

MODÉLISATION DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DES PARAMÈTRES BIOCLIMATIQUES DANS LA REGION TANGER- TETOUAN (RIF OCCIDENTAL)

Ghallab Abdelilah

SEAP, Direction des Eaux et Forêts. 33, Av. Mohamed V, Tétouan, Maroc

Taiqui Lahcen

Faculté des Sciences. Mhannech II. 93002. Tétouan, Maroc

Abstract

This work focuses on mapping the main bioclimatic factors in the region of Tangier -Tetouan (western Rif) in Morocco. This is with the view of integrating them into the modeling of the potential distribution of native plant species. These factors include the Annual Mean precipitation (Pmoy), Annual Mean Temperature (Tmoy), mean maximum temperature of the hottest month (Tmax), and the mean minimum temperature of the coldest month (Tmin). The adopted technique is the statistical modeling, which allows us to estimate such factors based on topographic and geographic variables. The backward stepwise multiple regression method which was applied, and the deterministic models obtained, have been corrected by the stochastic components that were interpolated by the Inverse Distance Weighting (IDW). The results of this modeling are discussed in the light of the results of other works of the same theme, as compared to previous descriptions of the climatic environment in the area. The results are satisfactory in the case of the average annual precipitation, mean annual temperature, and the mean minimum temperature of the coldest month, with coefficients of determination (R^2) of 0,76, 0,97 and 0,74, respectively. However, this ratio reached its lowest value (0,55) for the average of the maximum temperature of the warmest month. The assessment of the accuracy of the results obtained for the mean annual precipitation and mean annual temperatures was performed by calculating the Mean Absolute Error (MAE) and the Root Mean Squared Error (RMSE). These tests have shown that stochastic components contribute significantly to the improvement of deterministic models.

Keywords: Statistical model, interpolation, mapping, precipitation,

Temperature, Tangier-Tetouan Region

Résumé

Le présent travail porte sur une cartographie des principaux facteurs bioclimatiques dans la région Tanger –Tétouan (Rif occidental) du Maroc dans la perspective de les intégrer dans la modélisation de la distribution potentielle des espèces végétales autochtones. Ces facteurs concernent les précipitations moyennes annuelles (Pmoy), les températures moyennes annuelles (Tmoy), les moyennes des minima du mois le plus froid (Tmin) et les moyennes des maxima des températures du mois le plus chaud (Tmax). La technique adoptée est la modélisation statistique qui nous a permis d'estimer lesdits facteurs en fonction des variables topographiques et géographiques. La méthode de régression multiple ascendante progressive a été appliquée et les modèles déterministes obtenus ont été corrigés par les composantes stochastiques qui ont été interpolées par pondération par l'inverse de la distance (IDW). Les résultats de cette modélisation sont discutés à la lumière des résultats des autres travaux du même thème, d'une part, et d'autre part, par rapport aux descriptions antérieures de l'ambiance climatique dans la zone. Les résultats sont satisfaisants, dans le cas des précipitations moyennes annuelles, des températures moyennes annuelles et des moyennes des minima du mois le plus froid avec des coefficients de détermination (R^2) respectifs de 0,76 ; de 0,97 et de 0,74 ; toutefois ce coefficient enregistre sa plus faible valeur (0,55) dans le cas des moyennes des maxima des températures du mois le plus chaud. L'évaluation de la précision des résultats obtenus pour les précipitations moyennes annuelles et les températures moyennes annuelles a été effectuée via le calcul de l'erreur absolue (EMA) et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Ces tests ont montré que les composantes stochastiques contribuent significativement à l'amélioration des modèles déterministes.

Mots Clés: Modèle statistique, interpolation, cartographie, précipitations, cartographie, Région Tanger-Tétouan

Introduction

Le recours à des informations climatiques continues dans l'espace est devenu une nécessité dans plusieurs domaines tels que l'hydrologie, l'agriculture, la biologie et l'écologie. Ces informations sont obtenues généralement en exploitant les données fournies par les réseaux des stations de mesure ponctuelles. Les approches utilisées n'ont pas cessé de se développer en empruntant différentes voies afin d'aboutir à une caractérisation climatique précise. Ces méthodes profitent largement de l'évolution des outils informatiques surtout de cartographie et d'analyse

spatiale numérique. Au Maroc, tout en donnant plus d'importance à la pluviométrie, les expériences en matière de cartographie des facteurs climatiques sont peu nombreuses et sont généralement entreprises à une échelle globale ne reflétant que partiellement la diversité et les spécificités climatiques de certaines régions du pays. Depuis la publication de la carte des précipitations par Gaussen et Roux en 1957, en passant par les différentes tentatives d'actualisation et de production de nouvelles cartes climatiques, les auteurs ont progressivement adopté différentes méthodes d'interpolation pour spatialiser les variables climatiques : méthodes géostatistiques de Krigeage (Slaoui, 1996), les fonctions exprimant la relation entre les valeurs pluviométriques et l'altitude (Sebbar et al., 2010 et 2013) et l'adaptation récente dans le cadre du projet MOSAICC (FAO, 2011) au Maroc de la méthode d'interpolation spatiale AURELHY (Bénichou & Le Breton, 1987). Cette dernière approche s'est basée sur les données de 39 stations synoptiques réparties sur l'ensemble du territoire du royaume (710 850 km²) pour cartographier les variables climatiques à une résolution de 4,5*4,5 km. Le Rif occidental n'y est représenté que par trois stations côtières à savoir Tanger, Tétouan et Larache. Par conséquent, le réseau de mesure utilisé n'étant pas représentatif de l'ensemble des zones topoclimatiques de la région, de nombreuses unités de relief sont estompées des estimations obtenues. Les cartes élaborées confirment que la région septentrionale du pays est la plus arrosée ; toutefois, la valeur maximale des précipitations moyennes annuelles obtenue ne dépasse pas 1100 mm/an (El Hairech, 2011). Cette valeur qu'on trouve dans la base des données climatiques worldCilm, version 1.4 (Hijmans et al., 2005) est en deçà de la lame d'eau reçue par les zones d'altitude comme le confirment les enregistrements de plusieurs stations.

Les contrastes caractérisant les cartes climatiques disponibles du Rif occidental restent imprécises et insuffisants pour expliquer la particularité de la diversité et de la distribution des écosystèmes naturels. Devant cette situation, nous avons estimé nécessaire d'étendre la gamme des facteurs explicatifs susceptibles d'influencer la distribution des paramètres climatiques et d'élargir la liste des stations en incluant plus de stations y compris celles dont les enregistrements ne couvrent pas de longues séries (minimum de 15 ans).

