

Impact du changement climatique sur les températures journalières minimales et maximales et les précipitations de la région de Tanger (nord-ouest du Maroc) quantifié à partir d'une méthode de descente d'échelle statistique

Impact of climate change on daily maximum temperature, daily minimum temperature and precipitation in Tangier's region (North-Western Morocco) quantified from a statistical downscaling method

Nabil Rifai, Abdellatif Khattabi and Laila Rhazi

Volume 14, Number 3, December 2014

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1034950ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Rifai, N., Khattabi, A. & Rhazi, L. (2014). Impact du changement climatique sur les températures journalières minimales et maximales et les précipitations de la région de Tanger (nord-ouest du Maroc) quantifié à partir d'une méthode de descente d'échelle statistique. *VertigO*, 14(3).

Article abstract

A statistical downscaling model (ASD) was evaluated by simultaneously downscaling maximum temperature, minimum temperature, and precipitation in Tangier's region (North-Western Morocco). The data used for evaluation were large-scale atmospheric data encompassing daily NCEP reanalysis data and the daily mean climate model results for scenarios A2 and B2 of the HadCM3 model and scenario A2 of the MCGG3 model. Selected as climate variables for downscaling were measured daily maximum temperature, daily minimum temperature, and precipitation data (1961 - 2000) from the weather station of Tangier. The results show that the pattern of change and numerical values of the temperature can be simulated, with the coefficients of determination between observed and downscaled daily maximum temperature and daily minimum temperature that attain 90% and 81%, respectively. However for precipitation, the statistical relationship still relatively weak, this is illustrated by a coefficient of determination that not exceed 20%.

During 2061 – 2100, A2 scenario expect an increase for the maximum air temperature and the minimum temperature that attain about 2,9 °C but precipitation would decrease by about 49%. In the same trend, B2 scenario simulate an increase for the maximum air temperature and the minimum temperature by about 1,8 °C and 1,6 °C respectively and precipitation would decrease by about 45%. Thus, the climate of the North-Western Morocco tends to aridity with more warmer and drier conditions.



Nabil Rifai, Abdellatif Khattabi et Laila Rhazi

Impact du changement climatique sur les températures journalières minimales et maximales et les précipitations de la région de Tanger (nord-ouest du Maroc) quantifié à partir d'une méthode de descente d'échelle statistique

Introduction

- 1 Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007), au 20e siècle, une hausse particulièrement sensible de la température a été notée sur la région méditerranéenne avec un réchauffement de près de 2 °C sur le Sud-Ouest de l'Europe (péninsule ibérique, Sud de la France) et très net sur le nord de l'Afrique même s'il est plus difficilement quantifiable en raison d'un manque de données d'observations fiables. Cette hausse est plus prononcée en hiver qu'en été et qui porte davantage sur les minimales de température que sur les maximales. En ce qui concerne les précipitations, les pluies ont diminué au sud de l'Europe avec une baisse de 20 % dans certaines régions du bassin méditerranéen. La tendance est plus contrastée en Afrique du Nord (GIEC, 2007). Les projections climatiques dans la région méditerranéenne pour le 21e siècle montrent que la température annuelle moyenne afficherait une hausse plus marquée que la moyenne planétaire. Ainsi, à la fin du siècle, l'augmentation de la moyenne annuelle des températures devrait se situer entre 2,2 °C et 5,1 °C pour la période 2080 – 2099 par rapport à la période 1980 – 1999 (GIEC, 2007). Le réchauffement le plus fort se situerait en été. Les températures maximales devraient augmenter plus que les minimales et davantage que la moyenne. Par ailleurs, les précipitations moyennes annuelles diminueront dans la majeure partie de la région méditerranéenne. Cette baisse sensible de la pluviométrie devrait être comprise entre -4 % et -27 %. Le nombre de jours de pluie devrait baisser et le risque de sécheresse augmenter. Ainsi, dans une grande partie de la région, les sols devraient s'assécher et le débit des fleuves diminuer en moyenne sur l'année malgré une probable redistribution saisonnière (GIEC, 2007).
- 2 Les modèles de circulation générale (MCG) constituent des outils importants dans les travaux de recherche sur l'évolution du climat actuel. Les simulations des MCG sont la source principale d'information pour l'estimation des impacts futurs des changements climatiques dus au forçage anthropogénique. Étant donné la résolution spatiale grossière d'un MCG, ces modèles offrent une information à grande échelle pour les projections climatiques. Mais, la majorité des études sur les impacts et les implications engendrées à l'échelle régionale par les changements climatiques demandent une résolution spatiale plus fine. Vu que le climat régional peut être vu schématiquement comme résultant de l'interaction d'un état atmosphérique à grande échelle et de contraintes physiographiques locales (Von Storch, 1999), des méthodes ont été mises en place pour relier les variables climatiques simulées par les MCG à grande échelle et les variables climatiques locales. Ces méthodologies sont connues généralement sous le nom de « descente d'échelle » (Herrera et al., 2006).
- 3 Les méthodes de descente d'échelle se scindent en deux familles : les méthodes de descente d'échelle dynamiques et les méthodes de descente d'échelle statistiques.
- 4 Les méthodes de descente d'échelle dynamiques (Deque et Piedelievre, 1995; Giorgi, 1990; Mc Gregor, 1996; Jones et al., 1995; White et al., 2013; Knutson et al., 2013) utilisent les premiers principes des processus qui gouvernent le système climatique. Elles permettent d'affiner l'information climatologique produite par les MCG 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 atmosphérique (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 Deque, 2003). Ces méthodes nécessitent des ressources informatiques et humaines relativement importantes.

