

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/318914193>

# Interpolation spatiale des températures mensuelles en Algérie orientale

Article in *La Météorologie* · January 2017

DOI: 10.4267/2042/62459

CITATIONS

2

READS

159

2 authors:



**Laala Ahmed**

Centre universitaire de Mila

10 PUBLICATIONS 7 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Djamel Alatou**

University of Constantine 1

30 PUBLICATIONS 109 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Forest Fire Prevention [View project](#)



dynamique des massifs forestiers de l'Est algérien [View project](#)

# Interpolation spatiale des températures mensuelles en Algérie orientale

## Résumé

L'étude de l'enveloppe thermique des essences forestières de l'Est algérien ne peut pas se satisfaire des seules valeurs ponctuelles offertes par les stations météorologiques, bien que ces dernières soient présentes dans la majorité des wilayas. Dans cette optique, la présente étude vise à reconstituer, sous forme de cartes, le champ thermique de l'Algérie orientale à une échelle très fine (90 m). Les résultats statistiques affirment que la méthode qui combine la régression multiple avec le krigeage est la méthode optimale pour l'interpolation de la température en Algérie orientale à partir des variables explicatives décrivant le relief. Ils nous ont permis aussi d'établir un modèle qui précise, sous la forme d'une équation, la relation entre la température et les facteurs environnementaux.

## Abstract

### Spatial interpolation of monthly temperatures in eastern Algeria

The study of the thermal envelope of tree species of eastern Algeria cannot be conducted with point values provided by weather stations alone, despite these cover the majority of province. In this context, this study aims to reconstruct, in the form of maps, the thermal fields in eastern Algeria at the 90 m scale. The cartographic expression of statistical results shows that the method that combines multiple regression kriging is the optimal method for temperature interpolation in eastern Algeria from the explanatory variables describing the orography. It also allowed us to establish a model that specifies as an equation, the relationship between temperature and environmental factors.

Ahmed Laala, Djamel Alatou

Laboratoire de développement et valorisation des ressources phylogénétiques, Faculté des sciences de la nature et de la vie, Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie

laala\_sami@yahoo.fr

Les études écologiques et particulièrement bioclimatiques souffrent souvent de l'indisponibilité de données climatiques continues dans l'espace. La connaissance de ces données spatiales est pourtant nécessaire pour modéliser les aires climatiques potentielles des grandes essences forestières (Badeau *et al.*, 2004 ; Badeau *et al.*, 2005 ; Huntley *et al.*, 1995 ; Iverson et Prasad, 2002 ; Enquist, 2002) et pour la détermination de la vulnérabilité de ces essences forestières au stress (Bœuf et Gautier, 2009).

La spatialisation des données climatiques et notamment thermiques a fait l'objet de nombreuses études qui testent la fiabilité de diverses méthodes d'interpolation pour plusieurs régions du monde (Joly *et al.*, 2009 ; Benavides *et al.*, 2007 ; Lado *et al.*, 2007 ; Ninyerola *et al.*, 2000 ; Courault et Monestiez, 1999). Nalder et Wein (1998) ont utilisé plusieurs méthodes géostatistiques pour modéliser les températures et les précipitations pour tout le nord-ouest du Canada et cela à partir de 31 stations météorologiques. Ils confirment qu'il n'existe pas de méthode optimale d'interpolation applicable à toutes les régions du monde.

En Algérie, plusieurs travaux ont caractérisé la variabilité spatiale des précipitations (Louamri, 2009 ; Touaibia *et al.*, 2006 ; Touazi et Laborde, 2000 ; Mebarki, 2005 ; Aissani et Laborde, 1983). Par contre, il est difficile de trouver des travaux portants sur la spatialisation du champ thermique. La seule étude est celle de Tabet (2008) qui se base sur une

méthode d'interpolation déterministe, inversement proportionnelle à la distance (*Inverse Distance Weighting* ou IDW), pour la cartographie des températures annuelles et saisonnières de l'Est algérien. L'emploi unique de cette méthode d'interpolation ne convient pas au relief fortement contrasté de l'Est algérien. Il est donc nécessaire de prendre en compte des variables topographiques qui expliquent mieux la variabilité du champ thermique.

Dans ce contexte, la présente étude vise à restituer le champ spatial continu des températures mensuelles en Algérie orientale, à partir des valeurs mesurées ponctuellement en 15 stations météorologiques. La question est donc, d'une part, de savoir quelles sont les variables topographiques les plus explicatives de la variabilité spatiale des températures mensuelles de l'aire d'étude et, d'autre part, de déterminer la méthode d'interpolation qui fournit les meilleures estimations.

## Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est localisée dans la partie nord-est du territoire algérien, entre 34°31'15" et 37°5'24" de latitude Nord et entre 4°19'57" et 8°41'2" de longitude Est (figure 1), englobant 15 wilayas (collectivités publiques territoriales analogues aux départements français) aux caractères géographiques bien différents. Elle est limitée à l'est par la frontière

algéro-tunisienne, à l'ouest par la vallée d'Oued Soummam et les monts des Bibans, au sud par le piémont sud de l'Atlas saharien et au nord par la mer Méditerranée.

## Données et méthodes

Pour déterminer le champ thermique spatial de l'Est algérien, on a utilisé les données thermiques issues des stations météorologiques et les données géographiques spatiales qui déterminent le relief environnant chacune de ces stations.

### Données thermiques

Les données thermiques à notre disposition proviennent des 15 stations météorologiques pour une période de 30 années consécutives (1982-2011). Ces stations fournissent des données thermiques complètes par rapport à d'autres stations qui possèdent des données lacunaires.

