



HAL
open science

Cartographie climatique à fine résolution spatiale sur le territoire de la métropole Nice Côte d'Azur de 1986-2005 à 2081-2100

Nicolas Martin

► **To cite this version:**

Nicolas Martin. Cartographie climatique à fine résolution spatiale sur le territoire de la métropole Nice Côte d'Azur de 1986-2005 à 2081-2100. [Rapport Technique] UMR ESPACE - Université Nice Côte d'Azur & CNRS. 2020. hal-03374757

HAL Id: hal-03374757

<https://hal.science/hal-03374757>

Submitted on 12 Oct 2021

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.

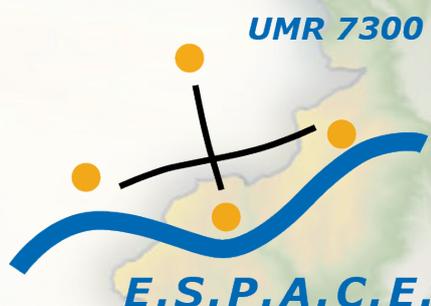


**Cartographies climatiques à fine résolution spatiale
sur le territoire de la métropole Nice Côte d'Azur
de 1986-2005 à 2081-2100**

Nicolas MARTIN

UMR 7300 ESPACE

CNRS / Université Côte d'Azur



UNIVERSITÉ
CÔTE D'AZUR

PREAMBULE

Dans le cadre de la stratégie d'adaptation du territoire au changement climatique notre laboratoire a pour mission de fournir des cartographies climatiques pour l'ensemble de la métropole Nice Côte d'Azur. Ces modélisations portent sur les températures minimales mensuelles, les températures maximales mensuelles et sur les cumuls de précipitation mensuels. Une déclinaison des cartes de températures donne accès à l'humidex mensuel, indice de confort thermique, pour les mois les plus chauds. Les résultats se présentent sous fichier raster à 25 m de résolution spatiale (et également à 1 m pour la commune de Nice pour les températures maximales uniquement), pour des normales mensuelles (moyennes, percentiles 10 (P10) et percentiles 90 (P90)) et sur les périodes de temps suivantes :

- Période de référence - 1986-2005 : période sur laquelle les modèles ont été calibrés et validés par comparaison avec les données observées et enregistrées par le réseau de stations météorologiques de Météo-France.
- Période future - 2016-2035 : projections à court terme réalisées à partir des modèles ALADIN-Climat (RCP 2.6, 4.5 et RCP 8.5) et REGCM4 (RCP 2.6 et 8.5) par downscaling statistique.
- Période future - 2046-2065 : projections à moyen terme réalisées à partir des modèles ALADIN-Climat (RCP 2.6, 4.5 et RCP 8.5) et REGCM4 (RCP 2.6 et 8.5) par downscaling statistique.
- Période future - 2081-2100 : projections à long terme réalisées à partir des modèles ALADIN-Climat (RCP 2.6, 4.5 et RCP 8.5) et REGCM4 (RCP 2.6 et 8.5) par downscaling statistique.

Ainsi ce sont 1224 fichiers raster à 25 m qui ont été calculés sur la métropole NCA pour les températures maximales (Tx) et pour les températures minimales (Tn) :

- 12 cartes mensuelles par variable, par paramètre statistique et par modèle pour la période de référence : 144 cartes au total
- 12 cartes mensuelles par variable, par paramètre statistique, par scénario et par modèle pour le court terme 2016-2035 : 360 cartes au total
- 12 cartes mensuelles par variable, par paramètre statistique, par scénario et par modèle pour le moyen terme 2036-2065 : 360 cartes au total
- 12 cartes mensuelles par variable, par paramètre statistique, par scénario et par modèle pour le long terme 2081-2100 : 360 cartes au total

Pour les précipitations le RCP 4.5 et 8.5 ont été retenus et les cartes de cumuls moyens mensuels ont été construites. Ainsi 132 fichiers rasters à 25 m décrivent l'évolution des précipitations mensuelles moyennes pour 1986-2005, 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100.

SOMMAIRE

Introduction	4
1. Données et méthode de régionalisation climatique	4
2. Résultats	8
2.1 Validation du downscaling statistique.....	8
2.2 Cartographies des températures de juillet de 1986-2005 à la fin du XXI ^e siècle.....	9
2.3 Évolution des températures minimales et maximales pour les 12 mois de l'année, pour chaque période et pour chaque scénario selon les modèles ALADIN et REGCM4.....	16
2.3.1 <i>Évolution des températures maximales moyennes et extrêmes depuis 1986-2005</i>	16
2.3.2 <i>Évolution des températures minimales moyennes et extrêmes depuis 1986-2005</i>	18
2.3.3 <i>Évolution des températures maximales et minimales moyennes et extrêmes à Nice aéroport et à Isola 2000</i>	20
2.4 Cartes des températures maximales et de l'humidex à 1 m de résolution spatiale durant les mois d'été Juin-Juillet-Août : quel confort thermique à Nice pour demain ?.....	22
2.5 Cartes de précipitations et évolutions des cumuls de pluie durant le XXI ^e siècle....	29
Conclusion	33
Bibliographie	34
Annexes	37

