



**HAL**  
open science

# DOWNSCALING STATISTIQUE DES TEMPERATURES ET DES PRECIPITATIONS 2071-2100 DU MODELE ALADIN-CLIMAT POUR LES SCENARIOS A1B, A2 ET B1 DANS LES ALPES-MARITIMES

Nicolas Martin, Pierre Carrega, Cyriel Adnès

► **To cite this version:**

Nicolas Martin, Pierre Carrega, Cyriel Adnès. DOWNSCALING STATISTIQUE DES TEMPERATURES ET DES PRECIPITATIONS 2071-2100 DU MODELE ALADIN-CLIMAT POUR LES SCENARIOS A1B, A2 ET B1 DANS LES ALPES-MARITIMES. XXVIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Sep 2013, Cotonou, Bénin. hal-01132720

**HAL Id: hal-01132720**

**<https://hal.science/hal-01132720>**

Submitted on 18 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.

## DOWNSCALING STATISTIQUE DES TEMPERATURES ET DES PRECIPITATIONS 2071-2100 DU MODELE ALADIN-CLIMAT POUR LES SCENARIOS A1B, A2 ET B1 DANS LES ALPES-MARITIMES

MARTIN N., CARREGA P. et ADNES C.

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 ALADIN-Climat du CNRM afin de renseigner localement l'évolution attendue des précipitations et températures minimales et maximales à l'horizon de la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle. En croisant des variables prédictives décrivant au mieux l'environnement physique avec les températures en sortie du modèle ALADIN-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 12 km de résolution à 90 m). Ainsi la même méthode est employée pour affiner la résolution spatiale des modélisations climatiques futures (2071-2100) selon les trois scénarios A2, A1B et B1.

**Mots-clés :** modélisation climatique, descente d'échelle, régression environnementale

**Abstract:** 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 ALADIN-Climat of the CNRM to locally evaluate the precipitations and the minimal and maximal temperatures trends at the end of the XXI<sup>st</sup> century. By crossing predictive variables that best describe the physical environment with temperatures from the ALADIN-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 12 km horizontal resolution to 90 m). Hence, the same method is used to refine the spatial resolution of the climate model simulated (2071-2100) according to three SRES scenarios A2, A1B and B1.

**Keywords:** climate modelling, downscaling, environmental regression

### Introduction

Le projet CASSANDRE a notamment pour but de préciser l'évolution future du risque d'incendie de forêt en milieu semi-urbain selon les changements environnementaux (climat et végétation) et les modifications de l'urbanisme et de l'urbanisation, les plus probables dans la zone littorale et la zone collinaire proche du littoral dans les Alpes-Maritimes.

L'évolution de la végétation est dépendante en partie des modifications des températures et des précipitations. Le modèle climatique utilisé est le modèle ALADIN-Climat (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) du CNRM dont la résolution spatiale est de 12 km. Ce niveau de détail n'est pas pertinent pour anticiper au mieux les éventuelles transformations de la végétation. La finalité de ce travail est d'affiner la résolution spatiale des températures et des précipitations prévues pour la fin du siècle à 90 m.

La méthode de descente d'échelle employée repose sur une approche statistique, la régression environnementale. Il s'agit de trouver des descripteurs des températures et des précipitations en utilisant comme échantillon de départ les sorties d'ALADIN-Climat pour la période dite de référence 1961-1990. La validation des modèles statistiques créés se fait en comparant les valeurs calculées par régression avec celles des stations météorologiques de Météo-France. La même démarche est reproduite avec les sorties d'ALADIN-Climat pour les scénarios A2, A1B et B1 pour la période 2071-2100.

