

Spatialisation fine des projections climatiques dans le bassin versant du Tleta au Nord Maroc

F. HUARD¹, F. CHOUKRI², D. RACLOT^{2,3}, Y. PÉPIN^{2,3}, M. CHIKHAOUI², M. NAIMI², H. KORKOT², M. YASSIN⁴

(Reçu le 13/12/2018; Accepté le 05/03/2019)

Résumé

Les études locales de l'impact du changement climatique nécessitent des projections climatiques à haute résolution spatiale. Dans le cadre du projet de recherche ALMIRA, les agronomes et hydrologues souhaitent intégrer à leurs modèles des projections climatiques afin de caractériser le fonctionnement du bassin versant du Tleta à l'horizon des années 2050. Les modèles climatiques globaux et régionaux ne peuvent l'appréhender qu'à travers un, voire quelques pixels au mieux. Aussi, il est indispensable de pratiquer une descente d'échelle statistique qui permette d'affiner la résolution spatiale. En s'appuyant sur les projections climatiques issues du modèle français ALADIN-Climat et des séries climatiques disponibles, une chaîne de traitements a été développée afin de fournir des champs spatialisés de variables climatiques sur la période 2021-2060 à une maille de 1 km².

Mots clés : Projections climatiques, Spatialisation, Bassin versant Nakhla, Rif, Maroc

Fine spatialization of climate projections in the Tleta watershed in northern Morocco

Abstract

Local studies of climate change impact require high spatial resolution of climate predictions. Within ALMIRA research project, agronomists and hydrologists wish to integrate climate predictions into their models in order to characterize the behavior of Tleta watershed by 2050. Global and regional climate models can only apprehend it through one or fewer pixels at best. It is also essential to use a statistical downscaling method, which allows for improving spatial resolution. Based on climate predictions from the French ALADIN-Climate model and available climatic series, a processing sequence has been developed to provide spatialized fields of climatic variables over the period 2021-2060 at 1 km² resolution.

Keywords: Climate predictions, Spatialization, Nakhla Watershed, Rif, Morocco

INTRODUCTION

Le bassin méditerranéen constitue l'une des régions où le changement climatique risque d'être le plus significatif (Quintana Seguí *et al.*, 2010). Pour l'étudier, les modèles climatiques globaux et régionaux, sont les outils indispensables. Toutefois, leur résolution spatiale n'est pas toujours compatible avec les processus analysés et pris en compte dans les modèles d'impact. Dans le cadre du projet de recherche ALMIRA, piloté par une équipe française de l'Institut de Recherche et de Développement (IRD), l'un des sites d'étude est le bassin versant du Tleta situé au nord du Maroc et d'une superficie de 180 km². La résolution spatiale des modèles climatiques globaux est trop large pour pouvoir prendre la mesure de sa variabilité spatiale. Il est alors nécessaire de procéder à une descente d'échelle (désagrégation spatiale, *downscaling*) afin d'affiner la résolution.

Il existe deux approches principales en matière de *downscaling*, qui peuvent être complémentaires:

- La première est de type statistique. Elle est mise en œuvre par les utilisateurs de modèles climatiques et consiste à estimer les variables climatiques locales en les dérivant des variables à large échelle issues du modèle climatique ;

- La seconde, qualifiée de dynamique, est développée par les équipes de modélisation du climat. L'objectif est de produire un modèle à aire limitée (modèle climatique régional – RCM) dont les conditions aux limites latérales sont fournies par un modèle climatique plus global. Elle intègre une physique plus fine du modèle et nécessite une très grande puissance de calcul afin d'obtenir une résolution spatiale de l'ordre de 10 à 50 km.

Malgré les progrès du *downscaling* dynamique, la résolution spatiale des modèles climatiques régionaux est encore insuffisante pour de nombreuses applications locales. Le *downscaling* statistique va permettre d'obtenir une résolution plus fine, certes en faisant abstraction de la physique, mais en cherchant des relations statistiques entre les sorties du modèle climatique régional (ou global) et des données observées issues de stations climatiques présentes sur la zone d'étude.

Il existe dans la littérature de nombreuses techniques de désagrégation statistique, chacune ayant des avantages et des inconvénients. Pour cette étude, il a été décidé de développer un modèle s'appuyant sur les méthodes dites des Quantiles Mapping et Bias Correction et d'utiliser les prédictions du modèle climatique régional français ALADIN-Climat sous deux scénarii d'évolution de concentration de gaz à effet de serre : les RCP4.5 et RCP8.5.

¹ INRA-AgroClim, 228 route de l'Aérodrome, CS 40509, 84914 Avignon Cedex 9 – France

² IAV Hassan II, Département des Ressources Naturelles et Environnement, Madinat Al Irfane, Rabat, Maroc

³ IRD, UMR LISAH, Bât.24 - 2 place Viala - 34060 Montpellier Cedex 2 - France

⁴ CRF, Av. Omar Ibn Al Khattab BP. 763 Rabat-Agdal, Maroc

L'objectif est de présenter la chaîne de traitements mise en place pour fournir aux agronomes et hydrologues des champs quotidiens de variables climatiques (température, pluie, humidité, ...) à haute résolution spatiale dans le bassin versant du Tleta à l'horizon du milieu du siècle (2021-2060) et dont le cœur repose sur la désagrégation spatiale du modèle ALADIN-Climat à partir de données climatiques observées sur et à proximité du bassin étudié.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Zone d'étude

Le bassin versant du Tleta, d'une superficie de 180 km², est localisé dans le Rif Occidental, au cœur de la péninsule Tingitane, à mi-chemin entre les deux grands centres urbains de Tanger et Tétouan (Figure 1). Situé sur les derniers flancs nord-ouest de la chaîne rifaine, il représente une unité hydrologique en amont du barrage Ibn Batouta dont la capacité actuelle est inférieure à 29 millions de m³ (plus de 40 millions de m³ au milieu des années 1970). L'eau mobilisée dans ce barrage est exclusivement utilisée à l'alimentation en eau potable de Tanger, les eaux souterraines y étant quasi inexistantes. Le bassin versant est principalement constitué de collines, les altitudes varient de 690 m (Jbel Rhdir El Haj) à une vingtaine de mètres à son exutoire. La majeure partie (60% de sa superficie) se situe au-dessous de 100 m d'altitude. Le climat est de type méditerranéen avec une influence océanique. La pluie

moyenne annuelle sur le bassin est légèrement inférieure à 800 mm, mais présente une variabilité spatiale avec un gradient de l'ordre de 200 mm: 700 mm en moyenne à l'exutoire au niveau du barrage et 900 mm à Béni Harchane situé au sud du bassin (période 1979-2013). La température moyenne annuelle est d'environ 18 °C. avec une érosion spécifique moyenne de plus de 20 m³ha⁻¹an⁻¹ sur l'ensemble du bassin, la durabilité des sols de cette région est fortement menacée (Hammouda, 2010).