INTRODUCTION

Au sein du département des Alpes-Maritimes la métropole Nice Côte d'Azur subit au même titre que l'ensemble du monde méditerranéen des évolutions climatiques rapides. Les projections climatiques élaborées par l'intermédiaire des modèles climatiques globaux (GCM) et plus localement des modèles climatiques régionaux (RCM) manquent de finesse spatiale si bien qu'il est intellectuellement impossible d'imaginer comment les conséquences de ces changements pourront affecter une ville, et plus encore un quartier. Ainsi cette étude a pour objectif principal d'affiner les résultats des modélisations climatiques faites sur de larges pixels d'une dizaine à une centaine de kilomètres de côtés : que se passe-t-il au sein de chaque pixel lorsque le pixel en question est à moitié maritime et à moitié continental, ou même lorsque la topographie en son sein varie fortement ? Les résultats de ce travail vont créer de l'information climatique en découpant chaque pixel de 12 km de côté (résolution spatiale des RCM utilisés) en 230 400 pixels de 25 m de côté. Concrètement, là où il y avait une température d'indiquée, il y en aura 230 400 après ce zoom spatial appelé downscaling.

Ce rapport présente l'ensemble des éléments permettant de comprendre les cartographies produites pour les températures, les précipitations et les indices d'humidex. Après une première partie décrivant la méthode suivie et les données utilisées en entrée, les résultats sont exposés et détaillés sous l'angle de leur validité, de leur représentation cartographique et graphique.

1. Données et méthode de régionalisation climatique

La méthode utilisée dans ce travail (Martin et al., 2013), le downscaling statistique appliqué aux sorties de modèles climatiques régionaux (RCM, déclinaison locale, à aire limitée, des modèles climatiques globaux, GCM, simulant le climat sur l'ensemble de la Terre), est expliquée ci-dessous et illustrée dans la figure 1 :

Les méthodes de descente d'échelle statistique sous-tendent que le climat régional ou local dépend de deux facteurs : le climat à échelle continentale et les caractéristiques locales ou régionales comme la topographie, la répartition terre/mer ou l'occupation du sol (Von Storch 1995, 1999). Cependant dans la quasi-totalité des travaux réalisés à l'aide d'une méthode de downscaling statistique, les auteurs considèrent que les caractéristiques locales ou régionales se limitent uniquement aux variables météorologiques et ils ne prennent pas en compte d'autres variables environnementales telles que celles citées ci-dessus (Mullan, 2012 ; Khalili, 2013). Le point commun à la grande majorité de ces études réside dans le fait qu'en fin de traitement les prévisions climatiques ne sont établies que pour des points précis de l'espace. En règle générale ces points sont les stations météorologiques qui ont fourni les variables locales pour établir les relations statistiques avec les sorties de modèles climatiques.

Dans la bibliographie un grand nombre d'articles traite de cette question de descente d'échelle statistique. Il s'agit fréquemment d'améliorer la précision spatiale des projections climatiques concernant les précipitations journalières (Liu, 2013 ; Lutz, 2012 ; Yin, 2011 ; Haylock, 2006 ; Wilby, 2000). En effet cette variable alimente de nombreux modèles environnementaux comme des modèles hydrologiques par exemple (Boé, 2007 ; Chen, 2010 ; Sachindra, 2013). Concernant les températures les travaux sont également abondants : régionalisation des températures dans l'état du Rajasthan en Inde (Goyal, 2011), dans le sud-ouest du Québec et le sud-est de l'Ontario (Khalili, 2013), dans le nord-est des Etats-Unis (Ahmed, 2013) et dans le nord du Chili (Souvignet, 2010) par exemple.

