



RÉGIONALISATION DES MODÉLISATIONS DE TEMPÉRATURES EN FRANCE POUR LA PÉRIODE 2071-2100 À PARTIR DU MODÈLE ARPÈGE-CLIMAT POUR LES SCÉNARIOS A1B, A2 ET B1

Nicolas Martin, Pierre Carrega, Cyriel Adnès

► **To cite this version:**

Nicolas Martin, Pierre Carrega, Cyriel Adnès. RÉGIONALISATION DES MODÉLISATIONS DE TEMPÉRATURES EN FRANCE POUR LA PÉRIODE 2071-2100 À PARTIR DU MODÈLE ARPÈGE-CLIMAT POUR LES SCÉNARIOS A1B, A2 ET B1. XXVe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Sep 2012, Grenoble, France. 2012. <hal-01132725>

HAL Id: hal-01132725

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01132725>

Submitted on 17 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RÉGIONALISATION DES MODÉLISATIONS DE TEMPÉRATURES EN FRANCE POUR LA PÉRIODE 2071-2100 À PARTIR DU MODÈLE ARPEGE-CLIMAT POUR LES SCÉNARIOS A1B, A2 ET B1

Nicolas MARTIN, Pierre CARREGA et Cyriel ADNES

Université de Nice Sophia-Antipolis, UMR ESPACE 7300, Equipe GVE, 98 Bd. E. Herriot 06204 Nice, France.
nicolas.martin@unice.fr ; pierre.carrega@unice.fr ; cyriel.adnes@unice.fr

Résumé : Le projet CASSANDRE a pour but d'anticiper l'évolution de la végétation dans les Alpes-Maritimes afin d'identifier les zones naturelles à protéger d'ici 2100. La première étape consiste à régionaliser les sorties du modèle climatique ARPEGE-Climat du CNRM afin de renseigner localement l'évolution attendue des températures minimales et maximales à l'horizon de la fin du XXI^{ème} siècle. En croisant des variables prédictives décrivant au mieux l'environnement physique avec les températures en sortie du modèle ARPEGE-Climat, des modèles de régressions multiples sont établis mensuellement pour la période 1961-1990. Les résultats obtenus offrent des résidus acceptables au regard du changement d'échelle opéré (passage de 50 km de résolution à 1 km). Ainsi la même méthode est employée pour affiner la résolution spatiale des modélisations climatiques des Tn et Tx futures (2071-2100) selon les trois scénarios A2, A1B et B1.

Mots-clés : Modélisation climatique, descente d'échelle, régression environnementale, température.

Abstract: Regionalization of simulated temperatures over France for the period 2071-2100, using the ARPEGE-Climat model and the GES scenarios A1B, A2 and B1.

The CASSANDRE project aims at anticipating the vegetation evolution in the Alpes-Maritimes French region to identify natural areas to protect before 2100. The first step consists in regionalizing the outputs of the climate model ARPEGE-Climat of the CNRM to locally evaluate the minimal and maximal temperatures trends at the end of the XXIst century. By crossing predictive variables that best describe the physical environment with temperatures from the ARPEGE-Climat model output, several models of multiple regressions are established monthly for the period 1961-1990. The obtained results give acceptable residues considering the scaling operated (from 50 km horizontal resolution to 1 km). Hence, the same method is used to refine the spatial resolution of the climate model simulated Tn and Tx (2071-2100) according to three SRES scenarios A2, A1B and B1.

Keywords: Climate modelling, downscaling, environmental regression, temperature.

Introduction

Le projet CASSANDRE (Contribution à l'élaboration d'un système d'aide à la décision pour la gestion des espaces naturels : application à la constitution des trames vertes au regard du changement climatique et de la dynamique urbaine) a pour but d'identifier les zones naturelles à protéger d'ici à 2100 en tenant compte de l'évolution de la répartition des végétaux et du développement urbanistique dans la zone littorale et la zone collinaire proche du littoral dans les Alpes-Maritimes.

Le point de départ de cette recherche consiste à préciser l'évolution de la végétation qui est en partie tributaire du devenir des températures et des précipitations (non abordées ici). Le modèle climatique utilisé est le modèle ARPEGE-Climat du CNRM dont la résolution spatiale est d'environ 50 km sur le territoire français métropolitain. La finalité du travail réside dans l'amélioration de la résolution spatiale des températures simulées ; en effet il est impensable de pouvoir quantifier correctement l'évolution de la végétation avec des données à 50 km. L'objectif est d'affiner considérablement les températures prévues pour la fin du siècle à 1 km de résolution spatiale.

