Geo-Eco-Trop., 2020, 44, 2 : 293-301

Quantification de la pluviométrie moyenne annuelle par la méthode de régression linéaire multiple : cas de la province d'Al Hoceima (Maroc)

Quantification of mean annual rainfall by the multiple linear regression method: case of Al Hoceima province (Morocco)

Taoufik BYOU[1], Khalid OBDA[1], Ali TAOUS[1] & Ilias OBDA[2]

ABSTRACT: In the province of Al Hoceima, knowledge of rainfall depth is a major concern for hydrologists and recognized for its effectiveness in many as land use planning and agriculture, etc. The too low density of observation networks is also the main cause of the problem of the estimation rainfall. To remedy these problems, automatic mapping of mean annual precipitation is proposed, using a "multiple linear regression" method taking into account relief (altitude) and geographical position (latitude and longitude). This method has made it possible to determine variations in mean annual rainfall in areas that are poorly served by measuring stations. she highlights local constraints linked to the exposure of the Rif chain in the distribution of rainfall and the presence of significant rainfall volumes of more than 1500mm/year on the summits of this chain.

Keywords: rainfall, orographic effect, spatialization, Al Hoceima

RESUME : Dans la province d'Al Hoceima, la connaissance de la lame d'eau précipitée est une préoccupation majeure pour les hydrologues et reconnue pour son efficacité dans de nombreux domaines tels que l'aménagement du territoire et l'agriculture, etc. La trop faible densité des réseaux d'observation est également la principale cause du problème de l'estimation des précipitations. Pour remédier à ces problèmes, une cartographie automatique des précipitations moyennes annuelles est proposée, par une méthode de « régression linéaire multiple » tenant compte du relief (l'altitude) et la position géographique (la latitude et la longitude). Cette méthode a permis de déterminer les variations de la pluviométrie moyenne annuelle dans les espaces mal desservis en stations de mesure. Elle met en évidence des contraintes locales liées à l'exposition de la chaîne du Rif dans la répartition de la précipitation et la présence des volumes pluviométriques importants de plus de 1500mm/an sur les sommets de cette chaîne.

Mots-clés : pluviométrie, effet orographique, spatialisation, Al Hoceima

INTRODUCTION

Les précipitations dans la province d'Al Hoceima possèdent une grande variabilité spatiale à cause de plusieurs facteurs intervenant dans leur répartition. Au regard de cette hétérogénéité, la province souffre de la déficience du réseau d'observation particulièrement dans les régions montagneuses. Cela rend l'estimation des précipitations un problème difficile et l'hydrométéorologie des bassins versants particulièrement complexe. Pour gérer ce problème, notre but est d'estimer les précipitations moyennes annuelles dans le territoire de la province d'Al Hoceima. Pour cela, le présent article propose une méthode régression linéaire multiple basée sur la corrélation entre les précipitations et les paramètres de relief et de position géographique. L'estimation de la pluviométrie moyenne annuelle sera présentée sous forme de résultats spatialisés.

[1]Département de géographie, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, FLSH Sais, Laboratoire d'Analyses Géo-Environnementales, d'Aménagement et de Développement Durable, Route Imouzzar, Fès, Maroc.
Courriels : taoufikbyou@gmail.com (BYOU Taoufik); khalidobda@yahoo.fr (OBDA Khalid) ; taousali@yahoo.fr (TAOUS Ali)
[2]Département de géologie, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, FST Sais, Laboratoire de Géoressources et Environnement, Route Imouzzar, Fès, Maroc. Courriel : obdailias@gmail.com (OBDA Ilias)

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La province est située au nord du Maroc sur le littoral méditerranéen entre les longitudes 3°45'W- 4°45'W et les latitudes 34°45'N- 35°15'N et s'étend sur une superficie totale de 3550 km^2 (Figure 1). Elle se trouve dans le domaine structurel du Rif formant l'arc Gibraltar. Elle est caractérisée par un relief très accidenté avec des vallées profondes qui donnent un aspect de hautes montagnes. Les plaines alluviales et les dépressions (bassins) sont rares.

Au nord, des basses montagnes surplombent directement la mer Méditerranéenne par une côte rocheuse relativement élevée. Dans la partie sud-ouest de la province, les altitudes fortes atteignent ou dépassent 2000m où le Jbel Tidirhine culmine à 2452m. Les crêtes sont nombreuses, leurs regroupements constituent le massif de Sanhaja dominant des hautes crêtes du grès quartzique (MAURER, 1968). Ainsi leurs orientations coïncident avec l'allure de la chaîne rifaine. Le climat de la province d'Al Hoceima est conditionné par la présence de la chaîne du Rif qui constitue une barrière qui intercepte les perturbations en provenance de l'ouest et du sud-ouest. Les pluies sont localisées particulièrement dans la phase occidentale dans de hautes montagnes de cette chaîne mais, elles sont rares sur les basses montagnes de Bokkoya. La température est influencée par la proximité de la côte méditerranéenne qui atténue l'amplitude thermique et diminuée par les hautes altitudes des montagnes du Rif au NE de la province.