Nous sommes conscients que la densité des stations météorologiques est faible compte tenu de l'étendue et de la diversité de la zone d'étude, ce qui peut poser des problèmes statistiques au niveau de la régression et rendre les valeurs interpolées incertaines. Si un plus grand nombre de stations avait été disponible, il aurait été judicieux d'exclure certaines stations de la méthode de régression dans un but d'évaluation.

### Les variables candidates explicatives de la température

Il est connu que les formes topographiques jouent un rôle essentiel dans la structuration spatiale de la température (Geiger *et al.*, 2003). Pour cela, nous avons utilisé le modèle numérique de terrain (MNT) MNTASTER GDEM, à 90 m de résolution, pour dériver les facteurs explicatifs liés au relief. Ce MNT a déjà bénéficié d'une correction de certains artefacts et d'un affinement global grâce à l'utilisation de nouvelles scènes Aster (nouvelles paires stéréoscopiques).

La précision des points du MNT dépend de divers facteurs : hauteur de vol pour les relevés, morphologie du terrain, réflectivité des matériaux... Les incertitudes provoquent l'apparition de bruit local. Pour éliminer le bruit présent dans le MNT, nous avons réalisé un lissage ( $3 \times 3$ ) du relief, en remplaçant chaque altitude réelle par la moyenne calculée entre la valeur d'altitude au niveau de ce nœud et de celles des huit nœuds voisins (figure 2).

Le logiciel ArcGIS9.2 nous a permis d'extraire à partir du MNT, pour chaque pixel de l'Est algérien, les variables explicatives suivantes :

- l'altitude (Alt : en mètres) : c'est l'élévation verticale d'un point par rapport au niveau moyen de la mer ;

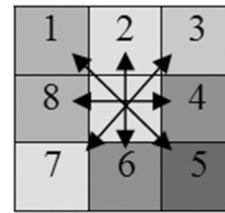


Figure 2. Illustration du lissage sur  $3 \times 3$  cellules réalisé dans le MNT.

- la pente (Pen : en degrés) : c'est la tangente de l'inclinaison entre deux points d'un terrain, les valeurs s'échelonnent théoriquement de 0 à 90° ;
- l'orientation des versants (Exp : en degrés) : pour mieux évaluer l'influence des composantes nord-sud et ouest-est sur la température ;
- la courbure du relief (Cur) qui renseigne sur le contexte topographique dans lequel se situe chaque pixel de l'aire d'étude. C'est la courbure de la surface elle-même et non la courbure d'une ligne formée par l'intersection de la surface avec un plan (figure 3). Une valeur de zéro indique que la surface est plate. Une courbure positive indique que la surface ou bien la pente est convexe (généralement des crêtes et des surfaces de drainage), alors qu'une valeur négative indique que la surface est concave (généralement des creux et des vallées). Quatre autres couches d'information ont été créées pour déterminer :
  - la latitude (Lat) et la longitude (Long) de chaque pixel de la zone d'étude, exprimées en degrés décimaux ;
  - la distance qui sépare chaque pixel de la mer la plus proche (Dis.m), exprimée en mètres ;
  - la distance qui sépare chaque pixel de la forêt la plus proche (Dis.f), exprimée en mètres.

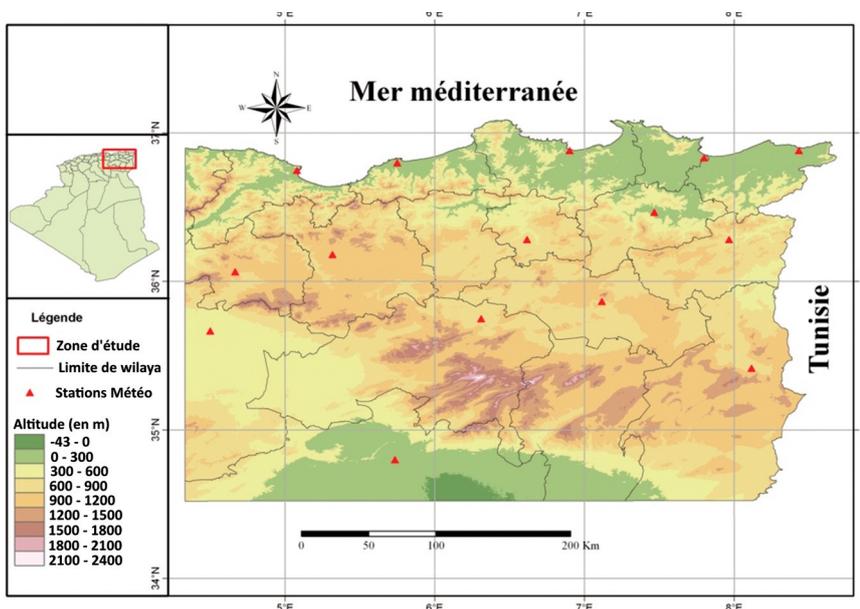


Figure 1. Relief de la zone d'étude et localisation des stations météorologiques. Les 15 stations météorologiques sont indiquées par des triangles rouges.

### Méthode d'interpolation

La méthode d'interpolation suivie dans notre étude est fondée sur une régression multiple entre la variable à expliquer (la température) et les variables explicatives (les variables géospatiales). Elle est complétée par une technique géostatistique (le krigeage) qui permet d'interpoler les résidus (erreurs d'estimation) issus de la régression.

