les débits mensuels moyens baisseraient de 26% en hiver et de 7%, 8% et 10% respectivement en automne, au printemps et en été. L'analyse des changements projetés pour les pluies et ETP conjointement avec celles projetées pour les débits montre le rôle très important de l'évolution de l'ETP. Les débits des mois d'août à octobre diminueraient, en effet, dans le futur de 11% en dépit des augmentations de 8 à 12% projetées pour les pluies.

Mois	Changement de pluie (%)	Changement de l'ETP (%)	Changement de débit par rapport aux débits observés (%)	Changement de débit par rapport aux débits simulés pour le présent (%)
1	-18	-3	-13	-29
2	-1	7	0	-19
3	-20	7	-32	-30
4	24	4	3	1
5	12	8	4	5
6	-20	11	-18	-9
7	2	11	6	-10
8	8	11	-20	-11
9	12	11	-65	-11
10	8	5	-67	-11
11	18	6	-51	-1
12	-20	1	-10	-29

Tableau 5.1 Changements projetés pour les pluies, l'ETP et le débit au bassin de la Moulouya (Dar ElCaid).

En utilisant les données climatiques issues de modèles de circulation générale de faible résolution, Milano (2009) projette une quasi disparition des écoulements au niveau de la Moulouya en 2046-2065 et ce pour toute l'année en dépit de l'augmentation projetée pour les précipitations de l'été. Ceci est probablement dû à la forte augmentation prédite pour l'ETP (jusqu'à 65%) en liaison avec l'augmentation des températures qui dépasse 5°C. Dans notre cas d'étude, les baisses de 5m³/s à 8m³/s projetées pour 2021-2050 ne feraient pas disparaître complètement les écoulements à cet horizon (Fig. 5.5). En plus, la forme de l'hydrogramme

moyen serait conservée; mêmes périodes de hautes eaux et de basses eaux intra-annuelles entre le présent et le futur.

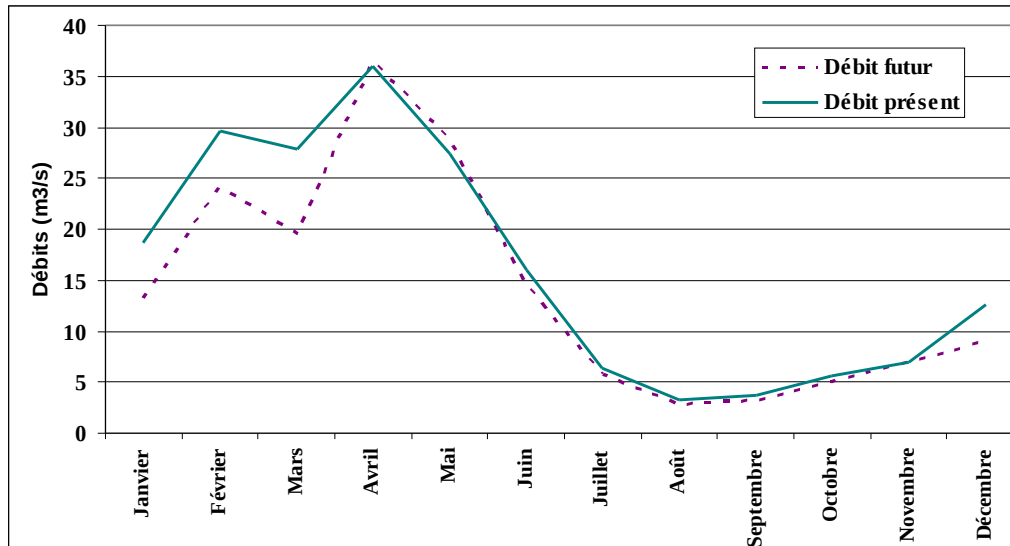


Fig. 5.5 Variation des débits mensuels moyens entre le futur et le présent (Bassin de la Moulouya, Dar ElCaid).

5.7. Conclusion

L'objectif de ce chapitre a consisté en l'évaluation des impacts potentiels de changement climatique sur un des grands bassins du Maroc qui est celui de la Moulouya situé à l'est du pays. L'évaluation est faite à l'aide du modèle hydrologique GR2M en utilisant les données de scénarios climatiques issues du modèle ARPEGE-Climat tourné à haute résolution sur le Maroc (50 à 60 km).

Entre 1958 et 2000 les débits mensuels ont accusé une nette tendance à la baisse attribuée principalement à la diminution de la pluviométrie et également à l'augmentation de l'ETP. A l'horizon 2021-2050, les débits de l'hiver sont projetés connaître une baisse de 20% à 30%, ceux des autres saisons diminueraient de façon plus faible (en moyenne 7% à 10%).

6. Réduction d'échelle dynamique à l'aide du modèle à aire limitée ALADIN-Climat tourné à très haute résolution

6.1. Introduction

Certains modèles d'impact nécessitent des données climatiques à des résolutions bien plus fines que la cinquantaine de kilomètres suffisante pour d'autres comme par exemple le modèle hydrologique GR2M utilisé dans le chapitre 5. En outre, plus la résolution est élevée plus les phénomènes locaux sont pris en compte dont notamment ceux dus à la topographie en zone montagneuses comme celles de l'Atlas marocain et plus les événements extrêmes ont des chances d'être mieux simulés par les modèles. A titre d'exemple, Kharin et al. (2007) ont montré que sur les régions extratropicales, les extrêmes les plus faibles sont donnés par les modèles des plus basses résolutions alors que les fortes valeurs sont simulées par le modèle ayant la résolution la plus élevée. Le risque de surestimation n'est, cependant, pas écarté. D'un autre côté, un extrême de précipitations réaliste quantitativement, mais s'étendant sur une zone de 2500 km² est peu conforme à la réalité qui veut que les pluies les plus violentes n'affectent généralement que de petites surfaces.

Sur une grande partie du globe, les précipitations devraient gagner en intensité, même dans des zones où les précipitations moyennes diminuent à l'exception de certaines régions subtropicales. Pour le Maroc, nous avons vu dans le chapitre 4 que, selon ARPEGE-RV tourné avec une résolution de l'ordre de 50km sur le pays, l'amplitude des événements de fortes précipitations hivernales (saison DJF) n'évoluerait pas de la même façon partout. Le nord-ouest et l'est du pays ainsi que toute une partie du moyen et haut Atlas ne subiraient pas de changements notables, le sud du pays connaîtrait moins de précipitations intenses et la zone côtière centre assisterait à une relative augmentation de l'amplitude des événements de fortes précipitations. Le nombre d'événements de fortes précipitations, quant à lui, diminuerait sur l'ensemble du territoire (voir Fig. H.1 de l'annexe H).

Dans ce chapitre nous abordons les scénarios futurs à très haute résolution (12km) en réalisant une réduction d'échelle dynamique à l'aide du modèle à aire limitée ALADIN-Climat forcé aux bords par la version du modèle ARPEGE-climat dont il a été question tout au long de cette thèse (ARPEGE-RV). Après une évaluation d'ALADIN-Climat à travers la distribution des précipitations, nous examinons la réponse de ce MRC à l'augmentation des GES (scénario A1B) tout en comparant les résultats à ceux issus du modèle à résolution variable. Même si nous nous focaliserons dans ce chapitre particulièrement sur la saison d'hiver (DJF), les autres saisons seront analysées en termes de précipitation moyenne.

6.2. Description de la version utilisée du modèle ALADIN-Climat

Le modèle numérique ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) est la version à aire limitée du modèle ARPEGE. Il a été développé, pour la prévision opérationnelle à courte échéance, depuis le début des années 1990 au sein d'un large consortium regroupant de nombreux centres météorologiques Européens auxquels se sont adjoint d'autres pays de l'Afrique du nord. La première version climatique d'ALADIN

développée en 2005 a été utilisée, jusqu'à présent, avec différents domaines sur l'Europe mais plus souvent avec des résolutions de l'ordre de 25km à 50km qu'avec la résolution maximale que permet ce MRC et qui est égale à la dizaine de km.

Dans cette étude, nous utilisons la dernière version d'ALADIN-Climat (version 5.1) dont les paramétrisations physiques sont identiques à celles d'ARPEGE-RV (voir chapitre 2) y compris les GES et les types d'aérosols. La grille du modèle à aire limitée a une résolution horizontale de 12km sur un domaine couvrant la moitié nord du Maroc et incluant ainsi les 14 stations météorologiques (voir Tableau 1.1 du chapitre 1 et Fig. 6.1) et toute la zone de l'Atlas. Ce domaine (nommé C) correspond au rectangle délimité par les points 13.23° ouest/25.21° nord et 2.35° est/38.32° nord (Fig. 6.1) ; soit une grille de 123 latitudes x 123 longitudes. Ce modèle bi-spectral est forcé par ARPEGE-RV à travers la technique de Davies (1976) consistant à rajouter une zone de relaxation (ou zone tampon) I de 8 points (96km) autour du domaine C (voir figure Fig. 6.1) afin d'y spécifier l'évolution de la température, de l'humidité et des deux composantes horizontales du vent. Dans ALADIN-climat les variables pronostiques sont décomposées en transformées de Fourier suivant les deux directions de la grille horizontale de calcul (Machenhauer et Haugen, 1998; Haugen et Machenhauer, 1993). Afin d'assurer la bi-périodicité, une zone d'extension (Bubnova et al., 1993) de 11 points (132km) est ajoutée au nord et à l'est de la zone tampon I (Radu et al., 2008). La discrétisation verticale d'ALADIN-Climat est la même que celle d'ARPEGE-RV ; soit 31 niveaux verticaux. Leurs pas de temps sont aussi identiques (30 mn).

A l'aide de la version d'ALADIN-Climat décrite ci-dessus, nous avons réalisé deux simulations de 30 ans chacune. La première simulation couvre la période 1971-2000 et sert à la fois pour l'évaluation du modèle et comme période de référence pour l'estimation des changements futurs. La seconde simulation couvre la période future 2021-2050 et elle est réalisée, comme pour ARPEGE-Climat, sous le scénario A1B.

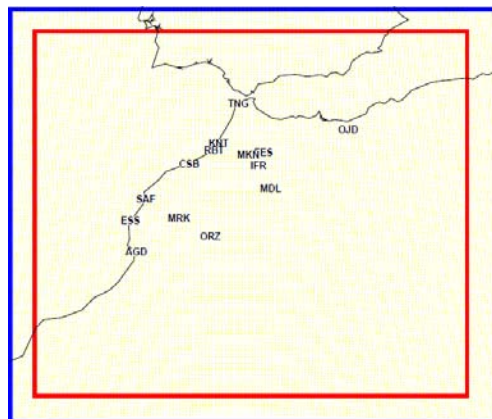


Fig. 6.1 Domaine couvert par le modèle ALADIN-Climat avec l'emplacement des 14 stations météorologiques. Le domaine C (intérieur de l'encadré rouge) représente la zone sur laquelle l'analyse porte. L'encadré bleu représente la zone d'extension I.

6.3. Evaluation du modèle ALADIN-Climat

Dans Driouech et al. (2009) nous avons comparé la distribution des précipitations de chacune des 14 stations météorologiques (voir Tableau 1.1 du chapitre 1) avec celle de la maille la plus proche du modèle. Ce choix était justifié d'une part par la densité du réseau d'observations et d'autre part par le fait que nous nous intéressons aussi aux extrêmes ;

l'utilisation de moyennes aura tendance à lisser les extrêmes. L'une des méthodes les plus appropriées pour comparer les points de grilles aux stations est de moyennner sur un domaine commun donné d'un côté les stations et d'un autre côté les points de grille. Déqué (2007) a utilisé cette méthode en comparant deux façons de l'appliquer : 1) en moyennnant d'un côté les données quotidiennes de précipitation des stations et d'un autre côté celles des points de grilles puis la comparaison est faite sur les distributions (en termes de centiles) des deux séries obtenues. 2) en calculant d'abord les centiles au niveau de chaque point du modèle et de chaque station à part puis en moyennnant d'une côté les séries des centiles observés et de l'autre côté celles issues du modèle, enfin la comparaison est faite entre les deux séries finales obtenues. La première méthode risque d'être un peu pénalisante pour les extrêmes qui présentent un intérêt pour notre étude. Ce point est illustré dans Déqué (2007) qui montre que ce filtrage, qui permet de réduire le biais des faibles précipitations, sous-estime les centiles supérieurs. Ceux-ci sont par contre mieux simulés par la deuxième méthode. L'utilisation de cette deuxième méthode telle que décrite plus haut n'est pas évidente dans notre cas à cause de la densité du réseau d'observations. En effet, dans un rayon de 50km que nous nous fixons, plusieurs stations se trouveraient seules en face de plusieurs points de grille. Nous optons donc pour évaluer le modèle de deux façons : en comparant, comme fait pour ARPEGE-RV dans Driouech et al. (2009), la série des centiles de chaque station météorologique avec celle du point de grille le plus proche et, s'inspirant de la méthode 2 ci-dessus, en comparant la série des centiles de chaque station avec celle obtenue en moyennnant les séries des centiles des points de grilles se trouvant dans un rayon de 50km. Vu que nous nous intéressons à l'évaluation de la distribution à travers les quantiles, une troisième méthode pourrait consister à calculer les quantiles du modèle sur la série obtenue en combinant les séries de tous les points de grille se trouvant dans le rayon de 50km autour d'une station donnée, et de les comparer ensuite à ceux issus des données observées de la station.

Les résultats des trois méthodes de comparaison de la distribution des observations au niveau des stations avec celles simulées par le modèle sont illustrés sur la figure Fig. 6.2 par les courbes quantile-quantile obtenues en traçant, pour chaque station, les centiles observés (axes des Y) en fonction de ceux issus de la simulation d'ALADIN-Climat (axes des X). Même si dans certains cas le choix de la méthode de comparaison a une influence notamment sur les centiles supérieurs, l'attitude d'ALADIN-Climat à sous-estimer les précipitations est quasi-générale. Ce type de comportement était aussi prédominant pour ARPEGE-Climat.

6.4. Changements futurs issus d'ALADIN-climat

Nous analyserons la réponse du modèle ALADIN-Climat à travers les mêmes indices pluviométriques utilisés le long de cette thèse et qui couvrent l'aspect moyen et les extrêmes de sécheresse et de fortes précipitations. Il s'agit de la précipitation moyenne (pav), du nombre de jours humides (pnl05), du nombre maximal de jours consécutifs secs, du nombre d'événements de fortes précipitations (pnl90) et de l'amplitude de ceux-ci (pq90).

L'évolution future du climat hivernal de la moitié nord du pays vers des conditions plus sèches est aussi projetée par ALADIN-Climat qui donne des réductions de la précipitation moyenne du même ordre de grandeur que celles issues de son modèle de forçage ARPEGE-RV; soit des changements de -10% à -20% sur la majeure partie de cette zone (Fig. 6.3). Là aussi, plus on s'éloigne des côtes en allant vers l'intérieur (du nord vers le sud ou de l'ouest vers l'est) plus l'assèchement s'accroît. Les deux modèles, coïncident largement aussi, au niveau de l'intersection de leurs domaines respectifs, pour les autres indices et seulement de très petites différences sont repérées. En particulier, la zone d'augmentation du 90^{ème} centile située, avec ARPEGE-Climat, vers la côte centre est repoussée par ALADIN-

Climat vers le sud. Ainsi, tout le nord du pays et toute la région à l'ouest des montagnes de l'Atlas ne subiraient pas, selon ALADIN-climat, de changements importants en termes d'amplitude des événements de fortes précipitations (Fig. 6.3 d). Le nombre d'événements de fortes précipitations (Fig. H.2 de l'annexe H) et celui de jours humides (Fig. 6.3 b) diminueraient sur toute la moitié nord de 10% à 20%, la seule différence apparente entre les deux modèles consiste, pour les deux indices, en un petit déplacement de l'isoline -15% vers le nord résultant en une réduction légèrement plus accentuée au niveau du Sais. Signalons que même si les deux modèles ont tendance à sous-estimer les précipitations, le modèle à aire limitée est, sur cette région, relativement plus sec qu'ARPEGE-RV par rapport aux observations (non montré). Le nombre de jours consécutifs secs augmenterait sur pratiquement toute la moitié nord du pays notamment à l'ouest des montagnes de l'Atlas (jusqu'à +4 jours).