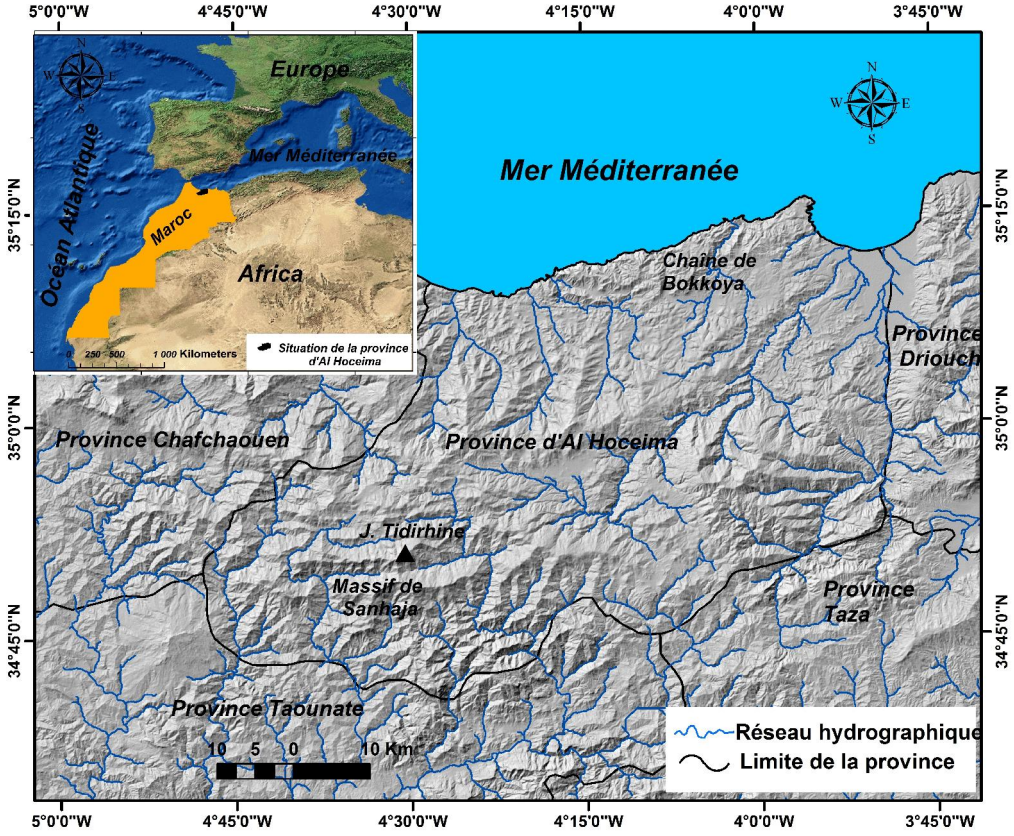

Figure 1 : Situation de la province d'Al Hoceima.

MATERIELS ET METHODE

Collecte et traitement des données de précipitations

La province d'Al Hoceima est équipée de 11 postes pluviométriques gérées par l'agence hydraulique du Loukkos et les centres locaux des travaux agricoles d'Imzouren, Snada, Beniboufrah et Targuiste. La superfiie de la province rapportée au nombre de postes de mesure, en effet, a révélé une densité d'un poste pour 323 km^2. La période sur laquelle est calculée la moyenne interannuelle de chaque poste s'étale sur 34 ans de 1981 à 2015. C'est la seule période commune pour la plupart des stations retenues. Pour les autres stations qui comportent des données manquantes, nous avons eu recours à l'extension de leurs séries après avoir homogénéisé les séries par

la méthode des doubles cumuls et comblé les lacunes mensuelles et annuelles par la méthode de régression (DUBREUIL, 1972 ; MOUHDI, 1993). Malgré le nombre insuffisant des stations pluviométriques, inégalement réparties dans le territoire, nous avons pu réaliser la répartition spatiale de la moyenne annuelle des précipitations, en intégrant les données pluviométriques des stations situées en dehors de la limite de la province d'Al Hoceima afin de compléter l'interpolation de l'information des données moyennes annuelles des précipitations (figure 2).

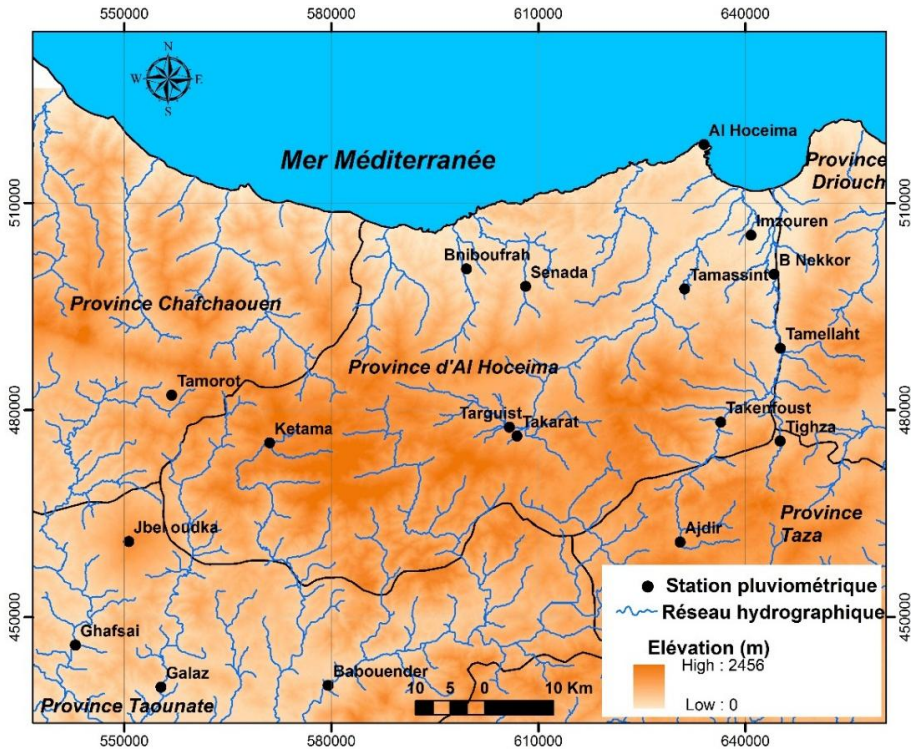

Figure 2 : Localisation des stations pluviométriques.