- 5 De leur part, les méthodes de descente d'échelle statistiques (Mearns et al., 1999; Wilby et al. 1998, 2002; Timbal et Jones, 2008; Brands et al., 2011) visent à obtenir l'information à l'échelle locale à partir de celle à grande échelle à travers des relations inférentielles entre les échelles, en utilisant une fonction aléatoire ou déterministe. Dans la descente d'échelle statistique, le conditionnement du climat régional par le climat à grande échelle est considéré comme une relation qui peut être déterministe ou stochastique entre l'ensemble des variables à grande échelle (le prédicteur) et l'ensemble des variables du climat régional (le prédicteur). Ces techniques permettent une certaine simplicité de calcul, et représentent donc une alternative appropriée lorsque les ressources ne sont pas disponibles ou sont insuffisantes pour utiliser des modèles dynamiques, ou lorsque les modèles dynamiques ne peuvent pas prédire explicitement les variables d'intérêt.
- 6 La large gamme de techniques de descente d'échelle statistiques peut être divisée en trois classes : les générateurs de séries hydroclimatiques continues qui sont des modèles statistiques de séquences observées de variables météorologiques (Wilks et Wilby, 1999), les fonctions de transfert qui consistent à interpoler les sorties des MCG sur une grille spatiale plus fine qui soit adaptée à l'étude en question (Smith et Pitts, 1997 ; Strezepek et Yates, 1997) et les schémas de classification basés sur les types de temps qui se basent sur la typologie des situations synoptiques récurrentes et qui ont pour but d'identifier un nombre de situations qui se produisent le plus fréquemment. Ces techniques reposent sur l'hypothèse fondamentale que la relation statistique « prédicteur-prédicteurs » établie à l'aide de l'information sur le climat actuel est également valide pour le futur (Hewitson et Crane, 2006; Solman et Nunez, 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.
- 7 Le modèle « Automated Statistical DownScaling » (ASD), développé par Hessami et al. (2008) utilise une régression linéaire multiple couplée à un générateur stochastique. Son principal avantage repose sur la sélection automatique des variables explicatives et les analyses statistiques suffisantes. Ce modèle inspiré du « Statistical DownScaling Model » (SDSM) créé par Wilby et al. (2002) établit des liens statistiques entre les données climatiques à grande échelle et à l'échelle locale. Le but final du modèle consiste à fournir des données à haute résolution sur le climat futur en orientant les liens statistiques calibrés à l'aide des variables explicatives du MCG pour les périodes à venir. La fiabilité du modèle ASD a été évaluée dans l'est du Canada (Hessami et al., 2008) et dans la région du Sahel (Parishkura, 2007). Dans les deux cas, le modèle ASD a également été comparé au modèle SDSM. D'une manière générale, il a donné des résultats relativement satisfaisants pour la descente d'échelle relative à la température quotidienne, ainsi qu'aux précipitations, y compris les indices des extrêmes climatiques.
- 8 Pour le Maroc, différentes études de projections climatiques futures, quoique fondées majoritairement sur les sorties de modèles climatiques à faible résolution, le pointent comme étant un des pays les plus susceptibles d'être menacés par le changement climatique (Hulme et al. 1999; Battisti et Naylor, 2009). Si les études de simulations numériques ayant ciblé le Maroc ne sont pas très nombreuses (Born et al., 2008), celles relatives à la régionalisation des scénarios futurs le sont encore moins (Driouech, 2010). Ainsi, l'objectif de cet article est d'étudier l'adaptabilité de l'ASD pour la descente d'échelle simultanée de la température journalière maximale, la température journalière minimale et les précipitations dans la région de Tanger (Nord du Maroc) et de fournir des informations pertinentes sur le changement climatique à l'échelle locale à partir des scénarios d'émissions futures globaux.

Zone d'étude et données utilisées

Zone d'étude

- 9 La région de Tanger est située à l'extrême nord-ouest du Maroc. Son climat est de type méditerranéen subhumide avec un hiver humide et doux et un été sec et chaud qui s'étend sur cinq mois, de mai à septembre (Karrouk, 1990).
- 10 D'après Driouech (2010), le réchauffement du climat dans la région de Tanger durant la période 1961-2008 est bien clair à la fois à l'échelle annuelle et estivale. Les tendances de l'été indiquent une hausse de +0,1 °C/décennie de la température moyenne estivale. Ce même auteur indique que la précipitation moyenne de la station de Tanger a connu une tendance négative au cours de la période 1961 – 2008 qui correspond à une baisse décennale de 5 % et pour les quatre saisons. Cette tendance revient à une diminution des précipitations hivernales de 8 % par décennie et d'une diminution des précipitations automnales de 4 % par décennie.

Données utilisées

- 11 La température journalière maximale (T max), la température journalière minimale (T min) et les précipitations journalières (P) de la station météorologique de Tanger (Latitude = 35,72°; Longitude = -5,90°; Altitude = 15 m) mesurées de 1961 à 2000 ont été sélectionnés comme prédicteurs pour la présente étude. De plus, 26 variables atmosphériques tirées de l'ensemble de données journalières de réanalyse du NCEP (National Centers for Environmental Prediction ; Kistler et al., 2001) pour la période 1961 – 2001 ont été évaluées comme prédicteurs (Tableau 1 et 2). L'évolution future du climat a été déterminée à travers les sorties journalières des scénarios A2 et B2 du modèle HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version 3) pour la période 1961 – 2099, avec une résolution spatiale de 3,75° (longitude) × 2,5° (latitude) et les sorties journalières du scénario A2 du modèle MCG3 (Modèle Couplé Canadien de Circulation générale, version 3) pour la période 1961-2100 avec une résolution spatiale de 3,75° (longitude) × 3,75° (latitude). Il est à rappeler que le scénario A2 décrit un monde très hétérogène caractérisé par une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques. Alors que le scénario B2 décrit un monde caractérisé par des niveaux intermédiaires de croissances démographiques et économiques, privilégiant l'action locale pour assurer une durabilité économique, sociale et environnementale.

Tableau 1. Liste des variables prédicteurs du NCEP tirées de la grille du modèle HadCM3.

No	Variable	Description	No	Variable	Description
1	mslp	Pression au niveau moyen de la mer	14	p8_f	Vitesse d'écoulement géostrophique à 850 hPa
2	p__f	Vitesse d'écoulement géostrophique à la surface	15	p8_u	Composante zonale de vitesse à 850 hPa
3	p__u	Composante zonale de vitesse à la surface	16	p8_v	Composante méridienne de vitesse à 850 hPa
4	p__v	Composante méridienne de vitesse à la surface	17	p8_z	Tourbillon à 850 hPa
5	p__z	Tourbillon à la surface	18	p8th	Direction du vent à 850 hPa
6	p_th	Direction du vent à la surface	19	p8zh	Divergence à 850 hPa
7	p_zh	Divergence à la surface	20	p500	Hauteur géopotentielle à 500 hPa

8	p5_f	Vitesse d'écoulement géostrophique à 500 hPa	21	p850	Hauteur géopotentielle à 850 hPa
9	p5_u	Composante zonale de vitesse à 500 hPa	22	r500	Humidité relative à 500 hPa
10	p5_v	Composante méridienne de vitesse à 500 hPa	23	r850	Humidité relative à 850 hPa
11	p5_z	Tourbillon à 500 hPa	24	rhum	Humidité relative près de la surface
12	p5th	Direction du vent à 500 hPa	25	shum	Humidité spécifique près de la surface
13	p5zh	Divergence à 500 hPa	26	temp	Température moyenne à 2 m

Tableau 2. Liste des variables prédicteurs du NCEP tirées de la grille du modèle MCG3.