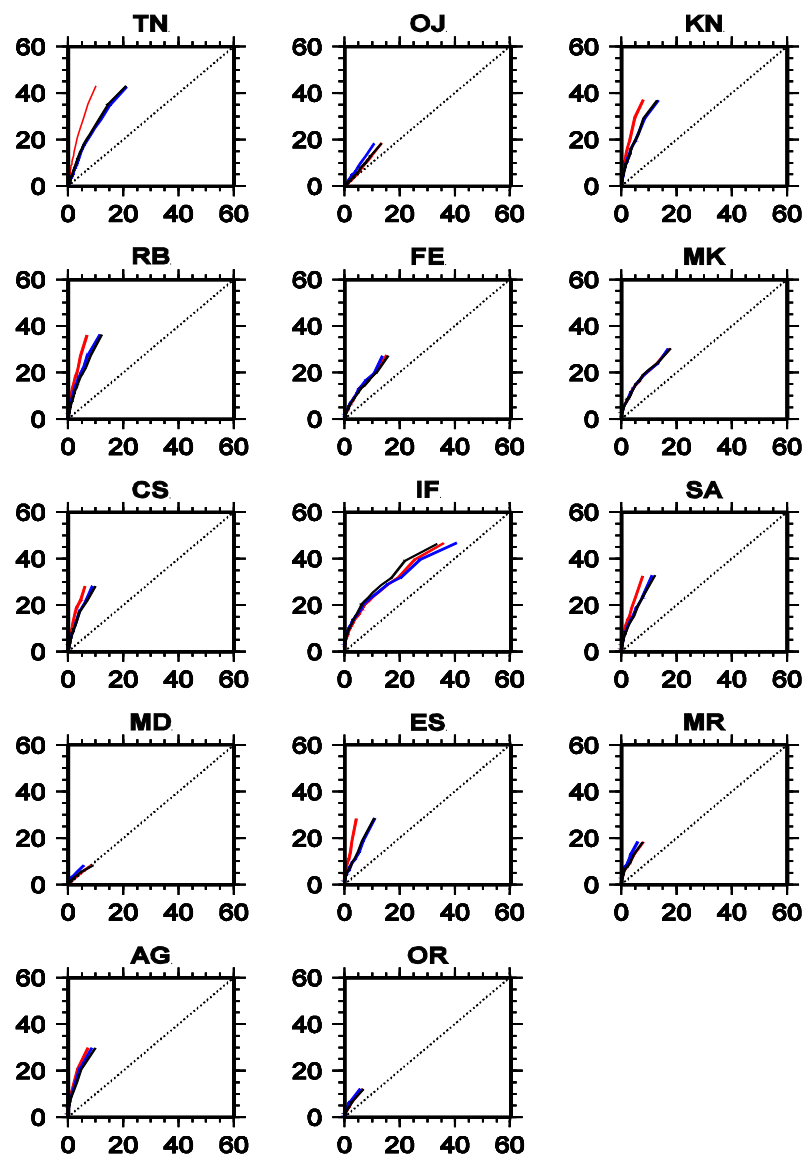


Fig. 6.2 Courbes quantile-quantile représentant les centiles de précipitation hivernale (DJF) observés au niveau des stations météorologiques en fonction de ceux simulés par ALADIN-climat. Courbe bleue : maille la plus proche. Courbe rouge : moyenne des centiles des points de grille se trouvant dans un rayon de 50km autour de chaque station. Courbe noire : centiles du modèle calculés sur les données confondues de tous les points situés dans le rayon de 50km. La diagonale correspond à la simulation parfaite.

La Fig. H.3 de l'annexe H présente les changements futurs de la précipitation moyenne des saisons du printemps, de l'été et d'automne. De façon générale, de grandes similitudes existent entre les structures spatiales des changements futurs issus d'ALADIN et celles d'ARPEGE-RV. Le modèle à aire limitée donne ainsi des augmentations de +5% à +20% sur la moitié nord du pays à l'exception de la région côtière nord-ouest située entre Tanger et Casablanca dont la précipitation moyenne ne subirait pas, selon lui, de changement notable au lieu de l'augmentation de 5% à 10% donnée par d'ARPEGE-RV. La réduction des précipitations estivales du nord du Maroc est confirmée par ALADIN-Climat qui l'évalue aussi de 5% à 10%. En été, l'isogline +5% est décalée vers le sud avec ALADIN-Climat, ce qui fait que toute la zone centre de son domaine ne subirait pas de changements notables et les augmentations du sud sont plus modérées. En particulier, les précipitations moyennes de la bande Essaouira-Marrakech-Ouarzazate augmenteraient, selon ARPEGE-RV, de +10% à +15% alors qu'elles ne connaîtraient pas d'évolution notable selon ALADIN-Climat. Pour la saison d'automne, les principales différences existant entre les changements futurs issus des deux modèles consistent en un gradient moins marqué avec ALADIN-Climat qui donne ainsi des hausses relativement plus modérées au sud-est. De plus, la zone de baisse de -5% à -10% qui s'étend avec le modèle à résolution variable, sur toute la bande côtière entre Tanger et Agadir se réduit à une petite zone entre Safi et Agadir. Toute la zone à l'ouest de l'Atlas ne subirait donc pas de changements importants en automne selon ALADIN-Climat.

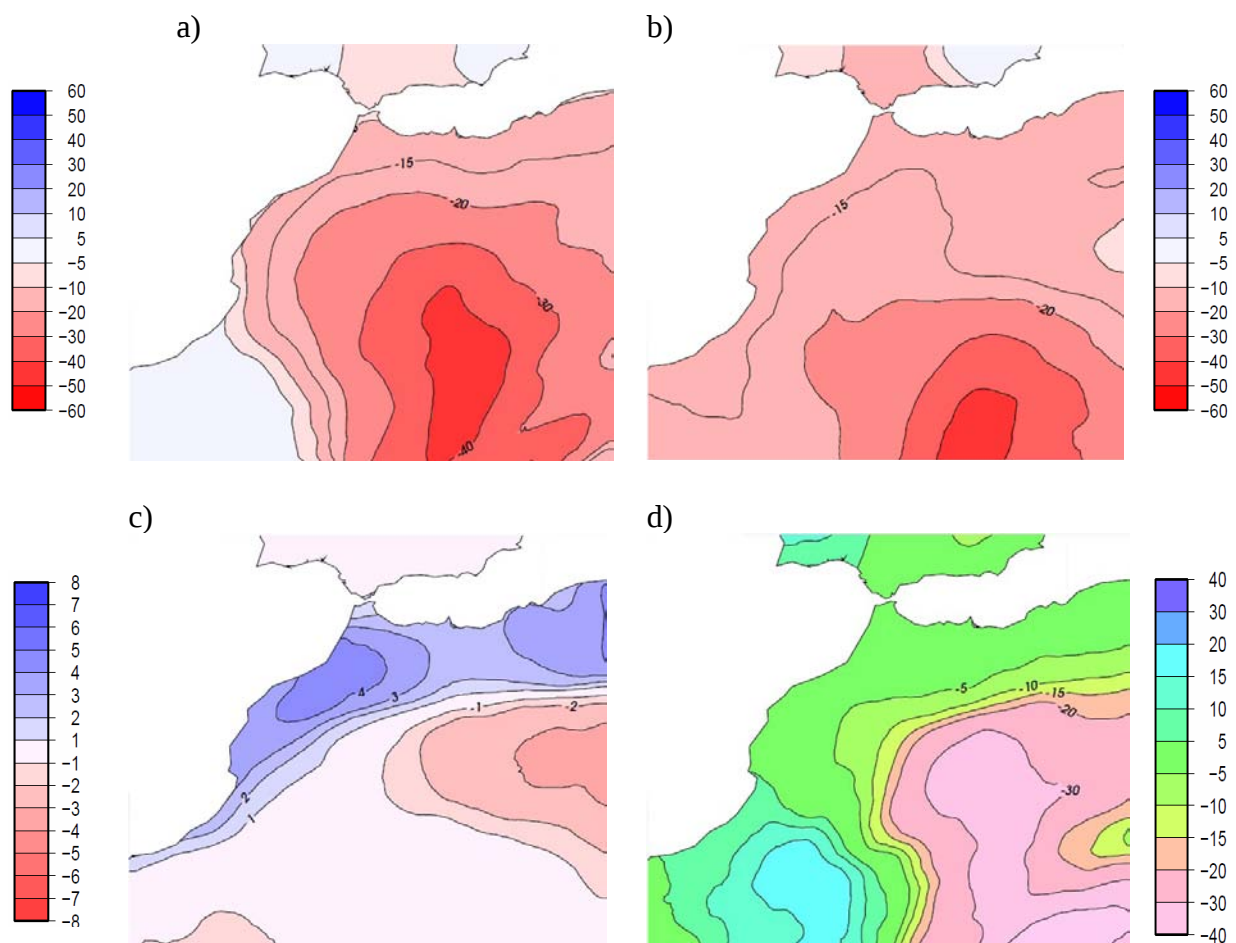


Fig. 6.3 Changements projetés par ALADIN-Climat sous le scénario A1B pour : a) la précipitation moyenne (en %), b) le nombre de jours humides (en %), c) le nombre maximal de jours consécutifs secs (en jours) et d) le 90^{ème} centile calculé sur le long terme (en %). Saison d'hiver (DJF). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

6.5.Conclusion

A l'aide du modèle à aire limitée ALADIN-Climat forcé aux bords par ARPEGE-RV, deux simulations de 30 ans chacune (1971-2000 et 2021-2050) ont été réalisées pour l'évaluation des changements futurs à très haute résolution (12km) sur la moitié nord du Maroc. L'évaluation d'ALADIN-Climat par rapport à la distribution des précipitations quotidiennes hivernales fait apparaître un caractère de sous-estimation chez le modèle ; une attitude connue aussi pour ARPEGE-RV et certains MRC d'ENSEMBLES. L'évolution vers des conditions plus sèches en hiver est aussi confirmée par ALADIN-Climat qui fait apparaître de larges similitudes avec le modèle à résolution variable que ce soit pour l'hiver ou pour les trois autres saisons. Certaines différences, même peu nombreuses, font cependant basculer certaines régions d'une augmentation ou une diminution future donnée par ARPEGE-RV vers des zones dont la précipitation ne changerait pas de façon notable selon le modèle à très haute résolution. En termes de changements futurs estimés par ALADIN-Climat, les précipitations hivernales diminueraient de 10% à 15% sur la majeure partie de la moitié nord du pays où on assisterait aussi à un allongement de la période maximale de sécheresse et à une diminution du nombre de jours humides. Les événements extrêmes ne subiraient pas, en amplitude, d'évolutions notables sur toute la zone à l'ouest des montagnes de l'Atlas et l'extrême nord. Ils diminueraient, par contre, en nombre de 10% à 20% sur toute la partie du Maroc couverte par le domaine du modèle. La précipitation moyenne printanière augmenterait de 5% à 20% sur la moitié nord du pays à l'exception de la région côtière nord-ouest située entre Tanger et Casablanca qui ne connaîtrait pas de changement important. Comme pour une grande majorité de MRC dont ARPEGE-RV, l'assèchement du nord du pays en été est aussi projeté par ALADIN-Climat. En automne, pratiquement toute la zone à l'ouest des montagnes de l'Atlas ne subirait pas de changements en termes de précipitations moyennes.

Conclusion générale

L'objectif principal de cette thèse consistait à étudier les évolutions futures des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'une augmentation des émissions de GES en utilisant les méthodes de régionalisation appropriées pour affiner au mieux les informations relatives au changement du climat au niveau de ce pays, qui fait partie des plus susceptibles d'être impactés par le réchauffement planétaire.

Avant de s'intéresser aux changements futurs, nous avons analysé les évolutions et changements déjà enregistrés par le climat observé en se focalisant sur les tendances d'un certain nombre d'indices climatiques relatifs aux aspects pluviométriques moyens et extrêmes. Outre la forte variabilité interannuelle des précipitations et l'augmentation de la fréquence des sécheresses depuis le début des deux dernières décennies du 20^{ème} siècle, un point important peut être retenu : la distribution des précipitations du Maroc a bien connu un changement au cours de la période 1961-2008. Ce changement, consistant en une évolution vers des conditions plus sèches, a coïncidé avec une augmentation des températures moyennes confirmant l'empreinte du réchauffement globale au niveau du pays. Malgré l'absence de traitement d'homogénéisation qui peut être important pour corriger d'éventuelles discontinuités dans les observations (dues par exemple au déplacement des abris, ou au changement des instruments de mesures), l'existence de tendances observables sur plusieurs stations est un signe fort en faveur d'une évolution régionale d'origine climatique. En outre, la période d'analyse couvre moins d'un demi-siècle, ce qui réduit l'impact des changements inévitables dans le réseau de mesure. D'un autre côté, la plupart des indices considérés sont calculés sur des bases quotidiennes et les travaux d'homogénéisation qui ont porté sur les données quotidiennes sont rares; les méthodes permettant ceci nécessitent d'être améliorées. Il sera toutefois bon, dans l'avenir, d'entreprendre une homogénéisation des séries observées pour détecter des tendances subtiles.

Afin de caractériser les évolutions futures des précipitations à des échelles plus fines que ce que permettent les MCGOA, nous avons élaboré des scénarios de changement climatique à haute résolution (environ 50km) sur le Maroc à l'aide de la version à résolution variable du modèle global ARPEGE-Climat; qui constitue une descente d'échelle dynamique d'une simulation de scénario GIEC-AR4. L'examen des capacités du modèle sur le climat présent, a montré son aptitude à simuler correctement la circulation de grande échelle notamment en termes de structure et de variabilité de basse fréquence ainsi que la variabilité interannuelle des précipitations marocaines malgré une sous-estimation de leur quantité.

L'évaluation des changements futurs que subirait la précipitation au Maroc, selon ARPEGE-Climat, fait ressortir une baisse des cumuls généralisée à tout le pays durant la saison d'hiver (DJF) et limitée à la zone située à l'ouest des montagnes de l'Atlas, une région importante de point de vue hydrologique et agricole, pour l'hiver étendu (ONDJFM). Cette baisse serait accompagnée d'une diminution du nombre de jours humides et du nombre d'événements de fortes précipitations et d'une augmentation de la persistance temporelle de la sécheresse. Ce changement de la distribution des précipitations coïnciderait avec un réchauffement qui se manifesterait à la fois aux échelles saisonnière et annuelle. La comparaison de nos résultats avec ceux des études antérieures ayant abordé le nord-ouest de l'Afrique en tant que partie du bassin méditerranéen ou à plus grande échelle, montre que les évolutions projetées par ARPEGE-RV sont de façon générale compatibles avec ceux d'autres

modèles notamment en hiver; la saison la plus pluvieuse. Cette compatibilité concerne aussi les quelques rares simulations faites à haute résolution sur le Maroc (à l'aide de modèles à aire limitée).