Données climatiques

Données disponibles

Il n'existe pas de réseau d'observation du climat structuré et de grande profondeur temporelle au sein du bassin versant. Un travail de collecte et de traitement a été réalisé afin d'avoir à disposition des séries climatiques les plus complètes possible.

L'aéroport de Tanger, situé à l'extérieur de la zone, possède la seule station multi-paramètres avec un historique important (Tableau 1). Il existe 8 stations de mesure de la pluie (RR), situées préférentiellement à l'Ouest et au Nord du bassin versant, avec une profondeur temporelle satisfaisante. Par contre, la température minimale et maximale (Tn&Tx) ainsi que l'humidité relative (HR) de l'air ne sont mesurées que sur deux sites: Tanger et Hakama (uniquement depuis 2015 pour cette dernière). Les seules données disponibles pour la vitesse du vent (VV) sont

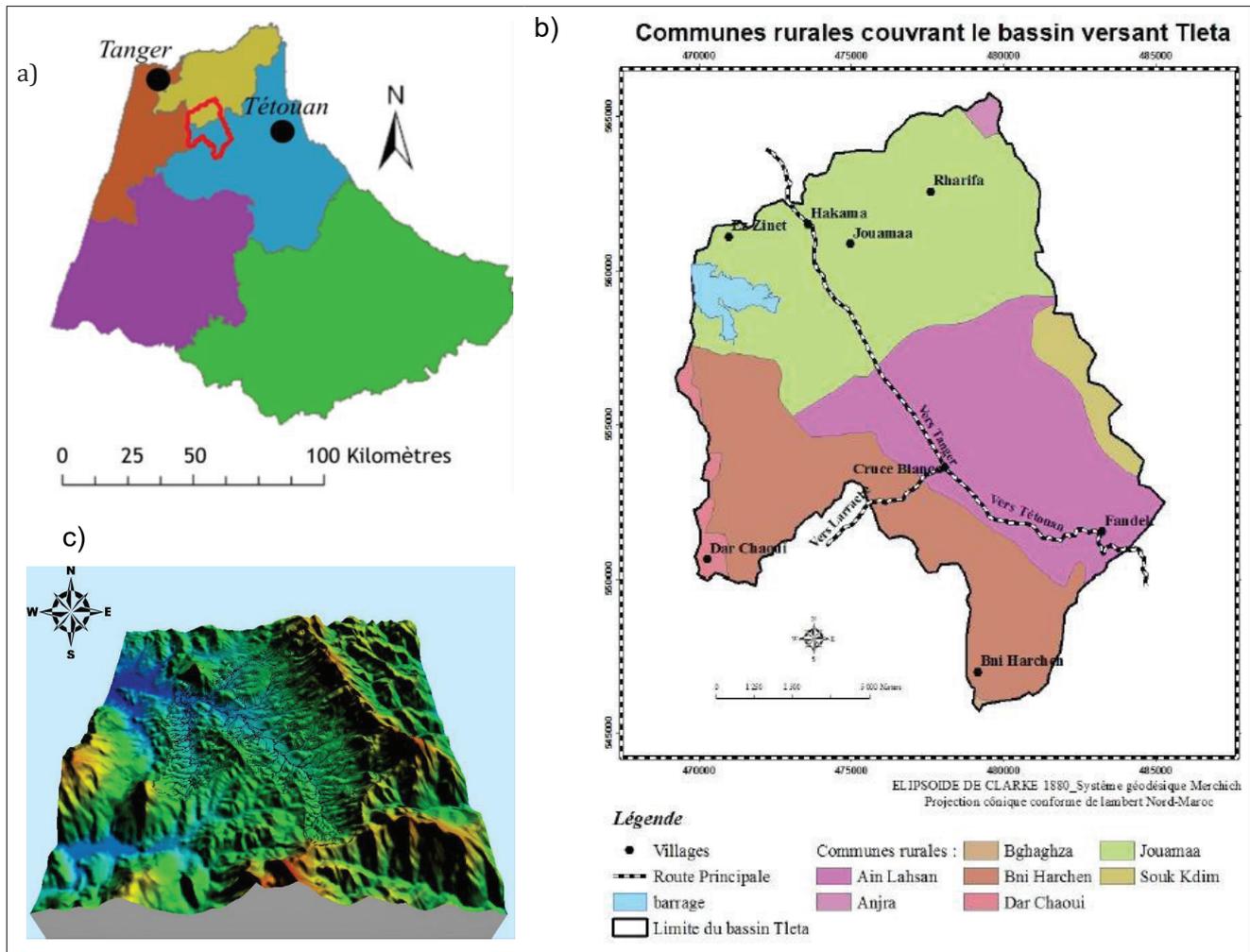


Figure 1 : a) Localisation du bassin versant du Tleta ; b) limites administratives, etc) relief

également issues de la station de Tanger. Pour le rayonnement solaire (Rg), les références sont malheureusement trop fragmentaires pour être exploitables.

Stations installées

Quatre stations automatiques ont été installées selon un axe Nord-Ouest/Sud-Est à partir de novembre 2014 pour compléter les dispositifs existants. Elles mesurent systématiquement la température et l'humidité de l'air à 2 mètres au-dessus du sol. Des capteurs pour le rayonnement global et la vitesse du vent équipent une station et la pluie est enregistrée sur trois stations. Le dispositif n'a pu être opérationnel qu'à partir de mai 2015. Toutefois des problèmes météorologiques récurrents n'ont pas permis de construire des séries pluviométriques et de rayonnement utilisables. Ce sont donc des séries de température et d'humidité de l'air d'une profondeur de moins de deux années qui sont disponibles pour cette étude. Au final, la localisation des sites n'est pas optimale pour une démarche de spatialisation, surtout avec peu de stations au centre et à l'Est du bassin versant (Figure 2).

Projections climatiques utilisées

Les projections climatiques sont issues du modèle régional ALADIN-Climat (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International) de Météo-France. La résolution native d'ALADIN-Climat est de 12 km. Compte tenu de la localisation des sites de mesure, 7 pixels du modèle sont associés (Figure 2).

Deux scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère ont été utilisés: RCP8.5 et RCP4.5, correspondant respectivement à un forçage radiatif de 8.5 et 4.5 $W.m^{-2}$ à l'horizon 2100 (Figure 3).