Méthode cartographique

Les précipitations sont influencées par de nombreux facteurs tels que le relief ou l'altitude, et les facteurs géographiques (la longitude et la latitude) et possèdent de ce fait une grande variabilité spatiale. Dans cette étude, nous avons préparé une très vaste base de données, reposant sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) extrait à partir d'une image satellitaire ASTER GDEM présentée sous un format GeoTIFF (HIRANO *et al*., 2003) et géoréférencée selon un système de projection Marocain Lambert zone 1 (Merchich/Nord Maroc). Le MNT couvre la province d'Al Hoceima avec une résolution de 30 mètres par pixel (Frédéric et al., 2008). Sur chaque maille, l'effet orographique, est considéré comme prépondérant dans l'explication des précipitations en montagne. La pluviométrie en un point de territoire dépend aussi d'une composante régionale. En effet, deux sites situés dans le même niveau topographique ne reçoivent pas la même quantité pluviométrique. Cela est à cause de leur positionnement par rapport aux masses d'air (Le site exposé aux vents humides est pluvieux alors que que le second site est abrité par la chaîne montagneuse). D'où l'intérêt d'intégrer les coordonnées géographiques la longitude, la latitude d'un point quelconque de la zone d'étude (MARAND & ZUMSTEIN.,1990; MOUHDI, 1993 ; ROMIEUX, 2011).

De nombreuses études ont été entreprises pour régionaliser les précipitations par la méthode de la régression linéaire et multiple (ROMIEUX, 2011;CASTELLANI, 1986; MARAND & ZUMSTEIN, 1990; MOUHDI, 1993; TRABOULSI, 2010, FRANÇOIS & HUMBERT, 2000). Le choix de cette méthode permet d'évaluer l'influence de chacun des facteurs choisis pour expliquer la variabilité spatiale de la pluviométrie dans la zone d'étude. Il permet également de mettre en évidence l'effet de ces facteurs sous forme d'une équation expliquant, le mieux possible cette variation. En s'appuyant sur l'hypothèse qui est celle d'une relation linéaire en augmentation de la pluviométrie et des facteurs choisis.

Dans un premier temps, nous avons appliqué la régression linéaire simple entre les modules pluviométriques annuels des stations étudiées et les facteurs géographiques quantifiables responsables de répartition de la pluie dans la province d'Al Hoceima : l'altitude, la latitude et la longitude, et sera retenu, le

facteur qui fournit un coefficient de corrélation plus élevé et une variance résiduelle faible qui sera retenue. Ensuite, une nouvelle régression linéaire multiple a été appliquée entre ces modules pluviométriques et les facteurs retenus (MOUHDI, 1993). Pour chaque maille dans la carte, la pluviométrie estimée est alors (FRANÇOIS & HUMBERT, 2000):

$$P = aX_1 + bX_2 + \cdots + nX_n + C$$

où : P est la pluie estimée ; X_1, X_2,…., Xn sont les variables explicatives ; a, b, …, n sont les coefficients de régression ; C'est la constante de la régression.

Finalement, la grille des précipitations finales n'est que la somme de deux grilles, celle des pluies estimées et celle des résidus (FRANÇOIS & HUMBERT, 2000 ; ROMIEUX, 2011 ; TRABOULSI, 2010 ; GOTTARDI *et al*., 2008). En effet, ces résidus sont spatialisés par krigeage dans une grille identique à celle des précipitations éstimées (JORDAN & MEYLAN, 1986). Il s'agit de la différence entre la valeur observée et la valeur estimée (TRABOULSI, 2010 ; ROMIEUX, 2011):

$$\text{Résidu} = P_{\text{observée}} - P_{\text{estimée}}$$

La figure 3 montre les diférentes étapes de cartographie sous le logiciel Arcgis 10.4. Le maillage préconisé de toutes les cartes des facteurs explicatifs a été fixé à 30*30. Cette dimension a la même taille d'un MNT utilisé dans cette étude. Le traitement statistique des données a été réalisé à l'aide du logiciel SPSS 24.