Le domaine des changements climatiques est entouré d'incertitudes dont les principales sont inhérentes aux scénarios d'émission, à la modélisation ou encore à la méthode de descente d'échelle. A un horizon aussi « proche » que celui de 2021-2050, visé par cette thèse, les incertitudes liées aux scénarios d'émission ne constituent pas un vrai problème et sont négligeables devant ceux issus de la modélisation et que la prédominance de la variabilité naturelle vient amplifier. L'évaluation de la marge des incertitudes liée aux changements climatiques et inhérente à la modélisation a été ainsi réalisée, pour la saison d'hiver, à l'aide des données d'une dizaine de modèles climatiques régionaux du projet ENSEMBLES (FP6-ENSEMBLES). Les projections futures issues de ces MRC sont globalement compatibles avec celles d'ARPEGE-RV. Ils affichent en effet dans la plupart des cas une réduction des cumuls pluviométriques de l'hiver qui serait généralement accompagnée d'une baisse du nombre de jours humides et du nombre d'événements de fortes précipitations et d'une augmentation du nombre maximal de jours consécutifs secs.

Nous avons par ailleurs examiné la possibilité d'utilisation d'une méthode de réduction d'échelle statistique basée sur les régimes de temps de l'Atlantique nord, une région de grande influence sur le climat du Maroc. Le test de cette méthode, réalisé à la fois à l'aide du modèle ARPEGE-Climat et des 10 autres MRC d'ENSEMBLES, pour la déduction des changements futurs des précipitations locales, a montré les déficiences de ce type d'approche dans le cas de la pluviométrie hivernale marocaine.

Même faites à haute résolution, les simulations des modèles climatiques ne sont pas une parfaite reproduction de la réalité. L'effet de la correction par quantiles, appliquée aux données d'ARPEGE-RV, sur les changements futurs a été donc examiné. Malgré un effet légèrement modérateur (légère diminution de l'amplitude des changements) la correction n'a pas changé le signe des changements et a maintenu l'évolution vers un assèchement du climat du Maroc.

Vu les tendances observées et les évolutions futures projetées, nous avons procédé à une évaluation préliminaire des impacts potentiels sur l'hydrologie du Maroc; un facteur déjà limitant à l'heure actuelle. Cet aspect a été abordé au niveau d'un des plus grands bassins hydrologiques du Maroc qui est celui de la Moulouya en utilisant les scénarios climatiques d'ARPEGE-Climat et le modèle hydrologique conceptuel GR2M. Les débits mensuels, ayant déjà accusé, au cours de la période 1958-2000, une tendance à la baisse attribuée principalement à la diminution de la pluviométrie et à l'augmentation de l'ETP, subiraient dans le futur des réductions supplémentaires notamment en hiver.

La dernière partie de cette thèse a consisté en la réalisation d'une réduction d'échelle spatiale à l'aide du modèle à aire limitée ALADIN-Climat à très haute résolution (maille 12km). Ce travail permettant une évaluation supplémentaire de la marge des incertitudes concernant les changements futurs des précipitations marocaines, a mis en évidence une grande concordance entre le modèle à aire limitée et son modèle de forçage ARPEGE-Climat malgré certaines différences qui, d'ailleurs, ne changent pas les principaux résultats à la fois en termes de moyennes et d'extrêmes. Cette approche a le mérite d'offrir des détails spatiaux qui rendent la modélisation plus proche de la réalité, au sens que la distribution des précipitations d'un jour donné est moins lisse que les données du modèle ARPEGE-RV, et a

fortiori que les données de la base du GIEC. Ceci est plus approprié à une utilisation par des modèles d'impact, mais il faut garder à l'esprit que si ces détails miment la réalité, ils ne la prédisent pas. A petite échelle, seule l'approche probabiliste a une valeur prédictive.

Au cours de cette thèse nous nous sommes efforcés d'analyser les changements futurs que subirait la pluviométrie marocaine en utilisant les meilleurs outils disponibles actuellement et de considérer différents aspects de la distribution. Cette étude n'aurait probablement pas pu être entreprise de cette façon il y a quelques années; les progrès récents en termes de descente d'échelle sont en effet d'un apport capital. La perspective de nouveaux ensembles de simulations, comme ceux liés au programme CORDEX du WCRP (World Climate Research Program de l'Organisation Météorologique Mondiale), permettra d'aborder les changements futurs en termes probabilistes, comme mentionné dans l'alinéa précédent, pour une meilleure appréhension de la gestion des risques. Les travaux concernant la prévision décennale, également à leur début, ouvrent des perspectives supplémentaires et permettraient probablement de se rapprocher davantage des horizons les plus souhaités par les spécialistes de programmation.

Du côté hydrologique, l'évapotranspiration dans les bassins semi-arides étant toujours un terme clé du bilan, une voie d'amélioration serait une meilleure prise en compte de ce paramètre en distinguant les principaux type d'occupation du sol rencontrés sur le bassin (cultures pluviales, cultures irriguées annuelles et arborés, végétation naturelle, sol nu ... etc.). Une approche multi-modèles hydrologiques autant qu'atmosphériques permettrait d'évaluer la robustesse des résultats et de couvrir une part des incertitudes liées à l'évaluation des impacts du changement climatique.

Références bibliographiques

- Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Mahé G., Paturol J.E., Dieulin C., Casenave L., 2005 :** Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale. Regional Hydrological Impacts of Climatic Change—Hydroclimatic Variability (Proceedings of symposium S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguacu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 296, 2005.
- Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Dieulin C., Casenave L., Niel H., Paturol J.E., Mahé G., 2006:** Application de scénarii climatiques en modélisation hydrologique: utilisation des sorties GCM. Climate Variability and Change—Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006), IAHS Publ. 308, 2006.
- Battisti D.S., Naylor R.L., 2009:** Historical Warnings of Future Food Insecurity with Unprecedented Seasonal Heat. *Science* 9:Vol. 323. no. 5911, pp. 240 – 244 DOI: 10.1126/science.1164363
- Beltrando et Chémery, 1995:** Dictionnaire du Climat. Ed. Larousse, Collection Références, ISBN 2-03-720233-4, 331 pp.
- Beniston M., Fox D.G., 1996:** Impacts of climate change on mountain regions. In: Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses, chap. 5. Watson RT, Zinyowera MC, Moss RH, Dokken DJ (eds). Cambridge: Cambridge University Press.
- Bernardara, P., 2007.** Hydraulique et hydrologie. Support de cours d'Hydrologie. Master ESTP, Cemagref de Lyon, France.
http://www.topoetp.fr/t2_hydraulique_hydrologie_modulehydrologie_seance4.pdf
- Bolle H.J., 2002:** Mediterranean Climate: Variability And Trends. ISBN 978-3540438380, Springer-Verlag, 320 pp.
- Born K., Christoph M., Fink A.H., Knippertz P., Paeth H., Steph P., 2008:** Moroccan climate in present and future: combined view from observational data and regional climate scenarios. In: Zeini, F., Hötzl, H. (Eds.), Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa. Springer, pp. 29-45.
- Born K., Fink A.H., Paeth H., 2009:** Dry and Wet Periods in the Northwestern Maghreb for Present Day and Future Climate Conditions (http://www.impetus.uni-koeln.de/fileadmin/content/veroeffentlichungen/publikationsliste/1415_Born_full_article.pdf).
- Bougeault P., 1985:** A simple parametrization of the large scale effects of deep cumulus convection, *Mon. Wea. Rev.*, 113, 2108–2121.
- Bubnova R., Horányi A., Malardel S. 1993:** International project ARPEGE/ALADIN. EWGLAM Newsletter, 22, 117–130.
- Bullock P., Le Houérou H., 1996:** Land degradation and desertification. In: Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific technical analyses, chap. 4. Watson RT, Zinyowera MC, Moss RH, Dokken DJ (eds). Cambridge: Cambridge University Press.
- Bzioui, M., 2004:** Rapport national 2004 sur les ressources en eau au Maroc. UN Water-Africa. 94pp.
(http://doc.abhatoo.net.ma/doc/IMG/pdf/Rappt_national_eau_maroc.pdf)

- Cassou C., Terray L., Hurrell J.W., Deser C., 2004:** North Atlantic Winter Climate Regimes: Spatial Asymmetry, Stationarity with Time, and Oceanic Forcing. *J. Clim.*, 17, 1055–1068.
- Chaponniere A., Smakhtin V., 2006:** A review of climate change scenarios and preliminary rainfall trend analysis in the Oum er Rbia, Morocco. International Water Management Institute.
- Christensen J.H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R.K., Kwon W.-T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mearns L., Menéndez C.G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P., 2007:** Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- CIHEAM, 2010 :** l'agriculture au Maroc et en Tunisie et priorités d'adaptation. Les Notes d'analyse du CIHEAM. N° 5 6 – Mars 2010.
- Cubasch U., Waszkewitz J., Hegerl G., Perlwitz J., 1995:** Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Clim Change* 31: 273-304.
- Dai A., Trenberth K. E., Qian T., 2004:** A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming. *American Meteorological Society*, 5, 1117-1130.
- Davies H.C., 1976:** A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 102, 405–418.
- De Perthuis C., 2009 :** Et pour quelques degrés de plus, Nos choix économiques face au risque climatique. Paris: Pearson.
- Déqué M., Drevet C., Braun A., Cariolle D., 1994:** The climate version of the ARPEGE-IFS: a contribution of the French community climate modelling, *Climate Dyn.*, 10, 249–266.
- Déqué M., Piedelievre J-Ph, 1995:** High resolution climate simulation over Europe. *Clim Dyn* 11: 321-339.
- Déqué M., Marquet P., Jones R.G., 1998:** Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Clim Dyn*, 14:173–189. doi:10.1007/s003820050216
- Déqué M., Jones R.G., Wild M., Giorgi F., Christensen J.H., Hassell D. C., Vidale P.L., Rockel B., Jacob D., Kjellström E., de Castro M., Kucharski F., van den Hurk B., 2005:** Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe : quantifying confidence level from PRUDENCE results, *Climate Dyn.*, 25(6), 653–670.
- Déqué M., Li L., 2007:** la Prévision climatique: régionalisation et extrêmes. *La météorologie*, 57 : 28-30.
- Déqué M., 2007:** Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Glob Planet Change* 57:16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030
- Dezetter, A., S. Girard, J. E. Paturel, G. Mahé, S. Ardoin-Bardin, E. Servat, 2008:** "Simulation of runoff in West Africa : Is there a single data-model combination that produces the best simulation results ?" *Journal of Hydrology* 354: 203-212.
- Dieulin C., Boyer J.F., Ardoin-Bardin S. & Dezetter A., 2006:** The contribution of GIS to

- hydrological modelling. In : Demuth S., Gustard A., Planos E., Scatena F. & Servat E. (eds.). *Climate variability and change : hydrological impacts*. FRIEND 2006: International Conference, 5, La Havane (CUB), AISH Pub. 308, 68-74.
- Douville H., Planton S., Royer J.F., Stephenson D.B., Tyteca S., Kergoat L., Lafont S., Betts R.A., 2000:** The importance of vegetation feedbacks in doubled-CO2 time-slice experiments. *J. Geophys. Res.* 105 : 14,841-14, 861.
- Driouech F., 2006 :** Etude des indices de changements climatiques sur le Maroc: températures et précipitations. Direction de la Météorologie Nationale "INFOMET", Casablanca, Novembre 2006.
- Driouech F., Déqué M., Mokssit A., 2009:** Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco, *Clim. Dyn.*, 32, 1055-1063. DOI 10.1007/s00382-008-04310-6
- Driouech F., Déqué M., Sánchez-Gómez E., 2010:** Weather regimes—Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Glob Planet Change*. DOI:10.1016/j.gloplacha.2010.03.004.
- Durman C.F., Gregory J.M., Hassell D.C., Jones R.G., Murphy J.M., 2001:** A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates. *Q J R Meteorol Soc*, 127: 1005-1015
- Easterling D.R., Meehl G.A., Parmesan C., Chagnon S.A., Karl T., Mearns L.O., 2000:** Climate extremes: observation, modelling and impacts. *Science* 289:2068-2074.
- El Hamly M., Sebbari R., Portis D.H., Ward M.N., Lamb P.J., 1997:** Regionalization of Moroccan precipitation for monitoring and prediction. *Proc. of the 7th Conference on Climate Variations of the Amer Meteor Soc*, Long Beach, CA, USA, Feb 2-7: 354-357
- El Hamly M., 2004:** North Atlantic Winter Surface Extratropical Cyclone Track variability on Interannual-to-Decadal Time-Scales. PhD. Dissertation. University of Oklahoma, Graduate College. Norman, Oklahoma.
- Esper J., Franck D., Büntgen U., Verstege A., Luterbacher J. and Xoplaki E., 2007:** Long-term drought severity variations in Morocco, *Geoph. Res. Letters*, 34, L17702, doi:10.1029/2007GL030844.
- Frich, P., Alexander L. V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A. M. G., Peterson T., 2002:** Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, 19, 193–212.
- Folland C.K., Rayner N.A., Brown S.J., Smith T.M., Shen S.S.P., Parker D.E., Macadam I., Jones P.D., Jones R.N., Nicholls N., Sexton D.M.H., 2001:** Global temperature change and its uncertainties since 1861. *Geophysical Research Letters* 28: 2621-2624. DOI:10.1029/2001GL012877.
- Fourier J.-B.J., 1890 :** Œuvre de Fourier, tome2, publié par G. Darboux. Gauthier-Villars, 636p.
- Fox-Rabinovitz M.S., Takacs L.L., Govindaraju R.C., Suarez M.J., 2001:** A variable resolution stretched-grid general circulation: Regional climate simulation. *Mon. Wea. Rev.*, 129(3), 453-469.
- Frei C., Christensen J.H., Déqué M., Jacob D., Jones R.G., Vidale P.L., 2003:** Daily precipitation statistics in regional climate models: evaluation and intercomparison for the European Alps. *J Geophys Res* 108:1–19.
- Gibelin A.L., Déqué M., 2003:** Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim. Dyn.*, 20, 327-339.