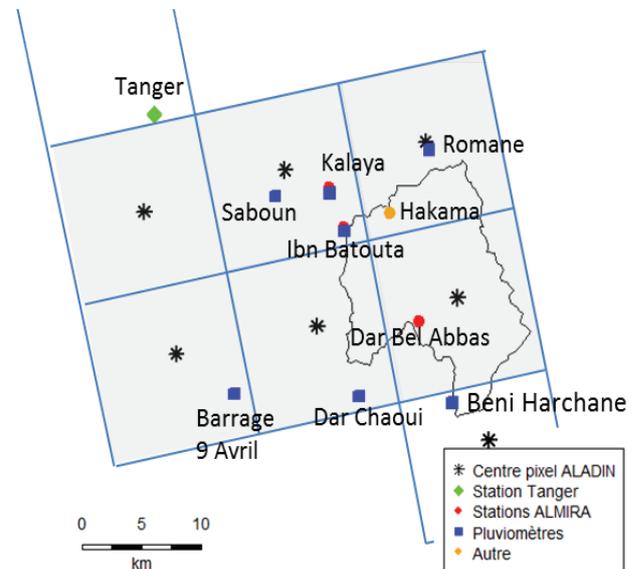


Figure 2. Localisation des différentes stations climatiques

On dispose ainsi, pour chacun des pixels présents, d'une série de contrôle (historique) simulée par le modèle ALADIN de 1950 à 2005, et des projections associées aux scénarios RCP de 2006 à 2100. Les variables extraites sont quotidiennes et concernent les températures minimales et

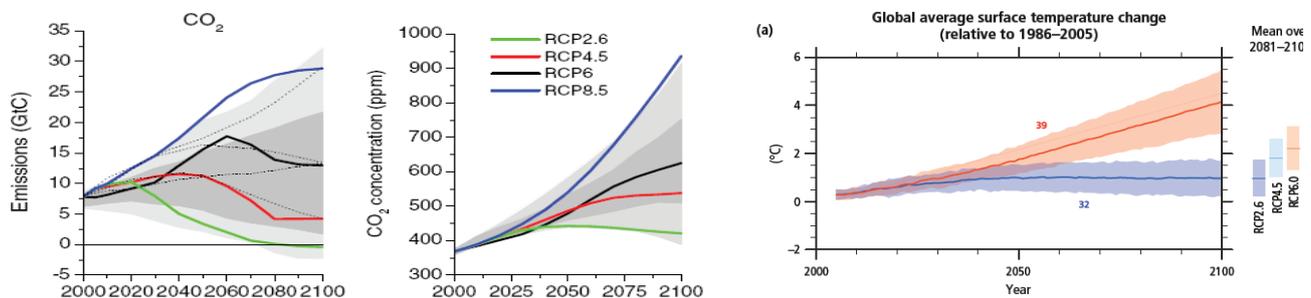


Figure 3. Quelques caractéristiques des différents scénarios RCP (Van Vuuren et al., 2011, IPCC, 2014)

Tableau 1. Caractéristiques des stations météorologiques et paramètres disponibles

Site/Paramètre	RR	Tn&Tx	HR	Rg	VV
Tanger	1979-2013	1966-2013	1966-2013	1966-2013	1966-2013
Kalaya	1979-2016	-	-	-	-
Kalaya (Almira)	-	2015-2016	2015-2016	-	-
Romane	1979-2015	-	-	-	-
Saboun	1998-2016	-	-	-	-
Barrage Ibn Batouta	1979-2016	-	-	-	-
Ibn Batouta (Almira)	-	2015-2016	2015-2016	-	-
Dar Bel Abbas (Almira)	-	2015-2016	2015-2016	-	-
Barrage 9 avril	1995-2008	-	-	-	-
Dar Chaoui	1992-2015	-	-	-	-
Béni Harchane	1979-2016	-	-	-	-
Béni Harchane (Almira)	-	2015-2016	2015-2016	-	-
Hakama	-	2015-2016	2015-2016	-	-

maximales, l'humidité relative, la pluie, le rayonnement global et la vitesse du vent ramenée à deux mètres au-dessus du sol. Le modèle climatique fournit des projections et non des prévisions, ce qui signifie qu'il n'existe pas de correspondance entre le climat simulé et observé à la date t.

Désagrégation statistique

L'objectif est de développer un modèle de transfert d'échelle qui permette de corriger les biais entre les sorties du modèle climatique régional ALADIN (échelle globale) et les observations (échelle locale) disponibles au sein ou à proximité du bassin versant. Calibré sur les séries observées de chaque site, ce modèle de correction sera appliqué sur les projections ALADIN, ce qui permettra de les débiaiser tout en gardant la variabilité temporelle du modèle. Il existe un grand nombre de méthodes et d'outils disponibles (deltas, analogues, générateurs de temps...) et on a utilisé une démarche basée sur les méthodes de Quantiles Mapping et Bias Correction qui permet de calculer le modèle correctif Y comme suit:

- Soit F_m la fonction de répartition d'une variable X de la projection sur un point de grille,
- Soit F_o la fonction de répartition de la même variable observée à la station la plus proche,

$$\text{Alors } Y = F_o^{-1}(F_m(X)) \quad (\text{Déqué, 2007})$$

Il est courant de découper les séries selon des périodes (mois, saisons...) afin de mieux prendre en compte la structure de la variable étudiée. Mais compte tenu des faibles profondeurs temporelles disponibles sur le bassin du Tleta, la désagrégation a été menée sur l'ensemble de l'année, ce qui permet de travailler avec des échantillons statistiquement significatifs.

L'approche développée dans cette étude est inspirée du modèle ARRM (Asynchronous Regional Regression Model) proposé par Stoner *et al.* (2013). La figure 4 illustre la problématique : le caractère asynchrone des variables à échelle globale et locale ne permet pas d'ajuster un modèle statistique qui n'aurait de toute façon pas de sens physique (Figure 4a). En ordonnant les valeurs des variables (analyse par rang ou par quantile), un modèle linéaire est adapté grâce à une régression segmentée (Figure 4b).

Dans cet exemple, la température minimale produite par ALADIN est sous-estimée d'autant plus qu'elle est faible, et à l'inverse elle est légèrement surestimée pour les valeurs supérieures à 19 C. Le modèle statistique détecte automatiquement deux ruptures dans la distribution : une première à +5.6 C puis une seconde à +17,5°C et définit trois équations de régression sur chacun des segments. Ces dernières sont alors appliquées aux températures quotidiennes des projections pilotées par les deux RCP. L'opération est réalisée pour chacun des sites et des paramètres.

Une période d'apprentissage de 30 années est également conseillée pour ce type de traitement. Comme elle doit se caler sur la série de contrôle du modèle climatique, elle doit s'achever au plus tard en 2005. Une telle profondeur n'est pas possible dans les séries du bassin versant, surtout pour les températures et l'humidité relative pour lesquelles, à l'exception de la station de Tanger, les données ne sont disponibles au mieux que depuis 2015.

Il est donc nécessaire de générer des séries historiques de température et d'humidité à partir des données disponibles aux différents sites. De simples régressions entre les stations et la série de Tanger (la plus longue) ont été réalisées et les résultats sont dans l'ensemble satisfaisants (Figure 5).