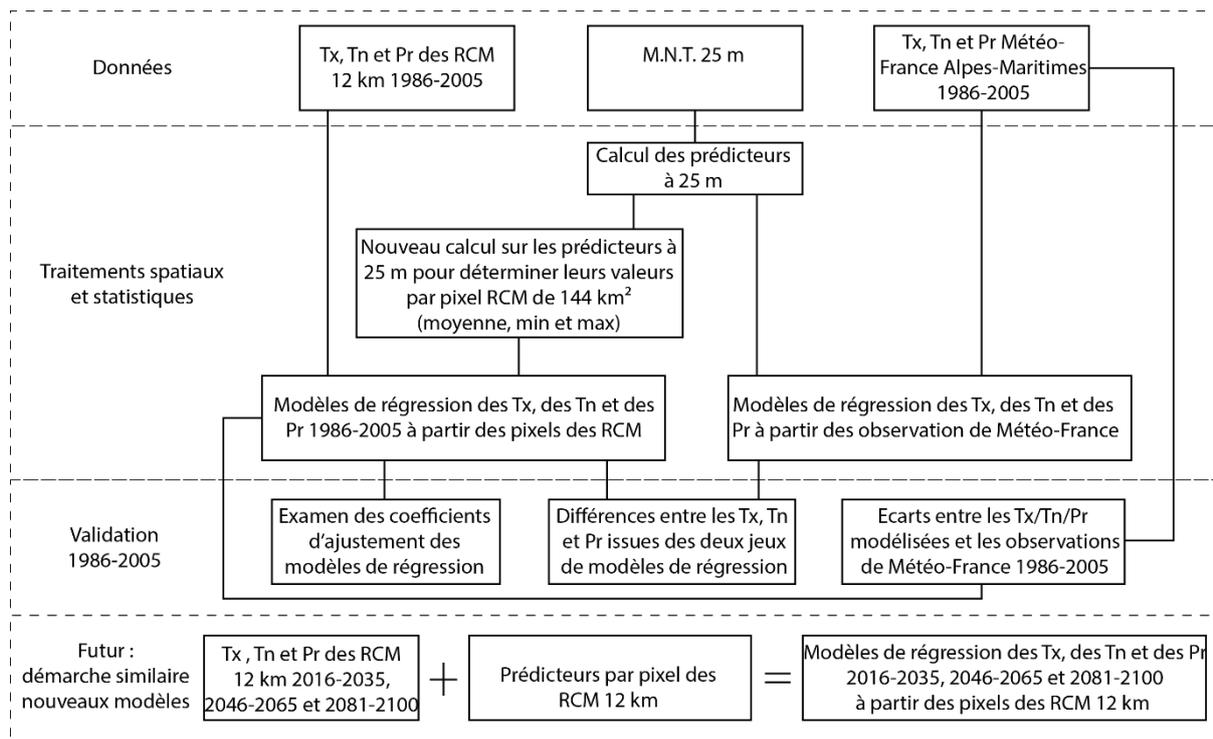


Figure 1. Organigramme synthétique de l'enchaînement des traitements pour spatialiser à fine échelle spatiale les sorties de températures minimales/maximales et de précipitations des Regional Climate Model (RCM).

Dans le détail, plusieurs techniques sont employées pour améliorer la résolution spatiale des sorties de modèles climatiques : classifications de types de temps et modèles de régression pour les plus usitées, avec très fréquemment des combinaisons ou des comparaisons entre les méthodes suivies (Wetterhall, 2006 ; Liu, 2012). La première méthode permet de calculer les valeurs moyennes d'une variable pour chaque type de temps, et d'établir pour le futur, en fonction de la modification des types de temps, les nouvelles valeurs moyennes (Corte-Real et al., 1999 Wetterhall, 2007). Par ailleurs les modèles de régression représentent des relations linéaires ou non-linéaires entre des variables locales et des sorties de modèles globaux ou régionaux : la régression linéaire multiple (Niojarov, 2012 ; Goyal, 2012 ; Jeong, 2011 ; Souvignet, 2011 ; Gachon, 2007), l'analyse de corrélation canonique (Khan, 2006) ou les réseaux de neurones artificiels (Goyal, 2012).

Peu de travaux ont jusqu'à présent débouché sur une vraie cartographie appliquée aux sorties de modèles climatiques, c'est-à-dire sur une « descente d'échelle » concernant un réseau de points ou de pixels si serré que le terme d'espace puisse lui être attribué. Ce travail en est un exemple.

Il existe deux logiques principales pour reconstituer un champ thermique, selon une démarche statistique, avec toujours le même point de départ, un réseau de postes météorologiques sur un territoire donné, et le désir d'attribuer une valeur à tous les espaces intermédiaires où l'on ne dispose pas de l'information recherchée. La première approche, celle de l'autocorrélation spatiale, consiste à attribuer une valeur à tous les pixels qui n'en ont pas, en se fondant sur la valeur de ceux qui en ont (là où existe un poste) en fonction de la distance qui les sépare. Plus on se rapproche d'un pixel à valeur connue, plus on lui ressemble, des coefficients divers commandant les gradients spatiaux supposés pouvant moduler le rôle de

cette distance. Divers travaux (Laborde, 1984 ; Lhotellier, 2005) ont montré que cette approche trouve ses limites en relief contrasté, donc en montagne, et les variogrammes indiquent souvent qu'il n'est pas justifié d'avoir recours à cette logique dans ces circonstances.

La seconde approche, consiste à chercher des relations entre les points renseignés (postes météorologiques) et leur environnement propre, c'est-à-dire essentiellement les paramètres topographiques de leur site. La relation température et altitude, mais aussi température et exposition, pente, encaissement, exposition, etc. ainsi que des paramètres de position (latitude Y, longitude X) ou de distance par rapport à la mer. Divers auteurs ont ainsi travaillé sur la variabilité spatiale des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) : Carrega, 1982, 1994, 1995 ; Malika Madelin, 2004 ; Lhotellier, 2005 ; Joly, 1987, 2011 ; Hengl, 2009). La relation entre températures et environnement est quantifiée par régression linéaire multiple, qui peut être délinéarisée si besoin, par anamorphose, par exemple l'expression d'une distance par son logarithme.

Le modèle général est du type :

$$T = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$$

Où T est la température recherchée ;

a_0 est une constante exprimant en fait une sorte d'état régional où toutes les variables descriptives seraient égales à zéro ;

x_1 et autres variables $x_2 \dots X_n$ sont les variables descriptives « environnementales », les « prédicteurs » ;

$a_1 \dots a_n$ sont les coefficients de régression multiple exprimant les gradients (l'influence de chaque descripteur, traduite en température).

Une fois l'équation déterminée, pour calculer la température de chaque pixel où elle n'est pas connue, il suffit d'attribuer sa valeur à chaque descripteur, de le multiplier par le coefficient de régression associé, et donc de résoudre l'équation.

Cette approche se situe à l'interface entre la démarche déterministe physique et la démarche statistique puisque le choix des variables environnementales n'est pas aléatoire mais guidé par l'intensité des relations statistiques qu'entretiennent ces données avec le phénomène à modéliser, pour des raisons physiques. Ces mécanismes déterministes sont contenus implicitement dans les modèles de régression multiple construits : par exemple la relation Tx/altitude exprime fortement la relation température/pression atmosphérique.