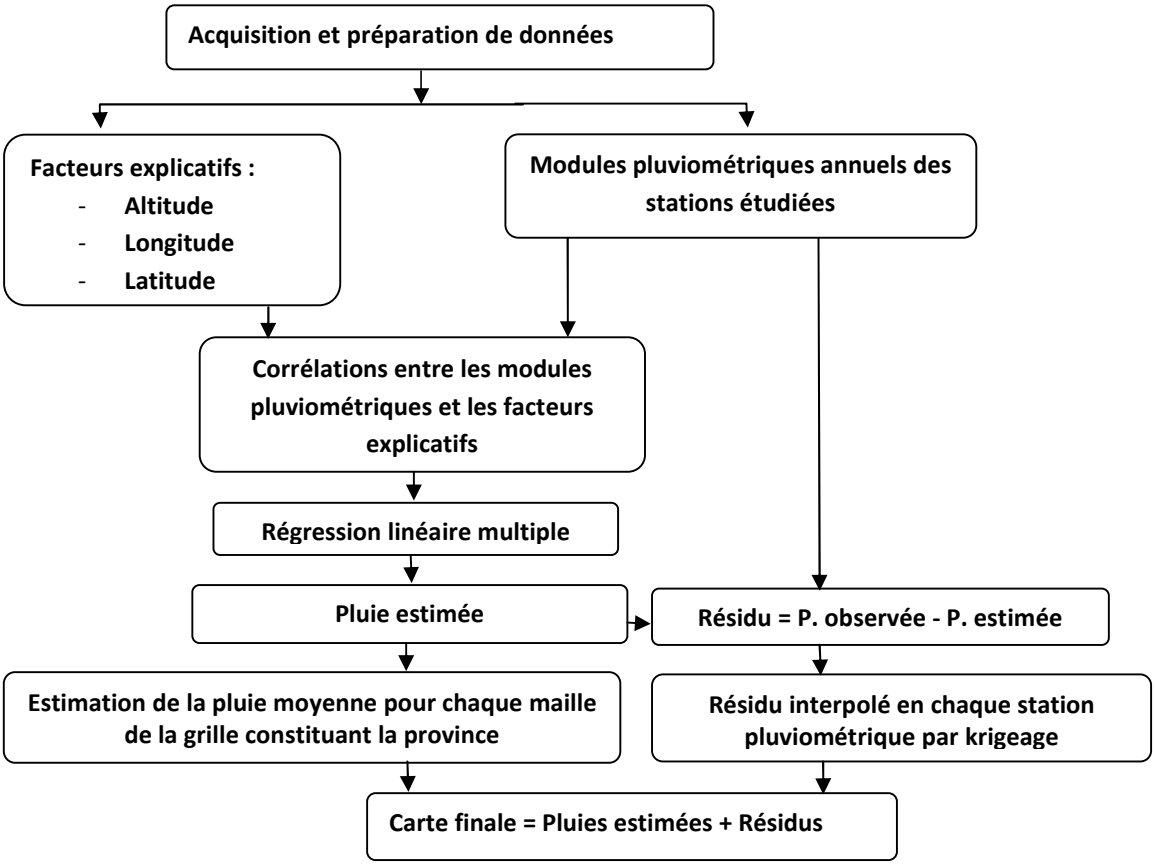

Figure 3 : Schéma des différentes étapes de la cartographie.

RESUTATS ET DISCUSSION

Les résultats de corrélation entre les modules pluviométriques annuels et les facteurs explicatifs sont représentés sur le tableau 1. Les équations des droites de régression pour chacun des facteurs explicatifs ont été calculées. Ainsi, ils ont été contrôlés par des tests de validité. On constate que les corrélations entre les modules pluviométriques annuels et les altitudes puis les longitudes sont assez fortes. La régression linéaire a fourni des coefficients des corrélations élevées 0.71 pour l'altitude qui explique (50%) de la variance spatiale de précipitation et 0.74 pour la longitude qui explique (54%) de la variation spatiale de précipitation. Ainsi, les figures 4 et 5 montrent que les valeurs de pluies annuelles augmentent par l'altitude et diminuent avec la longitude (cordonnées Lambert) ou au l'éloignement de la mer océanique représentant le point d'arrivée des

masses d'air humides. Par contre, La latitude n'explique qu'une très faible variation spatiale des pluies (19%) ce qui indique que l'importance des résidus est très grande (81%) (figure 6). Ces résultats sont vérifiés par le test T de Student et le test F de Fisher Sendecor montrant la qualité des corrélations. Parmi les trois corrélations, seulement celles des latitudes qui peuvent être jugés mauvais (T de Student calculé < T. théorique et F calculé < F théorique).

Tableau 1 : Résultats des corrélations entre le module pluviométrique moyen annuel et les facteurs explicatifs de la variabilité spatiale des pluies.

Facteurs explicatifs	Coefficient de corrélation	Coefficient de détermination	« T » de Student		« F » de Fisher Sendecor		Équation de corrélation
			« T » calculé	« T » théorique	« F » calculé	«F » théorique	
Altitude	0.708	0.501	4.010	2.131	16.082	4.49	Y=0.68*x+222.3
Longitude	0.738	0.544	4.371	2.131	19.107	4.49	Y=-0.009*x+6109.6
Latitude	0.435	0.189	1.93	2.131	3.725	4.49	Y=-0.009*x+4758.3