Concernant les températures minimales, les corrélations sont en effet très hautement significatives avec des R^2 variant de 0,76 à 0,93. Il en est de même avec les températures maximales. L'humidité relative pose problème sur les sites de Beni Harchane et Dar Bel Abbas pour lesquels les corrélations ne sont pas significatives (R^2 de 0,17 et 0,33). Il est difficile d'interpréter ces deux résultats (problèmes de mesure, effets micro-météorologiques, effets d'altitude...) qui ont conduit à ne pas intégrer ces séries dans la suite de la chaîne. Sur les trois autres stations, les corrélations sont de bon niveau avec une variance expliquée supérieure à 60%.

Ces régressions permettent d'étendre les nouvelles séries observées au sein du bassin versant sur la totalité de la période d'observation à Tanger. Toutefois, au regard de nombreuses valeurs manquantes dans les premières années, elles ont été tronquées pour les faire débiter en 1976 et obtenir une période de 30 ans (1976-2005) sur chacun des sites.

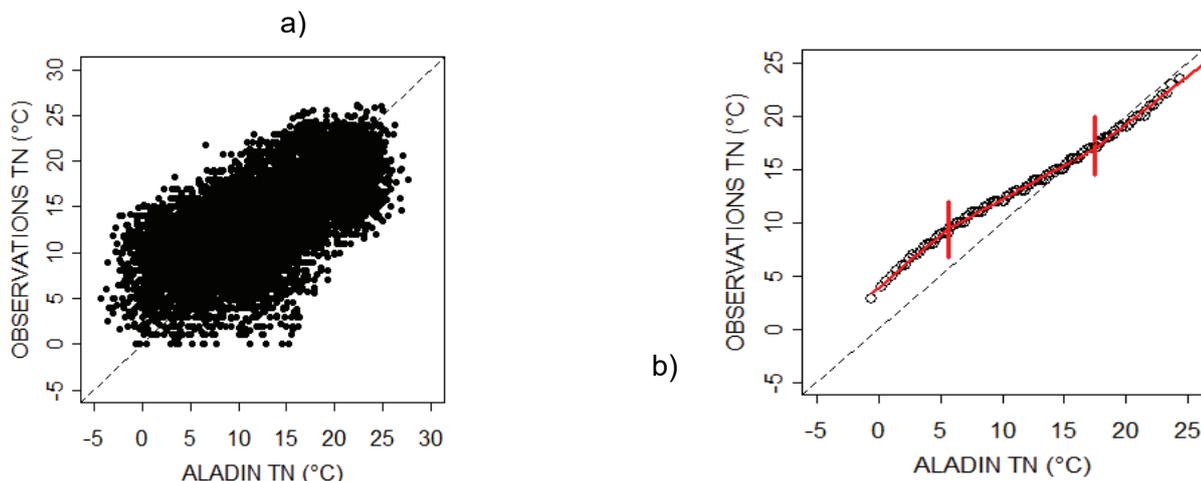


Figure 4. : Températures minimales à Tanger (1976-2005) issues des observations et du pixel modèle climatique ALADIN le plus proche associées par date (a) et par rang (b)

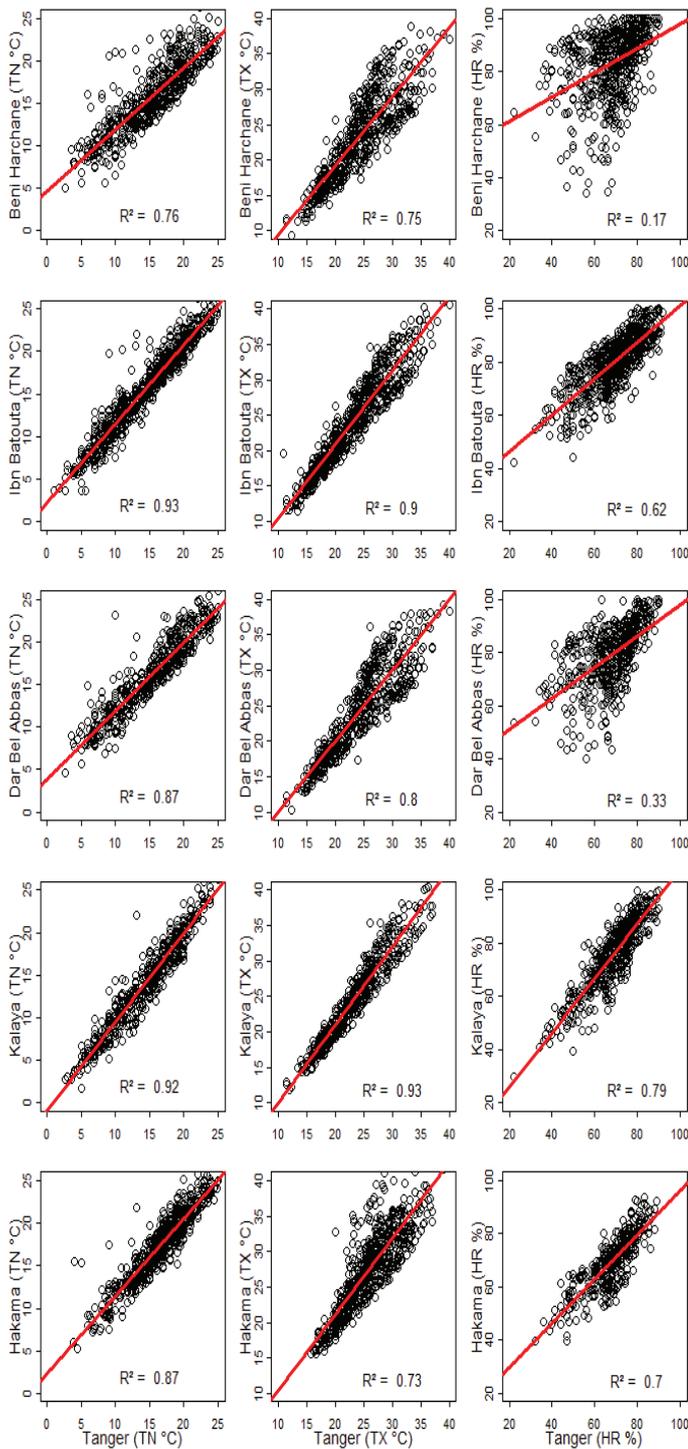


Figure 5. Corrélations entre les stations et le poste de Tanger pour les températures minimales, maximales et l'humidité relative

VALIDATION

Le *downscaling* statistique, qui consiste à appliquer le modèle de correction calibré sur chaque série historique observée, a été réalisé pour chacune des sorties du modèle de climat de façon indépendante. A l'issue de l'opération, on dispose de nouvelles projections débiaisées pour la période 1950-2005. En considérant de nouveau l'exemple des températures minimales à Tanger, un biais froid moyen de l'ordre 1,5°C est observé entre le RCM ALADIN et la donnée mesurée. La procédure de désagrégation permet alors de réduire le biais (il est ici annulé) et de ramener

la moyenne de la série d'échelle globale au niveau de la moyenne locale (Figure 6).