La cartographie automatique, à travers la modélisation statistique en se basant sur la corrélation existante entre les valeurs des variables climatiques et les variables explicatives topographiques et géographiques, a donné des résultats satisfaisants dans les régions montagneuses méditerranéennes et s'avère très utile pour pallier à la déficience du réseau d'observation (Edwards, 1972 ; Carrega, 1994 ; Hargy 1997 ; Agnew & Palutikof, 2000 ; Ninyerola et al., 2000 ; Brown & Comrie, 2002 ;

Traboulsi, 2010). C'est dans ce même cadre que cette méthode a été utilisée, dans la présente étude, afin de cartographier la distribution des principales variables bioclimatiques dans la région Tanger-Tétouan. La disponibilité des données et le degré d'influence potentielle, d'après la bibliographie existante, sur la distribution des aires des espèces végétales ont constitué les deux critères pour le choix des variables bioclimatiques à étudier. Ainsi quatre variables ont été sélectionnées ; il s'agit des précipitations moyennes annuelles (Pmoy), des températures moyennes annuelles (Tmoy), des moyennes des minima des températures du moins le plus froid (Tmin) et des moyennes des maxima du mois le plus chaud (Tmax).

Zone d'étude

La région Tanger-Tétouan est située au nord-ouest du Maroc, au niveau de l'extrême nord-ouest du continent africain. Elle s'encarte entre les longitudes $6^{\circ} 14' 36,27''$ - $4^{\circ}27' 22,80''$ W et les latitudes $34^{\circ} 30' 33,72''$ - $35^{\circ} 55' 20,68''$ N et s'étend sur une superficie de 12650 km². Avec ses imposants reliefs, le Rif marocain est le carrefour où les trois influences majeures océanique, méditerranéenne et saharienne atteignent sur le plan climatique leur suprême degré d'interaction en intensité et en importance. Le climat rifain a fait l'objet de plusieurs études et les synthèses bioclimatiques réalisées ont pu mettre en évidence l'originalité de ce climat. Les auteurs (Maurer, 1968 ; Benabid, 1982 ; Elgharbaoui, 1980 ; M'hirit, 1982) qui ont abordé la thématique du climat à l'échelle du Rif occidental s'accordent sur les caractéristiques qui sont derrière la particularité climatique que revêt cette zone méditerranéenne. Ces caractéristiques peuvent être synthétisées comme suit : (1) Les flux surtout de l'océan Atlantique vers la mer Méditerranée à travers le détroit de Gibraltar qui traduisent les échanges atmosphériques provoqués par les différences de pression et d'échauffement entre les deux étendues maritimes; (2) Les expositions résultantes de la forme générale arquée de la chaîne rifaine qui distingue d'un côté, des façades atlantiques ouest et sud-ouest soumises aux perturbations de l'Anticyclone des Açores, et d'un autre côté, des façades méditerranéennes orientées est et nord-est qui sont moins affectées par les masses d'air humide venant de l'Atlantique ; et (3) La forme du relief très accidentée impacte la circulation atmosphérique et accentue l'effet d'exposition et surtout des phénomènes d'abri (ombre pluviométrique). De ce fait, en région méditerranéenne, sur le plan bioclimatique, le Maroc et plus spécialement les Atlas et le Rif ont servi de base et de modèle pour les travaux d'Emberger (1930) qui a pu y définir sa conception du climat méditerranéen et ses grands types de bioclimats ainsi que les structures de végétation correspondantes. Ces schémas restent encore utilisés pour l'ensemble des grandes zones bioclimatiques méditerranéennes du Monde.

Les variations horizontales et altitudinales des paramètres climatiques et leurs relations avec la distribution de la végétation, en région méditerranéenne et tout particulièrement au Maroc ont fait l'objet de plusieurs travaux. Le paramétrage de l'aridité (Emberger, 1930) et de la continentalité avec ses deux dimensions pluviale au sens d'Angot (1906) et thermique au sens Daget (1968)), a constitué la préoccupation majeure pour plusieurs auteurs dans l'objectif de mettre en œuvre des synthèses bioclimatiques permettant d'approcher les pistes menant à expliquer les relations végétation-climat.

Que ce soit dans le Rif (Benabid, 1982) ou dans l'Atlas (Peyre, 1979 et 1983), les montagnes marocaines abritent des zones climatiques internes qui se trouvent derrière des massifs plus arrosés et où se manifeste un gradient de continentalité très marqué et caractérisé par une baisse du gradient ombrique altitudinal. Ce gradient particulièrement déterminant pour la végétation est appelé continentalité hydrique (Izard et al., 1985) ; il est décrit par Michalet (1991) comme un affaiblissement des précipitations hivernales par effet d'abri orographique ou/et simple éloignement des centres dépressionnaires actifs (l'anticyclone des Açores dans la région méditerranéenne), ce qui crée dans une même région des variations très importantes au niveau des totaux pluviométriques annuels. Cet effet contrastant, peut se superposer à un climat général qui peut être aussi bien océanique que méditerranéen ou même continental (Izard et al., 1985).

À partir du constat que l'aridification peut également se développer en situation océanique, Michalet (1991) a suggéré l'introduction de la notion de continentalité hydrique relative, pour dissiper la confusion régnant au niveau de la perception de l'aridité. Le même auteur juge que comparativement à la sécheresse estivale qui varie très peu horizontalement dans une région donnée à altitude égale et dont la durée et l'intensité permet de mesurer la xéricité (Bagnouls & Gaussen, 1953), la continentalité hydrique relative crée dans une même région des variations très importantes au niveau des totaux pluviométriques annuels. D'après ce débat, il paraît que l'intégration des irrégularités du relief (effet de barrières), l'altitude et la proximité des deux extensions maritimes (la mer Méditerranée et l'océan Atlantique) est une évidence incontestable pour approcher l'ambiance climatique rifaine qui reste avant tout typiquement méditerranéenne.

Méthodologie

La méthodologie adoptée dans cette étude repose sur les principes de la modélisation statistique. Cette approche a été appliquée avec succès dans le contexte méditerranéen par plusieurs auteurs (Agnew & Palutikof, 2000 ; Carrega & Garcia, 2000 ; Ninyerola et al., 2000 ; Assaba & Laborde, 2000 ; Brown & Comrie, 2002 ; Vicente et al., 2003 ; Yves Cornet et al., 2005). En

effet, nous avons exploité les variables physiographiques (topographiques et géographiques) qu'on a générées de façon continue sur le territoire d'étude et les avons fait intervenir dans la quantification des variables bioclimatiques. Considérés comme des variables explicatives, les différents facteurs topographiques et géographiques ont été traités en mode image à une résolution de 50 m.