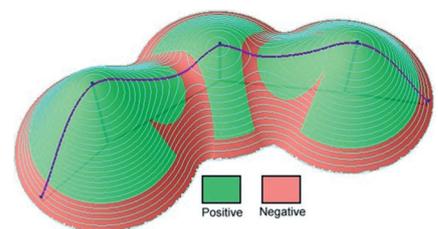


Figure 3. Courbure générale du relief.

Dans un premier temps, on a analysé les corrélations statistiques entre les températures mensuelles et les huit variables candidates qui décrivent les conditions de l'environnement de chaque station météo. Précisons que la colinéarité existant entre des couples de variables dont le coefficient de corrélation  $r$  dépasse 0,7 a été éliminée. Selon Foucart (2006), cette colinéarité statistique peut perturber les estimations des paramètres du modèle.

Les variables retenues après les tests de colinéarité et significatives au seuil de 5 % ont été identifiées et intégrées dans des régressions multiples ascendantes pas à pas (*backward selection*). Pour rappel, il s'agit d'une procédure de retrait progressif des variables jusqu'à ce qu'elles soient toutes significatives à un seuil  $\alpha = 5\%$ .

En régression multiple, il convient de garder un équilibre entre le pouvoir explicatif du modèle (indiqué par un  $R^2$  élevé) et sa simplicité (indiqué par un nombre de variables explicatives aussi petit que possible). Plus le ratio pouvoir explicatif/simplicité est élevé, plus le modèle satisfera le critère de parcimonie. Une mesure de la parcimonie d'un modèle de régression multiple est le  $R^2$  ajusté, aussi noté  $R_a^2$  (Petry, 2003).

Il se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$R_a^2 = -\frac{k-1}{n-k} (1-R^2)$$

où  $R^2$  est le coefficient de détermination,  $k$  le nombre de variable et  $n$  la taille de l'échantillon.

Dans notre cas, l'ensemble des variables significatives qui donne un coefficient  $R^2$  ajusté le plus élevé est retenu comme la combinaison qui fournit le modèle d'interpolation le plus fiable.

L'application du modèle, sous le logiciel ArcGIS9.2, nous a permis de créer des cartes thermiques de l'Est algérien et de calculer l'erreur de modélisation (résidu) qui est défini comme l'écart entre les valeurs thermiques observées et calculées. Ces dernières sont interpolées par la technique de krigeage afin d'obtenir une carte spatiale de résidus. Le krigeage est une technique géostatistique de modélisation spatiale permettant, à partir de données dispersées, d'obtenir une représentation homogène des informations étudiées (Hennequi, 2010). L'étape finale du processus d'estimation consiste à

additionner la valeur du champ thermique résultant de la régression à celle issue de krigeage des résidus.

Tous les traitements statistiques ont été effectués à l'aide du logiciel XLSTAT 2011, alors que la création des cartes et la restitution du champ thermique ont été réalisées au moyen du logiciel ArcGIS9.2.

## La validation du modèle

La validation des résultats obtenus est une étape essentielle post-interpolation. Les estimations réalisées sont validées selon différentes approches : pourcentage de variance expliqué par le modèle de régression multiple, comparaison entre estimation et mesure sur deux échantillons distincts, validation croisée.

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) exprime la part de la variation des températures expliquée par le modèle de régression. Plus ce coefficient est proche de 1, plus il y a une corrélation et meilleur est le modèle. C'est un indicateur de la performance du modèle comme outil de prévision.

Pour valider les modèles obtenus de la régression, nous avons estimé l'erreur de modélisation ou les résidus issus de la régression. C'est la différence entre la température mesurée ponctuellement au niveau des stations météorologiques et la température estimée par la méthode de régression multiple. En fait, la température est sous-estimée si les valeurs des résidus sont nettement négatives, elle est surestimée dans le cas contraire. Les valeurs ponctuelles des résidus ont été interpolées par krigeage afin d'obtenir un champ continu des erreurs d'estimation à l'ensemble de l'aire d'étude.

La carte de résidus obtenue par krigeage est ensuite ajoutée, à l'aide d'un système d'information géographique, à celle issue de la première méthode (régression) afin d'obtenir une carte

d'une deuxième méthode (régression + krigeage) qui représente un champ continu de la température plus proche de la réalité. Les résidus de cette deuxième méthode (régression + krigeage) sont interpolés aussi par krigeage pour comparer la performance de deux méthodes.

## Validation croisée

La méthode de la validation croisée ou *cross validation* permet d'évaluer l'erreur d'estimation pour chaque méthode d'interpolation testée. L'erreur moyenne quadratique (*root mean square error* ou RMSE) est une estimation de la variance de l'erreur de la régression, c'est-à-dire la valeur de l'erreur moyenne de dispersion des données autour de l'axe de régression ou encore la variation des résidus ; plus la RMSE est élevée, plus la dispersion des résidus est large et moins exact est le modèle. Plus la valeur du RMSE est faible, plus l'estimation de l'interpolateur est bonne. Donc c'est la valeur à minimiser dans le cadre d'une régression.

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

où  $F$  est le nombre de degrés de liberté,  $N$  le nombre d'observations,  $O_i$  la valeur observée, et  $P_i$  la valeur calculée.

## Détermination des variables explicatives

Le tableau 1 présente la matrice de corrélation entre les variables candidates. La première remarque qui s'impose est qu'il existe une colinéarité très élevée entre la variable « distance à la mer » et la variable « latitude » ( $R^2 = 0,98$ ). Ce problème risque, comme il a été dit, de perturber les estimations des paramètres du modèle.