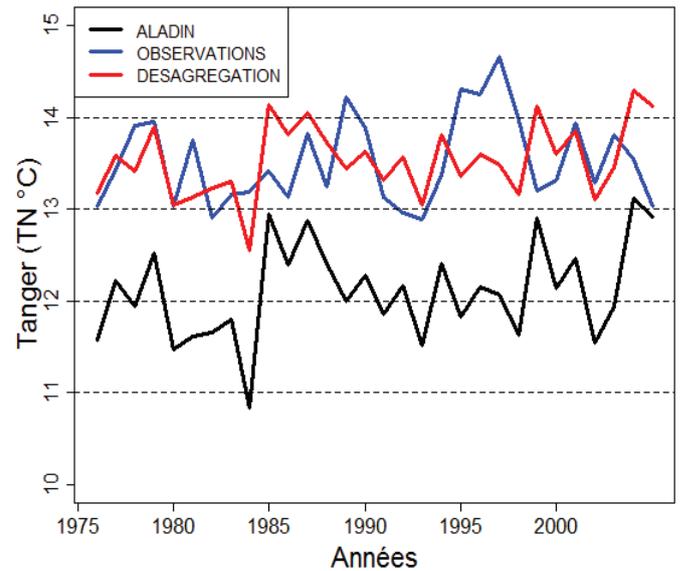


Figure 6. Débiaisage de la température minimale du pixel ALADIN associé aux observations à Tanger sur la période 1976-2005

Les résultats sur l'ensemble des variables et des sites/pixels montrent:

- Des biais initiaux importants pour les températures minimales pour les stations reconstituées situées au sud du bassin (Béni Harchane, Dar Bel Abbas), alors qu'ils sont inférieurs à 2 °C sur les autres sites (à l'exception de Hakama) (Tableau 2). La désagrégation par le modèle permet de les annuler;
- Des biais beaucoup moins importants sur les températures maximales (inférieurs à 2 °C sur tous les pixels) et corrigés à l'issue de l'opération (tableau 3);
- Pour les précipitations, une sous-estimation du modèle entre 100 et 200 mm de la moyenne des cumuls annuels (Tableau 4). Les résultats doivent toutefois être pris avec précaution pour certaines séries en raison de leur faible profondeur (il n'y a pas eu de reconstitution sur les précipitations). Le cumul exceptionnellement élevé en 1996 (plus du double de la moyenne annuelle) n'est pas observé dans l'historique du modèle (mais dans une moindre mesure en 2018) et influe considérablement sur les biais de précipitations (Figure 7). Sans cette année record, le modèle simule avec justesse la pluviométrie moyenne sur les différents sites. Le modèle permet de nouveau de réduire les biais pour les ramener à 10-50 mm;
- Une bonne caractérisation de la vitesse du vent par le modèle climatique sur le site de Tanger (Tableau 5);
- Des biais importants pour l'humidité relative mais ramenés au maximum à 6% donc au niveau de précision de la mesure instrumentale (Tableau 6);

Tableau 2. Résultats des désagrégations de la température minimale sur les différentes stations (période actuelle: 1976-2005, période future: 2031-2060, *: données reconstituées)

TN (C)	Mesure	Biais moyen Modèle brut-Mesure	Biais moyen Après désagrégation	Anomalie RCP8.5 futur-présent	Anomalie RCP4.5 futur-présent
Béni Harchane	14.5*	-6.5	0.0	+1.1	+0.9
Dar Bel Abbas	14.8*	-5.1	0.0	+1.2	+0.9
Ibn Batouta	14.8*	-3.5	0.0	+1.3	+1.0
Hakama	14.5*	-4.3	0.1	+1.4	+1.0
Kalaya	13.2*	-1.9	0.0	+1.4	+1.1
Tanger	13.5	-1.4	0.0	+1.4	+1.1

Tableau 3. Résultats des désagrégations de la température maximale sur les différentes stations (période actuelle: 1976-2005, période future: 2031-2060, *: données reconstituées)

TX (C)	Mesure	Biais moyen Modèle brut-Mesure	Biais moyen Après désagrégation	Anomalie RCP8.5 futur-présent	Anomalie RCP4.5 futur-présent
Béni Harchane	21.5*	0.8	0.1	+1.1	+0.8
Dar Bel Abbas	22.4*	0.7	0.1	+1.2	+0.9
Ibn Batouta	23.4*	0.7	0.2	+1.2	+0.9
Hakama	23.1*	0.2	0.1	+1.4	+1.1
Kalaya	23.4*	1.2	0.1	+1.3	+1.0
Tanger	22.5	1.4	0.2	+1.2	+0.9

Tableau 4. Résultats des désagrégations de la pluie sur les différentes stations (période actuelle: 1980-2005, période future: 2031-2060, *: les observations ne couvrent pas toutes la période 1980-2005)

Pluie (mm)	Mesure	Biais moyen Modèle brut-Mesure	Biais moyen Après désagrégation	Anomalie RCP8.5 futur-présent	Anomalie RCP4.5 futur-présent
Romane	751	-186	-46	-74	-42
Saboun	875*	-222	-32	-67	-38
Barrage 9 avril	773*	-214	-60	-67	-41
Béni Harchane	895	-145	35	-50	-16
Dar Chaoui	804*	-201	-48	-81	-44
Barrage Ibn Batouta	685	-101	7	-66	-37
Kalaya	733	-145	-17	-69	-36
Tanger	635	-158	-13	-62	-41

Tableau 5. Résultats des désagrégations de l'humidité relative sur les différentes stations

Tanger	Mesure	Biais moyen Modèle brut-Mesure	Biais moyen Après désagrégation	Anomalie RCP8.5 futur-présent	Anomalie RCP4.5 futur-présent
Vent (m/s)	3.8	-0.6	0	-0.6	+0.1
Rayonnement (joules/cm ²)	-	-	-	+17	+13

Tableau 6. Résultats des désagrégations de l'humidité relative sur les différentes stations (période actuelle: 1976-2005, période future: 2031-2060)

HR (%)	Mesure	Biais moyen Modèle brut-Mesure	Biais moyen Après désagrégation	Anomalie RCP8.5 futur-présent	Anomalie RCP4.5 futur-présent
Ibn Batouta	84*	-31	+2	0	0
Hakama	75*	-19	+6	+1	0
Kalaya	82*	-29	-1	0	0
Tanger	74	-22	+3	0	0

* Données reconstituées

RÉSULTATS

Séries futures désagrégées

Le modèle de désagrégation statistique peut désormais être appliqué sur les projections climatiques futures des deux scénarii RCP. Elle permet de fournir un premier diagnostic de l'évolution du climat à l'horizon 2031-2060 (tableaux 2 à 6) :