- Gibson J.K., Källberg P., Uppala S., Hernandez A., Serano E., 1997:** ERA description. ECMWF Re-analysis project report series. ECMWF, Shinfield
- Gilbert R.O., 1987:** Statistical methods for environmental pollution monitoring. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Giorgi F., 1990:** Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J Climate* 3: 941-96
- Giorgi F., Mearns L.O., 1991:** Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Reviews of Geophysics*, 29, 191–216.
- Giorgi F., 2008:** Régionalisation de l'information sur les changements climatiques pour les évaluations des incidences et l'adaptation. *Bulletin de l'OMM* 57 (2), 86-92.
- Gleick P.H., 1992:** Effects of climate change on shared fresh water resources. In: *Confronting climate change: Risks, implications and responses*, chap. 9. Mintzer IM (ed). Cambridge: Cambridge University Press.
- Glueck M.F., Stockton C.W., 2001:** Reconstruction of the North Atlantic Oscillation, 1429-1983. *Int. J. Climatol.*, 21(12), 1453-1465.
- Gommes R., El Hairech T., Rosillon D., Balaghi R., Kanamaru H., 2009:** World Bank - Morocco study on the impact of climate change on the agricultural sector. 105pp (ftp://ext-ftp.fao.org/SD/Reserved/Agromet/WB_FAO_morocco_CC_yield_impact/report/).
- Goodess C., 2003:** STAtistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions: STARDEX. *European Geophysical Union Information Newsletter* 6, available on line at <http://www.the-eggs.org/articles.php?id=3>
- Guttman N.B., 1999:** Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. -- *J. Amer. Water Resources Assn.*, 35, 311-322.
- Haugen J.E., Machenhauer B., 1993:** A spectral limited-area model formulation with time dependent boundary conditions applied to the shallow-water equations. *Mon. Wea. Rev.* 121, 2618–2630.
- Herrera R.G., Puyol D.G., Martin E.H., Presa L.G., Rodriguez P.R., 2001:** Influence of the North Atlantic Oscillation on the Canary Islands precipitation. *J. Clim.*, 14(19), 3889-3903.
- Hewitson B.C., Crane R.G., 2006:** Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa. *Int. J. Climatol.*, 26, 1315-1337.
- Hulme M., 1992:** Rainfall changes in Africa: 1931–1969 to 1961–1990. *Int J Climatol* 12: 685–699
- Hulme M., Barrow E.M., Arnell N.W., Harrison P.A., Johns T.C., Downing T.E., 1999:** Relative impacts of human-induced climate change and natural variability. *Nature* 397: 688–69.
- Hurrell J.W. and Van Loon H., 1997:** Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation, *Clim. Change*, 36, 301-326.
- IPCC, 2007a:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC, 2007b:** Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

- Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- Jacob D., 2001:** A note to the simulation of annual and interannual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorol Atmos Phys* 77:61–74. doi:10.1007/s007030170017
- Jones R. G., Murphy J.M., Noguer M., 1995:** Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I. Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Q J R Meteorol Soc* 121: 1413-1449.
- Kabouya, M., 1990:** Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat Thesis, Université Paris Sud Orsay, 347 pp.
- Kabouya M. et Michel C., 1991:** Monthly water resources assessment, application to a semi-arid country. *Revue des sciences de l'Eau*, 4(4), 569-587.
- Kharin V., Zwiers F. W., Zhang X. et Hegerl G.C., 2007:** Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations, *J. Climate*, 20(8), 1419–1444, doi :10.1175/JCLI4066.1.
- Kendall M.G., 1975:** Rank Correlation Measures. Charles Griffin, London, 202 p.
- Karl T. R., Nicholls N., Ghazi A., 1999:** CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Climatic Change*, 42, 3–7.
- Köppen, W., 1936:** Das geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie, Vol. 1, Part C, Gebr. Bornträger Verlag Berlin, 388 pp. (in German).
- Knippertz P., Christoph M. and Speth P., 2003:** Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates, *Metorol. Atmos. Phys.*, 83, 67-88.
- Kutiel H., Maheras P., Guika S., 1996:** Circulation indices over the Mediterranean and Europe and their relationship with rainfall conditions across the Mediterranean. *Theor Appl Climatol*, 54: 125–138.
- Lamb., P.J., Pepler, R.A., 1987:** North Atlantic Oscillation: concept and application. *Bull AmMet Soc*, 68: 1218–1225.
- Lavabre J., Cambon J.P., Folton N., Makhlof Z., Michel C., 1997:** LOIEAU : un logiciel pour l'estimation régionale de la ressource en eau. Application à la détermination des débits de référence de la région méditerranéenne française. *Ingénieries EAT*, 12, 59-66
- Le Treut H., 2003:** Les scénarios globaux de changement climatique et leurs incertitudes. *C.R. Géoscience*, 335, 525-533.
- Leung L.R., Mearns L.O., Giorgi F., Wilby R.L., 2003:** Regional climate research: needs and opportunities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 89-95
- Machenhauer B., Haugen J.-E., 1987:** Test of a spectral limited area shallow water model with time dependent lateral boundary conditions and combined normal mode/semiLagrangian time integration schemes. in: *ECMWF Workshop Proceedings: Techniques for Horizontal Discretization in Numerical Weather Prediction Models* ECMWF 361–371.
- Machenhauer B., Windelband M., Botzet M., Christensen J.H., Déqué M., Jones J., Ruti P.M., Visconti G., 1998:** Validation and analysis of regional present-day climate and climate change simulations over Europe. MPI Report No 275, MPI, Hamburg, Germany.
- Madec G., Delecluse P., Imbard M., Lévy C., 1998:** OPA version 8.1 Ocean General Circulation Model Reference Manual, Notes du Pôle de Modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace, n°11, 91 pp [Available from Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie, Université Paris VI, Paris 75252, France.].

- Magnan A., Garnaud B., Billé R., Gemenne F., Hallegatte S., 2009:** La Méditerranée au futur. Des impacts du changement climatique aux enjeux de l'adaptation. Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI)– Paris, France, 45pp.
- Makhlouf, Z., 1994:** Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat. Université de Paris XI Orsay / Cemagref (Antony), 228 pp.
- Makhlouf Z. et Michel C., 1994:** A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318.
- Manton, M.J., et al., 2001:** Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961–1998. *Int. J. Climatol.*, **21**, 269–284.
- Mariotti A., Zeng N., Lau K.-M., 2002:** Euro-Mediterranean rainfall and ENSO- a seasonally varying relationship. *Geophysical research letters*, 29, 59-1:59-4.
- Mann H.B., 1945:** Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, **13**, 245-259.
- McGregor J. L., 1996:** Semi-Lagrangian advection on conformal-cubic grids. *Mon Wea Rev* 124: 1311-1322.
- McGregor J.L., Nguyen K.C. et Katzfey J.J., 2002:** Regional climate simulations using a stretched-grid model. In: *Research Activities in Atmosphere and Oceanic Modelling* [Ritchie H., (ed.)]. Rapport 32, WMO/TD 1105, World Meteorological Organisation, Genève, 15-16.
- McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J., 1993:** The relationship of drought frequency and duration to time scales. -- Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, Jan. 17-22, Anaheim, CA, 179-184.
- Mearns L.O., Bogardi I., Giorgi F., Matyasovsky I. et Palecki M., 1999:** Comparison of climate change scenarios generated from regional climate models experiments and statistical downscaling. *J. Geophys. Res.*, 104(D6), 66036621. doi: 10.1029/1998JD200042.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007:** **Global Climate Projections.** In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Michelangeli P.A., Vautard R., Legras B., 1995 :** **Weather Regimes:** Recurrence and Quasi Stationarity. *J Atmos Sci* 52: 1237-1256
- 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, juin 2009. 81pp.
- Moisselin J-M., Schnider M., Canellas C., Mestre O., 2002:** Les changements climatiques en France au XXe siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitation. *La Météorologie*, n°38 – août 2002.
- Morcrette J., 1990:** Impact of changes to radiation transfer parametrizations plus cloud optical properties in the ECMWF model, *Mon. Wea. Rev.*, 118, 847–873.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., 2006:** Stepwise development of a two parameter monthly water balance model. *J. Hydrol.*, 318 (1-4), 200-214. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.

- Ministère des travaux publics, 1997:** Le point sur la sécheresse au Maroc. Publication du Ministère des travaux publics du Royaume du Maroc. Réf/3/97.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970:** River flow forecasting through conceptual models, Part I: A discussion of principle. *J. Hydrol.* **10**, 282-290.
- Nakićenović, N., et R. Swart (Publié sous la direction de), 2000:** Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, NY, États Unis d'Amérique, 599 pages.
- New M., Hulme M., Jones P., 1999:** Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-1966 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Clim.* **13** (13), 2217-2238.
- Nicholls, N. et W. Murray, 1999:** Workshop on Indices and Indicators for climate extremes, Asheville, NC, USA, 3-6 June 1999. Breakout Group B: Precipitation. *Clim. Change*, **42**, 23-29.
- Nicholson S.E., Kim J., 1997:** The relationship of the El Niño-Southern Oscillation to African rainfall. *Int. J. Climatol.* **17**:117-135.
- Noilhan J., Mahfouf S., 1996:** The ISBA land surface parametrization scheme, *Global Planet. Change*, **13**, 145-159.
- Paeth H., Born K., Podzun R., Jacob D., 2005:** Regional dynamical downscaling over West Africa: model evaluation and comparison of wet and dry years. *Meteorologische Zeitschrift* **14**:349-367. doi:10.1127/0941-2948/2005/0038
- Paeth H., Born K., Girmes R., Podzun R., Jacob D., 2009:** Regional Climate Change in Tropical and Northern Africa due to Greenhouse Forcing and Land Use Changes. *Jour. Clim.*, **22**, 114-132. doi: 10.1175/2008JCLI2390.1
- Palmer W.C., 1965:** Meteorological drought, Res. Pap. 45, 58 pp., U. S. Dep. of Commer., Washington, D. C.
- Parish R., Funnell D.C., 1999:** Climate change in mountain regions: Some possible consequences in the Moroccan High Atlas. *Global Environ. Chang.*, **9**: 45-58.
- Paturel J.E., Servat E., Vassiliadis A., 1995:** Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data. Case of the GR2M model. *J. Hydrol.* **168**, 111-125.
- Paturel J.E., Ouédraogo M., Mahé G., Servat E., Dezetter A., Ardoin S., 2003:** Influence of the spatialization of data on the modelling of monthly river regimes in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*. Volume 48, Number 6, December 2003 : 881-890.
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A., 2007:** Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **11**: 1633-1644.
- Peterson, T.C., 2001:** CLIMATE EXTREME INDICES VIA REGIONAL CLIMATE CHANGE WORKSHOPS. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wmo/ccl/AMS-2005-workshops-preprint.pdf>
- Peterson C., Taylor M. A., Demeritte R., Duncombe D. L., Burton S., Thompson F., Porter A., Mercedes M., Villegas E., Fils R. S., Tank A. K., Martis A., Warner R., Joyette A., Mills W., Alexander L., Gleason B., 2002:** Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *Jour. Geo. Res.*, **107**: 16-1:16-9.
- PNUE/PAM/PLAN BLEU, 2004:** L'eau des Méditerranéens : situation et perspectives. No. 158 de la Série des rapports techniques du PAM, PNUE/PAM, Athènes, 2004 si ça reste en intro, enler sinon !!!!
- Radu U., Déqué M., Somo S., 2008:** Spectral nudging in a spectral regional climate model. *Tellus A*, **60**, 898-910.

- Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E., 2007:** Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Réménieras, G., 1986 :** L'Hydrologie de l'Ingénieur. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. Ed. Eyrolles. p. 222.
- Ricard J. L., Royer J. F., 1993:** A statistical cloud scheme for use in an AGCM, *Ann. Geophysicae*, 11, 1095–1115.
- Rifaat, S., 1980 :** Comparaison de plusieurs techniques de reconstitution de débits moyens mensuels, Rapport de stage, 66 pp, EPFL (Lausanne), Cemagref (Antony).
- Rowell, D. P., 2006:** A demonstration of the uncertainty in projections of UK climate change resulting from regional model formulation, *Clim. Change*, 79(3-4), 243–257, doi:10.1007/s10584-006-9100-z.
- Salas-Mélia D., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Guérémy J.F., Marquet P., Planton S., Royer J. F., Tyteca S., 2005:** Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model. Note n° 103 de centre du CNRM, Météo-France, Toulouse.
- Sanchez-Gomez E., Cassou C., Hodson D.L.R., Keenlyside N., Okumura Y., Zhou T., 2008:** North Atlantic weather regimes response to Indian-western Pacific Ocean warming: A multi-model study. *GRL*, 35, L15706, doi:10.1029/2008GL034345.
- Singla S., 2009:** Impact du changement climatique global sur les régimes hydroclimatiques au Maroc : tendances, ruptures et effets anthropiques sur les écoulements. Mémoire de Master Recherche Eau et Environnement. Université de Montpellier 2.
- Snoussi M., Haïda S., Imassi S., 2002:** Effects of the construction of dams on the water and sediment fluxes of the Moulouya and the Sebou Rivers, Morocco. *Reg Environ Change*. 3:5-12.
- Solman S.A., Nuñez M.N., 1999:** Local estimates of global climate change: a statistical downscaling approach. *Int. J. Climatol.* 19 (8), 835–861.
- Somot S., Sevault F., Déqué M., Crépon M., 2008:** 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere–ocean regional climate model. *Glob. Plan. Change* 63: 112–126.
- Sneyers R., 1990:** On the statistical analysis of series of observations. WMO, Technical Note n°143, Geneva.
- Tegen I., Hollrig P., Chin M., Fung I., Jacob D., Penner J., 1997:** Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: estimates from model results. *J Geophys Res* 102:23895–23915. doi:10.1029/97JD01864.
- Terray L., Demory M.E., Déqué M., de Coetlogon G., Maisonnave E., 2004:** Simulation of late-twenty-first-century changes in wintertime atmospheric circulation over Europe due to anthropogenic causes. *J Clim* 17:4630–4635. doi:10.1175/JCLI-3244.1
- Terray L., Braconnot P. (ss dir.), 2008:** Livre blanc Escrime : étude des simulations climatiques. IPSL-Météo-France, 52 p.
- Uppala SM, Kållberg PW, Simmons AJ, Andrae U, da Costa Bechtold V, Fiorino M, Gibson JK, Haseler J, Hernandez A, Kelly GA, Li X, Onogi K, Saarinen S, Sokka N, Allan RP, Andersson E, Arpe K, Balmaseda MA, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Caires S, Chevallier F, Dethof A, Dragosavac M, Fisher M,**

- Fuentes M, Hagemann S, Hólm E, Hoskins BJ, Isaksen L, Janssen PAEM, Jenne R, McNally AP, Mahfouf J-F, Morcrette J-J, Rayner NA, Saunders RW, Simon P, Sterl A, Trenberth KE, Untch A, Vasiljevic D, Viterbo P, Woollen J, 2005:** The ERA-40 re-analysis. *Q J R Meteorol Soc* 131: 2961-3012.
- Visbeck M.H., Hurrell J.W., Polvanis L., Cullen H.M., 2001:** The North Atlantic Oscillation: Past, present and future. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*.
- von Storch H., 1995:** Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research, *Meteorol. Zeitschrift*, 4, 72–80.
- von Storch H., 1999:** On the use of ‘inflation’ in statistical downscaling, *J. Climate*, 12(12), 3505–3506.
- Vose R.S., Schmoyer R.L., Steurer P.M., Peterson T.C., Heim R., Karl T.R., Eischeid J.K. , 1992:** The Global Historical Climatology Network: Long-term monthly temperature, precipitation, sea level pressure, and station pressure data. NDP-041. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Vautard R., 1990:** Multiple Weather Regimes over the North Atlantic: Analysis of Precursors and Successors. *Mon Wea Rev* 118: 2056-2081.
- Wanner H., Brönnimann S., Casty C., Gyalistras D., Luterbacher J., Schmutz C., Stephenson D.B. et Xoplaki E, 2001:** North-Atlantic Oscillation – concepts and studies. *Survey in Geophys.*, 22, 321-381.
- Wang Y., Leung L.R., McGregor J.L., Lee D-K, Wang W-C, Ding Y., Kinura F., 2004:** Regional climate modeling: progress, challenges and prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 1599-1628.
- 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. In: Navarra A (ed), *Beyond El Niño: Decadal and Interdecadal Climate Variability*. Springer Verlag, Berlin, pp. 119-14.
- Wilby R.L., Wigley T.M.L., Conway D., Jones P.D., Hewitson B.C., Main J., Wilks D.S., 1998:** Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research* 34: 2995-3008
- Wilby R.L., Dawson C.W., Barrow E.M., 2002:** SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental and Modelling Software* 17: 145-157
- Wilby R.L., 2007:** Climate Change scenarios for Morocco. Final technical report. Department of Geography, Lancaster University and Environment Agency of England and Wales, Direction de la Météorologie Nationale, on behalf of World Bank. 23 pp.
- Xoplaki E., 2002:** **Climate variability** over the Mediterranean. PhD thesis, University of Bern, Switzerland, http://sinus.unibe.ch/klimet/docs/phd_xoplaki.pdf.
- Xoplaki E., Gonzales-Rouco J.F., Luterbacher J. and Wanner H., 2004:** Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large scale dynamics and trends, *Climate Dynamics*, 23, 63-78, DOI 10.1007/s00382-004-0422-0.
- Zhang X., Yang F., 2004:** Rclimdex (1.0) User Manual. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario, Canada. September 10, 2004.