Les valeurs de différentes grandeurs climatiques ont été exploitées, sous le logiciel SPSS, pour ajuster des modèles statistiques exprimant la relation entre lesdites valeurs et les variables physiographiques.

Les modèles statistiques obtenus ont ensuite été exploités pour spatialiser les paramètres bioclimatiques (Pmoy, Tmoy, Tmax et Tmin) en exploitant d'abord ses composantes déterministes et ensuite ses composantes stochastiques. Les composantes du modèle sont liées selon l'équation suivante :

Données observées = Données prédites + interpolation des résidus

La composante déterministe traduit les relations existantes entre les valeurs de chacun des paramètres et les variables physiographiques parmi celles introduites et retenues par le processus statistique. La composante stochastique est connue sous la forme de résidus aux stations qui peuvent être expliqués par des facteurs ignorés dans le modèle. Ces résidus ont fait l'objet d'une interpolation par pondération inverse à la distance (Inverse Distance Weighting) de façon à pouvoir corriger les couches obtenues à partir de l'exploitation de la composante déterministe.

Etant donné la nature exploratoire de notre travail et afin d'intégrer toute variable susceptible d'affecter les variables dépendantes (éléments bioclimatiques), les modèles ont été déterminés par régression progressive pas à pas. La règle de décision suivie par cette approche pour l'introduction des variables est basée sur leur contribution à l'amélioration du modèle. Les variables pour lesquelles le rapport F de Fischer dépasse le seuil de tolérance d'introduction de 0.1, sont introduites. Sur la base du test t de Student, seules les variables significatives au niveau 5 % ont été retenues. Le modèle finale correspond à celui dont l'ajout d'une autre variable n'est plus significatif (stabilisation de la valeur de R^2). Le modèle statistique de prédiction en fonction des variables explicatives est un modèle linéaire qui s'écrit comme suit :

$$P = \sum_{j=1}^R (a_j \times V_{pj}) + C + e$$

P : paramètre climatique (variable dépendante ; $\sum_{j=1}^R (a_j \times V_{pj}) + C$) : Composante déterministe, avec j indice des variables prédictives significatives variant de 1 à r , r étant le nombre de variables introduites, a_j

coefficient de régression de la variable prédictive retenue d'ordre j , V_{pj} variable prédictive retenue en ordre j , C constante ; $e(x, y)$ erreur d'ajustement (résidu) - c'est sur ce résidu que portera l'interpolation.

L'évaluation de la précision des cartes obtenues a été entreprise, d'une part à l'aide du coefficient de corrélation (R) et d'autre part, grâce aux deux critères statistiques suivants : l'erreur absolue (EMA) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) dont les formules s'écrivent comme suit :

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^1 |P_i - O_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^1 (P_i - O_i)^2}$$

Où : N : nombre d'observations, F : degrés de liberté, O : valeurs observées, P : valeurs prédites.

Vu le nombre relativement limité d'observations disponibles, le calcul des critères de validation EMA et RMSE a porté seulement sur les Pmoy et les Tmoy. Ainsi, 15 (soit 15% du nombre total) et 8 (soit 30% du nombre total) observations ont été réservées, respectivement, pour les Pmoy et les Tmoy afin d'estimer la précision des modèles de régression avant et après l'ajout des résidus. Pour cette validation indépendante, les échantillons de validation ont été choisis au hasard parmi l'ensemble des stations.

Les données climatiques

Les données pluviométriques exploitées sont issues essentiellement de la base de données élaborée en 2005 et qui a servi pour l'Etude d'Actualisation du Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau (PDAIRE) des Bassins Loukkos, Tangérois et Côtiers Méditerranéens. Ces données proviennent de différentes stations installées dans la région, dont la gestion est assurée séparément par les départements suivants : l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos, le Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification, le Ministère de l'Agriculture et de la pêche Maritime. Les données de température ont été puisées des travaux de Michalet (1991).

Au total, 109 stations ont été considérées (figure 1) : 106 stations comprennent des données pluviométriques, 25 comportent des Tmoy et 24 stations incluent les données de Tmax et Tmin. 10 stations en dehors de la limite de la zone d'étude (partie est et sud) ont été prises en compte afin de ne pas manquer de précision au niveau des zones périphériques. Les valeurs des paramètres climatiques concernent la période antérieure à 2000 et sont recueillies sur une période moyenne de 40 ans avec un minimum de 15 ans

et un maximum de 62 ans.

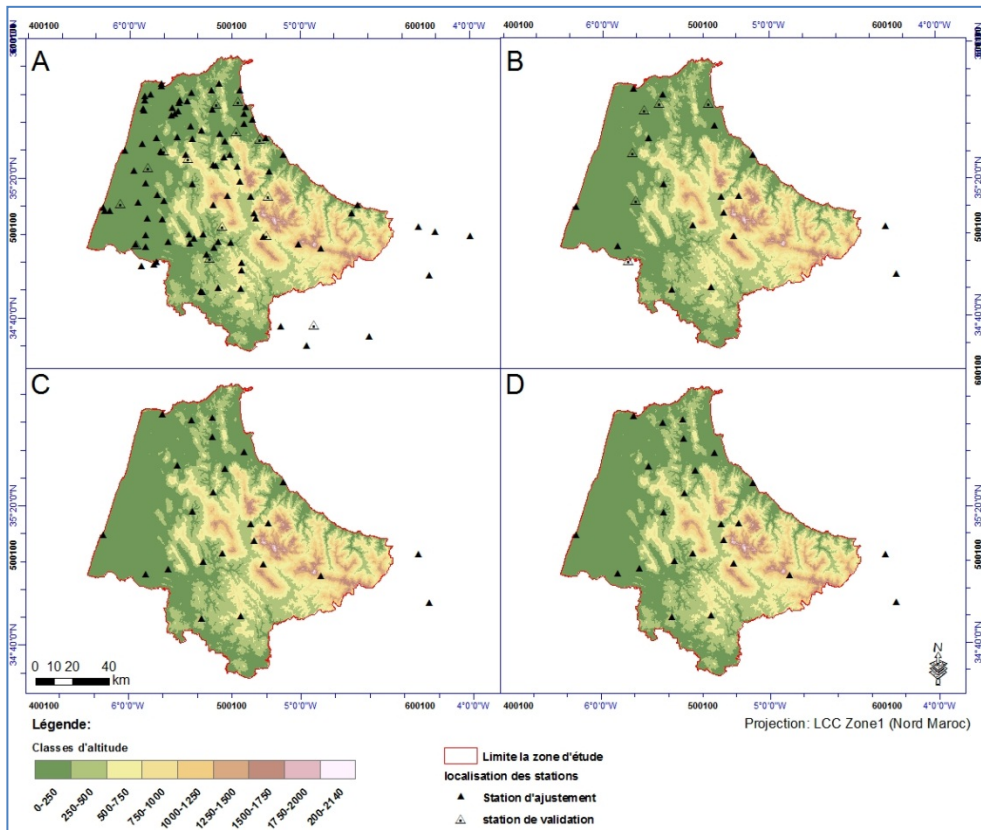


Figure 1. Localisation des stations météorologiques sur le MNT classifié. (A) stations de Pmoy, (B) stations de Tmoy, (C) stations de Tmax, (D) stations de Tmin.