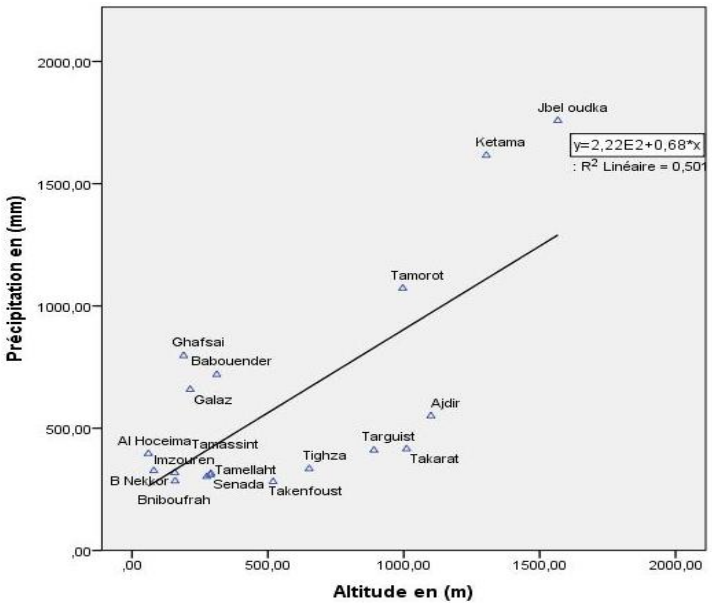

Figure 4 : Corrélation des pluies annuelles et des altitudes (1981-2015).

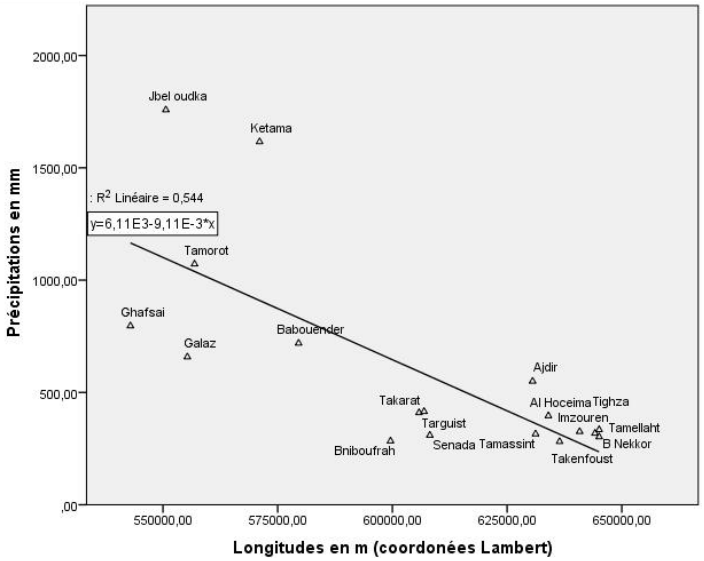

Figure 5 : Corrélation des pluies annuelles et des longitudes (1981-2015).

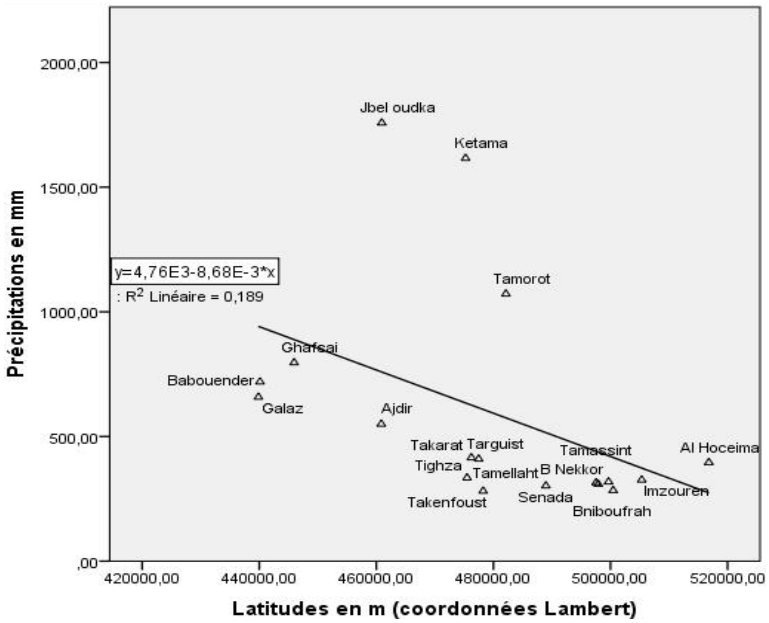

Figure 6 : Corrélation des pluies annuelles et des latitudes (1981-2015).

En résumé, la longitude et l'altitude jouent un rôle important dans l'explication des variabilités spatiales des précipitations moyennes annuelles. Cette hypothèse est confirmée par la régression linéaire multiple appliquée aux modules pluviométriques, d'une part et les altitudes et les longitudes d'autre part. D'après les caractéristiques statistiques représentées dans les tableaux 2 et 3, les tests TOL et VIF montrent qu'aucune colinéarité entre les variables prédictives que ce soit pour la VIF largement supérieure à 0.4 ou pour la TOL supérieure à 0.2. Il apparait aussi que les variables retenues présentent de très bons niveaux de probabilité p (P-value< 0.05). Le reste des statistiques effectuées (tableau 3), montrent que la combinaison avec les deux variables prédictives apporte une amélioration de la qualité de corrélation. Une grande partie de la variance est expliquée en commun par deux facteurs, la longitude et l'altitude : 77.4%. L'autre partie, ce sont les résidus qui représentent la part de la variance non expliquée par le modèle.