### 1. Les sorties d'ALADIN-Climat et les mesures de Météo-France

#### 1.1. Les températures et les précipitations modélisées par ALADIN-Climat

Les variables modélisées sont issues d'une version du modèle ALADIN-Climat développée par le CNRM dans le cadre du projet ANR-SCAMPEI (Déqué, 2011). Le modèle simule le climat par mois pour divers horizons temporels : la période dite de référence (1961-1990),

2050 (moyenne climatique 2021-2050) ou encore 2100 (moyenne climatique 2071-2100). La résolution horizontale est de 12 km sur le sud-est de la France. Ces sorties de modèle sont des valeurs moyennes par pixel de 144 km<sup>2</sup>. Ce degré de finesse ne restitue pas les caractéristiques essentielles de la topographie dans un espace tel que les Alpes-Maritimes (fig. 1).

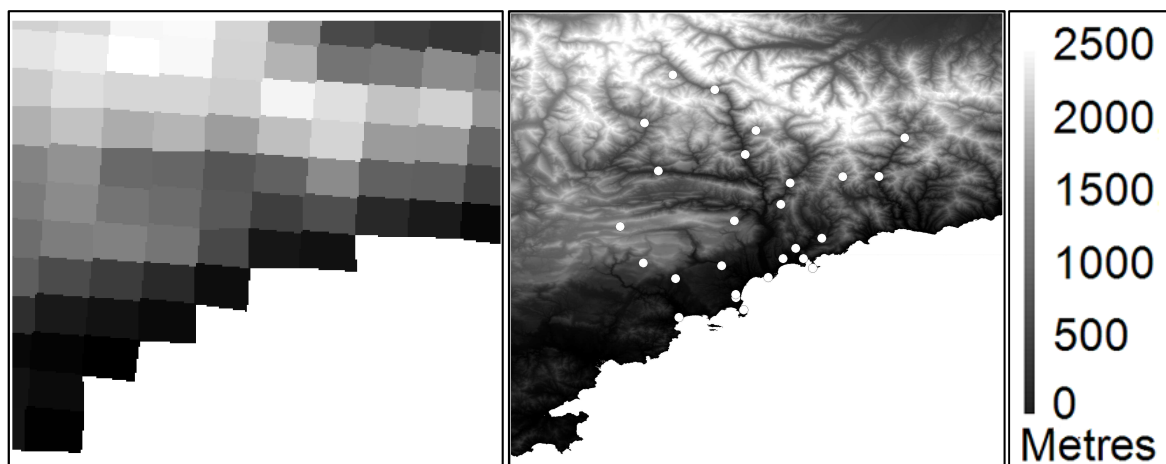


Figure 1. Modèle numérique de terrain des Alpes-Maritimes à 12 km (gauche) et à 90 m (droite) de résolution. Les points blancs correspondent aux postes de mesures de Météo-France.

Enfin ALADIN-Climat propose des simulations du climat futur selon divers scénarios d'évolution socio-économique et démographique. Chacun des scénarios présente des émissions de gaz à effet de serre d'intensité différente. Parmi les trois scénarios retenus le scénario A2 envisage une multiplication par 4 des émissions d'ici à 2100, le scénario A1B anticipe un doublement de celles-ci pour 2050 puis une stabilisation, et enfin le scénario B1 prévoit des émissions quasi constantes durant le XXI<sup>e</sup> siècle (GIEC, 2007).

## 1.2. Les normales climatiques 1961-1990

Pour vérifier la pertinence des modèles statistiques qui affineront spatialement les prévisions des différents scénarios, il est essentiel de croiser les températures ( $T_x$  et  $T_n$ ) et les précipitations ( $P$ ) calculées statistiquement (à partir des sorties d'ALADIN) 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  $P$ ,  $T_x$  et  $T_n$  d'ALADIN-Climat pour la période 2071-2100.

Les stations météorologiques de Météo-France dans les Alpes-Maritimes permettent d'effectuer l'étape de validation des modèles. Les 28 postes retenus (20 pour les  $P$ ) occupent des sites topographiques hétérogènes afin de tester convenablement les modèles de régression établis.