Pour cela la technique statistique fondée sur la régression environnementale a été privilégiée. Il s'agit donc de trouver des descripteurs des températures (minimales et maximales mensuelles) en utilisant comme échantillon de départ les sorties d'ARPEGE-Climat pour chaque mois de la période dite de référence 1961-1990. La validation des

modèles créés se fait par comparaison avec les stations météorologiques de Météo-France. Si les écarts constatés sont acceptables, alors la même démarche est reproduite avec les sorties d'ARPEGE-Climat pour les scénarios A2, A1B et B1 pour la période 2071-2100.

1. Les températures simulées et les normales climatiques en France

1.1. Les modélisations des températures en France selon le modèle ARPEGE-Climat

Le modèle ARPEGE-Climat version 4 développé par le CNRM (Salas-Mélia, 2005) présente une grille non régulière avec un pôle placé en mer Tyrrhénienne et une résolution horizontale de l'ordre de 50 km sur la France. Les sorties de modèles sont des données surfaciques et non ponctuelles. A chaque pixel (240 couvrent la France) correspond une valeur d'altitude représentant la moyenne des altitudes sur l'ensemble du pixel. Les températures maximales (Tx) et minimales (Tn) modélisées constituent ainsi des valeurs moyennes sur l'intégralité du pixel de 2500 km² (figure 1).

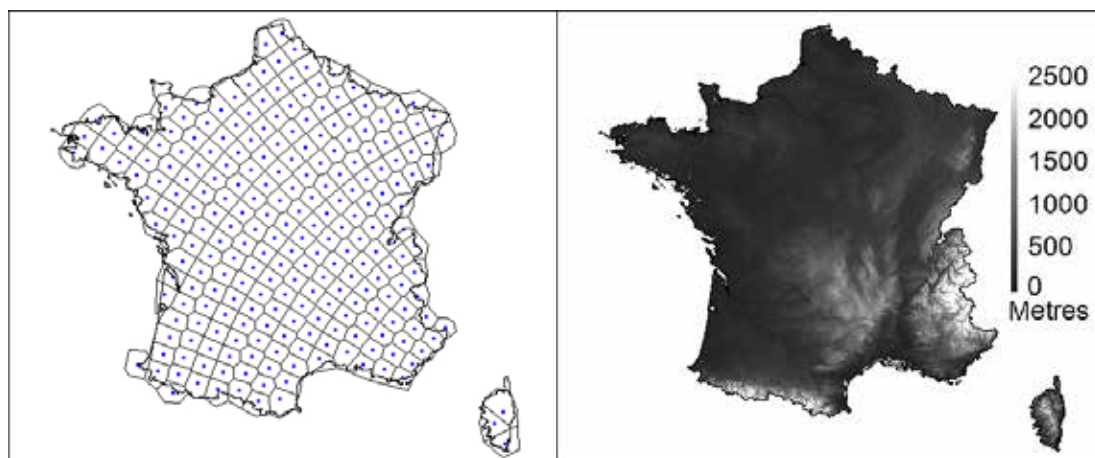


Figure 1 : Grille de calcul d'ARPEGE-Climat à 50 km comparée au modèle numérique de terrain à 90 m de la France.

ARPEGE-Climat fournit des simulations pour le futur selon différents scénarios d'évolution des sociétés qui traduisent des émissions en gaz à effet de serre (GES) plus ou moins importantes. Trois scénarios sont retenus dans ce projet. Le scénario A1B est fondé sur des émissions en GES qui doubleraient entre le début du siècle et 2050 pour très légèrement décroître ensuite. Cette voie semblerait être actuellement empruntée. Le scénario A2 est bien plus pessimiste avec une multiplication par 4 des émissions en un siècle. Enfin le scénario B1 est beaucoup plus optimiste puisqu'il considère que les émissions ne vont croître que faiblement jusqu'en 2050 et qu'elles devraient légèrement décroître par la suite.

Enfin ARPEGE-Climat simule également le climat entre 1961 et 1990, période dite de référence qui offre la possibilité de vérifier le degré de confiance à accorder à ces modélisations.