- Les résultats obtenus sont proches des valeurs proposées par Driouech (2010) qui avait estimé une diminution dans le nord du Maroc des précipitations annuelles de 5% à l'horizon 2021-2050 à partir des projections du modèle climatique ARPEGE-Climat avec l'ancien scénario SRES A1B (proche du RCP4.5 actuel). Ils confirment également les travaux menés plus récemment par Jacobeit (2014) et Balaghi *et al.* (2016) ;
- Les différences sont déjà significatives entre des deux scénarii RCP ;
- Le signal est fort pour les précipitations avec une anomalie (différence entre le climat moyen projeté et le climat actuel) de l'ordre de 20 à 40 mm avec le scénario RCP4.5 et de plus de 70 mm sur les différents sites du bassin avec le RCP8.5. Le déficit de pluie est important durant

les mois d'hiver: de décembre à février pour le scénario RCP8.5 et de janvier à mars pour le RCP4.5 (Figure 8a). L'anomalie du mois de décembre est fortement positive avec le scénario RCP4.5 à l'inverse du RCP8.5;

- Le réchauffement moyen est de l'ordre de 1 C et 1,3 °C pour les températures moyennes avec les scénarii RCP 4.5 et 8.5. On note que les températures minimales ont tendance à se réchauffer légèrement plus que les maximales, et ce, quel que soit le scénario. Le réchauffement est plus important l'été avec un pic en juillet durant lequel l'anomalie est supérieure à 2 °C avec le scénario RCP8.5 à Tanger (Figure 8b);
- L'humidité relative reste stationnaire sans évolution significative;
- Aucun signal ne se dégage permettant d'évaluer l'évolution du rayonnement solaire et de la vitesse du vent sur le site de Tanger.

Spatialisation des champs climatiques désagrégés

Dans la dernière étape, les variables quotidiennes débiaisées en climat futur aux différents sites sont interpolées en utilisant une méthode dépendant par l'inverse de la distance. On produit ainsi, pour chaque jour, variable et

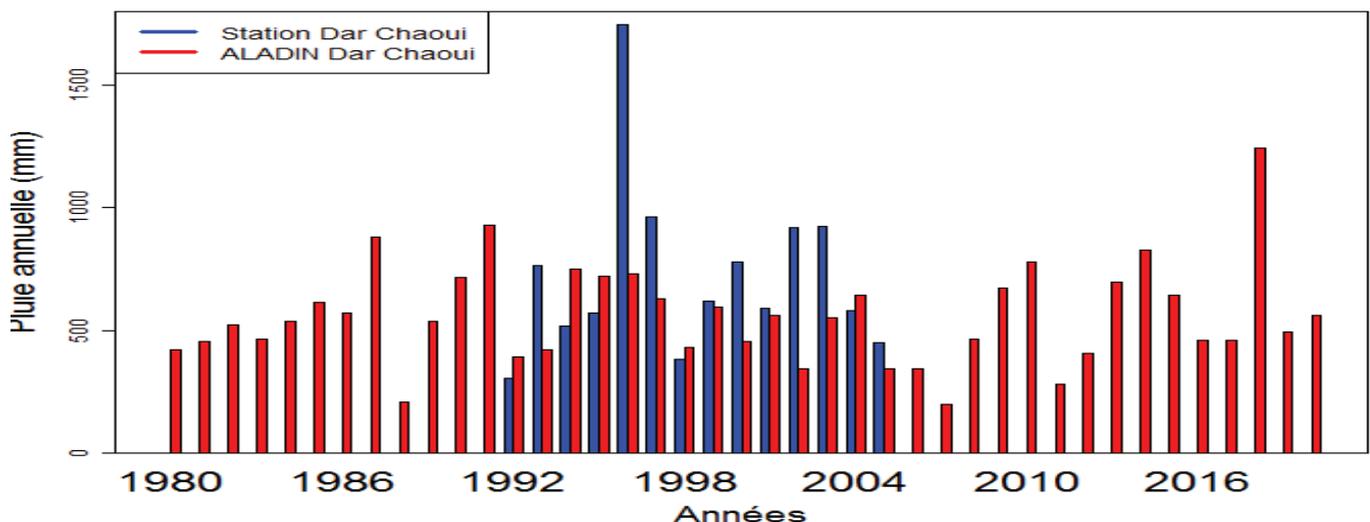


Figure 7. Précipitations observées et issues du modèle ALADIN à la station de Dar Chaoui

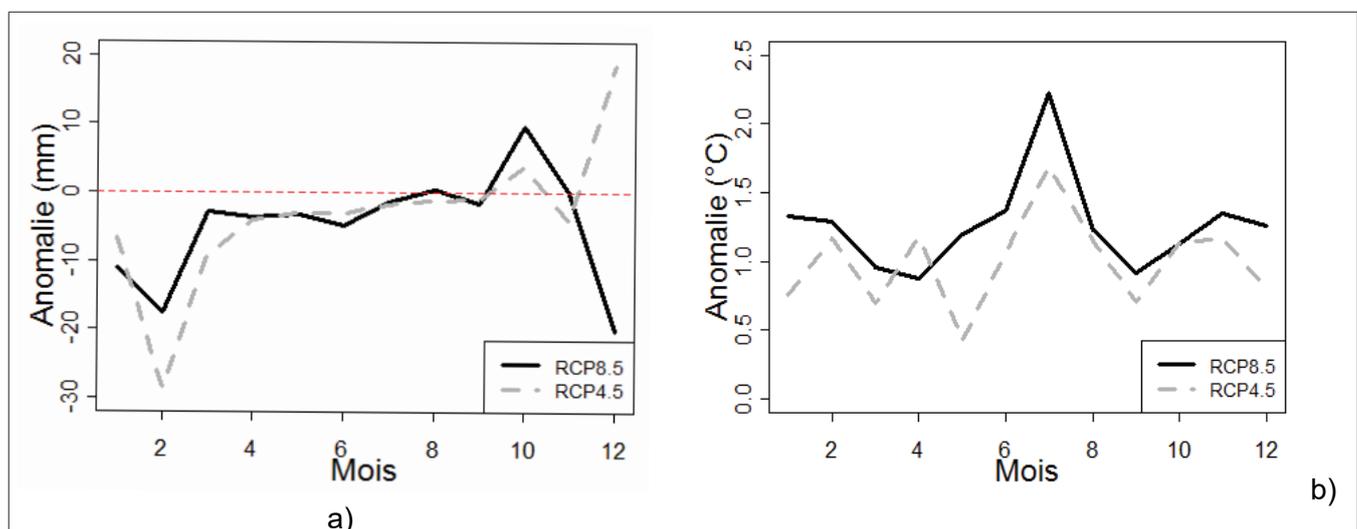


Figure 8. Anomalies mensuelles [2031-2060]-[1976-2005] des précipitations (a) et des températures moyennes (b) à Tanger

scénario, une grille régulière de 1 km de résolution. Seules les températures (minimales et maximales), les précipitations et l'humidité relative ont été spatialisées. Cette résolution est envisageable du fait de la superficie réduite du bassin versant associée à une variabilité climatique interne spatialement limitée. On présente ici les champs moyens calculés sur une période de 30 ans (1976-2005 et 2031-2060):