No	Variable	Description	No	Variable	Description
1	mssl	Pression au niveau moyen de la mer	14	p8_f	Vitesse d'écoulement géostrophique à 850 hPa
2	p__f	Vitesse d'écoulement géostrophique à la surface	15	p8_u	Composante zonale de vitesse à 850 hPa
3	p__u	Composante zonale de vitesse à la surface	16	p8_v	Composante méridienne de vitesse à 850 hPa
4	p__v	Composante méridienne de vitesse à la surface	17	p8_z	Tourbillon à 850 hPa
5	p__z	Tourbillon à la surface	18	p8th	Direction du vent à 850 hPa
6	p_th	Direction du vent à la surface	19	p8zh	Divergence à 850 hPa
7	p_zh	Divergence à la surface	20	p500	Hauteur géopotentielle à 500 hPa
8	p5_f	Vitesse d'écoulement géostrophique à 500 hPa	21	p850	Hauteur géopotentielle à 850 hPa
9	p5_u	Composante zonale de vitesse à 500 hPa	22	prcp	Accumulation de Précipitation
10	p5_v	Composante méridienne de vitesse à 500 hPa	23	s500	Humidité spécifique à 500 hPa
11	p5_z	Tourbillon à 500 hPa	24	s850	Humidité spécifique à 850 hPa
12	p5th	Direction du vent à 500 hPa	25	shum	Humidité spécifique près de la surface
13	p5zh	Divergence à 500 hPa	26	temp	Température moyenne à 2 m

- 12 La situation de la station météorologique de Tanger par rapport aux mailles des grilles relatives aux modèles HadCM3 et MCGG3 utilisés pour la descente d'échelle des paramètres climatiques est présentée dans les figures 1 (a) et (b). La description des prédicteurs du modèle HadCM3 et du modèle MCGG3 est présentée dans les tableaux 1 et 2. Il est à noter que les données du NCEP, d'une résolution initiale de $2,5^\circ$ (longitude) \times $2,5^\circ$ (latitude) doivent être interpolées pour ajuster sa résolution à celle du modèle correspondant puis normalisées par rapport à la période de référence.

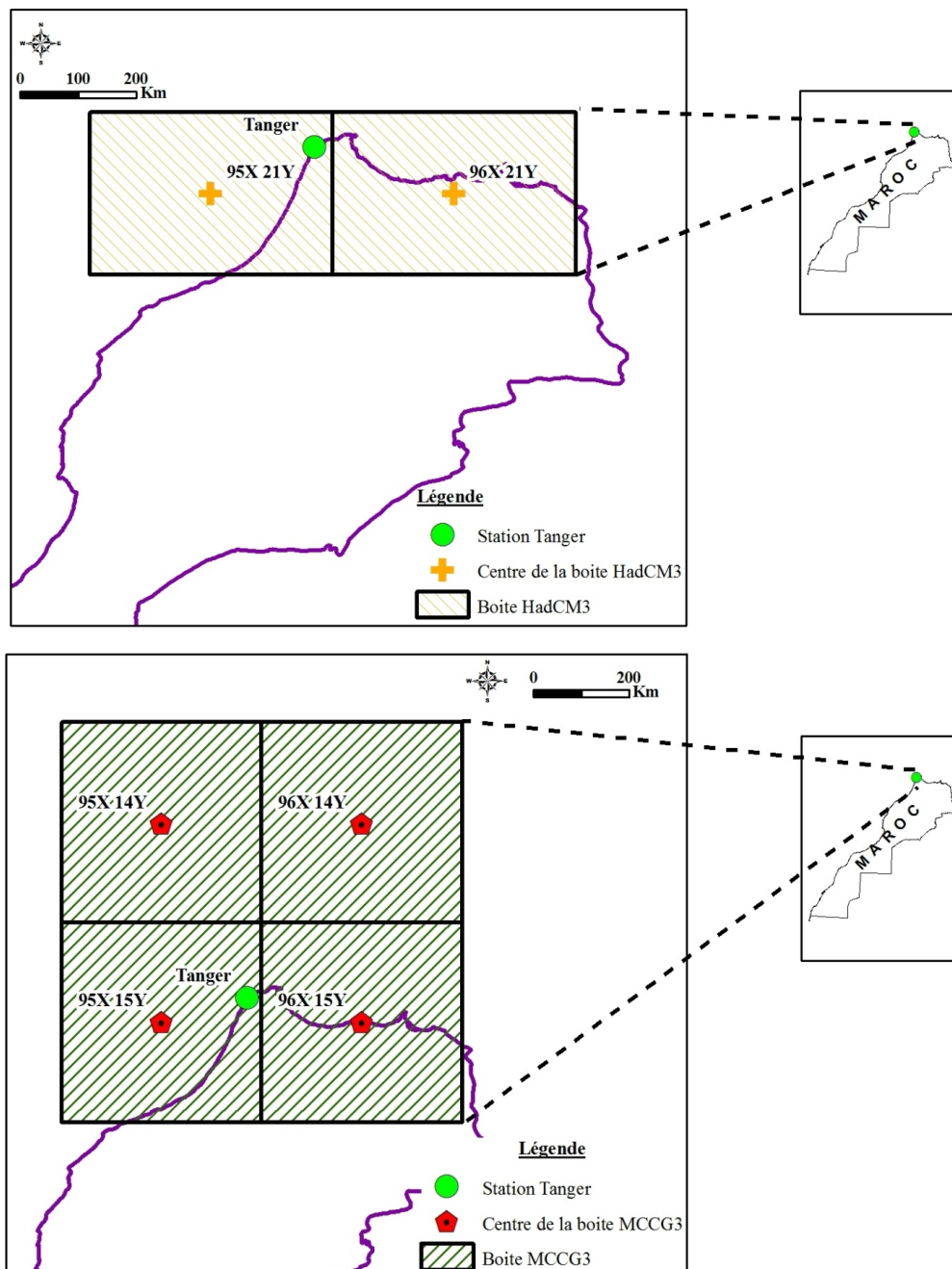
Descente d'échelle des températures et précipitations journalières sur la période 1960-2000

- 13 La descente d'échelle des températures et précipitations journalières a été réalisée en deux étapes notamment la sélection des prédicteurs fortement corrélés avec les variables climatiques locales et la calibration/validation des données.

Sélection des prédicteurs

- 14 La variabilité naturelle du climat méditerranéen, notamment en ce qui concerne les précipitations, est un frein à des projections précises surtout lorsqu'on s'intéresse aux projections climatiques à moyen terme. Malgré cette difficulté, 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, La phase négative de l'Oscillation Nord Atlantique (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 et al., 2003). L'influence du phénomène ENSO (El Nino-Southern Oscillation) a été également mise en évidence à travers une réduction des précipitations printanières au Maroc durant sa phase positive (Nicholson et Kim 1997; Ward et al., 1999).
- 15 La procédure adoptée pour sélectionner les prédicteurs appropriés pour chaque prédictand est la suivante : tout d'abord, l'ensemble de mailles, qui intéresse la zone d'étude, relatives aux grilles des modèles MCGG3 et HadCM3 a été pris en considération. Ainsi, quatre mailles de la grille du modèle MCGG3 ont été utilisées et qui sont codifiées comme suit : maille 95X 14Y, maille 95X 15Y, maille 96X 14Y et maille 96X 15Y. Pour le modèle HadCM3, deux mailles ont été utilisées et qui sont : maille 95X 21Y et maille 96X 21Y (Figure 1). Le choix du nombre des mailles à tester a été en fonction de la résolution spatiale de la grille du modèle. En effet, la grille du modèle HadCM3 présente une meilleure résolution spatiale que celle du modèle MCGG3.