L'équation de régression obtenue de la pluie moyenne annuelle estimée est donc :

$$Pmoyenne\ \ estimée = 0.493\ altitude - 0.007\ longitude + 4492.565$$

Tableau 2 : Résultats des coefficients B et des tests statistiques des variables utilisées dans l'équation de régression linéaire multiple

Variables indépendantes ou prédictives	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Signification	Tests de colinéarité	
	B	Erreur standard	Bêta			TOL	VIF
(Constante)	4492,565	1005,998		4,466	0,000		
Altitude	0 ,493	0,126	0,512	3,911	0,001	0,877	1,140
Longitude	-0,007	0,002	-0,558	-4,260	0,001	0,877	1,140

Tableau 3 : Estimation du R-deux tenant compte des facteurs de l'altitude et de la longitude

R	R^2	R² ajusté	Erreur standard d'estimation	Statistiques de variation			
				R² variation	Degré de liberté variation	Degré de liberté 1	Degré de liberté 2
0,880	0,774	0,744	227,757	0,774	25,734	2	15

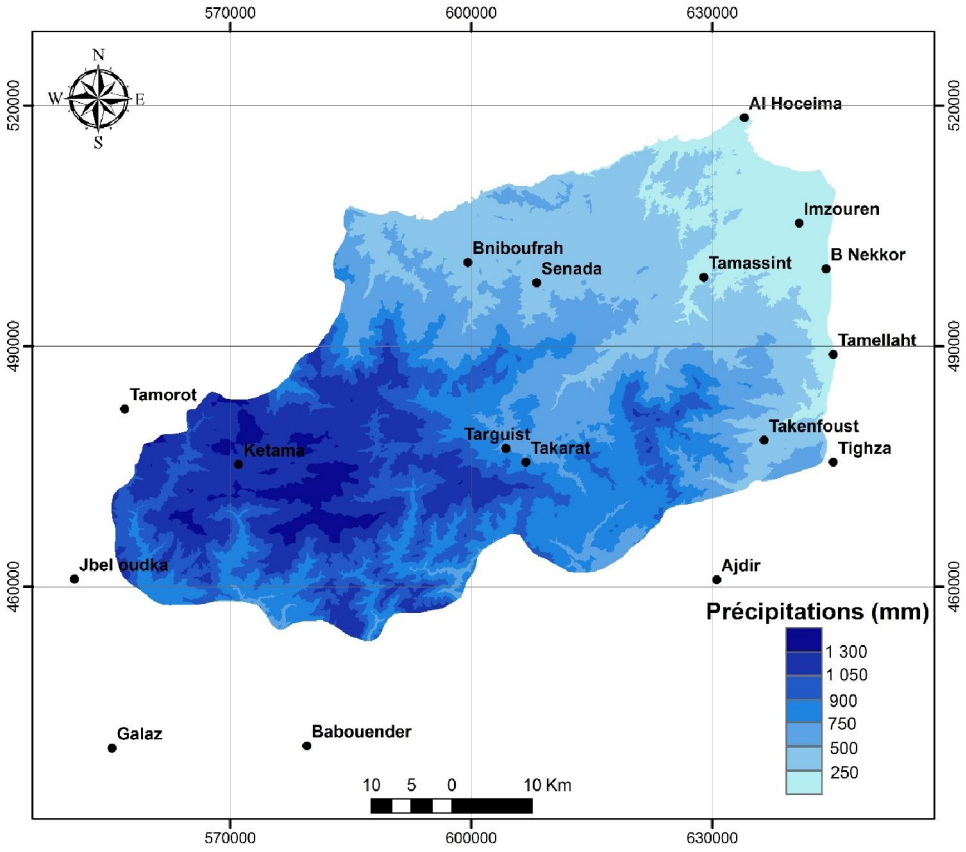

Figure 7 : Carte des pluies estimées selon l'équation de la régression linéaire multiple proposée.