Tableau 1. Matrice de corrélation entre les variables explicatives. Les valeurs en gras sont significativement différentes de 0 à un seuil de signification  $\alpha = 0,05$ .

Variables	Lat	Long	Dis.m	Dis.f	Alt	Pen	Exp	Cur
Lat	1							
Long	0,23	1						
Dis.m	<b>-0,99</b>	-0,16	1					
Dis.f	<b>-0,66</b>	-0,42	<b>0,63</b>	1				
Alt	-0,43	-0,13	0,44	-0,15	1			
Pen	0,34	0,29	-0,33	-0,29	-0,14	1		
Exp	-0,42	-0,50	0,40	<b>0,69</b>	-0,03	-0,10	1	
Cur	-0,32	-0,11	0,27	-0,04	<b>0,55</b>	<b>-0,55</b>	-0,32	1

Le calcul des coefficients de corrélation de toutes les paires de variables ne suffit pas à vérifier l'absence de colinéarité entre les variables. En effet, il peut exister une relation linéaire entre trois variables sans qu'il existe de relation linéaire entre deux quelconques de ces trois variables. Pour cela, nous avons vérifié l'absence de multi-colinéarité entre les variables par le calcul de l'indice de tolérance et de son inverse le *variable inflation factor* ou VIF (tableau 2).

Nous pouvons lire dans le tableau 2 que le test de tolérance pour la variable « distance à la mer » est inférieur à 0,2, ce qui confirme la présence d'un problème de multi-colinéarité avec les autres variables. Il nous a donc paru préférable de retirer la variable redondante « distance à la mer » dans l'opération de régression multiple.

Le nombre de variables retenues dans le modèle d'interpolation des températures mensuelles varie selon le mois considéré (figure 4). Pour la température maximale, quatre variables ont été retenues pour le mois d'avril, alors que pour le mois de février la seule variable explicative significative de la variation des maxima est l'altitude.

Concernant les températures minimales, le nombre des variables retenues est minimum pour les mois de mars, avril et septembre et maximum pour les mois de décembre, janvier, mai et toute la saison estivale.

L'altitude est toujours sélectionnée comme variable explicative dans le modèle de variation spatiale de la température minimale (tableau 3). Elle

Tableau 2. Indicateurs statistiques de colinéarité (test de tolérance et VIF) pour nos variables explicatives.

Variables	Lat	Long	Dis.m	Dis.f	Alt	Pen	Exp	Cur
<b>Tolérance</b>	0,26	0,22	0,41	0,18	0,22	0,2 5	0,2 3	0,32
<b>VIF</b>	3,85	4,55	2,44	5,56	4,55	4,0 0	4,3 5	3,13

Tableau 3. Coefficient de corrélation entre les températures minimales mensuelles et les variables significatives utilisées dans les régressions multiples.

Variables	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
<b>Lat</b>	0,52	/	/	/	0,51	0,53	0,52	0,51	/	/	/	0,52
<b>Dis.f</b>	/	/	/	/	0,61	0,75	0,77	0,68	/	/	/	/
<b>Alt</b>	-0,94	-0,93	-0,90	-0,86	-0,74	-0,61	-0,55	-0,68	-0,87	-0,93	-0,95	-0,94
<b>Cur</b>	-0,55	-0,53	/	/	/	/	/	/	/	-0,54	-0,56	-0,57

Tableau 4. Coefficient de corrélation entre les températures maximales mensuelles et les variables significatives retenues pour la régression multiple.

Variables	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
<b>Lat</b>	/	/	-0,55	-0,54	-0,82	-0,90	-0,89	-0,86	-0,64	-0,63	/	/
<b>Dis.f</b>	/	/	0,66	0,83	0,84	0,76	0,71	0,73	0,79	/	/	/
<b>Alt</b>	-0,99	-0,92	-0,75	-0,73	-0,71	-0,59	-0,58	-0,68	-0,71	-0,82	-0,97	-0,99
<b>Exp</b>	/	/	/	0,51	/	/	/	/	/	/	/	/
<b>Cur</b>	-0,58	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-0,56	-0,61

est négativement corrélée avec toutes les températures minimales mensuelles. Cette décroissance de la température dépend surtout de la pression atmosphérique qui diminue avec l'altitude suivant une loi exponentielle décroissante.

Le coefficient de corrélation entre l'altitude et la température minimale oscille entre -0,55 (juillet) et -0,95 (novembre). Les températures d'hiver semblent plus sensibles à l'altitude que celles d'été, ce qui nous porte à croire

qu'en saison hivernale le relief a une influence particulièrement grande sur le caractère thermique de l'Est algérien.

À l'inverse, la longitude est non significative au seuil de 5 % pour tous les mois de l'année et n'entre en aucun cas dans le modèle.

La latitude est sélectionnée comme variable explicative durant la saison estivale ainsi que durant les mois de décembre, janvier et mai. De ce fait, les minima sont plus sensibles à la variabilité latitudinale des stations durant ces mois de l'année. Celui-ci s'explique évidemment par des bilans radiatifs saisonniers très différents du nord au sud. Inversement, la courbure générale de la pente influe la température minimale mais uniquement durant les saisons hivernale et automnale. La distance à la forêt est corrélée positivement avec la température minimale durant toute la saison estivale, de mai à août (tableau 3). Ce résultat est à mettre en relation avec la transpiration des végétaux qui absorbe de l'énergie et refroidit l'air de l'environnement. Ainsi, plus la distance à la forêt est importante, plus les températures augmentent.