1.2. Validation : les normales climatiques 1961-1990

Pour vérifier la pertinence des modèles statistiques qui affineront spatialement les prévisions de températures des différents scénarios, il est essentiel de croiser les températures calculées statistiquement (à partir des sorties d'ARPEGE) avec des données réellement mesurées (stations). Ce travail est effectué pour la période de référence 1961-1990. Cette étape fondamentale validera ou non la démarche qui sera alors répétée, si les résultats le permettent, à partir des modélisations des Tx et Tn d'ARPEGE-Climat pour la période 2071-2100.

Deux séries de stations météorologiques permettent de valider les modèles sur la France entière (15 postes) et aussi plus spécifiquement dans les Alpes-Maritimes (18 postes), territoire d'étude du projet CASSANDRE. Dans les deux cas les postes retenus occupent des sites topographiques hétérogènes afin de tester convenablement les modèles de régression établis.

2. Méthode de régionalisation des Tn et des Tx du modèle ARPEGE

2.1. Régression environnementale

Plusieurs méthodes permettent d'affiner la résolution spatiale d'un phénomène. La technique de la régression environnementale a été retenue afin d'améliorer nettement la résolution spatiale des températures fournies par les simulations climatiques. Cette démarche permet de créer de l'information à partir de variables jugées explicatives qui régissent le phénomène étudié. Cette approche se situe à l'interface entre une démarche déterministe et une autre fondée sur l'interpolation spatiale puisque le choix des variables environnementales n'est pas aléatoire mais justifié par l'intensité des relations statistiques qu'entretiennent ces données avec le phénomène à modéliser, pour des raisons physiques. Ces mécanismes sont contenus implicitement dans les modèles de régression multiple construits. Par exemple, l'influence sur les températures de l'inertie thermique des mers ou des océans est intégrable dans un modèle de régression par la variable *distance à la mer*. Il existe ainsi de nombreuses solutions pour prendre en compte les lois physiques qui régissent la variabilité spatiale des températures.

2.2. Descripteurs des températures

La topographie exerce un poids important et bien documenté sur la variabilité spatiale des Tn et des Tx (Carrega, 1994 ; Madelin, 2004 ; Lhotellier, 2005 ; Joly, 2011). Le modèle numérique de terrain (M.N.T.) d'ARPEGE-Climat comporte potentiellement les informations nécessaires pour déterminer les variables explicatives dont dépendent les températures, et ce malgré la faiblesse de sa résolution spatiale.

Les descripteurs choisis sont l'altitude et les variables qui en découlent : la pente, l'orientation, la rugosité topographique (écart-type des altitudes) et l'encaissement (différence entre le pixel considéré et l'altitude maximale dans le voisinage). Ces 4 derniers prédicteurs sont calculés dans le voisinage immédiat du pixel considéré. D'autres variables influençant les températures mais non liées au M.N.T. sont également incluses dans cette logique : la longitude, la latitude et la distance à la mer.

Chacune de ces variables intègre une partie des facteurs physiques qui régissent la distribution spatiale des Tn et des Tx. L'altitude permet de prendre en compte la décroissance verticale des températures dans la troposphère en raison de la raréfaction de l'air ; la pente et l'orientation des versants offrent des différences d'exposition au soleil et donc des déficits ou des excédents énergétiques ; la rugosité du relief et l'encaissement des vallées module la variable altitude en introduisant des phénomènes locaux comme les inversions thermiques par exemple ; enfin la distance à la mer et le binôme longitude/latitude intègrent la notion de continentalité dans les modèles statistiques.

2.3. Descente d'échelle

Le défi majeur posé par la volonté d'améliorer la résolution spatiale des modélisations d'ARPEGE-Climat est la descente d'échelle, traduction du très connu « downscaling ». Dans la littérature cette étape est très majoritairement menée selon une démarche déterministe. Ici

l'originalité de l'approche consiste à effectuer une descente d'échelle en se fondant sur la régression environnementale.

Cependant des interrogations subsistent quant à la possibilité d'effectuer un tel saut entre des pixels de 50 km de côté et une grille finale de 1 km. Le lissage opéré dans ARPEGE-Climat sur la topographie et sur les Tn/Tx ne sera-t-il pas préjudiciable à la prise en compte par les modèles statistiques des phénomènes de micro-échelle ? Est-ce que les structures spatiales de ces phénomènes locaux sont observables à méso-échelle ? Malgré ces handicaps majeurs qui rendent cette démarche fragile il n'existe pas d'autres solutions que de procéder ainsi ; car aucune station météorologique ne peut aujourd'hui fournir l'échantillon de Tn ou de Tx nécessaire à l'élaboration d'un modèle de régression statistique décrivant la variabilité spatiale thermique de la période 2071-2100 !