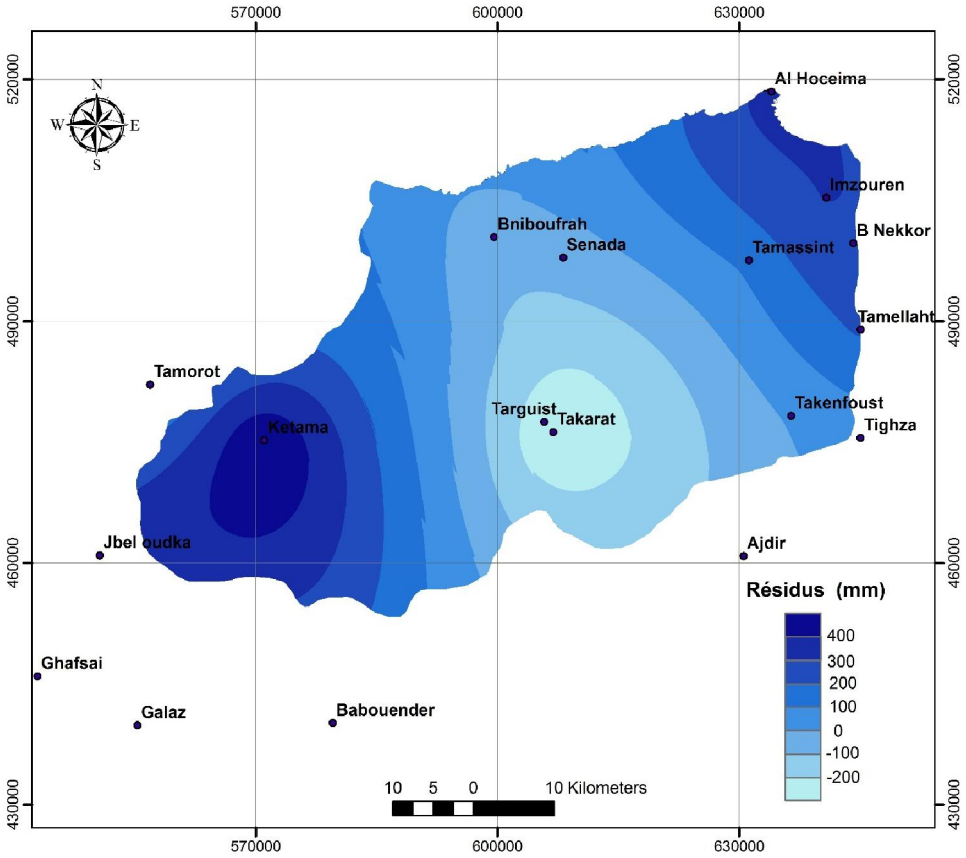

Figure 8 : Répartition spatiale des résidus.

Les résidus positifs dans la région de Ketama indiquent que les précipitations observées sont plus fortes que pourrait laisser supposer la situation altimétrique. Cela est dû principalement à l'élévation de la région et à son orientation et à sa proximité par rapport aux perturbations océaniques. Par contre, les résidus négatifs dans la région de Targuiste signifient que la pluie est plus faible que la normale. C'est l'effet de l'abri qui intervient dans la distribution de la pluviométrie (figure 8).

La carte finale obtenue montre que la répartition géographique des précipitations annuelles est contrôlée par le gradient pluviométrique, qui augmente avec l'altitude et diminue avec l'augmentation de la longitude. De ce fait, on constate également une réelle différenciation dans la répartition géographique des précipitations entre l'est et l'ouest de la province (figure 9).

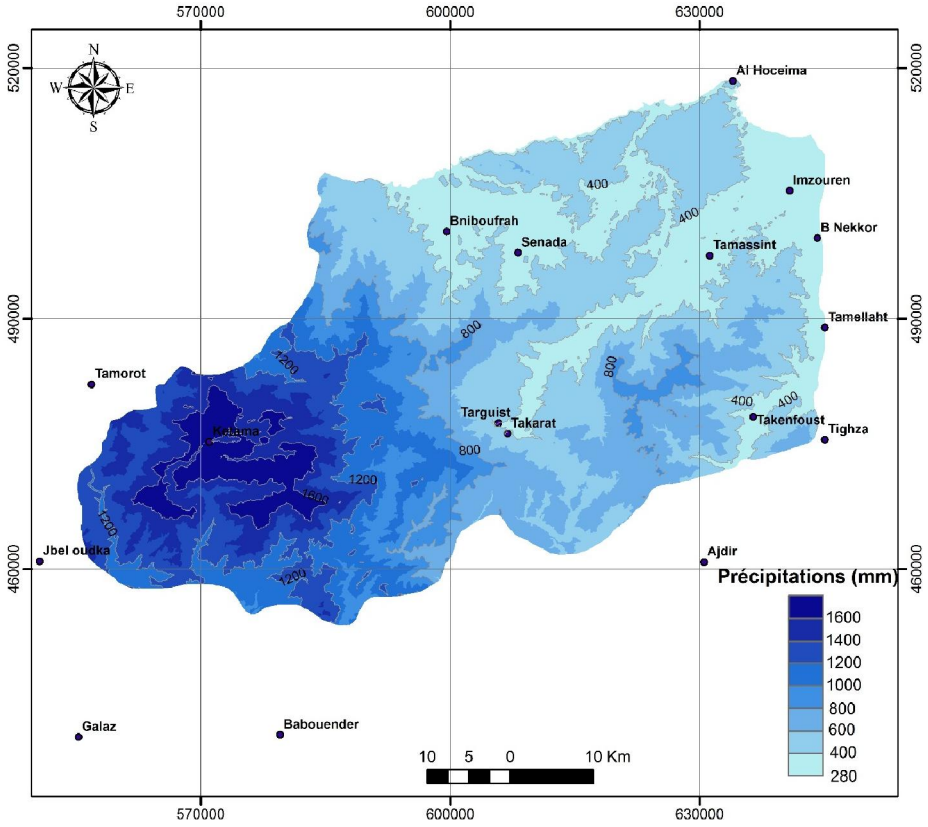

Figure 9: Carte finale de la spatialisation de la pluviométrie moyenne annuelle (1981-2015).

Par la position de la province en longitude, la région ouest de cette province est plus intéressée par les vents pluvieux que celle à l'est. Ainsi, la lame précipitée diminue progressivement à mesure que l'on va vers l'est. Cette diminution est due aussi à la variation de l'altitude de la haute montagne vers la basse montagne.
Les précipitations augmentent rapidement avec l'altitude, notamment sur le massif montagneux Ketama. Sa position par rapport aux perturbations océaniques apparaît sur la carte comme un facteur d'explication important. Ces phénomènes sont dus à l'ascendance des masses d'air qui déclenchent tout d'abord l'apparition des pluies, puis l'augmentation de leur quantité. Cette région reçoit plus de 1000mm de moyenne annuelle. Ces hauteurs s'expliquent par la combinaison de plusieurs facteurs tel que l'altitude, l'exposition et la longitude (la proximité au rivage atlantique) ; en effet le massif de Ketama (1303m) recueille plus de 1616mm. Par contre, les précipitations diminuent brutalement à mesure que l'on va vers le nord-est, en franchissant le massif de Ketama, bien que les altitudes restent relativement élevées, elles n'atteignent que 410 mm à Targuiste (890m), en raison de la situation de ces deux stations qui sont abritées par les hauts massifs montagneux du Rif central. Ainsi, les vents perdent une grande partie de leur humidité par suite d'un effet de foehn descendant.