Figure 1. Situation de la station météorologique de Tanger par rapport aux mailles des grilles des MCG (a) Modèle HadCM3 (b) Modèle MCG3.



- 16 La valeur indiquée dans chaque maille est la valeur au centre de la maille qui est définie sur une zone de $3,75^\circ$ de longitude et de $3,75^\circ$ de latitude pour le modèle MCG3 et sur une zone de $3,75^\circ$ de longitude et de $2,5^\circ$ de latitude pour le modèle HadCM3.
- 17 Par la suite, la méthode de la régression linéaire a été employée en utilisant l'ensemble des 26 prédicteurs de chaque maille et les paramètres statistiques résultants ont été pris en compte pour sélectionner la maille des prédicteurs dont la relation avec les prédicteurs de la station de Tanger est la plus significative. À partir des résultats présentés dans les tableaux 3 et 4, on peut dire que les prédicteurs de la maille 95X 15Y du modèle MCG3 et de la maille 95X 21Y du modèle HadCM3 sont les plus corrélés avec les paramètres climatiques de la zone d'étude. Une fois la maille des prédicteurs la plus appropriée a été sélectionnée, la méthode de régression descendante pas à pas a été employée avec un seuil de signification de 0,05. Cette méthode de sélection commence avec les 26 prédicteurs dans le modèle et retire les moins significatifs jusqu'à l'obtention des 5 prédicteurs les plus significatifs.

Tableau 3. Résultats de la méthode de la régression linéaire en utilisant l'ensemble des prédicteurs du NCEP interpolés sur la grille MCG3.

Maille	Prédicteur	Variance expliquée (R ²)	Erreur quadratique moyenne (RMSE)	
			Calibration	Validation
95X 14Y	T max	0,892	0,00714	0,512
	T min	0,784	0,00792	0,376
	P	0,288	1,38	1,9
95X 15Y	T max	0,897	0,00484	0,493
	T min	0,800	0,00935	0,442
	P	0,354	1,33	1,68
96X 14Y	T max	0,881	0,00929	0,615
	T min	0,789	0,00810	0,535
	P	0,299	1,34	1,85
96X 15Y	T max	0,895	0,00710	0,558
	T min	0,818	0,00974	0,534
	P	0,343	1,04	2,48

Tableau 4. Résultats de la méthode de régression linéaire en utilisant l'ensemble des prédicteurs du NCEP interpolés sur la grille HadCM3.

Maille	Prédicteur	Variance expliquée (R ²)	Erreur quadratique moyenne (RMSE)	
			Calibration	Validation
95X 21Y	T max	0,911	0,00535	0,437
	T min	0,837	0,00978	0,416
	P	0,384	0,651	1,49
96X 21Y	T max	0,908	0,00706	0,547
	T min	0,848	0,00799	0,624
	P	0,367	0,926	4,67

18 Il s'avère que différents prédicteurs atmosphériques contrôlent les variables climatiques locales. Ainsi les températures maximales et minimales sont plus sensibles aux facteurs atmosphériques de surface et de près de la surface, notamment la température moyenne à 2m, la pression au niveau moyen de la mer, la vitesse d'écoulement géostrophique à la surface et le tourbillon à la surface. Quant aux précipitations, les prédicteurs les plus pertinents se situent à une hauteur de 850 hPa, notamment le tourbillon, la composante méridienne de vitesse, la divergence, la hauteur géopotentielle et l'humidité que se soit relative ou spécifique.

Calibration et validation

19 Dans cette étude, la période de calibration pour la température journalière maximale, la température journalière minimale et les précipitations est de 30 ans (1961 – 1990) et la période de validation est de 10 ans (1991 – 2000). En se basant sur les cinq prédicteurs sélectionnés, la modélisation des variables climatiques de la station de Tanger a été réalisée sur une base mensuelle. Les occurrences quotidiennes des précipitations sont modélisées dans le cas où celles-ci dépassent le seuil fixé (0,5 mm). Ainsi, les résultats de la calibration et de la validation sont présentés dans le tableau 5. Ce même tableau montre que pour la température journalière maximale et la température journalière minimale, il y a une bonne corrélation entre les valeurs simulées et les valeurs observées à un niveau de confiance de 0,05. Ainsi, le coefficient de détermination pour la température journalière maximale est d'environ 90 % et 88 % pour la modélisation réalisée à partir des données du NCEP issues du modèle HadCM3 et celles issues du modèle MCG3. En ce qui concerne la température journalière minimale, la modélisation est globalement satisfaisante avec un coefficient de détermination d'environ 81 % et 77 % pour la modélisation réalisée à partir des données du NCEP issues du modèle HadCM3 et celles issues du modèle MCG3.

20 Cependant pour les précipitations, la corrélation entre les valeurs simulées et les valeurs observées reste relativement faible, ceci est illustré par un coefficient de détermination ne

dépassant pas 20 % indiquant ainsi une difficulté de simuler les précipitations à l'échelle locale à partir des variables atmosphériques à grande échelle.

Tableau 5. Résultats de la méthode de régression descendante pas-à-pas et les prédicteurs sélectionnés.