Les variables physiographiques

À l'exception des coordonnées cartographiques des stations et des couches relatives aux distances par rapport à la Mer Méditerranée et à l'Océan Atlantique, toutes les variables explicatives retenues ont été extraites du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone. Les définitions et les procédés de génération de ces variables sont indiqués sur le tableau 1. La spatialisation de certaines de ces variables est illustrée dans la figure 2.

La projection Lambert Conique Conforme LCC (zone1, système géodésique Merchich) utilisée au Nord du Maroc a été adoptée pour l'ensemble des couches (vectorielles et rasters) exploitées et générées dans ce travail. Le MNT utilisé a été généré par une digitalisation des courbes de niveau sur des cartes topographiques à l'échelle de 1/50.000 et a été reproduit sous forme raster à une résolution de 50 m.

Tableau 1. Variables physiographiques.

| Code | Variable | Unité | Origine |
|------------------------|--|-------------------|--|
| <i>X</i> | Longitude | mètres | Terrain (GPS) |
| <i>Y</i> | Latitude | mètres | Terrain (GPS) |
| <i>A</i> | Altitude | mètres | MNT (outil ArcInfo : Zonal Statistics) |
| <i>A_i</i> | Altitude moyenne sur un cercle de rayon <i>i</i> (<i>i</i> =1, 2, 3, 4, 5,10 et 20 km) | mètres | MNT (outil ArcInfo : Focalmean) |
| <i>ΔA_{ij}</i> | Différence maximale d'altitude dans un secteur de rayon <i>i</i> (<i>i</i> =1, 2, 3, 4, 5,10 et 20 km) et d'orientation <i>j</i> (N, NE, E, SE, S, SW, W et NW) | mètres | MNT (outils ArcInfo : Focal Statistics, wedge) |
| <i>P_i</i> | Pente moyenne sur un cercle de rayon <i>i</i> (<i>i</i> =1, 2, 3, 4, 5,10 et 20 km) | Degrés | MNT (outils ArcInfo : Slope, Focalmean) |
| <i>O_i</i> | Orientation géographique moyenne sur un cercle de rayon (1, 2, 3, 4, 5,10 et 20 km) | Degrés | MNT (outils ArcInfo : Aspect, Focalmean) |
| <i>D_m</i> | Distance d'éloignement de la Mer Méditerranée | mètres | Outil ArcInfo : Distance Euclidéenne |
| <i>D_a</i> | Distance d'éloignement de l'Océan Atlantique | mètres | Outil ArcInfo : Distance Euclidéenne |
| <i>C</i> | Courbure du terrain (0 : surface plane, courbure positive : surface convexe, courbure négative : surface concave) | sans | MNT (outil ArcInfo : curvature) |
| <i>I</i> | Insolation ou radiation solaire | WH/m ² | MNT (outil ArcInfo : AreaSolarRadiation) |

La courbure et la radiation solaire ont été introduites seulement pour la modélisation de la distribution des paramètres thermiques (*T_{moy}*, *T_{max}* et *T_{min}*).