## 2. Méthode de descente d'échelle des $P$ , des $T_n$ et des $T_x$ du modèle ALADIN-Climat

### 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.

## **2.2. Les prédicteurs des températures et des précipitations**

La topographie influence la variabilité spatiale des Tn, des Tx et des P (Laborde, 1984 ; Carrega, 1994 ; Malika Madelin, 2004 ; Lhotellier, 2005 ; Joly, 2011). Un modèle numérique de terrain (M.N.T.), défini à 12 km de résolution, pour correspondre aux pixels d'ALADIN-Climat, comporte potentiellement les informations nécessaires pour déterminer les variables explicatives dont dépendent les températures et les précipitations.

Les descripteurs choisis sont l'altitude et les variables qui en découlent : la pente, l'orientation, la rugosité topographique (écart-type des altitudes), l'encaissement maximal (différence entre le pixel considéré et l'altitude maximale dans le voisinage) et l'encaissement moyen (différence entre le pixel considéré et l'altitude moyenne dans le voisinage). Ces 4 derniers prédicteurs sont calculés dans divers rayons autour 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.

## **3. Spatialisation des Tn, des Tx et des P sur la période de référence 1961-1990**

### **3.1. Les variables explicatives des modèles de régression mensuels**

Pour favoriser l'interprétation de chacun des douze modèles de régression élaborés pour chacune des trois variables (Tx, Tn et P), les mêmes prédicteurs ont été sélectionnés pour l'ensemble des douze mois. Ainsi les modèles pour les Tx incorporent la longitude, la latitude, l'altitude, l'encaissement moyen dans un rayon de 20 km, la rugosité topographique dans un rayon de 5 km et la pente à 90 m. De même les modèles statistiques des Tn prennent en compte la longitude, la latitude, l'altitude, le logarithme de la distance à la mer et l'encaissement maximum dans un rayon de 5 km. Enfin les prédicteurs des précipitations sont la longitude, la latitude, le logarithme de la distance à la mer, l'encaissement moyen et la rugosité topographique dans un rayon de 10 km.

### **3.2. Pertinence des modèles statistiques : validation interne**

Classiquement, le premier test à effectuer est d'apprécier le coefficient de corrélation multiple, et son carré, le coefficient de détermination. Des valeurs supérieures à 0,85 - 0,90 pour ce dernier deviennent satisfaisantes. Une autre démarche consiste à consulter les résidus (écarts entre valeurs d'entrées et valeurs estimées par le modèle), à étudier leur cartographie (afin de déceler de nouveaux prédicteurs à intégrer au modèle), et à calculer l'erreur-type (écart-type des résidus).

L'étude et la comparaison de ces divers paramètres calculés au fur et à mesure de la procédure de construction des modèles de régression a permis d'aboutir à une solution jugée satisfaisante. Pour la période de référence les coefficients de détermination sont compris entre 0,986 et 0,995 pour les Tx, et entre 0,931 et 0,948 pour les Tn. Les erreurs-type sont très faibles, de l'ordre de 0,3 à 0,4°C pour les Tx et de 1 à 1,3°C pour les Tn. Concernant les précipitations, les coefficients de détermination sont compris entre 0,3 et 0,67 ce qui signifie que les modèles construits n'expliquent qu'une partie, parfois mince (de novembre à janvier), de la variance des précipitations issues du modèle ALADIN-Climat. Les erreurs-type varient de 10 à 30 mm (tabl. 1). Les modèles statistiques élaborés pour la période 2071-2100, quels que soient les scénarios (A1B, A2 ou B1) sont caractérisés par des R<sup>2</sup> et des erreurs-type très proches de ceux observés pour 1961-1990.