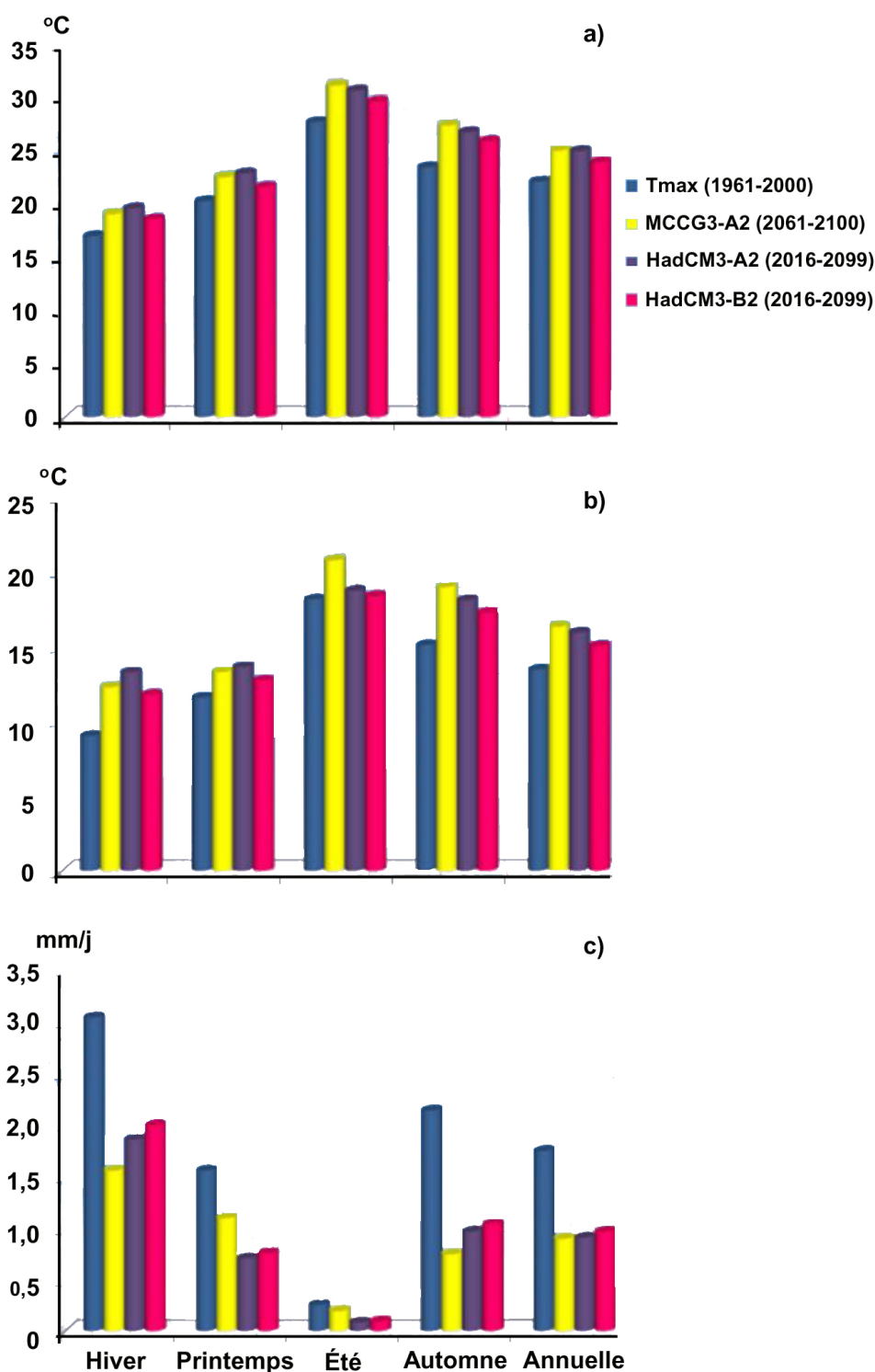
Modèle	Prédic-tant	Variance expliquée (R ²)	Erreur quadratique moyenne (RMSE)		Numéros des prédicteurs sélectionnés	prédicteurs sélectionnés
			Calibration	Validation		
HadCM3	T max	0,901	0,00651	0,458	1, 2, 20, 21, 26	mssl, p__f, p500, p850, temp
	T min	0,810	0,00609	0,411	5, 7, 14, 23, 26	p__z, p_zh, p8_f, r850, temp
	P	0,191	0,688	1,61	1, 2, 16, 17, 23	mssl, p__f, p8_v, p8_z, r850
MCCG3	T max	0,881	0,00555	0,454	1, 2, 5, 17, 26	mssl, p__f, p__z, p8_z, temp
	T min	0,770	0,00859	0,370	6, 13, 14, 25, 26	p_th, p5zh, p8_f, shum, temp
	P	0,196	0,669	1,52	1, 5, 19, 21, 24	mssl, p__z, p8zh, p850, s850

- 21 D'une manière générale, on constate une erreur plus grande en phase de validation par rapport à la phase de calibration pour la modélisation de la température journalière maximale, la température journalière minimale et les précipitations.

Descente d'échelle des températures et précipitations journalières sur la période 2060-2100

- 22 Afin d'évaluer les évolutions probables des variables climatiques (température journalière maximale, température journalière minimale et précipitations) dans le cadre d'un changement climatique, le climat de la période de 1961 – 2000, considérée comme climat actuel (A) a été comparé au climat de la période de 2061 – 2100, considéré comme climat futur (F) prédit à l'aide du modèle MCCG3 et la période de 2061 – 2099 considéré comme climat futur prédit à l'aide du modèle HadCM3.
- 23 La détermination des changements concernant la température journalière maximale, la température journalière minimale et les précipitations a été obtenue à partir de l'analyse des scénarios A2 et B2 du modèle HadCM3 et du scénario A2 du modèle MCCG3. Ainsi, le but est d'avoir un intervalle de confiance permettant de cerner la variation des paramètres climatiques étudiés dans le futur. Les résultats de la comparaison entre le climat actuel et le climat futur simulé sont présentés dans les tableaux 6, 7 et 8 ainsi que la figure 2.

Figure 2. Comparaison de la variation des paramètres climatiques entre le climat actuel et futur (a) : Température journalière maximale, (b) : Température journalière minimale, (c) : Précipitations.



Température journalière maximale

24 Le tableau 6 illustre la comparaison de la variation de la moyenne de la température journalière maximale entre le climat actuel et futur à une échelle annuelle et saisonnière. Ainsi, on peut constater que par rapport au climat actuel, la moyenne de la température journalière maximale devrait augmenter d'environ 1,8 °C selon le scénario B2 et d'environ 2,9 °C selon le scénario A2 vers la fin du 21e siècle.

Tableau 6. Comparaison de la variation de la moyenne de la température journalière maximale entre le climat actuel et futur.

Saison	Tmax actuelle (°C) A	MCCG3 (Scénario A2)		HadCM3 (Scénario A2)		HadCM3 (Scénario B2)	
		F	F - A	F	F - A	F	F - A
Hiver (D-J-F)	16,98	19,06	2,08	19,61	2,63	18,58	1,60
Printemps (M-A-M)	20,27	22,52	2,25	22,89	2,62	21,60	1,33
Été (J-J-A)	27,70	31,14	3,44	30,67	2,97	29,65	1,95
Automne (S-O-N)	23,45	27,38	3,93	26,75	3,30	25,92	2,47
Annuelle	22,10	25,02	2,92	24,98	2,88	23,94	1,84

25 Selon une analyse saisonnière, on peut remarquer que les trois scénarios étudiés montrent pratiquement la même tendance avec une hausse de la température journalière maximale plus prononcée pendant la saison estivale et automnale. Cependant, l'amplitude d'augmentation de la température journalière maximale sera moins marquée en hiver et en printemps (figure 2 (a)).