3. Spatialisation des Tn et des Tx sur la période de référence 1961-1990

3.1. Sur la France entière

Les 8 variables explicatives réparties sur les 240 pixels d'ARPEGE-Climat alimentent les modèles statistiques. La même procédure dite pas à pas (test de Fisher Snedecor sur le plus petit coefficient de corrélation) est suivie pour chacune des 12 moyennes mensuelles Tx/Tn de 1961-1990. A l'issue des calculs 24 modèles sont décrits par une équation de type $y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + \dots + z$ où y est la température mensuelle à calculer, x_1, x_2, x_3 sont les descripteurs et a, b, c les coefficients de régression ; enfin z est l'ordonnée à l'origine.

Dans aucun modèle les variables pente et orientation ne sont retenues. Certainement victimes d'un effet de lissage trop fort de la topographique ces descripteurs sont écartés. Les autres variables explicatives sont conservées et après plusieurs essais c'est le logarithme de la distance à la mer qui est préféré à la variable initiale pour traduire la non linéarité de la relation avec les températures. Les coefficients de détermination qui quantifient la part de variance expliquée par les modèles sont tous supérieurs à 0,9 et parfois même à 0,95. Les écarts moyens (racine de la moyenne des carrés des écarts, RMCE) sont presque tous inférieurs à 1°C (tableau 1). Enfin la cartographie des résidus montre pour les mois les plus froids une sous-estimation des Tn dans la vallée du Rhône et pour les mois les plus chauds une surestimation des Tx en Provence et en Corse.

Tableau 1 : Coefficients de détermination et écarts moyens mensuels pour la période 1961-1990 pour les Tn/Tx.

	R² Tn	RMCE Tn	R² Tx	RMCE Tx
Janvier	0,94	1,04	0,97	0,86
Février	0,94	0,99	0,97	0,63
Mars	0,95	0,74	0,98	0,37
Avril	0,95	0,61	0,97	0,54
Mai	0,93	0,53	0,95	0,73
Juin	0,93	0,49	0,95	0,69
Juillet	0,93	0,60	0,92	0,83
Août	0,92	0,66	0,93	0,92
Septembre	0,92	0,86	0,97	0,50
Octobre	0,91	0,96	0,98	0,36
Novembre	0,89	1,04	0,98	0,77
Décembre	0,93	1,00	0,97	0,99

Par ailleurs, la confrontation des Tx/Tn simulées par les modèles statistiques avec les normales climatiques 1961-1990 est plutôt satisfaisante. Sur l'ensemble des 15 stations météorologiques, les écarts moyens entre modèles et observations sont compris entre 0,21 et 1,4°C pour les Tn et entre 0,36 et 1,21°C pour les Tx. En général, les Tn sont surestimées et les Tx sont sous-estimées. Par type d'implantation topographique, ces différences sont plus prononcées lorsque la surface est vallonnée voire accidentée.