La température maximale est sensible aussi à la variation altitudinale durant toute l'année (tableau 4). La latitude et la distance à la forêt sont retenues

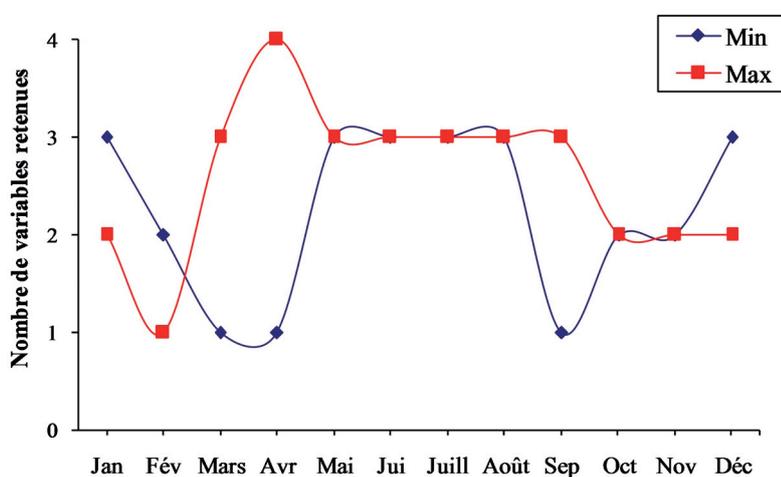


Figure 4. Nombre de variables retenues mensuellement dans la régression multiple des températures minimales et maximales.

également comme variables explicatives dans le modèle de variation spatiale de la température maximale (sauf en hiver), alors que l'exposition est uniquement retenue en avril.

Les résultats montrent aussi que la courbure du relief a une influence négative sur la température maximale durant les mois de novembre, décembre et janvier. Cela est dû à l'accumulation de l'air froid au fond des cuvettes topographiques. De plus, la variable « longitude » est une variable non significative dans le modèle de la variation spatiale de la température maximale (tableau 4).

### La validation des estimations Calcul du coefficient de détermination $R^2$

Le coefficient  $R^2$  le plus important est enregistré en décembre (0,97) pour les maxima et en novembre (0,89) pour les minima (figure 5). Dans notre exemple, 97 % de la variabilité totale des températures maximales du mois de décembre et 89 % de celle des températures minimales du mois de novembre sont expliqués par ces deux modèles, alors que la valeur la plus faible du  $R^2$  pour les températures maximales et minimales est enregistrée respectivement en juillet et en août.

### Validation par le calcul des résidus

Les résidus annuels moyens des températures minimales issus de deux méthodes d'interpolation sont alors calculés pour 15 postes climatologiques. Ils sont ensuite interpolés par krigeage (figure 6).

L'erreur de modélisation, issue de la première méthode (régression), varie de  $-0,85$  à  $1,18$  °C, ce qui indique une forte sous-estimation des températures minimales pour une vaste superficie de l'Est algérien et une surestimation à l'ouest. La deuxième méthode (régression + krigeage) présente des résidus d'étendue plus réduite par rapport à la première méthode.

La figure 6b illustre la variabilité spatiale des résidus des températures minimales annuelles issus de la deuxième méthode (régression + krigeage). Elle est caractérisée par des résidus faibles qui varient entre  $-0,2$  et  $+0,5$  °C sur une vaste superficie de l'Est algérien.

Cependant, la première méthode de régression présente des fortes valeurs de résidus qui atteignent  $1,4$  °C au sud-ouest de l'aire d'étude et des résidus très négatifs au centre (figure 6a), ce qui nous conduit à constater que la première méthode (régression seule) est inadéquate à l'interpolation des températures minimales et maximales.

La carte des résidus des températures maximales montre aussi une nette diminution des résidus pour la deuxième méthode pour toute la zone d'étude (figure 7). Les valeurs extrêmes des résidus positives ont également diminué avec un maximum de  $0,5$  °C contre  $1,4$  °C pour la première méthode.

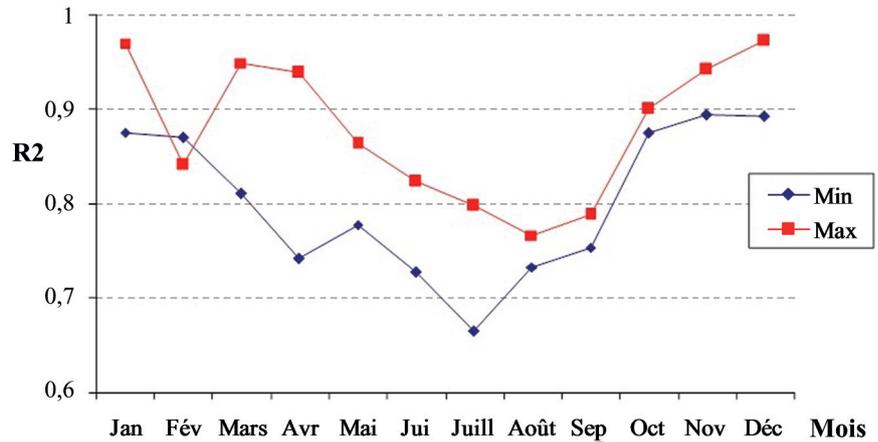


Figure 5. Variation mensuelle du coefficient de détermination ( $R^2$ ) obtenu par la régression multiple des moyennes mensuelles des températures maximales et des minimales.