Température journalière minimale

26 Le tableau 7 montre la comparaison de la variation de la moyenne de la température journalière minimale entre le climat actuel et futur. À partir de ce tableau, on peut voir que la tendance de changement de la moyenne de la température journalière minimale reste la même pour les deux scénarios A2 et B2. Ainsi, la hausse la plus importante est signalée en hiver et en automne. Cependant, la hausse de la moyenne de la température journalière minimale en été sera relativement faible selon le modèle HadCM3.

Tableau 7. Comparaison de la variation de la moyenne de la température journalière minimale entre le climat actuel et futur.

Saison	Tmin actuelle (°C) A	MCCG3 (Scénario A2)		HadCM3 (Scénario A2)		HadCM3 (Scénario B2)	
		F	F - A	F	F - A	F	F - A
Hiver (D-J-F)	9,02	12,27	3,25	13,26	4,24	11,77	2,76
Printemps (M-A-M)	11,58	13,30	1,72	13,62	2,04	12,73	1,15
Été (J-J-A)	18,16	20,78	2,62	18,74	0,58	18,38	0,22
Automne (S-O-N)	15,10	18,98	3,88	18,10	3,01	17,28	2,19
Annuelle	13,46	16,33	2,87	15,93	2,47	15,04	1,58

27 En moyenne et vers la fin du 21^e siècle, la température journalière minimale devrait augmenter d'environ 1,6 °C selon le scénario B2 et d'environ 2,5 °C selon le scénario A2 du Modèle HadCM3. Cependant, le scénario A2 du Modèle MCCG3 prévoit une hausse plus importante d'environ 2,9 °C (figure 2 (b)).

28 D'une manière générale, par comparaison à la température journalière maximale, on peut remarquer que la hausse de la température journalière minimale est relativement moins prononcée ce qui est en conformité avec les prévisions du GIEC.

Précipitations

29 Le tableau 8 indique la comparaison de la variation des précipitations moyennes entre le climat actuel et futur à une échelle annuelle et saisonnière. D'une manière générale, on constate une diminution des précipitations annuelles d'environ 45 % selon le scénario B2 et d'environ 48 % à 49 % selon le scénario A2. Cette diminution remarquable des pluies touche l'ensemble des saisons, mais la réduction des pluies hivernales et automnales aura le plus d'impact sur le climat de la région (figure 2 (c)).

Tableau 8. Comparaison de la variation des précipitations moyennes annuelles entre le climat actuel et futur.

Saison	P (mm/j) actuelle A	MCCG3 (Scénario A2)			HadCM3 (Scénario A2)			HadCM3 (Scénario B2)		
		F	F - A	F - A (%)	F	F - A	F - A (%)	F	F - A	F - A (%)
Hiver (D-J-F)	3,03	1,55	-1,48	-49	1,85	-1,18	-39	1,99	-1,04	-34
Printemps (M-A-M)	1,55	1,09	-0,46	-30	0,70	-0,85	-55	0,75	-0,80	-52
Été (J-J-A)	0,25	0,19	-0,06	-24	0,08	-0,17	-69	0,09	-0,16	-65
Automne (S-O-N)	2,13	0,74	-1,40	-65	0,96	-1,17	-55	1,03	-1,11	-52
Annuelle	1,74	0,89	-0,85	-49	0,90	-0,84	-48	0,96	-0,78	-45

30 Cependant, si le constat de la diminution des précipitations dans la zone d'étude est en concordance avec les prévisions du GIEC pour la région méditerranéenne, la validation des résultats relatifs à l'amplitude de cette diminution n'est pas chose confirmée tenant compte de la difficulté trouvée par le modèle pour établir une relation statistique fiable entre les variables climatiques à grande échelle et les données historiques des précipitations de la station de Tanger.

Conclusion

31 Les méthodes de descente d'échelle statistiques sont des outils efficaces pour combler l'écart entre l'information sur le changement climatique à grande échelle et l'information à l'échelle locale, parmi elles, le modèle ASD présente l'avantage de la sélection automatique des variables explicatives (prédicteurs).

32 Dans cette étude, le modèle ASD a été appliqué à la station météorologique de Tanger (Nord-Ouest du Maroc), et on a étudié son adaptabilité par la descente d'échelle de la température journalière maximale, la température journalière minimale et les précipitations journalières, qui sont des paramètres importants pour évaluer l'impact du changement climatique à l'échelle locale.

33 En outre, on a analysé la tendance de changement climatique pour la période 2061-2100 en se basant sur les scénarios d'émissions futures A2 et B2 du modèle HadCM3 et A2 du modèle MCCG3. Ainsi, on a constaté que différents ensembles de prédicteurs ont été sélectionnés pour les différents prédicteurs étudiés à l'aide de la méthode de régression descendante pas à pas.

34 Quant à la température journalière maximale et minimale, elles sont plus sensibles aux variables atmosphériques de surface et de près de la surface, notamment la température moyenne à 2 m, la pression au niveau moyen de la mer, la vitesse d'écoulement géostrophique à la surface et le tourbillon à la surface. Pour les précipitations, les prédicteurs les plus pertinents se situent à une hauteur de 850 hPa, notamment le tourbillon, la composante méridienne de vitesse, la divergence, la hauteur géopotentielle et l'humidité.

35 La calibration et la validation d'ASD avec les données de réanalyse du NCEP sélectionnées par la méthode de régression descendante pas à pas ont prouvé leur efficacité pour la température journalière maximale et la température journalière minimale, ainsi l'amplitude et le signe du changement peuvent être bien simulés.

36 Le meilleur résultat est obtenu pour la température journalière maximale avec un coefficient de détermination (R^2) pouvant atteindre 90 %, alors que le coefficient de détermination pour la température journalière minimale peut atteindre 81 %. Par contre, les résultats obtenus pour les précipitations montrent une difficulté de simuler les pluies locales à partir des variables atmosphériques à grande échelle. Ceci est reflété par un coefficient de détermination n'atteignant pas 20 % ce qui aura certainement un impact sur la fiabilité des prédictions des précipitations sur la base des scénarios d'émissions futures.

37 D'une manière générale, en utilisant les prédicteurs sélectionnés comme entrées, les caractéristiques de variation de la température journalière maximale et la température

journalière minimale peuvent être raisonnablement produites, chose qui n'a pas été confirmée pour les précipitations.

- 38 En comparaison avec le climat actuel, le modèle prévoit une hausse de la température journalière maximale variant entre 1,8 °C et 2,9 °C au cours de la période 2060 – 2100. Pour la température journalière minimale, il est prévu une augmentation variant entre 1,6 °C et 2,9 °C en fonction du scénario d'émissions futures choisi. La simulation des précipitations montre une grande diminution pouvant atteindre 49 %. Cette valeur peut être surestimée vu la difficulté que trouve le modèle pour la simulation des pluies à partir des prédictes atmosphériques à grande échelle.