3.2. Zone littorale et collinaire des Alpes-Maritimes

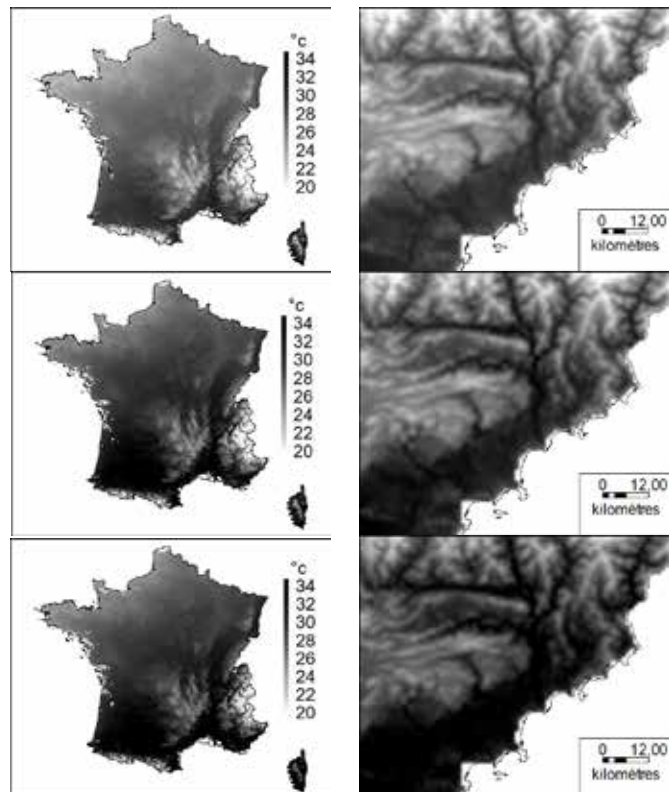
Les modèles de régression construits précédemment sont également appliqués sur cette partie du territoire. Bien qu'étant situé dans le sud des Alpes-Maritimes, l'espace d'intérêt du projet CASSANDRE est caractérisé par une topographie très prononcée. Les modèles élaborés à partir d'une maille grossière (seuls 2 points d'ARPEGE-Climat concernent le département) sur la France entière, spatialisent-ils correctement les températures ?

La deuxième série de postes météorologiques est alors utilisée pour tester les simulations statistiques. Les résultats sont moins satisfaisants. Les écarts moyens sont de l'ordre de 2 à 3°C pour les Tn et de l'ordre de 1 à 2°C pour les Tx en fonction des mois. L'analyse par type d'implantation des stations météorologiques révèle que les postes de fond de vallée souffrent de fortes surestimations des Tn durant l'hiver (3 à 4°C). L'impact de l'encaissement de ces sites de mesures sur les Tn est donc mal modélisé.

4. Spatialisation des Tn et des Tx sur la période 2071-2100

La spatialisation des températures sur la période 1961-1990 étant concordante avec les normales climatiques à l'échelle de la France, et dans une moindre mesure aux observations dans les Alpes-Maritimes, la procédure est ainsi reproduite avec les sorties d'ARPEGE-Climat pour les 3 scénarios A1B, A2 et B1 sur la période 2071-2100. Pour chacun des scénarios et pour les Tn et les Tx les coefficients de détermination sont compris entre 0,85 et 0,98. Les résidus sont très faibles et les erreurs-type sont inférieures à 1°C (figure 2).

Figure 2 : Spatialisation des Tx de juillet pour la période 2071-2100 en France à gauche et plus localement, à droite, dans les Alpes-Maritimes. En haut, le scénario B1 : au milieu, le scénario A1B et en bas, le scénario A2.



Conclusion

La technique statistique fondée sur la régression environnementale permet d'affiner spatialement les modélisations ARPEGE-Climat des Tx et des Tn. La démarche a été validée sur la période de référence 1961-1990 et a donc été reproduite pour les scénarios A1B, A2 et B1 concernant la période 2071-2100. Malgré des très bons résultats sur la majeure partie du pays, les zones marquées par un fort relief ne bénéficient pas d'une spatialisation performante des températures, notamment des minimales. La faible résolution des pixels ARPEGE-Climat est probablement responsable de ces forts écarts en raison d'un fort lissage des phénomènes topographiques et thermiques à 50 km. La descente d'échelle ne s'opère pas totalement à travers ces modèles. La piste privilégiée est alors de renouveler le travail à partir des modélisations ALADIN-Climat qui bénéficient d'une meilleure résolution spatiale (12 km).

Remerciement : Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet CASSANDRE. Nous remercions Michel Déqué du CNRM pour la mise à disposition des modélisations d'ARPEGE-Climat.

Références bibliographiques

- Carrega P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat*. Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée, Revue de Géographie du laboratoire d'analyse spatiale Raoul Blanchard, 408 pages.
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M. et Wavresky P., 2011 : Temperature interpolation based on local information : the example of France. *International Journal of Climatology*, 31, 2141-2153.
- Lhotellier R., 2005 : *Spatialisation des températures en zone de montagne alpine*. Thèse de doctorat, Grenoble, 352 pages.
- Madelin M., 2004 : *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : Modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Thèse de doctorat, Paris, 353 pages
- Salas-Mélia D., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Guérémy J.F., Marquet P., Planton S., Royer J.F., Tyteca S., 2005 : *Description and validation of CNRM-CM3 global coupled climate model*. Note de centre GMGEC, CNRM, 103.