Annexe A

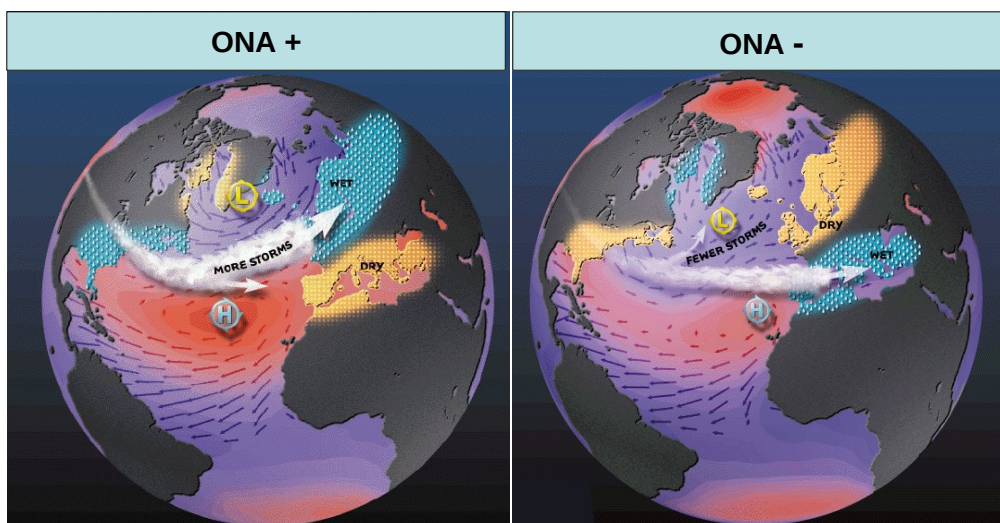


Fig. A.1 Représentation schématique des conditions météorologiques associées aux phases positive (à gauche) et négatives (à droite) de l'Oscillation Nord-Atlantique. Source : <http://www.ldeo.columbia.edu/NAO> (by Martin Visbeck).

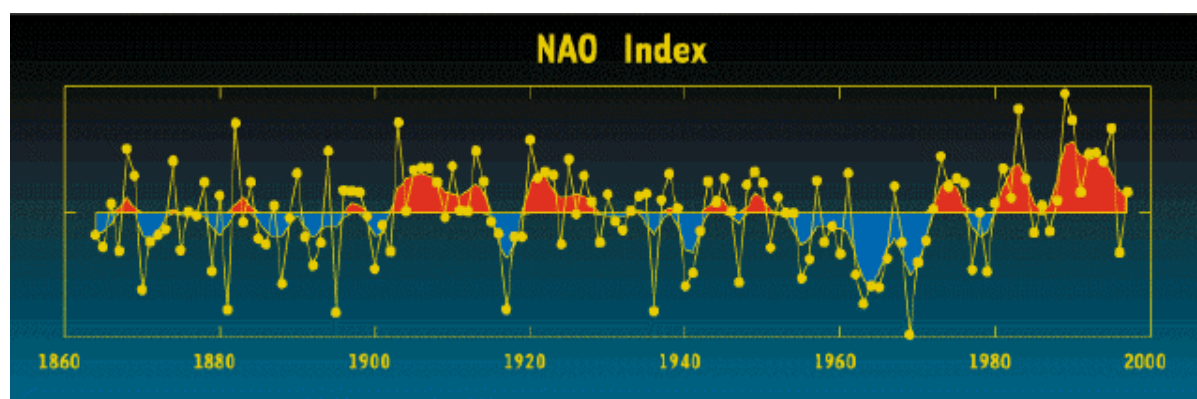


Fig. A.2 Evolution temporelle de l'indice de l'ONA de la période hivernale allant de décembre à mars. Source : <http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/NAO/>.

Annexe B

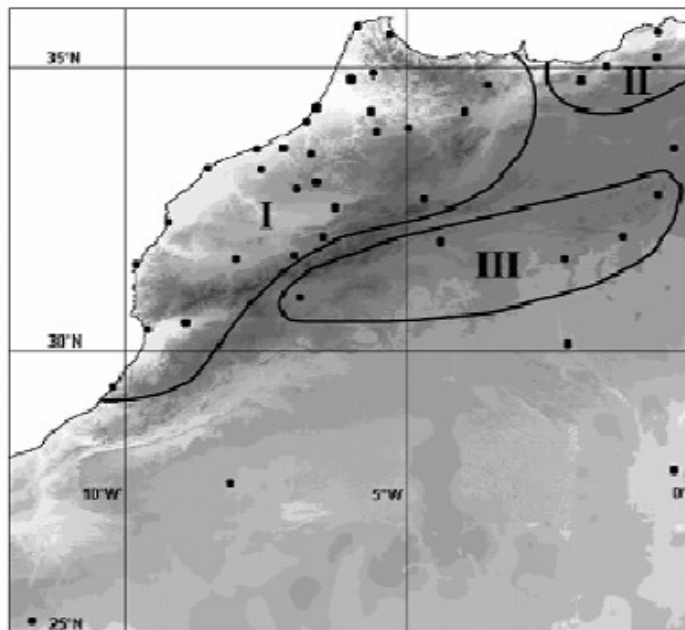


Fig. B.1 Régions pluviométriques hivernales selon Knippertz et al. (2003). Les régions I, II et III sont aussi nommées respectivement ATL (ouest des montagnes de l'Atlas), MED (nord-est du Maroc) et SOA (sud des montagnes de l'Atlas). Source : Knippertz et al. (2003).

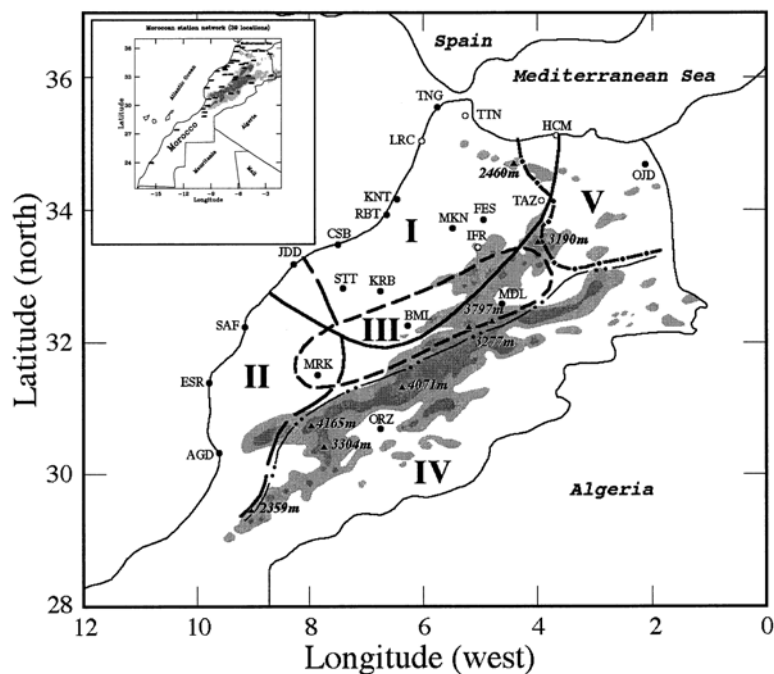


Fig. B.2 Régionalisation des précipitations d'octobre à Avril de 22 stations marocaines pour la période 1932-1995. La carte entière du Maroc est montrée sur le carré inséré en haut à gauche. Source El Hamly (2004).

Annexe C

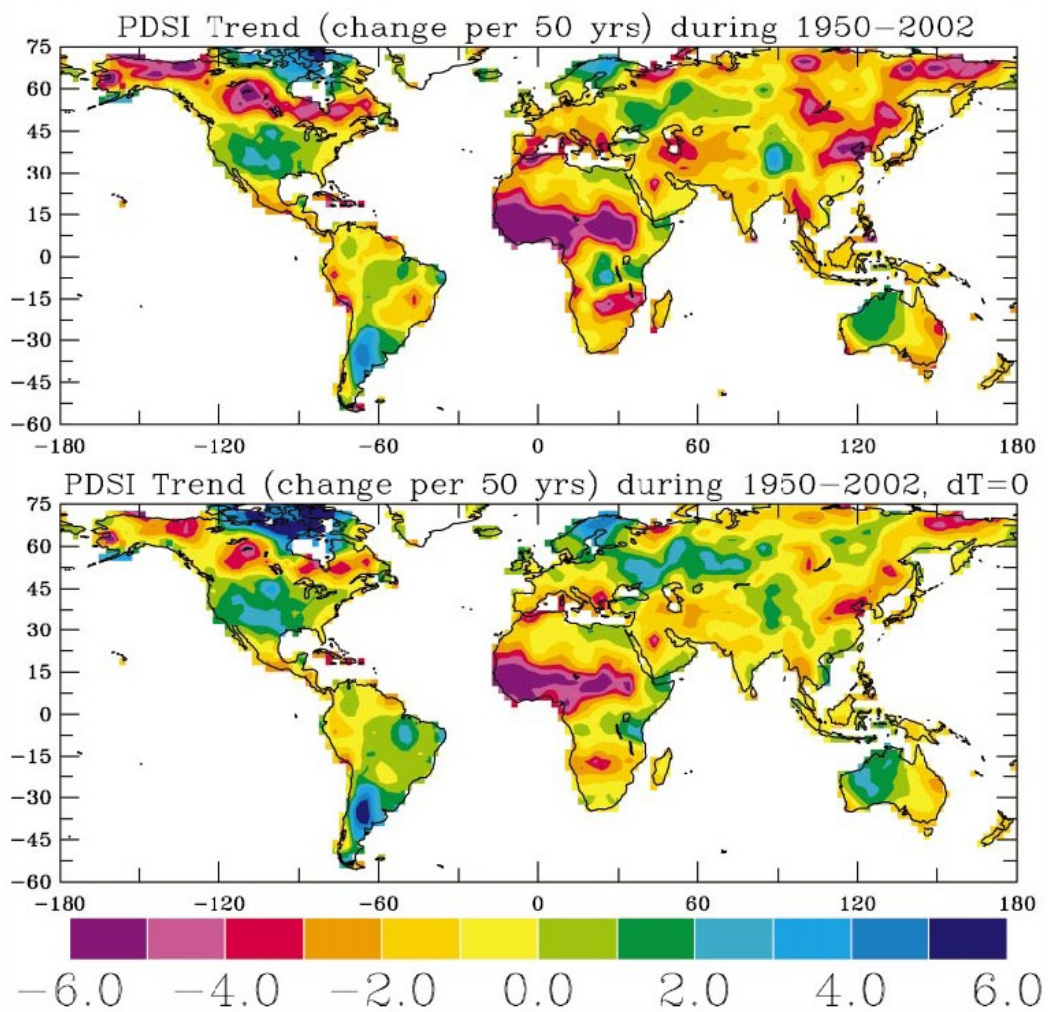


Fig. C.1 tendances linéaires du PDSI (changement par 50 ans) calculé sur la période 1950-2002 en tenant compte des changements de précipitations et de températures (carte du haut) et tenant compte uniquement des changements de précipitation (carte du bas). Les zones rouges indiquent un assèchement et les zones bleues une humidification. Source (Dai et al. 2004).

Annexe D

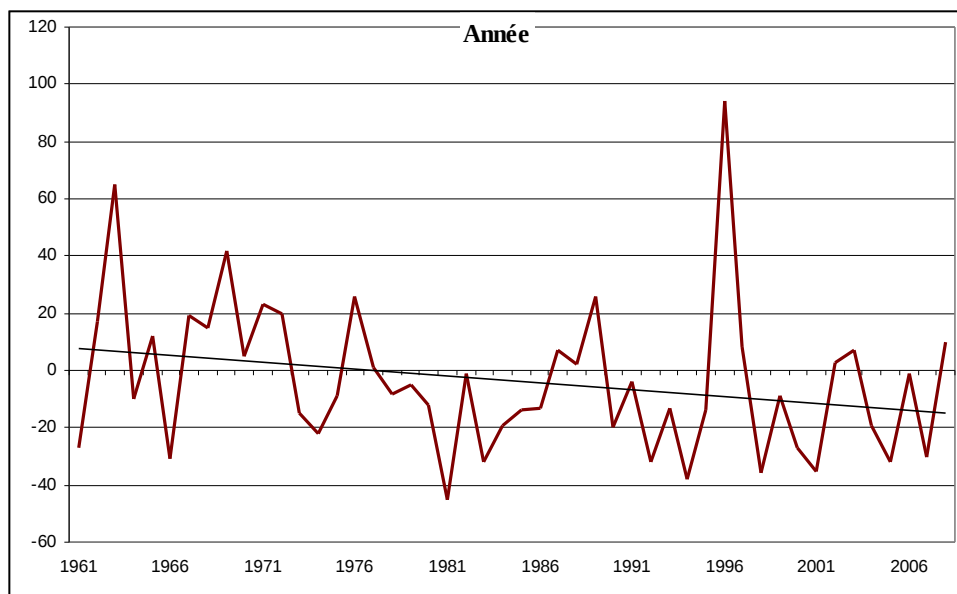


Fig. D.1 Moyennes nationales (en %), des anomalies relatives des cumuls pluviométriques annuels, calculées sur les 14 stations météorologiques marocaines. Période 1961-2008.

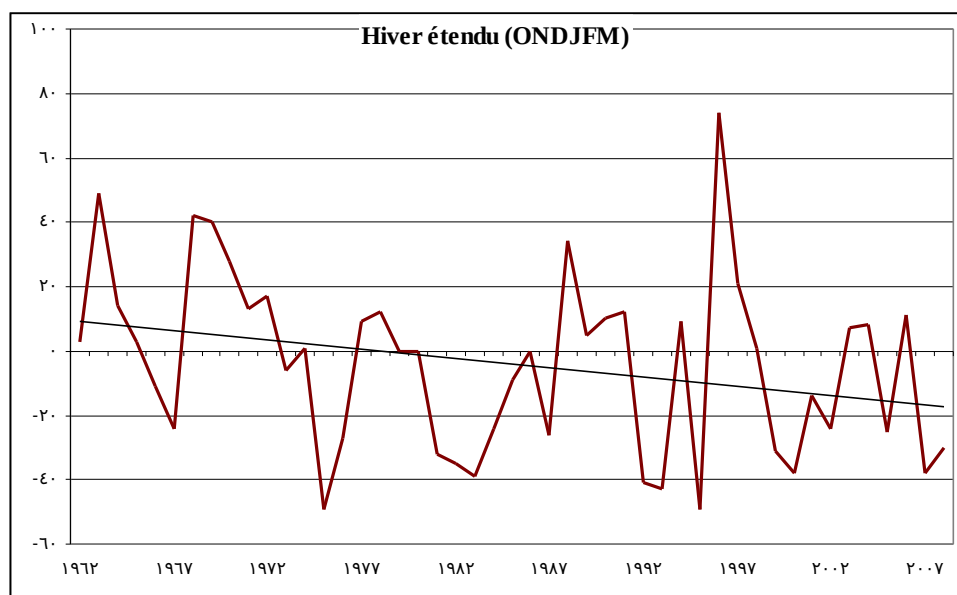


Fig. D.2 Moyennes nationales (en %), des anomalies relatives des cumuls pluviométriques de l'hiver étendu (octobre à mars), calculées sur les 14 stations météorologiques marocaines. Période 1961-2008.