Cette approche peut s'appliquer à des valeurs moyennes (donc des séries de 20 ou 30 ans comme celles utilisées pour caractériser un climat actuel ou futur) avec des performances généralement très élevées, ou aussi à des valeurs « instantanées » comme celles des Tx d'une journée, par exemple, mais avec des performances très variables selon les cas. Il n'est de toutes façons pas légitime d'appliquer une équation calculée sur une moyenne trentenaire à une situation individuelle d'un jour précis, puisque la moyenne résulte de la synthèse de tous les types de temps et de circulation atmosphérique, par définitions parfois très variables d'un jour à l'autre. Il peut dans cette optique être utile de calculer une régression environnementale par type de temps donné, par exemple venteux, à ciel clair ou couvert, etc., selon l'application recherchée.

Notre but étant d'obtenir des cartes de températures à fine échelle spatiale pour le présent et le futur, se pose le problème de la source des données devant constituer la matrice de départ : le meilleur résultat pour le présent est obtenu à partir des données issues du réseau de postes météorologiques existants. Toutefois, à cette démarche inapplicable par définition pour le futur, a été préférée celle consistant à partir des sorties d'un modèle climatique déterministe, ce qui permet de comparer au mieux les cartes du futur et celles du présent, puisque construites selon le même protocole.

Les RCM utilisés sont le modèle ALADIN-Climat version 6.3 (AL63) du CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques – France) et le modèle REGCM4 version 6 (CM46) de l'ICTP (International Centre for Theoretical Physics – Italie), tous deux disponibles sur la plateforme Earth System Grid Federation et utilisés dans le projet Coordinated Regional climate Downscaling Experiment (<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/esgf-ipsl/>). Chacun d'entre eux est alimenté en amont par des modèles climatiques globaux (GCM) différents :

- Le HadGEM2-ES est produit par le Met Office (anglais), il fournit les conditions aux limites du REGCM4 ; il s'agit d'un « earth system model » (ESM), le type de modèle climatique global le plus élaboré actuellement.
- Le CNRM-CM5 (français) développé au CERFACS, il alimente ALADIN-Climat aux limites de son aire de modélisation ; c'est également un ESM.

Le recours à 2 GCM distincts permet de prendre en compte plus d'incertitude relative à la modélisation climatique, c'est donc un avantage pour balayer un peu plus encore les champs des possibles.

Ces RCM proposent des simulations du climat futur à 12 km de résolution spatiale et selon plusieurs RCP (Representative Concentration Pathway, le 2.6, le 4.5 et le 8.5). A chacun de ces RCP sont associés des forçages radiatifs, c'est-à-dire des quantités d'énergie en W/m² en plus dans le système climatique terrestre entre le début de la révolution industrielle et 2100 (le chiffre du RCP correspondant à la quantité de Watts croissante en raison de l'augmentation de l'effet de serre). Ces RCP trouvent leur équivalence avec les scénarios utilisés précédemment dans les modélisations climatiques, les SRES :

- Le RCP 4.5 équivaut au scénario B1 (émissions de GES qui continuent à croître jusqu'en 2050 environ puis qui baissent pour rejoindre les niveaux de 1980 en 2100) ;
- Le RCP 8.5 équivaut fortement au scénario A2 (multiplication par près de 3 des émissions de GES d'ici à 2100) ;
- Enfin le RCP 2.6 n'a pas d'équivalents parmi les SRES, et il suppose l'adoption quasi-immédiate d'un comportement vertueux de tous pour faire baisser les émissions de GES drastiquement afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050, les émissions étant ensuite négatives pour de longues décennies (déstockage du carbone atmosphérique).

La période dite « de référence » est la « normale » 1986-2005 qui a permis de valider la capacité des modèles climatiques régionaux à reproduire le climat considéré comme actuel, ainsi que l'aptitude du modèle de régression environnementale à affiner le champ thermique. Cette validation se double d'une confrontation avec les données observées de 12 postes météorologiques pour les températures et 28 postes météorologiques pour les précipitations, tous situés dans le département des Alpes-Maritimes.

2. Résultats

2.1. Validation du downscaling statistique

Après une longue phase de tâtonnement, et cela pour chacune des variables à modéliser, les prédicteurs retenus pour les modèles de régression environnementale sont les suivants :

- *Température maximale – 4 prédicteurs* : M.N.T. (Modèle Numérique de Terrain) à 25 m, Topographic Position Index calculé dans un rayon de 20 km, exposition nord-sud des versant à 25 m et logarithme népérien de la distance à la mer à 25 m.
- *Température minimale – 4 prédicteurs* : M.N.T. à 25 m, logarithme népérien de la distance à la mer à 25 m, logarithme népérien de la hauteur de pente à 25 m et hauteur normalisée à 25 m (les deux derniers prédicteurs sont dérivés du M.N.T. selon le module « Relative Heights and Slope Positions » de SAGA-GIS).
- *Précipitations – 3 prédicteurs* : M.N.T. à 1 km, logarithme népérien de la distance à la mer à 25 m et rugosité topographique dans un rayon de 10 km (écart-type des altitudes calculé dans un rayon de 10 km à partir du M.N.T. à 25m).