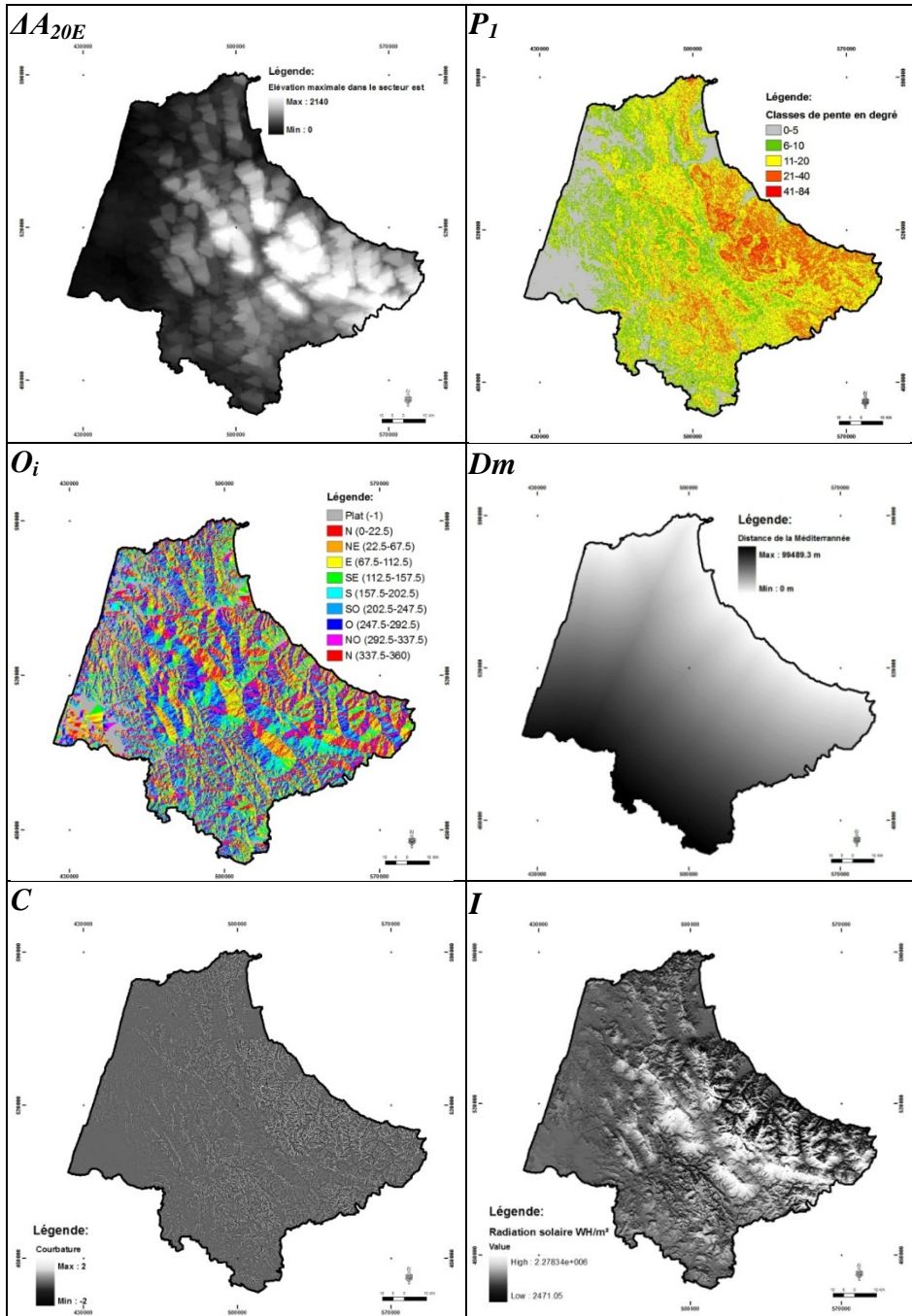


Figure 2 : Cartes illustrant certaines variables physiographiques (*AA20E* : Maximum d'altitude dans un secteur de rayon de 20 km et d'orientation est, *P1* : Pente moyenne sur un cercle de rayon de 1km (classée), *Oi* : Orientation géographique moyenne sur un cercle de rayon de 1km (classée), *Dm* : Distance de la Mer Méditerranée, *C* : Courbure et *I* : Carte de la radiation solaire).

Discussion des modèles statistiques obtenus

Les modèles finals obtenus pour chaque variable, la part de la variance expliquée par le modèle, le test de signification du coefficient de corrélation multiple et l'erreur standard d'estimation sont reportés dans le tableau 2. Pour toutes les variables analysées, la part de la variance expliquée par les modèles relatifs à chaque élément climatique (R^2 ajusté) est très importante. Elle est de 95% pour les T_{moy} , 74% pour les P_{moy} , 70% pour les T_{min} et 53% pour les T_{max} . Tous les modèles sont significatifs ($p < 0,05$). Ce qui nous laisse conclure que les modèles développés sont satisfaisants.

Tableau 2. Les modèles d'estimation des variables climatiques retenus

| Variables indépendantes | Variables dépendantes | | | |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | P | T | m | M |
| (Constante) | 1242,44 | -14,37 | 7,99 | 29,52 |
| A | 0,212 | | -0,004 | |
| X | -0,003 | | | |
| O_{20} | 6,217 | 0,031 | | |
| ΔA_{20NE} | -0,146 | | | |
| ΔA_{10SE} | 0,201 | | | |
| ΔA_{2NE} | -0,559 | | | |
| ΔA_{1E} | 0,786 | | | |
| D_m | | $6,47 \cdot 10^{-5}$ | $-3,28 \cdot 10^{-5}$ | $8,21 \cdot 10^{-5}$ |
| C | | | -2,37 | |
| ΔA_{3N} | | -0,003 | | |
| Y | | $4,72 \cdot 10^{-5}$ | | |
| D_a | | $1,85 \cdot 10^{-5}$ | | |
| R | 0,87 | 0,98 | 0,86 | 0,74 |
| R² | 0,76 | 0,97 | 0,74 | 0,55 |
| R² ajusté | 0,74 | 0,95 | 0,70 | 0,53 |
| F | 8,65 | 13,046 | 5,546 | 27,32 |
| p | 0,004 | 0,004 | 0,029 | 0,000 |
| ESEabs | 126,69 | 0,242 | 1,11 | 1,96 |
| N | 95 | 17 | 24 | 24 |

Les équations des modèles peuvent être écrites comme suit :

$$P_{moy} = 1242,44 + (0,21 \cdot A + 6,22 \cdot O_{20} + 0,78 \cdot \Delta A_{1E} + 0,20 \cdot \Delta A_{10SE}) - (0,56 \cdot \Delta A_{2NE} + 0,15 \cdot \Delta A_{20NE} + 0,003 \cdot X)$$

$$T_{moy} = -14,37 - 0,003 \cdot \Delta A_{3N} + (0,031 \cdot O_{20} + 6,47 \cdot 10^{-5} \cdot D_m + 4,72 \cdot 10^{-5} \cdot Y + 1,85 \cdot 10^{-5} \cdot D_a)$$

$$T_{min} = 7,99 - (0,004 \cdot A + 0,00003 \cdot D_m + 2,37 \cdot C)$$

$$T_{max} = 29,527 + 8,21 \cdot 10^{-5} \cdot D_m$$

Le modèle de distribution des précipitations moyennes annuelles montre que l'altitude, l'orientation moyenne des versants sur une vaste étendue (20km de rayon), les barrières sud-est et est contribuent positivement à l'augmentation des quantités d'eaux reçues annuellement. Les précipitations augmentent de l'ordre de 21,2mm/100m en montant en altitude ; ce gradient est légèrement inférieur à la valeur minimale qui est de 25mm/100m obtenue par M'hirit (1982). À l'échelle du territoire étudié, la

moyenne des expositions dans un rayon de 20km sont comprises entre 100° (exposition Est) et 188° (exposition Sud), cette dernière exposition concerne 75% de son étendue globale ; au sein de cet intervalle, l'augmentation des valeurs moyennes des expositions est accompagnée d'une hausse importante des précipitations évaluée à plus de 6.21mm/°. Par contre, la longitude (X), les barrières du côté nord-est font diminuer les précipitations au-delà de 2km. L'importance des perturbations atmosphériques provenant de l'Atlantique est confirmée par la diminution de Pmoy en fonction de la longitude de l'ouest vers l'est (3mm/km). Contrairement aux barrières nord-est, le modèle montre que les zones situées principalement à 1km de l'ouest et moindrement à 10km du nord-ouest des sommets reçoivent plus de précipitation. Ceci est expliqué par l'effet de *foehn* qui est un phénomène météorologique qui se crée lors de la rencontre de la circulation atmosphérique (un vent dominant) et d'une chaîne montagneuse disposée perpendiculairement. En effet, pour franchir les chaînes rifaines, le vent atlantique humide (soufflant du côté nord-ouest, ouest et sud-ouest (figure 3) s'élève en suivant les façades ouest et sud-ouest des crêtes numidiennes et de la chaîne calcaire (versants au vent) et il se refroidit selon le gradient adiabatique sec. A force de se refroidir, l'air finit par se saturer en humidité qui tombe sous forme de pluie. Après le passage des crêtes, l'air asséché se remet à descendre et subit un effet inverse. Il se réchauffe alors et le reste de l'humidité condensée commence à se réévaporer en absorbant de la chaleur. Lorsqu'il descend, l'air se comprime (puisque la pression augmente vers le bas) et donc sa température augmente par compression adiabatique selon le taux adiabatique sec. Au final, le vent arrive plus chaud et plus sec du côté est et nord-est (versants sous vent) des chaînes montagneuses ce qui rend de la frange méditerranéenne la zone la plus sèche dans la région. Cette sécheresse s'accroît au fur et à mesure qu'on se déplace vers l'est, le long de la côte.