Au nord de la province, au niveau de la basse chaîne de Bokkoya, la moyenne des précipitations n'atteint pas une hauteur supérieure à 600mm. Ici, l'altitude de la chaîne n'est pas suffisamment élevée pour provoquer une augmentation sensible des précipitations (Al Hoceima 395mm ; Imzouren 326mm). En plus, une nette diminution de la pluviométrie a été constatée, au niveau des dépressions et des vallées abritées, 284mm à Beni Boufrah, 309mm à Snada et B. Nekor 318mm. Ces stations se situent sur des altitudes basses et sont rattachées au domaine du versant méditerranéen, elles se trouvent dans des régions moins arrosées, parce que l'intensité de

la condensation d'origine méditerranéenne à ce niveau est très faible et les perturbations atlantiques ne donnent lieu, sur cette région, qu'à des pluies rares.

CONCLUSION

L'intérêt de cette étude réside dans la cartographie des isohyètes des pluviométries annuelles moyennes de la province d'Al Hoceima. La carte obtenue fait ressortir le rôle important du relief dans la répartition des précipitations puisque celle-ci est similaire en grande partie à la carte du relief, sans oublier le rôle de la longitude (distance de la côte atlantique). Le contraste pluviométrique est bien marqué dans la carte puisqu'entre les postes Ketama et Targuiste, la moyenne annuelle des précipitations est multipliée par 3.7 fois. Cette opposition explique la transformation rapide du paysage géographique tels que : le couvert végétal, les processus géomorphologiques, les ressources en eau, l'urbanisation, etc.

Le modèle d'estimation des précipitations présenté dans cet article a permis de fournir des informations suffisantes liées aux déficiences du réseau d'observation et aux lacunes des données pluvieuses.

Il permet aussi de combler le manque de stations météorologiques qui devraient couvrir suffisamment l'ensemble du territoire de la province. Ainsi, ce modèle permet d'estimer la pluviométrie supérieure à 1500mm qui tombe dans les régions montagneuses de haute altitude qui ne sont pas équipées par des stations pluviométriques, notamment le massif de Ketama.

Les résultats de cette étude peuvent être améliorés si on peut réduire les incertitudes liées à dissymétrie des postes pluviométriques à l'échelle de la province et aux séries pluviométriques courtes. Ainsi, la création de nouveaux postes pluviométriques dans les régions montagneuses devient nécessaire pour préciser les résultats dans le futur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CASTELLANI, C., 1986. Régionalisation des précipitations annuelles par la méthode de la régression linéaire simple : l'exemple des Alpes du Nord. *Revue de Géographie Alpine*, 74, 4 : 393-403.

DUBREUIL, P., 1972. Initiation à l'analyse hydrologique (dix exercices suivis des corrigés), masson et cie orstom, paris, 226p.

FRANÇOIS, D. & HUMBERT, J., 2000. Quantification spatiale des précipitations. Applications au Nord-Est de la France, *Revue Géographique de l'Est*, 40 / 1-2 | 2000. URL : http://journals.openedition.org/rge/4159

GOTTARDI, F., OBLED, C., GAILHARD, J. & PAQUET, E., 2008. Régionalisation des précipitations sur les massifs montagneux Français à L'aide de régressions locales et par type de temps, *Climatologie*, 5 : 7-25. https://doi.org/10.4267/climatologie.647.

HIRANO, A., WELCH, R. & LANG, H., 2003. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 57**:** 356-370.

JORDAN, J.P. & MEYLAN, P., 1986. Estimation spatiale des précipitations dans l'ouest de la Suisse par la méthode du Krigeage 1: 800 000: Bibliothèque Centrale, Lausanne, 7p.

MARAND, C. & ZUMSTEIN, J.F., 1990. La modélisation des précipitations moyennes annuelles appliquée au Massif Vosgien. *Hydrologie continentale*, 5/1 : 29-39

MAURER, G., 1968. Les montages du Rif Central marocain. Etude gémorphologique, Thèse Lettre, Paris, 500p.

MOUHDI, A., 1993. Contribution à l'étude pluvio-hydrologique du bassin-versant de l'oued Mélloulou (Maroc oriental). Thèse de doctorat. Université des sciences et technologies de Lille. 222p.

ROMIEUX, N., 2011. Synthèse et régionalisation des données pluviométriques de la Nouvelle Calédonie. Direction des Affaires Vétérinaires Alimentaires et Rurales, Service de l'eau des statistiques et études rurales, Observatoire de la ressource en eau, Gouvernement de Nouvelle Calédonie, 83p.

TRABOULSI, M., 2010. La pluviométrie moyenne annuelle au Liban : Interpolation et cartographie automatique. Lebanese Science Journal, 11, 2 : 11-25.