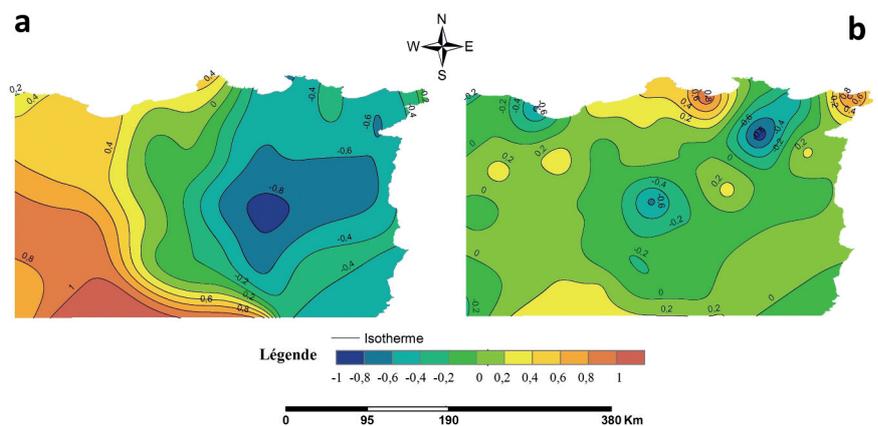


Figure 6. Résidus de la moyenne des températures minimales annuelles issus des deux méthodes d'interpolation : a) régression ; b) régression + krigeage. Les deux cartes sont le résultat d'un krigeage portant sur les résidus issus de la régression aux 15 postes climatologiques.

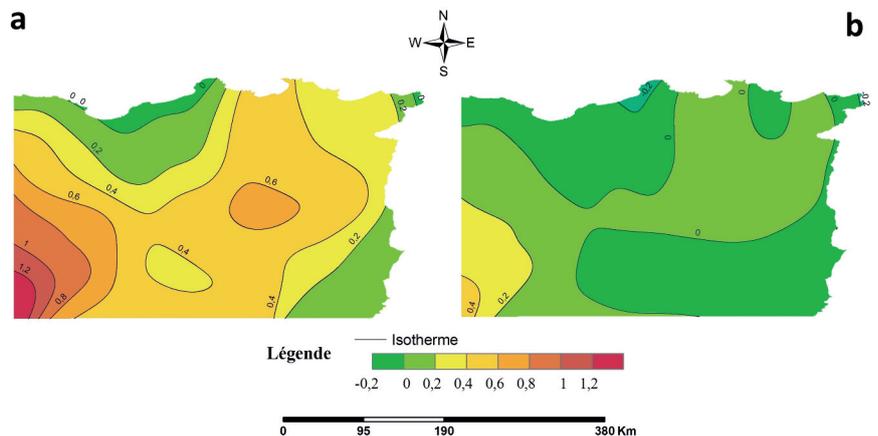


Figure 7. Résidus de la moyenne des températures maximales annuelles issus des deux méthodes d'interpolation : a) régression ; b) régression + krigeage. Les deux cartes sont le résultat d'un krigeage portant sur les résidus issus de la régression aux 15 postes climatologiques.

## Validation croisée

Les valeurs de RMSE issues de l'interpolation des températures minimales par la première méthode (la régression seule) sont fortes : elles sont comprises respectivement entre 0,9 et 1,2 °C pour les mois de novembre et juillet (figure 8). Alors que celles issues de la deuxième méthode (régression + krigeage) sont relativement faibles, elles s'échelonnent entre 0,3 °C pour le mois de septembre et 0,9 °C pour le mois de mai, indiquant la variance relativement faible de l'erreur de l'interpolation.

Concernant les températures maximales, on remarque une nette amélioration du modèle par la deuxième méthode qui minimise les valeurs de RMSE surtout durant le mois de juin où les résidus passent de 1,4 °C pour la première méthode à 0,1 °C pour la deuxième méthode (figure 9).

## Exemple de l'interpolation des températures minimales du mois de mai

Pour illustrer la méthode suivie pour l'interpolation des températures mensuelles (minimales et maximales), nous prendrons dans cette partie l'exemple de la température minimale du mois de mai.

Le modèle complet à trois variables (altitude, latitude et distance à la forêt) propose un coefficient  $R^2$  ajusté égal à 76,7 % (tableau 5). La variable la plus problématique est la distance à la forêt (Dis.f) qui n'est pas significative à 5 % ( $p$ -value = 0,155). Pour cette raison, elle ne peut être conservée. Le modèle suivant qui comporte deux variables explicatives significatives à 5 % (l'altitude et la latitude) est notre modèle définitif avec un  $R^2$  ajusté égal à 74,1. Le dernier modèle à une seule variable significative « altitude » est moins pertinent, il affiche un  $R^2$  ajusté égal à 51,5 (tableau 5).

L'équation du modèle s'écrit alors (pour le mois de mai) :

$$T_{\min} \text{ (en } ^\circ\text{C)} = 101,38 - 0,00678 \times \text{Alt (en mètres)} - 2,357 \times \text{Lat (en degrés décimaux)}$$

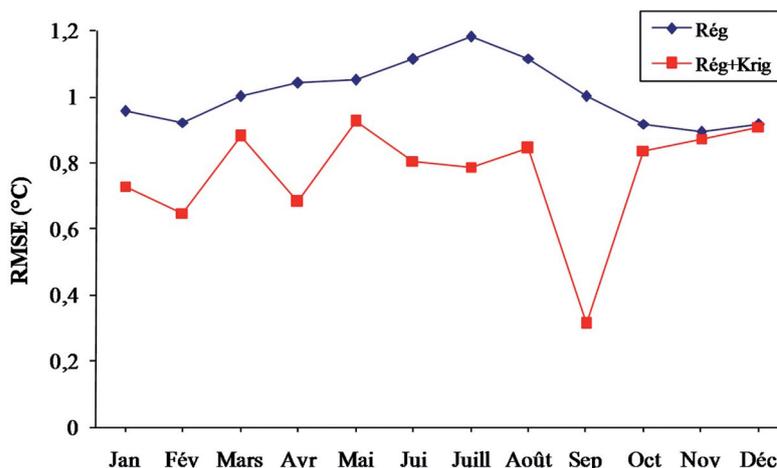


Figure 8. Évaluation des deux méthodes d'interpolation des températures minimales par l'indicateur RMSE.