Tableau 1. Coefficients de détermination et erreurs-types mensuels pour la période 1961-1990 pour les Tn/Tx/P

Mois	Tx-R <sup>2</sup>	Tx erreur-type en °C	Tn-R <sup>2</sup>	Tn erreur-type en °C	P-R <sup>2</sup>	P erreur-type en mm
Janvier	0,989	0,31	0,941	1,07	0,3	13
Février	0,987	0,36	0,938	1,21	0,53	12
Mars	0,991	0,33	0,941	1,22	0,53	17
Avril	0,990	0,35	0,948	1,10	0,67	19
Mai	0,990	0,33	0,940	1,20	0,67	27
Juin	0,993	0,32	0,941	1,30	0,63	29
Juillet	0,991	0,36	0,942	1,27	0,61	24
Août	0,993	0,32	0,936	1,27	0,58	22
Septembre	0,994	0,29	0,931	1,22	0,65	14
Octobre	0,994	0,28	0,934	1,11	0,54	20
Novembre	0,995	0,24	0,947	0,97	0,28	21
Décembre	0,986	0,31	0,942	0,98	0,39	11

### 3.3. Performances des modèles statistiques : validation externe

Réservée uniquement à l'époque actuelle, plus puissante, cette démarche consiste à vérifier que le pixel sur lequel se trouve une station météorologique réelle pendant la période contemporaine (1961-1990) est caractérisé par des températures proches de celles réellement observées. L'inconvénient est qu'il est difficile de savoir quelle part d'erreur doit être attribuée aux sorties d'ALADIN-Climat et au modèle de régression environnementale.

Tableau 2. Coefficient de détermination et écarts moyens entre les postes de Météo-France et les modèles de régression environnementale pour la période 1961-1990 pour les Tn/Tx/P. La dernière colonne concerne à titre indicatif les écarts moyens entre les postes de Météo-France (MF) et les précipitations des pixels du modèle ALADIN-Climat.

Mois	Tn-R <sup>2</sup>	Tn écarts en °C	Tx-R <sup>2</sup>	Tx écarts en °C	P-R <sup>2</sup>	P écarts en mm	P écarts en mm (Aladin-MF)
Janvier	0,7	2,8	0,7	1,4	0,23	18	37
Février	0,73	2,5	0,87	0,8	0,19	25	43
Mars	0,72	2,3	0,86	1,6	0,29	13	24
Avril	0,71	2,0	0,83	2,3	0,42	14	39
Mai	0,74	1,9	0,79	1,7	0,82	21	58
Juin	0,63	2,8	0,76	1,1	0,89	22	54
Juillet	0,51	2,8	0,75	1,9	0,86	17	62
Août	0,62	2,7	0,82	1,5	0,82	11	45
Septembre	0,7	2,0	0,8	2,1	0,55	17	24
Octobre	0,73	2,5	0,82	2,7	0,25	40	43
Novembre	0,75	2,4	0,81	1,5	0,49	24	27
Décembre	0,69	2,9	0,59	1,8	0,27	26	45

Lors de cette validation « externe » les écarts moyens calculés entre les mesures terrain et les valeurs, par pixels de 90 m, issues des modèles de régression environnementale fournissent une idée précise sur la capacité de la démarche à affiner spatialement les sorties climatiques du modèle ALADIN-Climat. Ainsi en s'appuyant sur le réseau de stations

météorologiques de Météo-France couvrant le territoire d'étude (postes implantés dans des sites hétérogènes) l'écart moyen (racine carrée de la moyenne du carré des écarts) entre la réalité et la modélisation statistique à 90m est évalué. Cette confrontation entre les Tx/Tn simulées par les modèles statistiques et les normales climatiques 1961-1990 montre de faibles différences. Sur l'ensemble des 28 stations météorologiques les écarts moyens constatés évoluent entre 1,1 et 2,7°C pour les Tx et entre 1,9 et 2,9°C pour les Tn. Les écarts les plus faibles s'observent pour les Tx et notamment pour les mois estivaux mais pas seulement. Pour les précipitations, en moyenne sur les 12 mois, la différence entre les valeurs calculées par les modèles statistiques et les mesures terrain est de 21 mm sur les 20 postes de Météo-France. Les écarts varient entre 11 et 40 mm selon les mois (Stat-MF). Ces valeurs sont à comparer aux écarts entre les mêmes postes de Météo-France et les sorties du modèle ALADIN-Climat qui alimentent les modèles statistiques (Aladin-MF) (tab. 2).