Annexe E

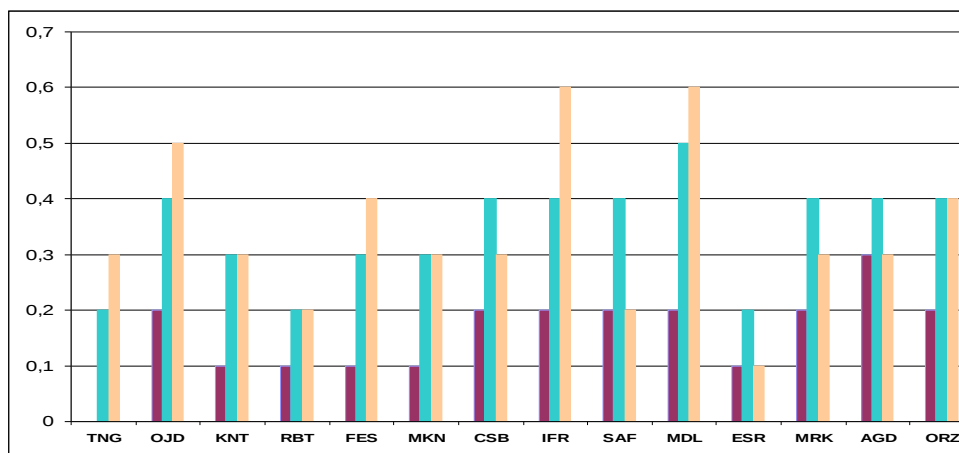


Fig. E.1 Tendances de la température moyenne saisonnière calculées sur la période 1961-2008 au niveau des 14 stations météorologiques. Hiver : barres rouges, printemps : barres vertes, automne : barres jaunes. En °C/décennie.

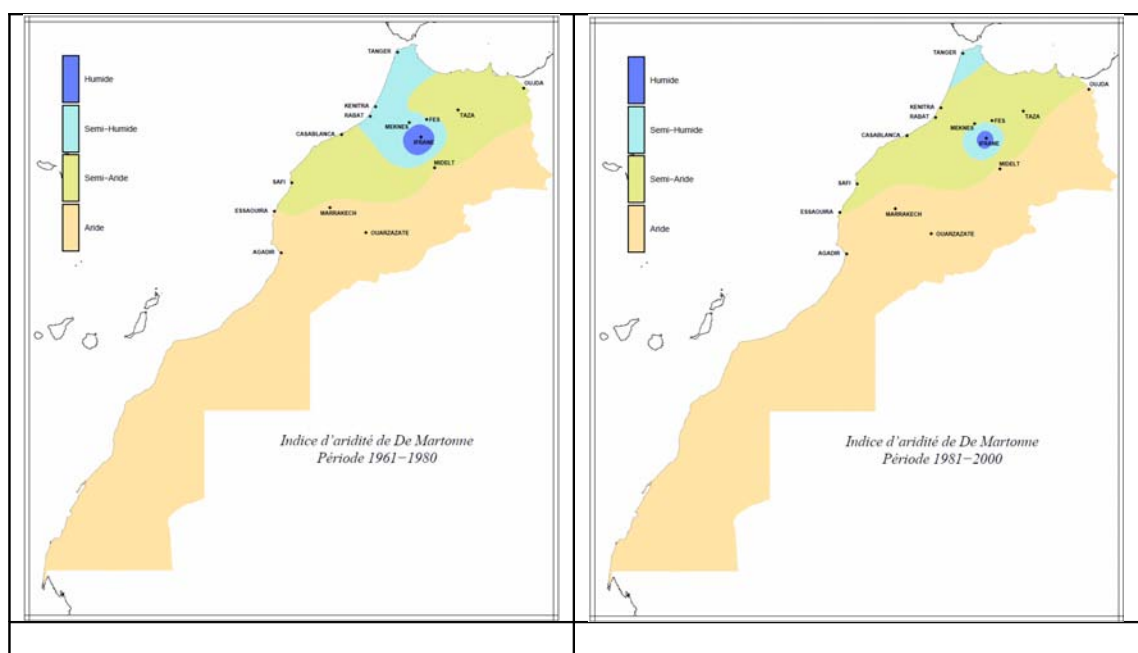


Fig. E.2 Différents types de climats au Maroc, selon l'indice d'aridité de De Martonne, pour les périodes 1961-1980 (figure de gauche) et 1981-2000 (figure de droite). Les stations météorologiques utilisées sont affichées sur les graphes.

Annexe F

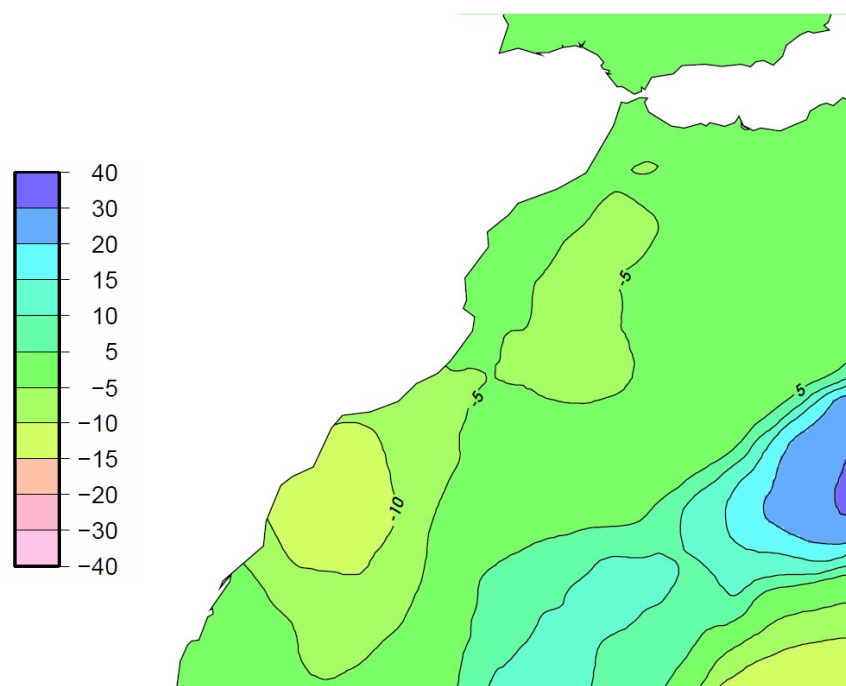


Fig. F.1 Changements projetés (en %) par ARPEGE-RV sous le scénario A1B pour le 90^{ème} centile de précipitations. Hiver étendu (octobre à avril). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

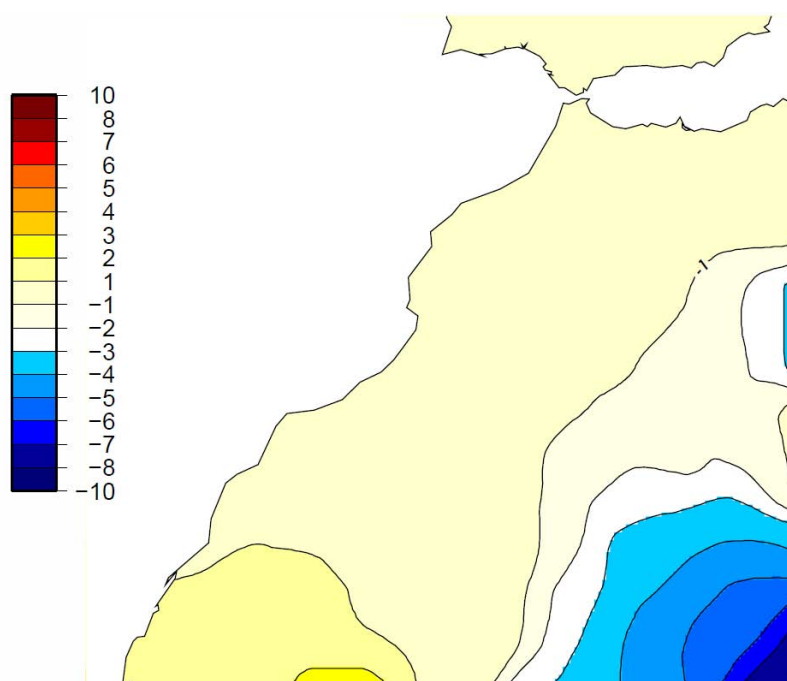


Fig. F.2 Changements projetés (en jour) par ARPEGE-RV sous le scénario A1B pour le nombre moyen de jours consécutifs secs. Hiver étendu (octobre à avril). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

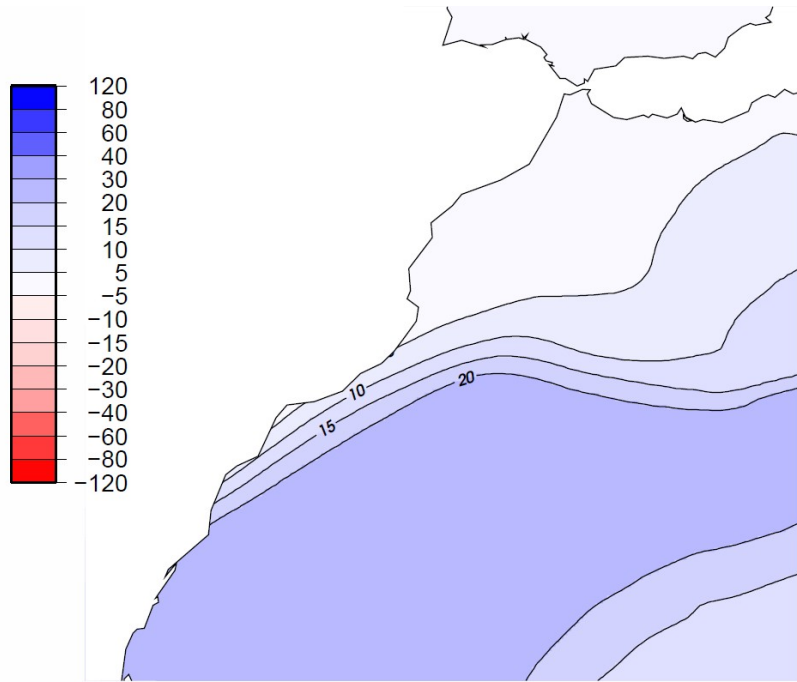


Fig. F.3 Changements (en %) projetés par ARPEGE-RV pour la précipitation moyenne annuelle sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

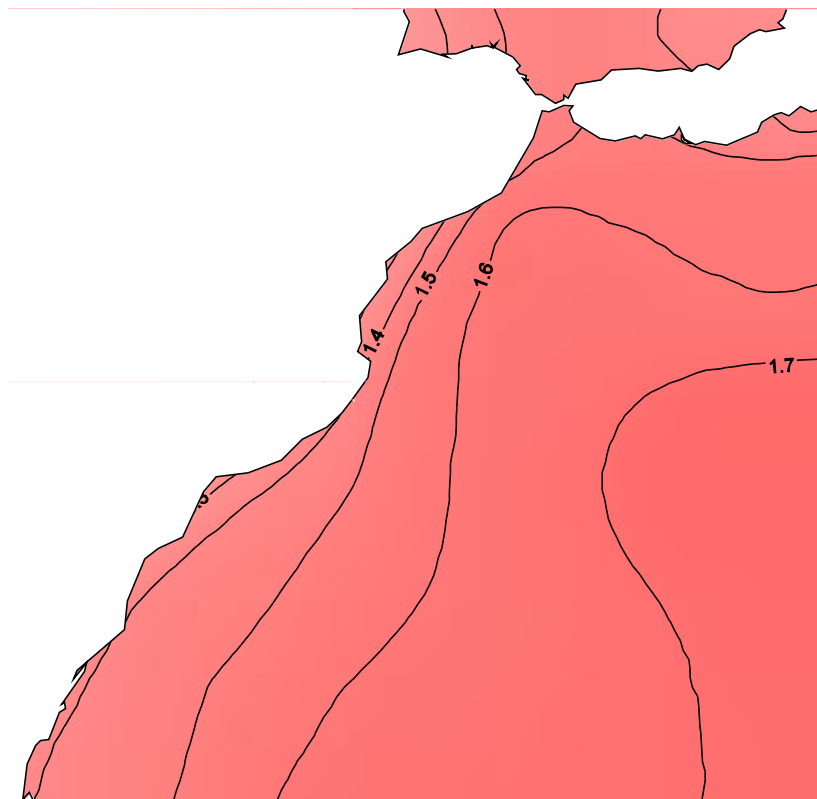


Fig. F.4 Changements (en °C) projetés par ARPEGE-RV pour la température moyenne annuelle sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Annexe G

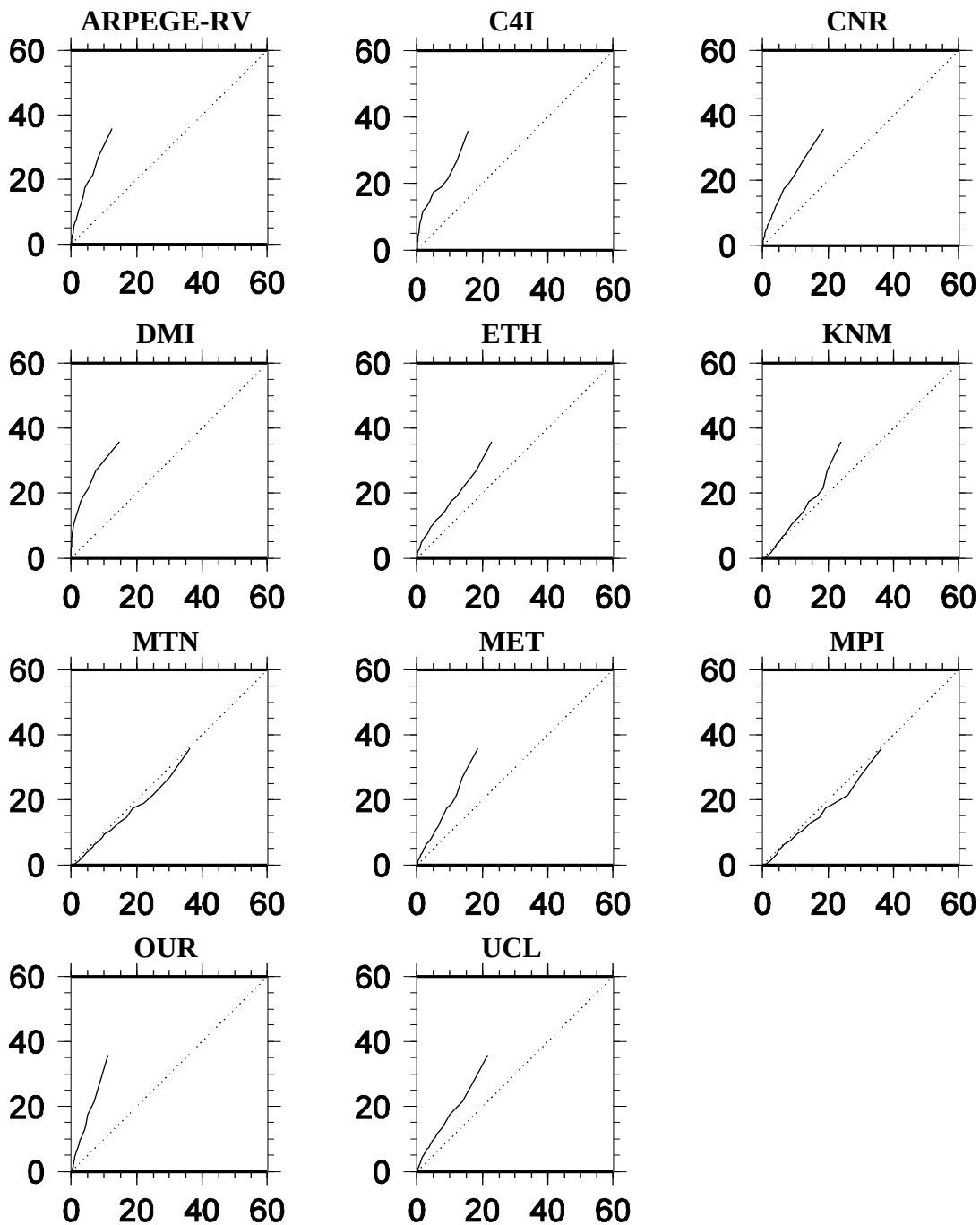


Fig. G.1 Courbes quantile-quantile représentant les centiles des précipitations hivernales (DJF) observés à Rabat en fonction de ceux simulés par les MRC d'ENSEMBLES et par ARPEGE-RV au niveau des mailles les plus proches de Rabat. Saison d'hiver (DJF).