Afin de mesurer *la robustesse des modèles de régression environnementale* mis en place, la comparaison des résultats avec les données mesurées par Météo-France au cours de la période de référence 1986-2005 est la plus sérieuse des validations (calcul du RMCE, racine carrée de la moyenne du carré des écarts, pour le pixel de 25 m comprenant une station Météo-France). Pour l'ensemble des modèles mensuels des températures maximales, tout comme pour les modèles mensuels des températures minimales l'incertitude des modélisations climatiques à 25 m de résolution s'établit autour de 0,85°C (0,8°C pour les maximales et 0,9°C pour les minimales). Quant aux modèles mensuels des précipitations l'incertitude est toujours inférieure à 15% du cumul de pluie mensuel. Ces résultats sont jugés très satisfaisants. Le tableau 1 ci-dessous regroupe les valeurs moyennes (établies à partir des 12 valeurs mensuelles) de RMCE obtenues pour chacune des variables climatiques relatives aux températures maximales et minimales modélisées à 25 m :

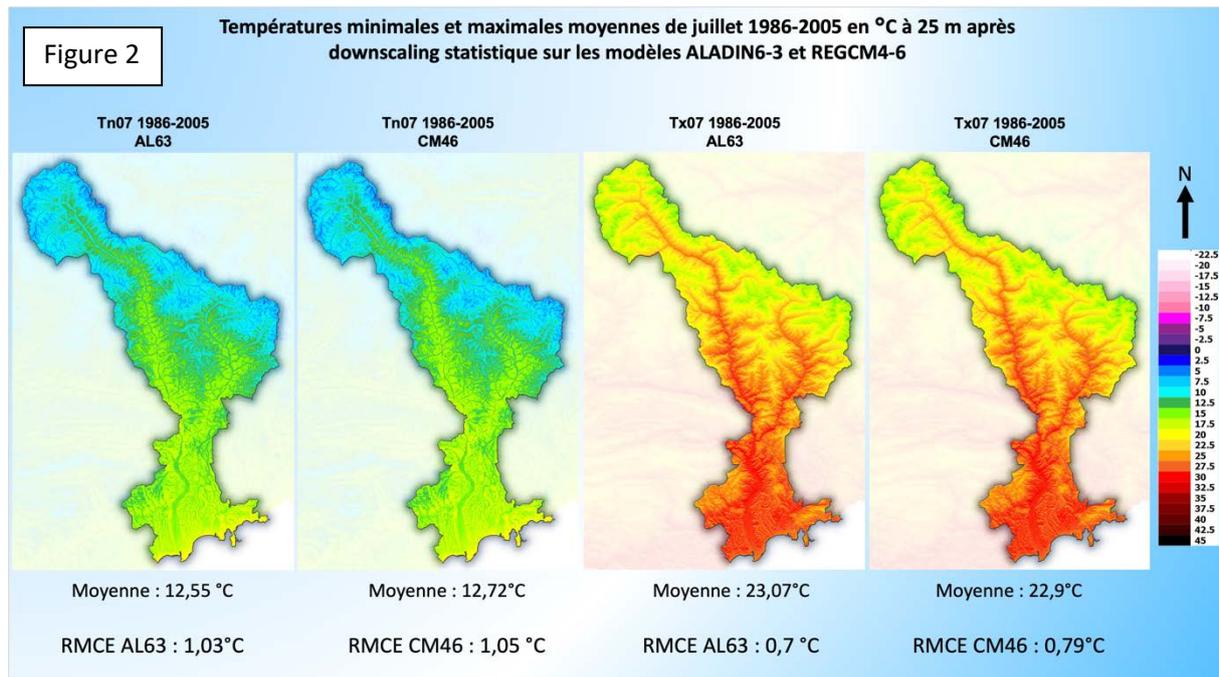
Tableau 1. Valeurs de RMCE pour les Tx et les Tn moyennes et extrêmes sur la période de référence 1986-2005 pour les deux modèles climatiques régionaux utilisés.

RMCE en °C	Tx AL63	Tx CM46	Tn AL63	Tn CM46
Moyenne	0,7	0,78	0,98	1,02
Percentile 10	0,72	0,77	0,86	0,85
Percentile 90	0,79	0,92	0,85	0,87

Concrètement ces chiffres représentent l'incertitude des cartes de températures modélisées à 25 m. Les résultats obtenus ont une fourchette de probabilité comprise entre plus ou moins 0,8 à 0,9°C autour de la valeur considérée. Ainsi lorsque l'évolution des températures entre la période de référence et une période future est de plus de 1°C (déjà vrai pour la période estivale actuelle), *alors le signal climatique est supérieur à l'incertitude des modèles*; les projections climatiques à 25 m de résolution sont donc significatives et dénotent une évolution du climat.

Outre la validation statistique de cette méthode de downscaling, une attention particulière a été accordée à l'aspect visuel des champs thermiques représentés sur les cartes finales obtenues à partir des deux modèles ALADIN et REGCM4. L'impératif s'est notamment porté sur la

nécessaire étroite ressemblance entre les résultats cartographiques spatialisés pour la même variable et pour le même mois de la période de référence 1986-2005 à partir des deux différents modèles. Après calibration des modèles de régression effectuée par confrontation avec les données observées par les stations de Météo-France, les cartes issues des deux RCM doivent être très similaires pour le même mois. L'exemple des températures minimales et maximales moyennes de juillet 1986-2005 propose des cartes presque jumelles quel que soit le RCM utilisé en entrée du downscaling statistique (fig. 2). La moyenne des valeurs de l'ensemble des pixels composant le territoire de la métropole NCA est la même à moins de 0,2°C. La forte similitude entre les cartes élaborées pour la période de référence à partir des deux RCM est valable pour chaque mois de l'année.