Le modèle montre donc que les précipitations dominantes proviennent de l'océan atlantique et diminuent progressivement en fonction de la continentalité. Cette chute est généreusement compensée dans les hautes altitudes au niveau des versants ouest sur un rayon de 1km autour des sommets. Les pluies abondent également mais un peu moindre dans les versants nord-ouest et se font sentir à 10km avant d'atteindre les pics montagneux.

La distance par rapport à la méditerranée influence les trois paramètres de la température (Tmoy, Tmax et Tmin). Elle constitue l'unique variable explicative de la variabilité de la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (Tmax). Ces maxima extrêmes correspondent aux très fortes chaleurs qui se produisent lorsque le vent d'est « le chergui » apporte dans les régions atlantiques de l'air saharien dont la

température est très chaude (Noin, 1963). En s'éloignant de la Méditerranée, la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (Tmax) augmente de 1°C/12km, ceci montre que le passage de ce vent au-dessus de la Méditerranée avant d'atteindre la zone d'étude semble lui atténuer son pouvoir calorifique desséchant au nord et au niveau des façades méditerranéennes de la zone d'étude. Les plaines atlantiques, les collines pré-rifaines et les versants rifains méridionaux au sud-ouest de l'aire d'étude sont surtout affectés par les vents d'est qui traversent le couloir de Taza entre le Rif central et le Moyen Atlas oriental.

L'éloignement de la Méditerranée se traduit également par une augmentation de la température moyenne annuelle (Tmoy) de 1°C/15 km et une diminution de la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (Tmin) de 1°C/30km. La Tmoy augmente également de 1°C/54km avec l'éloignement de l'océan Atlantique, de 1°C/21km avec la latitude et de 0.031°C/° avec l'orientation moyenne dans un rayon de 20km. Les barrières du côté nord interviennent localement pour abaisser la Tmoy de 0,3°C/100m sur une distance de 3 km, cet effet peut être attribué au froid que peuvent apporter les masses d'air venant du nord qui se refroidissent en montant les sommets avant de redescendre et affecter les secteurs au sud.

En plus de l'éloignement de la Méditerranée, la courbure et l'altitude agissent négativement sur la Tmin ; l'altitude fait diminuer la Tmin de 0,4°C/100m.

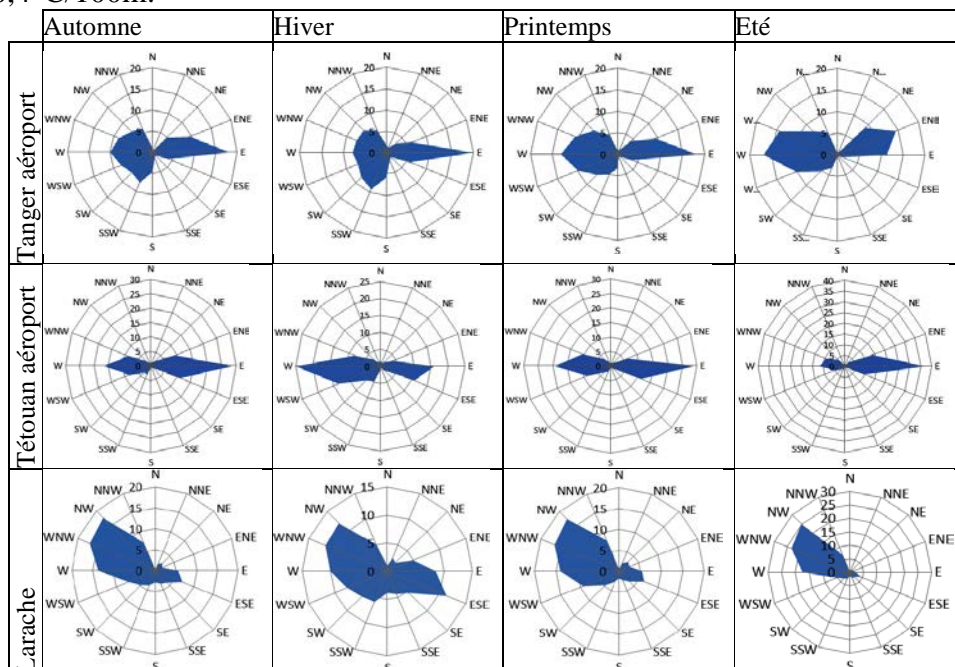


Figure 3. Roses des vents dominants à Tanger (2001-2014), à Tétouan (2002-2014) et à Larache (2005 - 2014) (d'après les données de windfinder 2014, <http://fr.windfinder.com/windstatistics>).

Pour les trois stations, on constate un courant alternatif constitué d'un côté par les vents soufflant du nord-ouest, ouest et sud-ouest, influencés par l'océan atlantique et d'un autre côté par les vents d'est, influencés en partie par la Méditerranée. À Tétouan, les vents sont canalisés par les reliefs (dorsale calcaire) et paraissent tous venus de la direction ouest ou est. Loin de l'influence du détroit de Gibraltar (station de Tanger) et du relief (station de Tétouan), les directions des vents à Larache reflètent la situation de mouvement d'air dans la majorité du territoire de la région.