- Un gradient Nord/Sud plus marqué pour les températures maximales que pour les minimales se dessine alors que le réchauffement est spatialement uniforme sur l'ensemble (Figures 9a et 9b). A l'échéance 2031-2060, les deux scénarios se différencient déjà surtout sur la partie nord ;
- La cartographie des précipitations est intéressante car elle apporte des nuances aux observations précédentes. Si le sud du bassin versant conserve un caractère plus pluvieux,

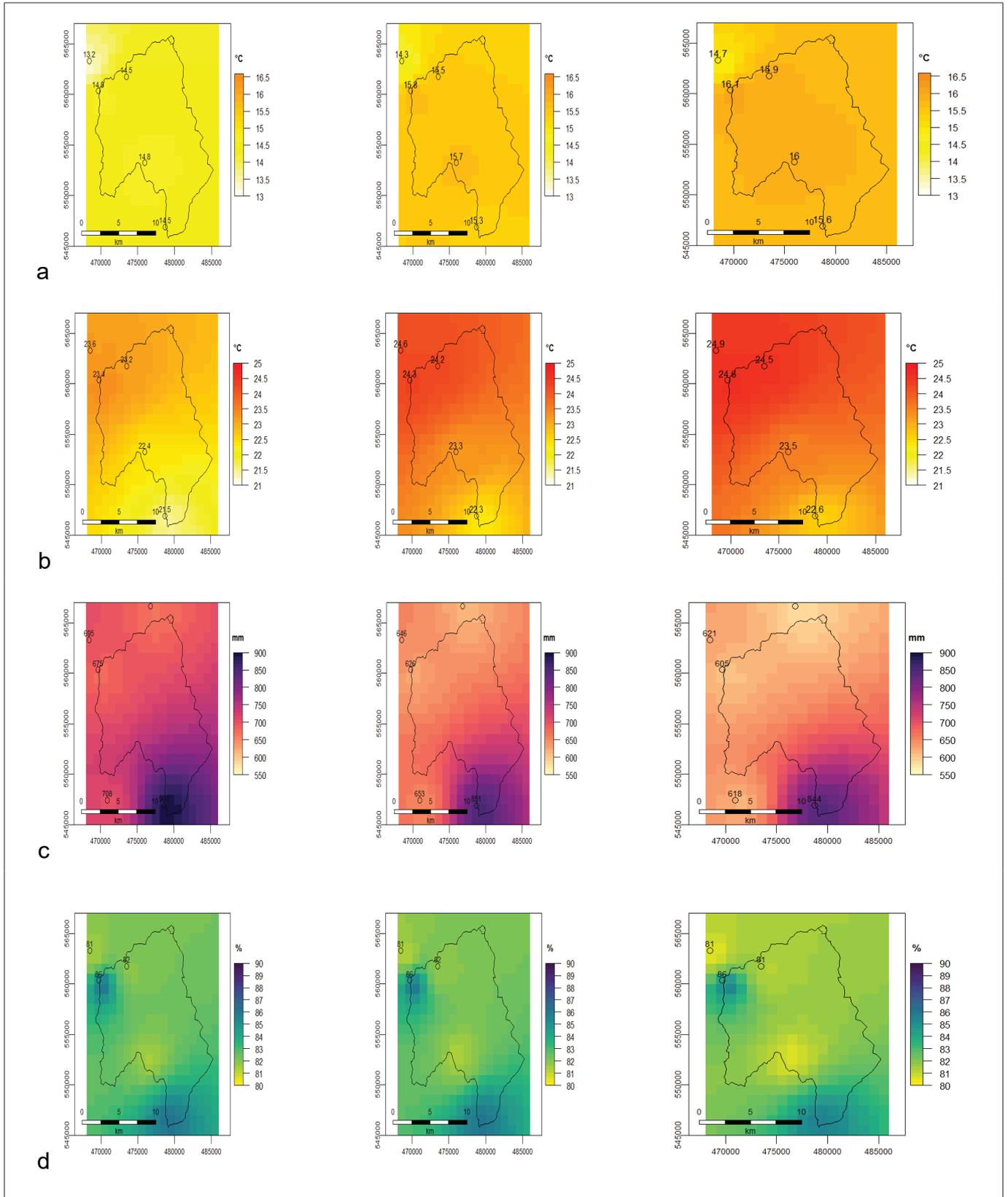


Figure 9. Moyenne des champs des températures minimales (a), maximales (b), de pluie (c) et d'humidité (d) désagrégés sur le Tleta (C) pour les périodes 1976-2005 (gauche), 2031-2060 RCP4.5 (centre) et 2031-2060 RCP8.5 (droite). Pour les pluies, la période présente est définie de 1980 à 2005

le cumul de pluie et la surface de cette cellule sont amenés à se réduire significativement quel que soit le scénario (Figure 9c). L'impact orographique est bien visible. La situation pourra être préoccupante sur la partie nord, avec une diminution annuelle des pluies pouvant atteindre un peu moins d'une centaine de millimètres.

- Concernant l'humidité, aucun signal d'évolution de la variabilité spatiale n'est détecté.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La méthode développée permet de produire des projections climatiques à haute résolution spatiale dans le bassin versant du Tleta. Elle met en œuvre différents processus (figure 10) permettant:

- De construire un modèle de désagrégation des modèles de climat à large échelle adapté aux séries climatiques locales, qu'il est parfois nécessaire de traiter pour augmenter la profondeur temporelle;
- De générer des séries quotidiennes futures sur les différents sites;
- De spatialiser les résultats à une résolution de 1 km².

Des champs quotidiens de températures, de précipitations et d'humidité relative à l'horizon 2021-2060 pour les deux scénarii RCP ont été fournis pour être intégrés en entrée des modèles d'impact agronomiques et hydrologiques. Pour le vent et le rayonnement global, compte tenu du trop faible nombre de points d'observation et d'un historique réduit, il n'est pas possible de les spatialiser : le choix a été fait de produire des champs spatialement uniformes

basés sur la valeur de la correction du pixel associé à la station de Tanger. Étant donné la surface du bassin versant, l'impact ne devrait pas être important pour le rayonnement global (peu de variabilité à cette échelle) mais peut poser un problème pour la vitesse du vent.