Remerciements

- 39 Les données climatiques de la station météorologique de Tanger ont été fournies par l'Institut des Mathématiques Appliquées et Technologies d'Informatique du Conseil National de la Recherche (CNR- IMATI) dans le cadre du projet de coopération CYCAS-MED entre CNR-IMATI (Italie) et INRA (Maroc).

Bibliographie

Achab, M., 2011, Les plages et les vasières des environs des embouchures des oueds Tahaddart et Gharifa (NW du Maroc) : dynamique morphosédimentaire et impact des aménagements sur leur évolution récente, Travaux de l'Institut Scientifique, série générale n° 6, pp 1-12.

Battisti, D.S. et R.L. Naylor, 2009, Historical Warnings of Future Food Insecurity with Unprecedented Seasonal Heat, *Science* 9.Vol. 323, no. 5911: 240 – 244, doi : 10.1126/science.1164363

Born, K., M. Christoph, A.H. Fink, P. Knippertz, H. Paeth et P. Steph, 2008, Moroccan climate in present and future : combined view from observational data and regional climate scenarios, dans : Zeini F, Hötzl H, eds. *Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa*, Berlin : Springer

Brands, S., J. Taboada, A. Cofino, T. Sauter et C. Schneider, 2011, Statistical downscaling of daily temperatures in the NW Iberian Peninsula from global climate models: Validation and future scenarios, *Climate Research* 48, pp. 163-176.

Cubasch, U., J. Waszkewitz, G. Hegerl et J. Perlwitz, 1995, Regional climate changes as simulated in time-slice experiments, *Climatic Change* 31 : 273-304.

Déqué, M. et J.P. Piedelievre, 1995, High resolution climate simulation over Europe, *Climate Dynamics* 11: 321-339.

Déqué, M. et L. Li, 2007, La Prévision climatique : régionalisation et extrêmes, *La météorologie* 57 : 28-30.

Driouech, F., 2010, Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Thèse de doctorat, spécialité Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace, Institut National Polytechnique de Toulouse.

Fox-Rabinovitz, M.S., L.L. Takacs, R.C. Govindaraju et M.J. Suarez, 2001, A variable resolution stretched-grid general circulation : Regional climate simulation, *Monthly Weather Review* 129(3) : 453-469.

Gibelin, A.L. et M. Déqué, 2003, Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model, *Climate Dynamics* 20: 327-339.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007, Bilan 2007 des changements climatiques : les éléments scientifiques physiques, dans : Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB et al., eds. *Quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Cambridge : Cambridge University Press.

Giorgi, F., 1990, Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *Journal of Climate* 3 : 941-96.

Giorgi, F. et L.O. Mearns, 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'Organisation Météorologique Mondiale* 57 (2), pp. 86-92.

Glueck, M.F. et C.W. Stockton, 2001, Reconstruction of the North Atlantic Oscillation, 1429-1983, *International Journal of Climatology* 21(12) : 1453-1465.

- Herrera, E., T.B.M.J. Ouarda et B. Bobée, 2006, Méthodes de désagrégation appliquées aux Modèles du Climat Global Atmosphère-Océan (MCGAO). *Revue des sciences de l'eau*, 19(4) : 297-312.
- Herrera, R.G., D.G. Puyol, E.H. Martin, L.G. Presa et P.R. Rodriguez, 2001, Influence of the North Atlantic Oscillation on the Canary Islands precipitation, *Journal of Climate* 14(19) : 3889-3903.
- Hessami, M., Gachon P, T.B.M.J. Ouarda et A. St-Hilaire, 2008, Automated regression based Statistical Downscaling Tool, *Environmental Modelling and Software* 23: 813-834.
- Hewitson, B.C. et R.G. Crane, 2006, Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa, *International Journal of Climatology* 26 : 1315-1337.
- Hulme, M., E.M. Barrow, N.W. Arnell, P.A. Harrison, T.C. Johns et T.E. Downing, 1999, Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability, *Nature* 397, pp. 688-691.
- Jones, R.G., J.M. Murphy et M. Noguer, 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, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 121: 1413-1449.
- Karrouk, M.S., 1990, Aperçu sur les mécanismes climatiques rifains. Le Rif, l'espace et l'homme, *Revue de la Faculté des Lettres de Tétouan* 4 : 11-36.
- Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, H. Kousky, H. Van Den Dool, R. Jenne et M. Fiorino, 2001, The NCEP-NCAR 50-Year reanalysis : Monthly Means CD-ROM and Documentation, *Bulletin of American Meteorological Society*, 82 (2), pp. 247-268.
- Knippertz, P., M. Christoph et P. Speth, 2003, Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates, *Meteorology and Atmospheric Physics* 83, pp. 67-88.
- Knutson, T.R., J.J. Sirutis, G.A. Vecchi, S. Garner, M. Zhao, H. Kim, M. Bender, R.E. Tuleya, I.M. Held et G. Villarini, 2013, Dynamical Downscaling Projections of Twenty-First-Century Atlantic Hurricane Activity: CMIP3 and CMIP5 Model-Based Scenarios, *Journal of Climate*, 26 : 6591-6617.
- Leung, L.R., L.O. Mearns, F. Giorgi et R.L. Wilby, 2003, Regional climate research: needs and opportunities, *Bulletin of the American Meteorological Society* 82, pp. 89-95.
- McGregor, J.L., 1996, Semi-Lagrangian advection on conformal-cubic grids, *Monthly Weather Review* 124, pp. 1311-1322.
- McGregor, J.L., K.C. Nguyen et J.J. Katzfey, 2002, Regional climate simulations using a stretched-grid model, dans: Ritchie H, ed. *Research Activities in Atmosphere and Oceanic Modelling*, Genève : World Meteorological Organisation.
- Mearns, L.O., I. Bogardi, F. Giorgi, I. Matyasovsky et M. Palecki, 1999, Comparison of climate change scenarios generated from regional climate models experiments and statistical downscaling, *Journal of Geophysical Research* 104 (D6): 6603-6621, doi : 10.1029/1998JD200042.
- Nicholson ,S.E. et J. Kim, 1997, The relationship of the El Niño-Southern Oscillation to African rainfall, *International Journal of Climatology* 17, pp. 117-135.
- Parishkura, D., 2007, Évaluation de méthodes de mise à l'échelle statistique : Reconstruction des extrêmes et de la variabilité du régime de mousson au Sahel, *Mémoire de maîtrise en sciences de l'atmosphère*, Université du Québec.
- Smith, J.B. et G. Pitts, 1997, Regional climate change scenarios for vulnerability and adaptation assessments, *Climatic Change* 36 : 3-21.
- Solman, S.A. et M.N. Nuñez, 1999, Local estimates of global climate change: a statistical downscaling approach, *International Journal of Climatology* 19 (8), pp. 835-861.
- Strezepek, K.M. et D.N. Yates, 1997, Climate change impacts on the hydrologic resources of Europe: a simplified continental scale analysis, *Climatic Change* 36, pp. 79-92.
- Timbal, B. et D. Jones, 2008, Future projections of winter rainfall in southeast Australia using a statistical downscaling technique, *Climatic Change* 86 : 165-187.
- Von Storch, H., 1995, Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research. *Meteorologische Zeitschrift* 4: 72-80.
- Von Storch, H., 1999, On the use of 'inflation' in statistical downscaling, *Journal of Climate* 12(12), pp. 3505-3506.