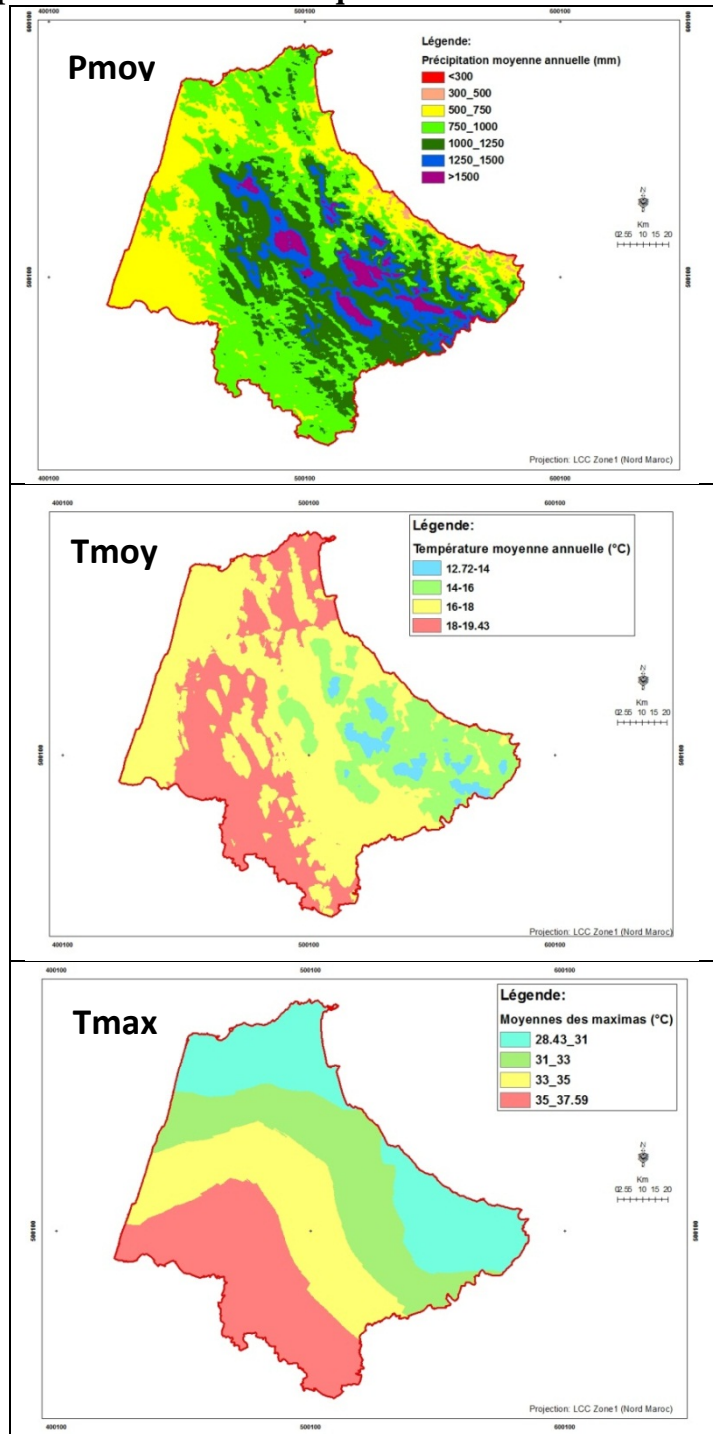
Validation des modèles statistiques

En plus du coefficient de corrélation mentionné dans le tableau 2, l'erreur absolue (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont utilisées pour tester la précision des cartes obtenues. Ces critères statistiques servent pour déterminer l'erreur entre les prédictions du modèle et les données réelles enregistrées aux stations météorologiques. En exploitant dans un premier temps uniquement la composante déterministe des modèles statistiques, les résultats de la validation pour la précipitation moyenne annuelle, montrent que la précision globale donnée respectivement par MAE et RMSE est de 3,84mm et 168,33mm. Tandis que pour la température moyenne annuelle, la précision est de 0,26°C pour MAE et de 0,71°C pour RMSE.

Si on compare les résultats obtenus par les composantes déterministes des modèles aux résultats obtenus après introduction de la composante stochastique, on remarque qu'il y a une nette amélioration surtout pour les précipitations moyennes annuelles. Ainsi, pour Pmoy, l'erreur absolue (MAE) est passée de 3,84 à 2,99°C alors que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) a baissé de 168,33 à 5,96 mm. Quant à la Tmoy, l'amélioration est très faible à presque nulle.

À titre comparatif, la variance expliquée par les modèles de régression finaux en Arizona et au Nouveau Mexique a montré pour la température un coefficient $R^2 = 0,98$ et une RMSE = 0,74°C, alors que pour les précipitations le $R^2 = 0,63$ et la RMSE = 27mm (Brown & Comrie, 2002). En Italie, le modèle développé par Claps et al. (2008) relatif à la distribution de la température moyenne annuelle explique 92% de la variance et a produit une erreur-type RMSE de 0,89°C. Dans la vallée moyenne de l'Èbre en Espagne, la précision du modèle final de la distribution de la température moyenne annuelle a donné une RMSE de 0,62°C avec $R^2 = 74\%$, tandis que le modèle prédisant les précipitations moyennes annuelles a produit une RMSE = 28,2mm avec un $R^2 = 95\%$ (Vicente-Serrano et al., 2003). Ninyerola (2007), en cartographiant la distribution des précipitations annuelles dans la péninsule ibérique, a obtenu une RMSE = 137,8mm.

Cartographie des facteurs climatiques



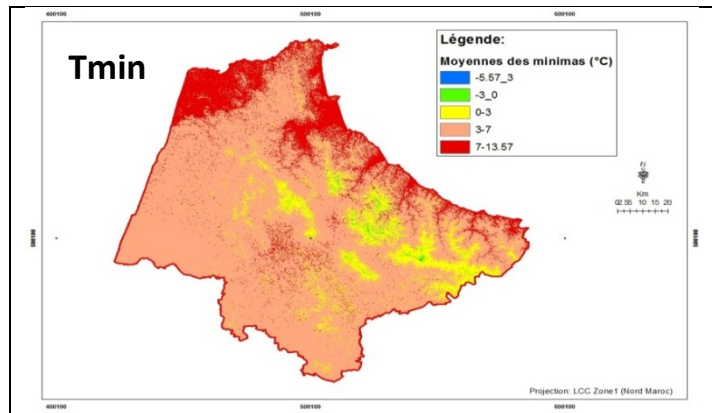


Figure 4. Distribution spatiale des facteurs bioclimatiques dans le Rif occidental (Pmoy : précipitation moyennes annuelles, Tmoy: températures moyennes annuelles, Tmax : moyennes des températures maximales du mois le plus chaud, Tmin : moyennes des températures minimales du mois le plus froid).

Conclusion

Dans notre étude, nous avons généré des cartes de distribution spatiale des principaux paramètres bioclimatiques dans la région Tanger-Tétouan. Les facteurs pris en considération sont ceux utilisés habituellement comme descripteurs écologiques de la distribution des espèces, ils englobent les précipitations moyennes annuelles (Pmoy), les températures moyennes annuelles (Tmoy), les moyennes des minimas des températures du moins le plus froid (Tmin) et les moyennes des maximas du mois le plus chaud (Tmax). La spatialisation a été obtenue à travers la construction des modèles statistiques permettant d'estimer les moyennes desdits facteurs en fonction des variables topographiques et géographiques.