Quant aux perspectives, la méthode pourra faire l'objet de développements supplémentaires. En effet, si les résultats sont conditionnés à la densité, quantité et qualité des observations climatiques, plusieurs pistes d'optimisation sont envisagées:

- D'une part lors de la génération des longues séries à partir d'observations limitées dans le temps. La méthode s'appuie actuellement sur une simple régression linéaire entre la série de Tanger et celles des autres stations. Il serait envisageable de tester un modèle de régression statistique asynchrone (Statistical Asynchronous Regression SAR) qui permet de déterminer des relations entre des paramètres qui n'ont pas été mesurés simultanément (O'Brien *et al*, 2001). Avec un historique plus important (les mesures actuelles se poursuivant), le modèle SAR, dont la structure est proche de ce qui est réalisé pour le downscaling, pourrait améliorer la qualité des reconstructions de façon sensible. Les ré-analyses climatiques mériteraient également d'être prises en compte, notamment pour pallier et compléter l'historique des observations;

- D'autre part lors de l'étape de désagrégation. Les séries ont été traitées à l'échelle annuelle, mais les résultats ont montré une structure saisonnière des anomalies (intensités plus fortes en hiver pour les pluies et en été pour les températures). Une segmentation saisonnière permettrait ainsi d'affiner les modèles de correction;

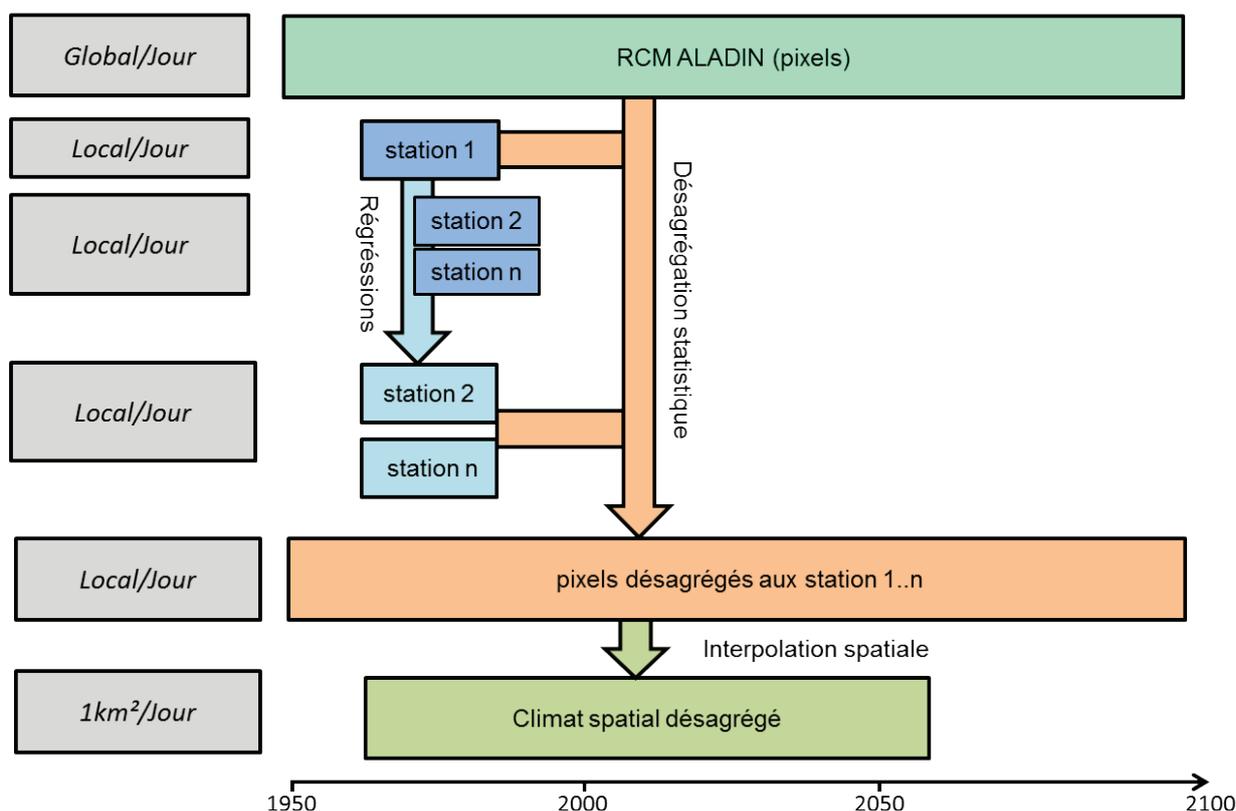


Figure 10. Schéma fonctionnel de la méthode de désagrégation spatio-temporelle développée

• Et enfin lors de la spatialisation. La démarche repose actuellement sur une interpolation basée sur le carré de l'inverse de la distance. D'autres méthodes d'interpolation pourraient être testées, d'autant plus que l'essentiel du temps de calcul est utilisé pour cette opération.

Le travail présenté n'est donc qu'une première étape et il est important d'attendre encore quelques mois afin de disposer de mesures climatiques plus conséquentes. L'utilisation de plusieurs modèles climatiques et plusieurs méthodes de désagrégation statistique permettrait également d'associer des éléments d'incertitude aux résultats proposés.

Remerciements

Les auteurs remercient le programme JEAI Vecteur financé par l'IRD et le projet ALMIRA (ANR-12-TMED-0003) financé par l'ANR pour leur support financier et technique.

BIBLIOGRAPHIE

Balaghi R, El Hairech T, Alaouri M, Motaouakil S, Benabdelouahab T, Mounir F, Lahlou M, Arrach R, Abderrakif M, Colmant R, Evangelisti M, Poortinga A, Kuik O and, Delobel F. (2016). Climate Change Impact Assessment Using MOSAICC in Morocco. INRA Morocco, ISBN: 978-9954-0-6702-4. 250p

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.

Driouech F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Thèse de l'INP Toulouse, 164p.

Hammouda N. (2010). Évolution de l'occupation des sols et de l'érosion dans le bassin versant Tleta (Rif occidental, Maroc). Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. 140p.

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151p.

Jacobeit J, Hertig E, Seubert S, Lutz K. (2014). Statistical downscaling for climate change projections in the Mediterranean region: methods and results. *Reg. Environ. Change* 14: 1891.

O'Brien T.P, Sornette D, and Mc Pherron R.L., (2001). Statistical asynchronous regression: Determining the relationship between two quantities that are not measured simultaneously. *J. Geophys. Res.*, 106:247-259.

Quintana Seguí P, Ribes A, Martin E, Habets F, Boé J. (2010). Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *J Hydrol.* 383:111-124.

Stoner A-M, Hayhoe K, Yang X and Wuebbles D.J. (2013). An asynchronous regional regression model for statistical-downscaling of daily climate variables. *Int. J. Climatol.*, 33: 2473-2494.

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Masui, T. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109: 5.