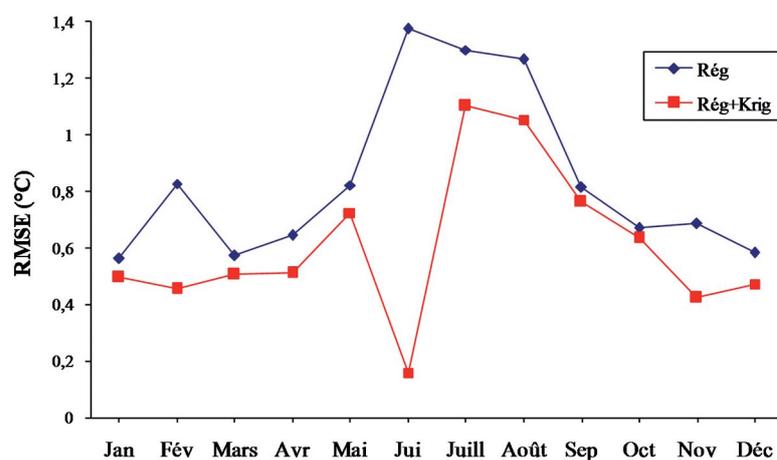


Figure 9. Évaluation des deux méthodes d'interpolation des températures maximales par l'indicateur RMSE.

Tableau 5. Régression pas à pas (*backward selection*) pour la température minimale du mois de mai. La ligne en gras correspond au modèle explicatif choisi.

	Alt	Lat	Dis.f				
$R^2$	$R^2$ ajusté	t	p-value	t	p-value	t	p-value
81,7	76,7	-4,22	0,001	-0,92	0,03	1,53	0,155
<b>77,8</b>	<b>74,1</b>	<b>-6,43</b>	<b>0,000</b>	<b>-3,51</b>	<b>0,004</b>		
55	51,5	-3,77	0,002				

À partir de cette formule mathématique, on peut déduire le gradient thermique, dans ce cas,  $-0,68$  °C pour 100 mètres gagnés en altitude,  $-2,3$  °C pour un degré parcouru vers le nord, soit une décroissance de  $-2,13$  °C pour un déplacement de 100 km vers le nord puisqu'un degré de latitude équivaut à environ 111 km.

La figure 10 illustre la variabilité spatiale, à une échelle très fine (90 m × 90 m), de la température minimale du mois de mai pour la période

1982-2011. Elle est construite à partir des deux variables explicatives sélectionnées par le modèle statistique (l'altitude et la latitude).

Les températures minimales du mois de mai dans l'Est algérien se situent entre 2 et 21,6 °C, soit un écart thermique de 19,6 °C. On trouve les plus fortes valeurs au sud et les plus faibles sur les reliefs soumis au climat de montagnes (les Aurès, les Babors), alors que les plaines sont marquées par des températures plus clémentes.

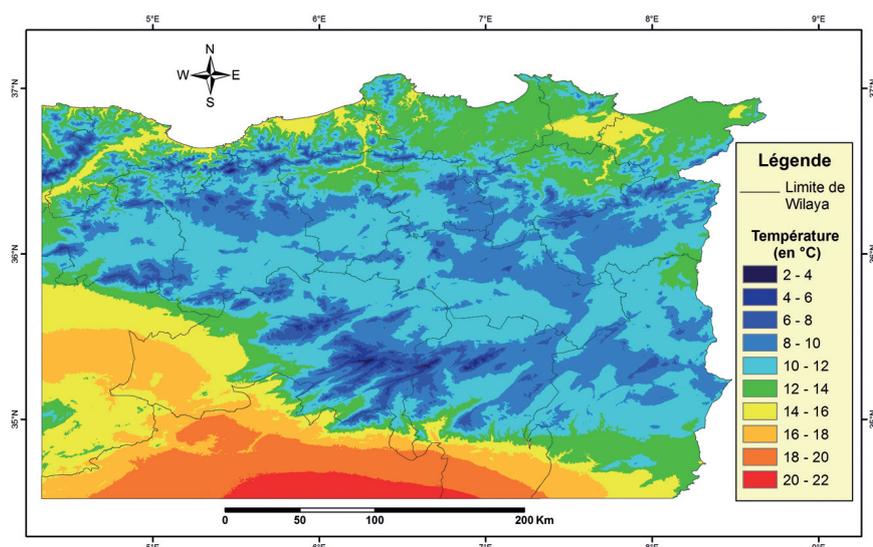


Figure 10. Température minimale du mois de mai pour la période 1982-2011 interpolée par la méthode régression + krigeage.

## Conclusion

Le présent travail a montré que les variables explicatives significatives dans l'interpolation des températures mensuelles varient selon le mois et le type de température analysée (minimale ou maximale). Les coefficients de corrélation marquent le rôle significatif et structurant de l'altitude qui joue le rôle

d'une variable explicative du caractère thermique de l'Est algérien et cela pour tous les mois de l'année.