2.2. Cartographies des températures de juillet de 1986-2005 à la fin du XXIe siècle.

A titre d'exemple, et parce que l'enjeu climatique à travers le confort thermique et ses potentielles conséquences sanitaires est encore plus prégnant pour la période estivale que pour le reste de l'année sur le territoire de la métropole NCA, l'ensemble des cartes établies pour le mois de juillet pour toutes les périodes, pour les deux modèles régionaux, pour tous les paramètres statistiques (moyennes et extrêmes) et pour le RCP 8.5 est présenté ici et commenté. Ainsi les figures suivantes s'enchaînent comme suit :

- Figure 3 : Cartes des Tn percentiles 10 et des Tx percentiles 10 de juillet 1986-2005 pour AL63 et CM46.
- Figure 4 : Cartes des Tn percentiles 90 et des Tx percentiles 90 de juillet 1986-2005 pour AL63 et CM46.
- Figure 5 : Cartes des Tn percentiles 10 et des Tx percentiles 10 de juillet 2016-2035 pour AL63 et CM46 pour le RCP 8.5.
- Figure 6 : Cartes des Tn moyennes et des Tx moyennes de juillet 2016-2035 pour AL63 et CM46 pour le RCP 8.5.
- Figure 7 : Cartes des Tn percentiles 90 et des Tx percentiles 90 de juillet 2016-2035 pour AL63 et CM46 pour le RCP 8.5.

- Figure 8 : Cartes des Tn percentiles 10 et des Tx percentiles 10 de juillet 2046-2065 pour AL63 et CM46 pour le RCP 8.5.
- Figure 9 : Cartes des Tn moyennes et des Tx moyennes de juillet 2046-2065 pour AL63 et CM46 pour le RCP 8.5.
- Figure 10 : Cartes des Tn percentiles 90 et des Tx percentiles 90 de juillet 2046-2065 pour AL63 et CM46 pour le RCP 8.5.
- Figure 11 : Cartes des Tn percentiles 10 et des Tx percentiles 10 de juillet 2081-2100 pour AL63 et CM46 pour le RCP 8.5.
- Figure 12 : Cartes des Tn moyennes et des Tx moyennes de juillet 2081-2100 pour AL63 et CM46 pour le RCP 8.5.
- Figure 13 : Cartes des Tn percentiles 90 et des Tx percentiles 90 de juillet 2081-2100 pour AL63 et CM46 pour le RCP 8.5.

Les paramètres statistiques représentés dans toutes ces cartes sont d'une part la moyenne mensuelle, c'est-à-dire la température enregistrée très fréquemment durant les jours de juillet puisque l'été est une sorte de plateau thermique (comme l'hiver serait une cuvette thermique), alors que le printemps et l'automne sont des saisons de transition, les moyennes mensuelles n'étant alors qu'une construction intellectuelle. D'autre part les percentiles 10 et 90 mensuels sont les valeurs qui ne sont pas dépassées, respectivement, 10 et 90% du temps. Par exemple le percentile 10 des Tn de juillet 1986-2005 représente la 62^e plus petite température minimale enregistrée (ou modélisée) sur les 620 journées des mois de juillet de 1986 à 2005 (31 jours par 20 années). De manière identique le percentile 90 des Tn de juillet de 1986 à 2005 est la 558^e plus petite valeur, soit la 63^e plus grande de ces 620 mêmes journées. Ces percentiles constituent donc des valeurs bien plus faibles ou bien plus fortes en valeur absolue, respectivement, que la moyenne, et ont des fréquences d'apparition plus basses : quand la moyenne est atteinte quasiment 1 jour sur 2 alors les percentiles 10 et 90 ne sont enregistrés qu'1 jour sur 10 statistiquement.