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

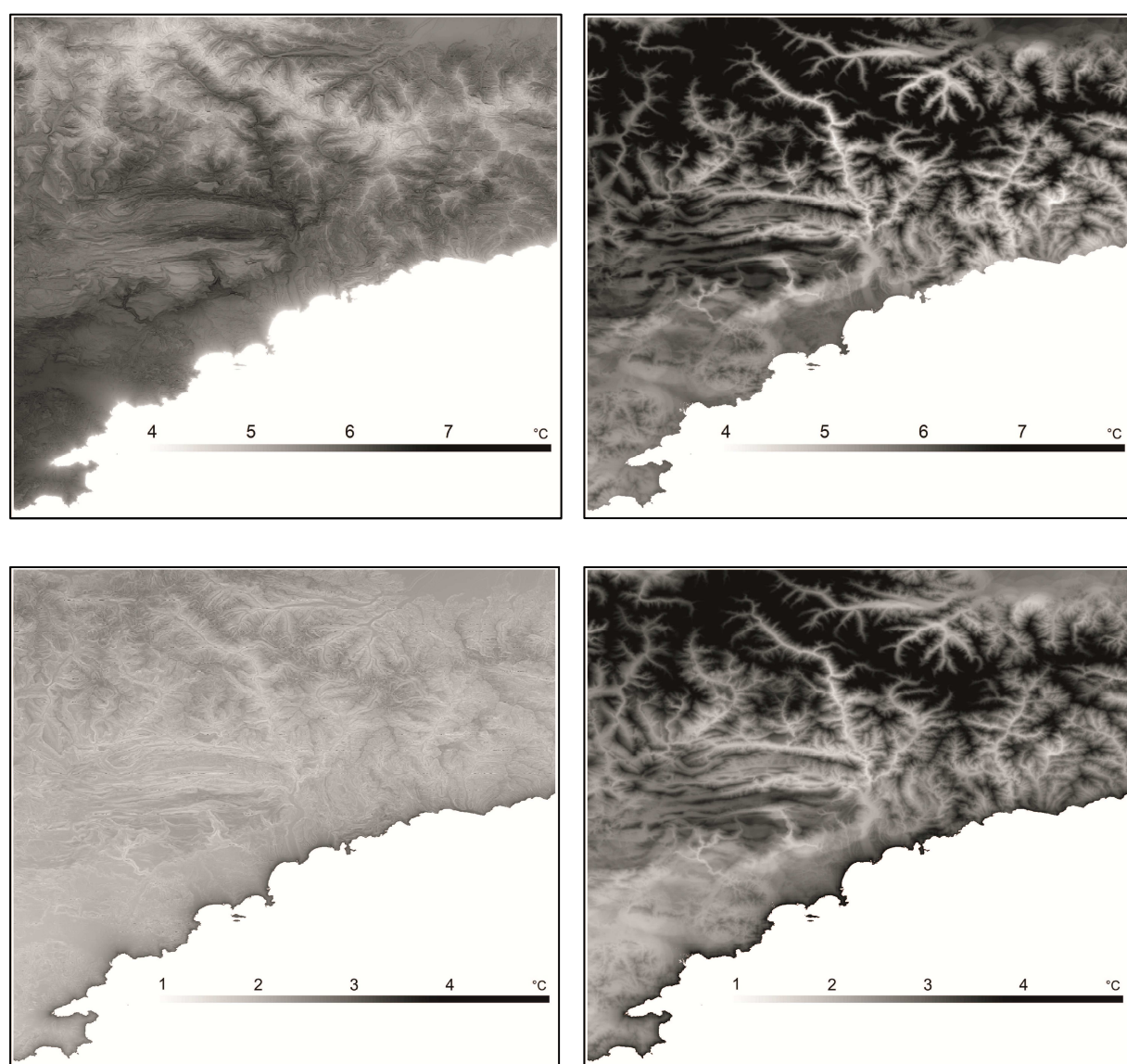


Figure 2. Spatialisation de la hausse, en degrés Celsius par rapport à la période 1961-1990, des Tx (à gauche) et des Tn (à droite) de juillet (en haut) et de janvier (en bas) dans les Alpes-Maritimes pour 2071-2100 et selon le scénario A2.

La spatialisation des températures sur la période 1961-1990 étant concordante avec les normales climatiques observées dans le département, la procédure est ainsi reproduite avec les sorties d'ALADIN-Climat pour les 3 scénarios A1B, A2 et B1 sur la période 2071-2100 et pour chacun des mois. Malgré les résultats moins probants observés pour les précipitations, leurs spatialisations pour le futur sont également établies. Pour chacun des scénarios les coefficients de détermination sont compris entre 0,98 et 0,99 pour les Tx, entre 0,93 et 0,95 pour les Tn et entre 0,23 et 0,79 pour les P. Les résidus sont très faibles dans l'ensemble et les erreurs-types sont inférieures à 0,5°C pour les Tx, à 1,2°C pour les Tn et varient entre 11 et 32 mm pour les P.

Globalement la hausse des Tx de juillet envisagées pour 2100, +3,1°C en moyenne dans le scénario B1, +4,8°C dans le A1B et +5,5°C dans le A2, sera plus prononcée dans l'intérieur des Alpes-Maritimes et à moyenne altitude. A l'inverse en janvier la hausse bien plus modérée des Tx (+1,4°C dans le B1, +2,2°C dans le A1B et le A2) est plus importante sur le littoral et à haute altitude (fig. 2). Pour les Tn le réchauffement est à nouveau plus marqué en juillet qu'en janvier (jusqu'à +6,7°C dans le scénario A2 en juillet et seulement +3°C en janvier). Pour les Tn, et pour les deux mois, la hausse est plus prononcée à haute altitude et à proximité de la mer. Enfin pour les P un net assèchement semble se dessiner dans les scénarios A1B et A2 pour juillet et octobre (mois le plus pluvieux pour la période 1961-1990).