Stations	Changement de pav (%)			Changement de pn05 (%)			Changement de pxcdd (j)			Changement de pnl90 (%)		
	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
TN	-12	-36	30	-13	-22	3	2.8	0.0	5.8	-13	-23	3
OJ	-17	-29	5	-16	-26	0	4.2	0.0	8.8	-16	-26	0
KN	-19	-42	11	-16	-28	0	3.7	-1.4	8.7	-16	-27	0
RB	-19	-38	17	-17	-32	0	3.5	-0.5	7.3	-17	-32	0
FE	-17	-28	3	-17	-28	0	4.7	-1.9	9.8	-17	-28	0
MK	-18	-36	8	-17	-27	0	3.7	0.0	8.6	-17	-26	0
CS	-17	-39	24	-16	-31	0	4.4	0.0	8.2	-16	-29	0
IF	-15	-31	3	-17	-26	0	4.7	0.0	9.9	-16	-27	0
SA	-16	-42	52	-20	-46	2	6.2	0.0	23.1	-20	-48	0
MD	-2	-27	27	-8	-23	9	2.7	-3.7	10.2	-7	-22	13
ES	-13	-42	69	-21	-59	7	6.0	-1.6	16.8	-21	-55	5
MR	-21	-43	9	-20	-32	0	5.8	0.0	16.8	-21	-38	0
AG	-14	-43	50	-19	-37	15	5.5	-7.6	16.8	-23	-57	17
OR	-14	-57	29	-11	-45	17	1.2	-5.8	9.6	-13	-50	18

Tableau 1 Changement moyen, maximal et minimal calculés, sur les 11 MRC incluant ARPEGE-RV, au niveau des mailles les plus proches de chacune des stations météorologiques, pour la précipitation moyenne (pav, en %), le nombre de jours humides (pn05, en %), le nombre maximal de jours consécutifs secs (pxcdd, en jour) et le nombre d'événements de fortes précipitations (pnl90, en %). Saison d'hiver (DJF).

Stations	pav	pn05	pxcdd	Pnl90
TN	16	7	1.7	7
OJ	12	8	2.7	8
KN	15	7	3.0	7
RB	15	8	2.9	8
FE	10	9	3.6	10
MK	12	7	2.6	7
CS	17	7	2.7	7
IF	10	8	2.7	7
SA	24	12	5.9	12
MD	18	10	4.1	11
ES	29	16	5.6	15
MR	15	8	5.0	9
AG	29	17	7.2	20
OR	28	19	4.9	19

Tableau 2 Ecart-types des changements futurs issus des 11 MRC incluant ARPEGE-RV, au niveau des mailles les plus proches de chacune des stations météorologiques, pour la précipitation moyenne (pav, en %), le nombre de jours humides (pn05, en %), le nombre maximal de jours consécutifs secs (pxcdd, en jour) et le nombre d'événements de fortes précipitations (pnl90, en %). Saison d'hiver (DJF).

Annexe H

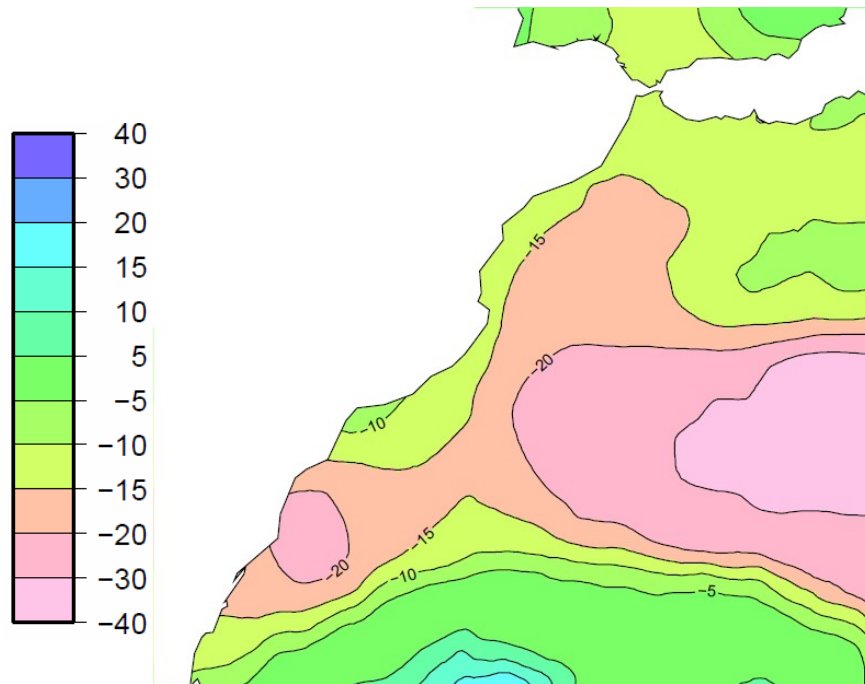


Fig. H.1 Changements projetés par ARPEGE-RV pour le nombre d'événements de fortes précipitations (en %) sous le scénario A1B. Saison d'hiver (DJF). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

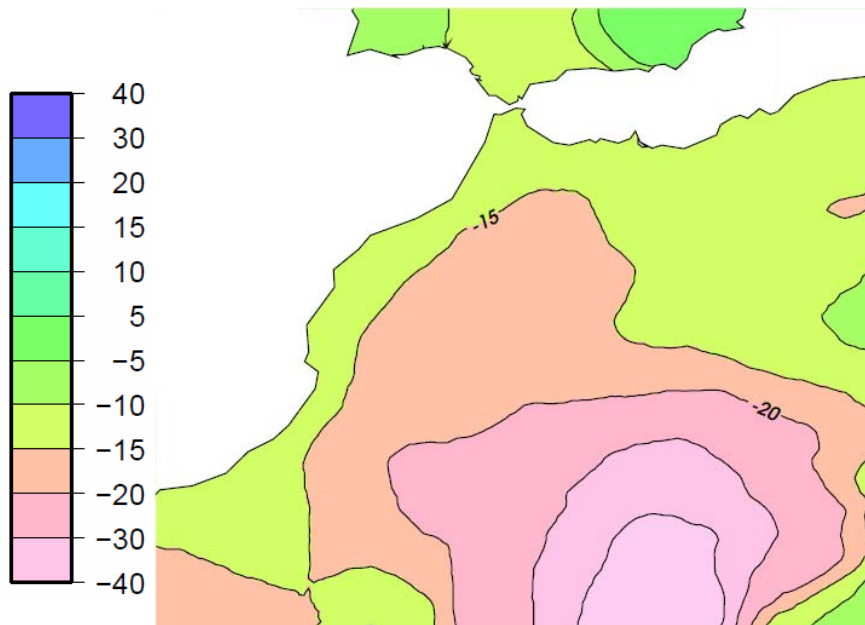


Fig. H.2 Changements projetés par Aladin-Climat pour le nombre d'événements de fortes précipitations (en %) sous le scénario A1B. Saison d'hiver (DJF). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

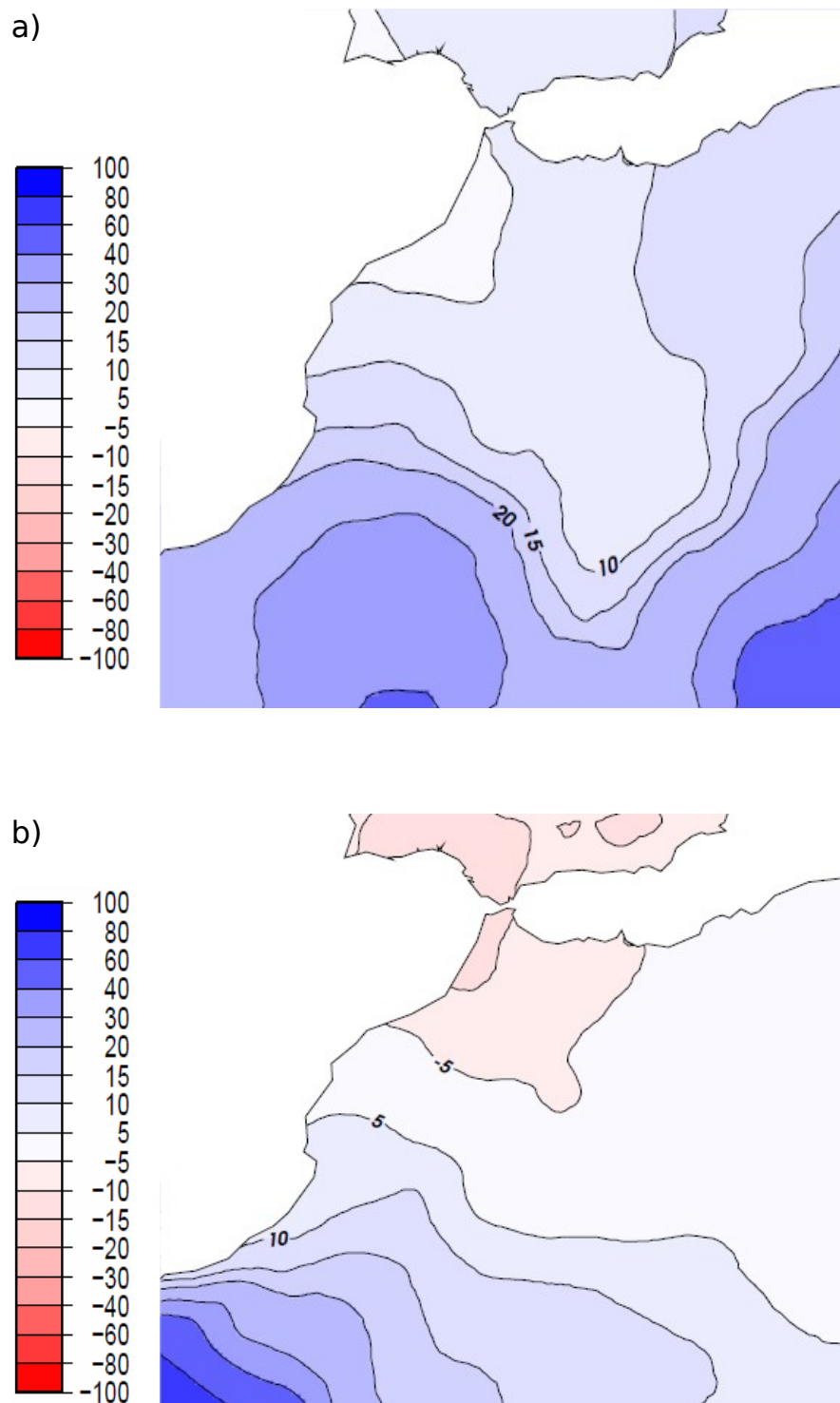


Fig. H.3 Changements projetés par Aladin-Climat pour la précipitation moyenne (en %) sous le scénario A1B. a) Saison du printemps (MAM). b) saison d'été (JJA). c) saison d'automne (SON). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

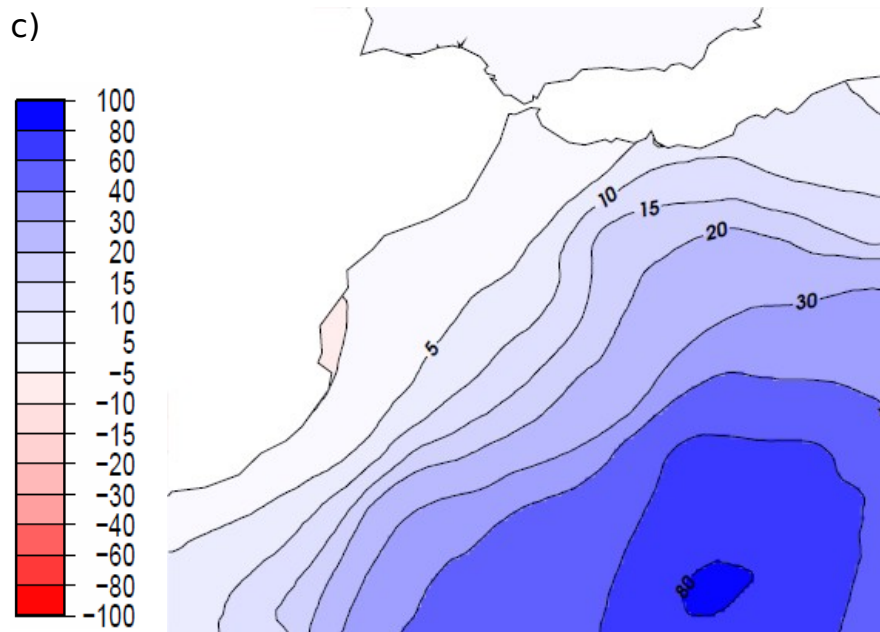


Fig. H.3 Suite.

Liste des illustrations

Chapitre 1

Fig. 2.1 Pluviométrie annuelle moyenne au Maroc calculée sur la période 1971-2000 (Source : Direction de la Météorologie Nationale, Maroc).

Fig. 1.2 Anomalies relatives (en %) de la précipitation moyenne annuelle au niveau des 14 stations météorologiques marocaines. Période 1961-2008.

Fig. 1.3 Tendances des indices climatiques calculées sur la période 1961-2008 pour les 14 stations météorologiques marocaines. a) précipitation moyenne (mm/j par décennie), b) nombre de jours humides (j/décennie), c) : période maximale de sécheresse (j/décennie), d) : nombre d'événements de fortes précipitations (par décennie). Pour chaque indice, on a, du haut en bas, la saison d'hiver, le printemps et l'automne. Les cercles entourant les triangles indiquent les tendances statistiquement significatives selon K-test.

Fig. 1.4 Tendances des indices climatiques calculées sur la période 1961-2008 pour les 14 stations météorologiques marocaines. a) précipitation moyenne (mm/j par décennie), b) nombre de jours humides (j/décennie), c) : période maximale de sécheresse (j/décennie), d) : nombre d'événements de fortes précipitations (par décennie). Pour chaque indice, on a l'année (carte du haut) et l'été (carte du bas). Les cercles entourant les triangles indiquent les tendances statistiquement significatives selon K-test.

Fig. 1.5 Tendances de la température moyenne estivale (barres rouges) et annuelle (barre bleue) calculées sur la période 1961-2008 au niveau des 14 stations météorologiques. En Tableau 2 Types de climats, selon l'indice d'aridité de De Martonne, au niveau des 14 stations météorologiques durant les périodes 1961-1980, 1981-2000 et 1981-2008. La quatrième colonne représente les tendances annuelles de l'indice de De Martonne sur la période 1961-2008 (en mm/°C par an). Les tendances significatives, selon K-test, sont en gras et soulignées.

Tableau 1.1 Noms des 14 stations utilisées, leurs coordonnées géographiques, leurs altitudes ainsi que le nom de la région pluviométrique à laquelle elles appartiennent selon chacune des régionalisations précitées ; celle de Knippertz et al. (2003) notée A (voir Fig. B.1 de l'annexe B) et celle d'El Hamly et al. (1997) notée B (voir Fig. B.2 de l'annexe B). La région ATL couvre l'ouest des montagnes de l'Atlas, la région MED le nord-ouest et la région SOA le sud des montagnes de l'Atlas.

Chapitre 2

Fig. 2.1 Schématisation de la différence d'échelles entre les MCG et les modèles d'impacts. (Adapté d'une représentation de David Viner, Climatic Research Unit, University of East-Anglia. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/modelcc/>).