Wang, Y., L.R. Leung, J.L. McGregor, D.K. Lee, W.C. Wang, Y. Ding et F. Kimura, 2004, Regional climate modeling: progress, challenges and prospects, *Journal of the Meteorological Society of Japan* 82, pp. 1599-1628.

Ward, M.N., P.J. Lamb, D.H. Portis, M. El Hamly et R. Sebbari, 1999, Climate Variability in Northern Africa: Understanding Droughts in the Sahel and the Maghreb, dans : Navarra A, ed. *Beyond El Niño : Decadal and Interdecadal Climate Variability*. Berlin : Springer Verlag.

White, C.J., K.L. McInnes, R.P. Cechet, S.P. Corney, M.R. Grose, G.K. Holz, J.J. Katzfey et N.L. Bindoff, 2013, On regional dynamical downscaling for the assessment and projection of temperature and precipitation extremes across Tasmania, Australia, *Climate Dynamics* 14: 3145-3165.

Wilby, R.L., T.M.L. Wigley, D. Conway, P.D. Jones, B.C. Hewitson, J. Main J et D.S. Wilks, 1998, Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods, *Water Resources Research* 34 : 2995-3008.

Wilby, R.L., L.E. Hay et G.H. Leavesley, 1999, A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado, *Journal of Hydrology* 225 : 67-91.

Wilby, R.L., C.W. Dawson et E.M. Barrow, 2002, SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Environmental Modelling and Software* 17, pp. 145-157.

Wilks, D.S. et R.L. Wilby, 1999, The weather generator game: A review of stochastic weather models, *Progress in Physical Geography* 23: 329-358.

Pour citer cet article

Référence électronique

Nabil Rifai, Abdellatif Khattabi et Laila Rhazi, « Impact du changement climatique sur les températures journalières minimales et maximales et les précipitations de la région de Tanger (nord-ouest du Maroc) quantifié à partir d'une méthode de descente d'échelle statistique », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 14 Numéro 3 | Décembre 2014, mis en ligne le 28 décembre 2014, consulté le 14 octobre 2015. URL : <http://vertigo.revues.org/15474> ; DOI : 10.4000/vertigo.15474

À propos des auteurs

Nabil Rifai

Doctorant au Laboratoire d'écologie aquatique et environnement, Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II-Casablanca, BP 5366 Maarif, 20 100, Casablanca, Maroc et Ingénieur d'État des eaux et forêts au Haut Commissariat aux eaux et forêts et à la Lutte contre la Désertification, 3 rue Haroune Arrachid Agdal, 10 080, Rabat, Maroc, courriel : nabilenfi@yahoo.fr

Abdellatif Khattabi

Enseignant chercheur à l'École nationale forestière d'ingénieurs, BP 511 Tabriquet, 11 000, Salé, Maroc, courriel : ab_khattabi@yahoo.com

Laila Rhazi

Enseignant chercheur au Laboratoire d'écologie aquatique et environnement, Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II-Casablanca, BP 5366 Maarif, 20 100, Casablanca, Maroc, courriel : rhazilaila@yahoo.fr

Droits d'auteur

© Tous droits réservés

Résumés

Un modèle de descente d'échelle statistique (ASD) a été évalué par la descente d'échelle de la température maximale, la température minimale et les précipitations dans la région de Tanger (Nord-Ouest du Maroc). Les données utilisées pour l'évaluation sont des données atmosphériques à grande échelle englobant les données journalières de ré-analyse NCEP et

les moyennes journalières des modèles climatiques pour les scénarios A2 et B2 du modèle HadCM3 et le scénario A2 du modèle MCGG3. Les observations proviennent de la station météorologique de Tanger pour la période 1961-2001 concernant la température journalière maximale, la température journalière minimale et les précipitations. Les résultats montrent que le signe de changement et les valeurs numériques de la température peuvent être simulés, avec des coefficients de détermination de la corrélation entre la variable observée et celle simulée pour la température journalière maximale et la température journalière minimale pouvant atteindre respectivement 90 % et 81 %. Cependant pour les précipitations, la relation statistique reste relativement faible, avec un coefficient de détermination ne dépassant pas 20 %. Pour la période 2061-2100, le scénario A2 prévoit une augmentation de la température maximale de l'air et de la température minimale pouvant atteindre environ 2,9 °C alors que les précipitations diminueront d'environ 49 %. Dans la même tendance, le scénario B2 simule une augmentation de la température maximale de l'air et la température minimale d'environ 1,8 °C et 1,6 °C respectivement et une diminution des précipitations d'environ 45 %. Ainsi, le climat du nord-ouest du Maroc tend vers une aridification avec des conditions plus chaudes et sèches.

Impact of climate change on daily maximum temperature, daily minimum temperature and precipitation in Tangier's region (North-Western Morocco) quantified from a statistical downscaling method

A statistical downscaling model (ASD) was evaluated by simultaneously downscaling maximum temperature, minimum temperature, and precipitation in Tangier's region (North-Western Morocco). The data used for evaluation were large-scale atmospheric data encompassing daily NCEP reanalysis data and the daily mean climate model results for scenarios A2 and B2 of the HadCM3 model and scenario A2 of the MCGG3 model. Selected as climate variables for downscaling were measured daily maximum temperature, daily minimum temperature, and precipitation data (1961 - 2000) from the weather station of Tangier. The results show that the pattern of change and numerical values of the temperature can be simulated, with the coefficients of determination between observed and downscaled daily maximum temperature and daily minimum temperature that attain 90% and 81%, respectively. However for precipitation, the statistical relationship still relatively weak, this is illustrated by a coefficient of determination that not exceed 20%.

During 2061 – 2100, A2 scenario expect an increase for the maximum air temperature and the minimum temperature that attain about 2,9 °C but precipitation would decrease by about 49%. In the same trend, B2 scenario simulate an increase for the maximum air temperature and the minimum temperature by about 1,8 °C and 1,6 °C respectively and precipitation would decrease by about 45%. Thus, the climate of the North-Western Morocco tends to aridity with more warmer and drier conditions.

Entrées d'index

Mots-clés : changement climatique, descente d'échelle statistique, modèle de circulation générale, régression linéaire, Maroc

Keywords : climate change, statistical downscaling, general circulation model, linear regression, Morocco