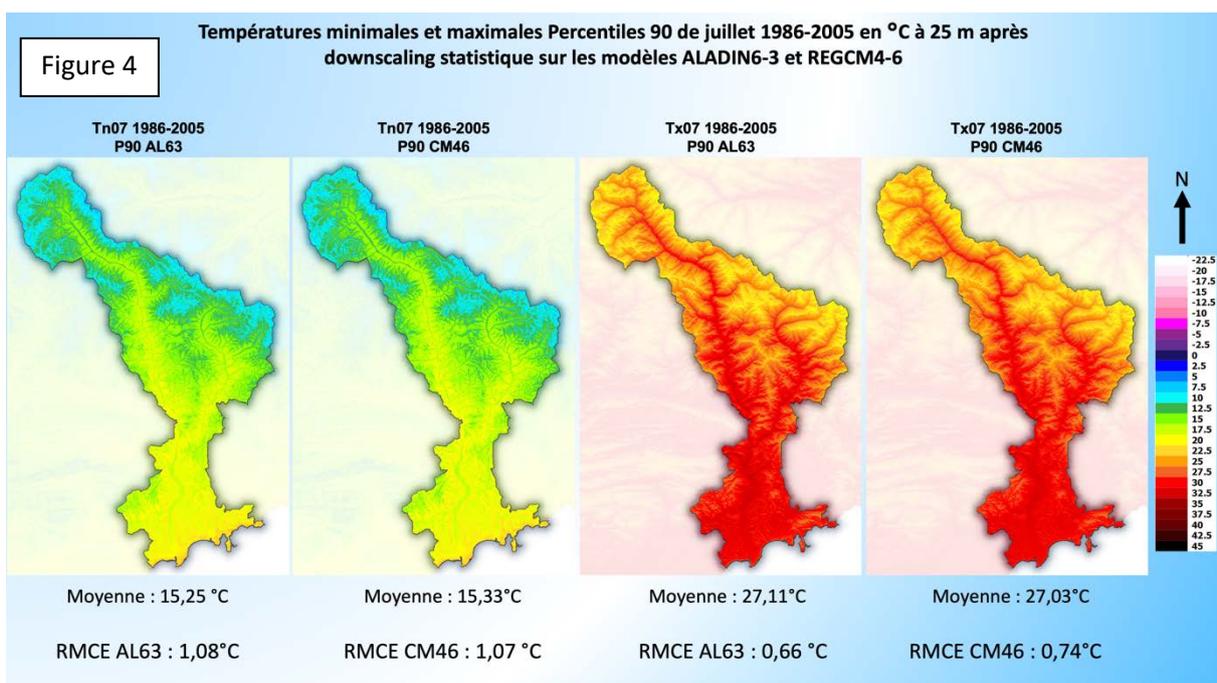
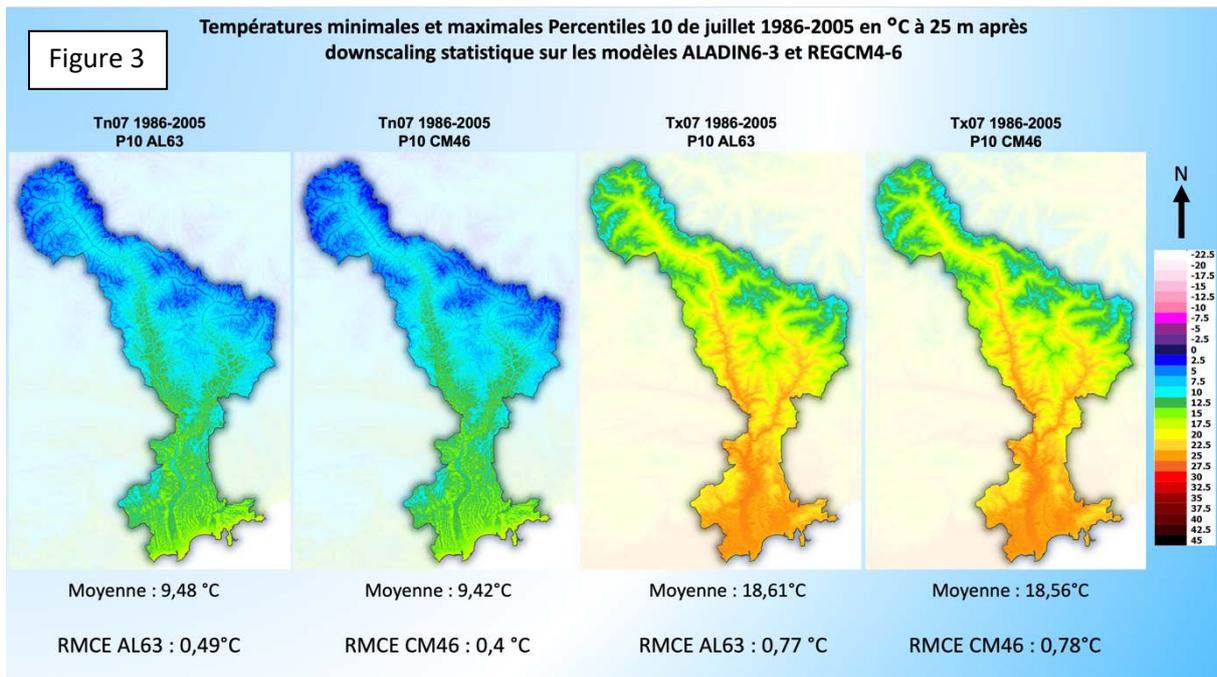
L'élaboration des cartes des P10 et P90 permet de prendre en compte la variabilité du climat maintenant et pour les potentiels futurs : est-ce que cette variabilité va changer, et dans quel sens ? Ces paramètres statistiques peuvent être qualifiés « d'extrêmes » mais ne sont toutefois pas des valeurs records puisque dans chaque cas 62 autres journées du même mois ont connu des températures plus basses ou plus hautes.

Que ce soit pour les Tn ou bien pour les Tx leur variabilité spatiale est très forte sur le territoire de la métropole tant les facteurs géographiques régissant les mécanismes thermiques subissent des variations propres : la topographie de plus en plus accidentée combinée à une distance à la mer toujours plus forte modifient profondément les champs thermiques. Pour la période 1986-2005 (fig. 2 à 4), cette variabilité s'apprécie aisément sur les cartes avec des couleurs très différentes sur le territoire du sud au nord.