Article 1

Fig. 1: Map of northern Morocco, with location of the 14 stations and of the model grid-points (land only). Grid-point elevation is indicated as follows: black dot is under 1000 m, grey dot is between 1000 m and 2000 m, open circle is above 2000 m.

Fig. 2: Mean sea level pressure in extended winter (ONDJFM) for the model (a) and ERA40 analysis (b). Contour interval is 3 hPa, values below 1015 hPa are shaded.

Fig. 3: First EOF of 6-90-day bandpass filtered 500 hPa height in extended winter for the model (a) and ERA40 analysis (b). Contour interval is 20 m; 0-contour omitted, shading above 10 m.

Fig. 4: Standard deviation of the 2-6-day bandpass filtered 500 hPa height in extended winter for the model (a) and ERA40 (b). Contour interval is 10 m, values above 30 m are shaded.

Fig. 5: Composites of 500 hPa height anomalies in extended winter for the model (left-hand column) and ERA40 (right-hand column) for the four weather regimes. ZO: Zonal; BL: Blocking ; GA: Greenland Anticyclone; AR: Atlantic Ridge. Numbers shown by each panel are the mean frequency of the regime (Thick number) and standard deviation of the annual frequency (Thin number).

Fig. 6: Quantile-quantile plot of extended-winter precipitation (mm/day) for the 14 Moroccan stations; model (x-axis) versus observation (y-axis). ZO: dash-dot line, BL: Thick line, GA: dashed line, AR: thin line.

Fig. 7: STARDEX indices for extended winter; the long-term 90th percentile of rain day amounts (pq90, upper panel) and the fraction of total precipitation from events above this percentile (pfl90, lower panel) for the 14 stations. Observation (bars) and model (circles).

Fig. 8: STARDEX indices for extended winter; the mean dry spell length (psmed, upper panel) and the maximum number of consecutive dry days (pxcdd, lower panel) for the 14 stations. Observation (bars) and model (circles).

Chapitre 3

Fig. 3.1 Changements de température (cartes du haut) et de précipitations (cartes du milieu) projetés, selon le scénario SRES-A1B, pour l’Afrique pour la période 2080-2099 par rapport à 1980-1999. Les changements sont moyennés sur 21 modèles du GIEC. Les figures du bas représentent le nombre de modèles projetant une augmentation des précipitations. La colonne 1 représente l’année, la colonne 2 l’hiver et la troisième colonne l’été. Source : GIEC, 2007.

Fig. 3.2 Evolution des émissions de GES et de la croissance de la température globale suivant les scénarios d’émission du GIEC. Source : GIEC, 2007.

Fig. 3.3 Changements projetés par ARPEGE-RV sous le scénario A1B pour : a) la précipitation moyenne (en %), b) le nombre de jours humides (en %), c) le nombre maximal de jours consécutifs secs (en jours) et d) le nombre d’événements de fortes précipitations (en %). Hiver étendu (octobre à avril). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Fig. 3.4 Changements (en %) projetés par ARPEGE-RV pour la précipitation moyenne saisonnière sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

a) hiver, b) printemps, c) été, d) automne.

Fig. 3.5 Changements (en °C) projetés par ARPEGE-RV pour la température moyenne saisonnière sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Fig. 3.6 Changements (en mm/°C) projetés par ARPEGE-RV pour l’indice d’aridité de De Martonne sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000

Chapitre 4

Fig. 4.1 Courbes quantile-quantile représentant les centiles de précipitation hivernale (DJF) observés à Rabat en fonction de ceux simulés, par les MRC d’ENSEMBLES et par ARPEGE-RV, au niveau des mailles les plus proches de Rabat. Régime zonal: ligne épaisse, régime de la dorsale atlantique: ligne en pointillé, régime de blocage : ligne tiret-point, régime de l’anticyclone groenlandais : ligne fine. La diagonale correspond à la simulation parfaite.

Fig. 4.2 a) Changement moyen (%) calculé, pour chacune des stations météorologiques, sur les 11 MRC incluant ARPEGE-RV (carte du haut) et le nombre de modèles projetant une augmentation (carte de bas). b) Changements maximal (carte de haut) et minimal (carte de bas) obtenus. Saison d'hiver (DJF).

Fig. 4.3 Nombre de jours consécutifs secs (pxcdd) observé (barres) au niveau de chacune des 14 stations météorologiques ainsi que celui simulé par ARPEGE-RV au niveau des mailles les plus proches sans correction (ronds) et avec correction (étoiles). Saison d'hiver (DJF). Voir tableau 4.4 pour les noms des stations.

Tableau 4.1 Liste des MRC (colonne 1) d'ENSEMBLES dont les données sont utilisées dans ce chapitre. La colonne 2 contient les modèles de forçage. Les colonnes 3 et 4 présentent respectivement les acronymes des MRC et les institutions dont ils sont issus.

Tableau 4.2 Fréquences moyennes (en %) des régimes de temps pour le climat présent observé (colonne 2) ainsi que celui simulé par chacun des dix MRC d'ENSEMBLES et par

Tableau 4.3 Moyenne (en %) des biais moyens calculée, pour chaque régime et chaque MRC (les 10 MRC d'ENSEMBLES en plus ARPEGE-RV), sur les 14 stations météorologiques.

Tableau 4.4 Changements futurs (colonnes de gauche) au niveau des mailles les plus proches des 14 stations météorologiques obtenus après correction des sorties d'ARPEGE-RV. Les colonnes de droite montrent la différence entre les changements futurs obtenus avec les données corrigées et ceux issus des données brutes du modèle. pav (%), pn05mm (%), pxcdd (j), et pn190 (%).

Article 2

Figure 1: Location of the 14 stations over Morocco and of the ARPEGE-Climate model grid-points (land only).

Figure 2: Observed present-day relative changes (%) in the frequency of intense precipitation days (map top of each square), in the frequency of wet days (map middle of each square) and in the mean precipitation (map down of each square) for each Z500 weather regime. Values between parentheses are the observed weather regime frequencies.

Figure 3: Present-day relative changes (%) in the frequency of intense precipitation days (map top of each square), in the frequency of wet days (map middle of each square) and in the mean precipitation (map down of each square) for each Z500 weather regime, as simulated by ARPEGE-Climate model (MORC). Values between parentheses are the simulated weather regime frequencies for present-day (left values) and for the future (right values).

Figure 4: Future changes projected by ARPEGE-Climate model for a): mean precipitation (in %), b) total number of wet days (in %), c) maximum number of consecutive dry days and d) 90th percentile (in %).

Figure 5: Future changes projected by ARPEGE-Climate model (MOR) and the 10 ENSEMBLES-RCMs at the nearest grid box to Rabat station. a): mean precipitation (red; in %) and pn05mm (violet; in %). b): pxcdd (orange; day, left axis) and pq90 (blue; %, right axis).

Table1: Name of the grid boxes from ARPEGE-Climate together with the location of the centre of each grid (longitude and latitude) box and the name of the nearest station.

Table 2: Changes simulated by the ARPEGE-Climate model for mean precipitation (mm/day) at the nearest grid box to each of the 14 stations. The first column represents the changes estimated by the direct approach (future minus present climate). The

second and third columns represent respectively the changes for case 1 and case 2 computed from the weather regimes approach. In Case 1 only the changes in the weather regime frequencies are taken into account. In Case 2 only the changes in the composite of precipitation for each weather regime are taken into account. Sum column contains the sum of case 1 and case 2 estimations.

Table 3: Changes simulated by the 10 ENSEMBLES-RCM for mean precipitation (mm/day) at the nearest grid box of Rabat station. The second and third columns represent respectively the changes for case 1 and case 2 computed from the weather regimes approach. In Case 1 only the changes in the weather regime frequencies are taken into account. In Case 2 only the changes in the composite of precipitation for each weather regime are taken into account. Sum column contains the sum of case 1 and case 2 estimations.

Chapitre 5

Fig. 5.1 Evolution des débits observés et des pluies moyennes (issues du CRU) au bassin versant de la Moulouya (Dar ElCaid) ; les débits sont multipliés par 10.

Fig. 5.2 Débits mensuels observés et simulés en validation sur la période 1973-1990 à Dar ElCaid.

Fig. 5.3 Evolution future de la température mensuelle moyenne (calculée sur tous les mois de l'année) pour le bassin de la Moulouya (Dar ElCaid) ; en °C.

Fig. 5.4 Changements futurs des précipitations et ETP mensuelles moyennés sur les différentes saisons (Bassin de la Moulouya, Dar ElCaid).

Fig. 5.5 Variation des débits mensuels moyens entre le futur et le présent (Bassin de la Moulouya, Dar ElCaid).

Tableau 5.1 Changements projetés pour les pluies, l'ETP et le débit au bassin de la Moulouya (Dar ElCaid).

Chapitre 6

Fig. 6.1 Domaine couvert par le modèle ALADIN-Climat avec l'emplacement des 14 stations météorologiques. Le domaine C (intérieur de l'encadré rouge) représente la zone sur laquelle l'analyse porte. L'encadré bleu représente la zone d'extension I.

Fig. 6.2 Courbes quantile-quantile représentant les centiles de précipitation hivernale (DJF) observés au niveau des stations météorologiques en fonction de ceux simulés par ALADIN-climat. Courbe bleue : maille la plus proche. Courbe rouge : moyenne des centiles des points de grille se trouvant dans un rayon de 50km autour de chaque station. Courbe noire : centiles du modèle calculés sur les données confondues de tous les points situés dans le rayon de 50km. La diagonale correspond à la simulation parfaite.

Fig. 6.3 Changements projetés par ALADIN-Climat sous le scénario A1B pour : a) la précipitation moyenne (en %), b) le nombre de jours humides (en %), c) le nombre maximal de jours consécutifs secs (en jours) et d) le 90^{ème} centile calculé sur le long terme (en %). Saison d'hiver (DJF). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Annexe A

Fig. A.1 Représentation schématique des conditions météorologiques associées aux phases positive (à gauche) et négatives (à droite) de l'Oscillation Nord-Atlantique. Source : <http://www.ldeo.columbia.edu/NAO> (by Martin Visbeck).

Fig. A.2 Evolution temporelle de l'indice de l'ONA de la période hivernale allant de décembre à mars. Source : <http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/NAO/>.

Annexe B

Fig. B.1 Régions pluviométriques hivernales selon Knippertz et al. (2003). Les régions I, II et III sont aussi nommées respectivement ATL (ouest des montagnes de l'Atlas), MED (nord-est du Maroc) et SOA (sud des montagnes de l'Atlas). Source : Knippertz et al. (2003).

Fig. B.2 Régionalisation des précipitations d'octobre à Avril de 22 stations marocaines pour la période 1932-1995. La carte entière du Maroc est montrée sur le carré inséré en haut à gauche. Source El Hamly (2004).

Annexe C

Fig. C.1 tendances linéaires du PDSI (changement par 50 ans) calculé sur la période 1950-2002 en tenant compte des changements de précipitations et de températures (carte du haut) et tenant compte uniquement des changements de précipitation (carte du bas). Les zones rouges indiquent un assèchement et les zones bleues une humidification. Source (Dai et al. 2004).

Annexe D

Fig. D.1 Moyennes nationales (en %), des anomalies relatives des cumuls pluviométriques annuels, calculées sur les 14 stations météorologiques marocaines. Période 1961-2008.

Fig. D.2 Moyennes nationales (en %), des anomalies relatives des cumuls pluviométriques de l'hiver étendu (octobre à mars), calculées sur les 14 stations météorologiques marocaines. Période 1961-2008.

Annexe E

Fig. E.1 Tendances de la température moyenne saisonnière calculées sur la période 1961-2008 au niveau des 14 stations météorologiques. Hiver : barres rouges, printemps : barres vertes, automne : barres jaunes. En °C/décennie.

Fig. E.2 Différents types de climats au Maroc, selon l'indice d'aridité de De Martonne, pour les périodes 1961-1980 (figure de gauche) et 1981-2000 (figure de droite). Les stations météorologiques utilisées sont affichées sur les graphes.

Annexe F

Fig. F.1 Changements projetés (en %) par ARPEGE-RV sous le scénario A1B pour le 90^{ème} centile de précipitations. Hiver étendu (octobre à avril). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Fig. F.2 Changements projetés (en jour) par ARPEGE-RV sous le scénario A1B pour le nombre moyen de jours consécutifs secs. Hiver étendu (octobre à avril). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Fig. F.3 Changements (en %) projetés par ARPEGE-RV pour la précipitation moyenne annuelle sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Fig. F.4 Changements (en °C) projetés par ARPEGE-RV pour la température moyenne annuelle sous le scénario A1B. 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Annexe G

Fig. G.1 Courbes quantile-quantile représentant les centiles des précipitations hivernales (DJF) observés à Rabat en fonction de ceux simulés par les MRC d'ENSEMBLES et par ARPEGE-RV au niveau des mailles les plus proches de Rabat. Saison d'hiver (DJF).

Tableau 1 Changement moyen, maximal et minimal calculés, sur les 11 MRC incluant ARPEGE-RV, au niveau des mailles les plus proches de chacune des stations météorologiques, pour la précipitation moyenne (pav, en %), le nombre de jours humides (pn05, en %), le nombre maximal de jours consécutifs secs (pxcdd, en jour) et le nombre d'événements de fortes précipitations (pnl90, en %). Saison d'hiver (DJF).

Tableau 2 Ecart-types des changements futurs issus des 11 MRC incluant ARPEGE-RV, au niveau des mailles les plus proches de chacune des stations météorologiques, pour la précipitation moyenne (pav, en %), le nombre de jours humides (pn05, en %), le nombre maximal de jours consécutifs secs (pxcdd, en jour) et le nombre d'événements de fortes précipitations (pnl90, en %). Saison d'hiver (DJF).

Annexe H

Fig. H.1 Changements projetés par ARPEGE-RV pour le nombre d'événement de fortes précipitations (en %) sous le scénario A1B. Saison d'hiver (DJF). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Fig. H.2 Changements projetés par Aladin-Climat pour le nombre d'événement de fortes précipitations (en %) sous le scénario A1B. Saison d'hiver (DJF). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Fig. H.3 Changements projetés par Aladin-Climat pour la précipitation moyenne (en %) sous le scénario A1B. a) Saison du printemps (MAM). b) saison d'été (JJA). c) saison d'automne (SON). 2021-2050 par rapport à 1971-2000.

Liste des principaux acronymes

ARPEGE	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
ALADIN	Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational
BM	Banque Mondiale
CEPMMT	Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme
CRU	Climatic Research Unit
CORDEX	COordinated Regional climate Downscaling Experiment
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
ETP	EvapoTranspiration Potentielle
FAO	Food and Agriculture Organisation (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)
GES	Gaz à Effet de Serre
GHCN	Global Historical Climatology Network
GIEC	Groupe Intergouvernemental des experts sur l'Evolution du Climat
GR2M	Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel
IMFREX	IMPact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations
ISBA	Interaction Sol Biosphère Atmosphère
MCG	Modèle de Circulation Générale
MCGA	Modèle de Circulation Générale Atmosphérique
MCGA-RV	Modèle de Circulation Générale Atmosphérique à Résolution Variable
MCGOA	Modèle de Circulation Générale couplés Océan-Atmosphère
MRC	Modèle Régional de Climat
MSLP	Pression réduite au niveau de la mer
OMM	Organisation de la Météorologie Mondiale
ONA	Oscillation Nord-Atlantique (ONA)
PDSI	Palmer Drought Severity Index
SIREM	Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation
SPI	Standardised Precipitation Index
STARDEX	STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions
TSO	Température de Surface de l'Océan
WCRP	World Climate Research Program de l'Organisation Météorologique Mondiale
ZCIT	Zone de Convergence InterTropicale