L'approche adoptée a permis de mieux comprendre les processus provoquant la variabilité des paramètres climatiques à l'échelle de la zone d'étude. Globalement, les résultats obtenus ont confirmé et apporté plus de précision aux constatations déjà faites sur le climat de la région. En effet, les précipitations moyennes annuelles s'avèrent plus influencés par l'altitude et les barrières orientées à l'opposé des apports provenant de l'Atlantique. Par contre, les températures moyennes annuelles semblent influencées conjointement par les facteurs liées à la continentalité (éloignement de la Méditerranée et de l'Atlantique) et à l'irrégularité topographique. L'influence méditerranéenne affecte considérablement les minimas et les maximas mais avec de profondes modifications induites par la topographie (altitude et concavité) sur les minimas.

Les cartes élaborées sont d'une grande importance pour mener des études sur la prédiction des habitats des espèces forestières, comme elles peuvent être utilisées pour évaluer l'impact des changements climatiques sur leur répartition.

References:

- Agnew, M.D. & Palutikof, J.P. (2000). GIS-based construction of base line climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Clim Res* 14:115–127.
- Angot, A. (1906). Étude sur le régime pluviométrique de la Méditerranée. *C. R. Congr. Soc. Sav. Paris* : 120-134.
- Anonyme (2005). l'Étude d'Actualisation du Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau des Bassins Loukkos, Tangérois et Côtiers Méditerranéens (PDAIR). Agence du Bassin Hydraulique Loukkos. 2004-2005.
- Assaba, M. & Laborde, J.-P. (2000). La prise en compte du relief dans l'estimation des pluies mensuelles : le cas de la Corse. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13, pp. 149-157.
- Bagnouls, F. & Gaussen, H. (1953). Saison sèche et indice xérothermique. *Bull Soc. Hist. Toulouse*, 88 (3-4) : 193-239.
- Benabid, A. (1982). Etudes phytoécologique, biogéographique et dynamique des associations et séries sylvatiques du Rif occidental (Maroc). Thèse Doctorat Es-Sciences, Faculté Sciences et Techniques St-Jérôme-Marseille. 199 p+Annexes.
- Brown, DP, Comrie, AC (2002). Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico, USA. *Clim Res* 22:115–128.
- Benichou, P. & Le Breton, O. (1987). Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 9 : 23-34.
- Carrega, P. & Garcia, E. (2000). Les fortes précipitations quotidiennes en Toscane et leur cartographie. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13, pp. 169-180.
- Carrega, P. (1994). Topoclimatologie et habitat, Analyse spatiale et appliquée. Thèse de doctorat de l'Université de Nice-Sophia Antipolis, Rev. Géogr. du Laboratoire d'Analyse Spatiale Raoul Blanchard, 408 p.
- Cornet, Y., Fitschy, C., Gobbato, O. & Erpicum, M. (2005). Modélisation de la distribution spatiale des précipitations en Sicile. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 46, 11-26
- Daget, Ph. (1968). Quelques remarques sur le degré de continentalité des climats de la région holarctique. *C.E.P.E. - C.N.R.S., Montpellier*, 12 p.
- Edwards, Ka (1972). Estimating areal rainfall by fitting surfaces to irregularly spaced data. In: *Proc Int Symp Distribution of Precipitation in Mountainous Areas, Vol 2. World Meteorological Organisation, Geneva*, p 565–587.
- El Gharbaoui, M. (1981). La Terre et l'homme dans la Péninsule Tingitane. Etude sur l'homme et le milieu naturel dans le Rif occidental. *Trav. Inst. Se, Serie Géologie et Géographie physique*, n° 15, 439p.

- EL Hairech, T. (2011). E-AGRI Training Workshop: Crop yield forecasting based on remote sensing 12-14 October 2011, Rabat, Morocco.
- FAO (2011). 'Modelling System for Agricultural Impacts of Climate Change (MOSAICC)'. URL: [http:// www.fao.org/climatechange/ mosaic /en/](http://www.fao.org/climatechange/mosaic/en/).
- Hargy, VT. (1997). Objectively mapping accumulated temperature for Ireland. *Int J Climatol* 17:909–927.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. & Jarvis, A. (2005). Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology*, vol. 25.
- Izard, M., Casanova, H., Devau, B. & Pautou, G., 1985.- Continentalité et notion de zone interne dans les Pyrénées. *Acta oecol. Oecol. Gen.*, Paris, 6, (4) : 317-344.
- Mackay, G.A. (1972). Précipitation. Manuel des principes d'hydrologie. Comité national canadien de la décennie hydrologique internationale, Chap. 2 Ottawa, Canada, 113 pp.
- Maurer, G. (1968). Les montagnes du Rif central. Etude géomorphologique. *Trav. Inst. Sc. Chérif.*, Rabat, Ser. Géol. et Géogr. Phys., 14, 500 p.
- M'hirit, O. (1982). Etude écologique et forestière des cédraies du Rif marocain. *Ann. Rech. For.*, T.22, Rabat, Maroc, 502 p.
- Michalet, R. (1991). Une approche synthétique biopédoclimatique des montagnes méditerranéennes: exemple du Maroc septentrional. Thèse Doct., Univ. Joseph Fourier, Grenoble I, France.
- Ninyerola, M., Pons, X., Roure, JM. (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *Int J Climatol* 20:1823–1841.
- Noin, D. (1963). Types de temps d'été au Maroc. *Annales de géographie*, 389, 1-12.
- Peyre, C. (1979). Recherches sur l'étagement de la végétation dans le massif du Bou Iblane (Moyen-Atlas oriental, Maroc). Thèse 3eme Cycle, Univ. Droit, Econ., Sci, Aix-Marseille III, St-Jerome, 149 p.
- Peyre, C. (1983). Étagement de la végétation et gradients climatiques dans le système atlasique marocain. Le bassin de l'Oued Rdat et le versant sud de l'Atlas au méridien du Tizi N'Tichka. *Bull. Fac. Sci. Marrakech, sect. Sci. Vie*, 2 : 87-139.
- Sebbar, A., Fougrach, H., Hsain, M., Saloui, A., Badri, W. (2011) : Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004). *Sécheresse*, 22, 139-48.
- Sebbar, A., Fougrach, H., Hsain, M., Saloui, A., Badri, W. (2013): carte des précipitations annuelles au Maroc (1935/2006). Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie, cotonou 2013, 7 p.