Les modèles régressifs fondés sur des paramètres décrivant le relief produisent des cartes thermiques à haute résolution spatiale, mais qui comportent des écarts importants avec les valeurs observées. L'addition au modèle des résidus

interpolés par krigeage améliore les résultats et procure une carte interpolée des températures avec des résidus faibles pour une vaste superficie de la zone d'étude.

On dispose donc de cartes thermiques qui peuvent contribuer aux différentes analyses visant à expliquer la répartition spatiale des écosystèmes forestiers de l'Est algérien. Par ailleurs, bien que la méthode d'interpolation retenue dans cette étude donne des résultats proches de la réalité avec une résolution spatiale fine (90 m), elle présente aussi des limites, car elle ne prend pas en compte l'interaction d'autres variables climatiques tels que l'humidité et le vent avec la température.

Pour mieux décrire le champ thermique au niveau de l'Algérie, il sera intéressant de densifier le réseau de mesures météorologiques du pays et d'appliquer la méthodologie suivie dans cette étude sur tout le territoire algérien, tout en utilisant comme variables explicatives d'autres quantités physiques qui peuvent mieux conditionner la variabilité spatiale de la température, tels que l'indice de rugosité du terrain et l'indice de densité végétale.

## Bibliographie

- Aissani B., Laborde J.-P., 1983. Les pluies extrêmes et leur cartographie automatique dans la région algéroise. Document préliminaire. *Conférence sur le climat méditerranéen et les ressources en eau, Eau verte – Eau bleue*, Marseille, 8 p.
- Badeau V., Dupouey J.-L., Cluzeau C., Drapier J., Le Bas C., 2004. Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. In : Rapport Final du projet Carbofor : *Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France*. Bordeaux-Pierrefitte, Inra, 101-113.
- Badeau V., Dupouey J.-L., Cluzeau C., Drapier J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici à 2100. *Forêt-Entreprise*, 162, 25-29.
- Benavides R., Montes F., Rubio A., Osoro K., 2007. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. *Agri. For. Meteorol.*, 146, 173-188.
- Bœuf R., Gautier L., 2009. Changement climatique : identification et cartographie du degré de vulnérabilité au stress hydrique des principales essences forestières d'Alsace selon une approche synécologique. Disponible à l'adresse : [www.forestclim.eu/uploads/media/article\\_boeuf.pdf](http://www.forestclim.eu/uploads/media/article_boeuf.pdf)
- Courault D., Monestiez P., 1999. Spatial interpolation of air temperature according to atmospheric circulation patterns in southeast France. *Int. J. Climatol.*, 19, 365-378.
- Enquist C.A.F., 2002. Predicted regional impacts of climate change on the geographical distribution and diversity of tropical forests in Costa Rica. *J. Biogeogr.*, 29, 519-534.
- Foucart T., 2006. Colinéarité et régression linéaire. *Math. Sci. Hum.*, 173, 5-25.
- Geiger R., Aron R.H., Todhunter P., 2003. *The climate near the ground*. Rowman and Littlefield Publishers, 6, 91-100.
- Hennequi M., 2010. *Spatialisations des données de modélisation par Krigeage*. Rapport de stage, Université de Strasbourg, Paris, 74 p.
- Huntley B., Berry P.M., Cramer W., McDonald A.P., 1995. Modelling present and potential future ranges of some European higher plants using climate response surfaces. *J. Biogeogr.*, 22, 967-1001.
- Iverson L.R., Prasad A., 2002. Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US. *Forest Ecol. Manage.*, 155, 205-222.
- Joly D., Bois B., Zaksek K., 2009. Hiérarchie des facteurs topographiques explicatifs de la variation spatiale des températures et des précipitations selon différentes échelles. Acte des Journées de climatologie de la commission « Climat et Société » du CNFG, Climat et Relief, Besançon, 13 mars 2009, 25-34.
- Lado L.R., Sparovek G., Torrado P.V., Neto D.D., Vázquez F.M., 2007. Modelling air temperature for the state of Sao Paulo, Brazil. *Scientia Agricola*, 5, 460-467.
- Louamri A., 2009. Cartographie des pluies annuelles dans le bassin versant de l'Oued Seybouse (Nord-Est algérien). *Sci. Technol.*, 30, 43-52.
- Mebarki A., 2005. *Hydrologie des bassins de l'Est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement*. Thèse Doctorat d'État, Université Mentouri, Constantine, 360 p.
- Nalder I.A., Wein R.W., 1998. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agri. For. Meteorol.*, 92, 211-225.
- Ninyerola M., Pons X., Roure J.M., 2000. A methodological approach of climatological Modelling of air temperature and precipitation Through GIS techniques. *Int. J. Climatol.*, 20, 1823-1841.
- Petry F., 2003. *Guide pratique d'introduction à la régression en sciences sociales*. Presses de l'Université Laval, 195 p.
- Tabet S., 2008. *Le changement climatique en Algérie orientale et ses conséquences sur la végétation forestière*. Thèse de magistère en écologie végétale. Université Mentouri, Constantine, 132p.
- Touaibia B., Inegliz S., Ould A.A., 2006. Couplage d'une analyse en composantes principales et d'une approche géostatistique pour l'élaboration de cartes pluviométriques du centre de l'Algérie du Nord. *Rev. Sci. Eau*, 19, 213-219.
- Touazi M., Laborde J.P., 2000. Cartographie des pluies annuelles en Algérie du Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13, 191-199.