## Conclusion

La technique statistique fondée sur la régression environnementale permet d'affiner spatialement les modélisations ALADIN-Climat des Tx et des Tn en passant de 12 km à 90 m de résolution. 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. Par contre pour les précipitations les résultats ne sont pas aussi satisfaisants. Contrairement aux températures, pour qui les mécanismes physiques sont implicitement intégrés dans les modèles de régression, les précipitations ne sont pas majoritairement régies par des variables environnementales locales. De plus les données d'entrée alimentant les modèles de régression sont déjà des données modélisées et de manière générale les températures sont plus correctement simulées par les modèles climatiques que les précipitations.

**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'ALADIN-Climat.

## Bibliographie

- Carrega P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat*. Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée, Revue de Géographie du laboratoire d'analyse spatiale Raoul Blanchard, Thèse de doctorat, 408pages.
- Déqué M., 2012 : *Projet ANR-SCAMPEI* Compte-rendu de fin de projet, 20 pages.
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavaillhes J., Hilal M. et Wavresky P., 2011 : *Temperature interpolation based on local information : the example of France*. *International Journal of Climatology*, **31**, 2141-2153.
- Laborde J-P., 1984 : *Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie*. *Eléments d'hydrologie lorraine*. Thèse de doctorat, Nancy, 484 pages.
- 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
- GIEC, 2007 : *Changements climatiques 2007 : Rapport de Synthèse*. 114 pages.