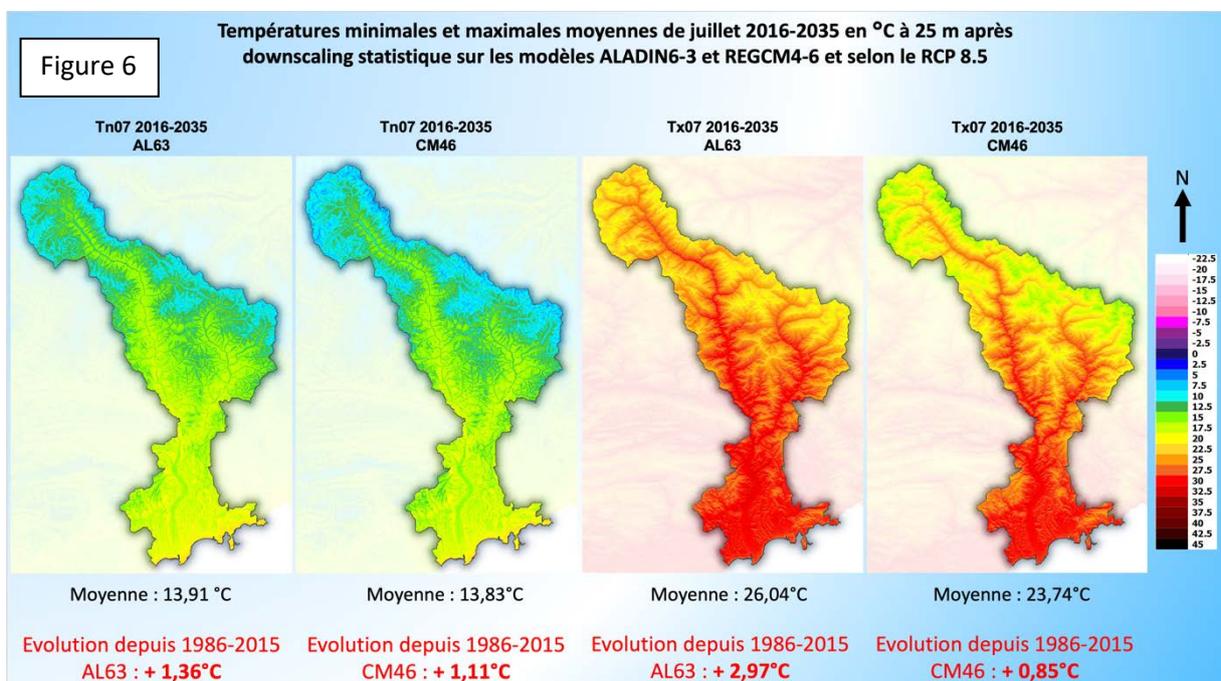
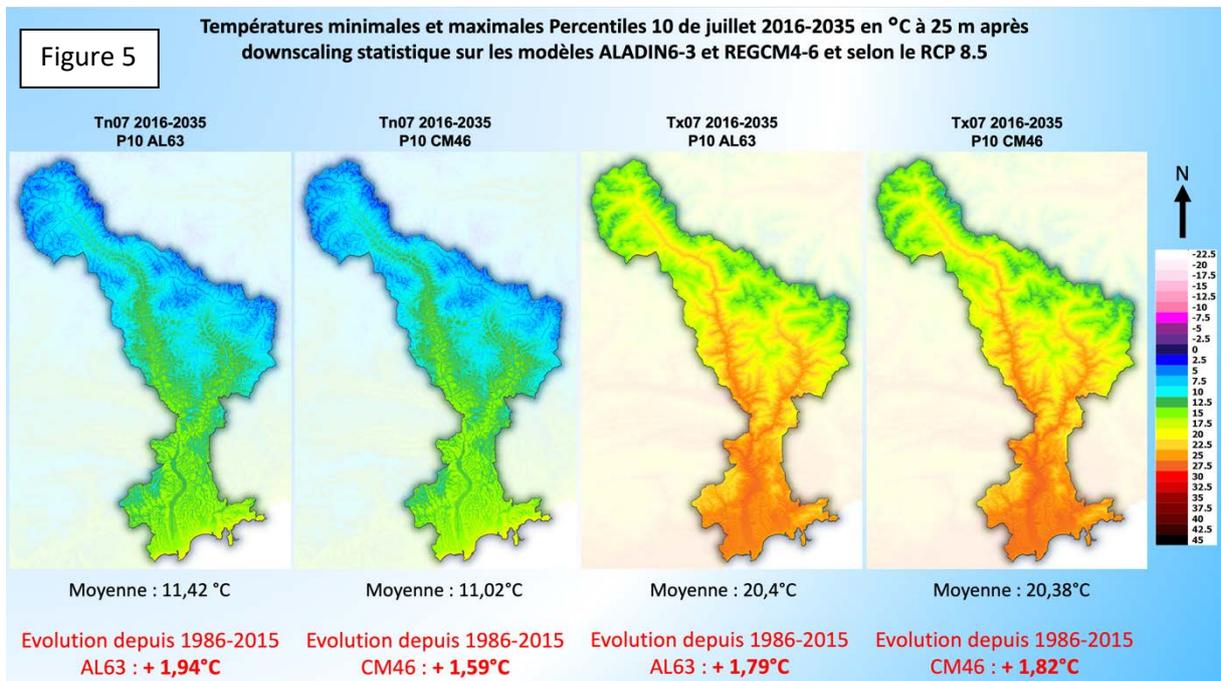
Pour les Tn les espaces les plus frais sont ceux aux plus hautes altitudes, mais également les sites encaissés en fond de vallée, ou dans des cuvettes topographiques, où le phénomène d'inversion thermique s'exprime très fortement dans notre région (durant les nuits avec un ciel très dégagé, et par perte de rayonnement infrarouge du sol : accumulation d'air froid plus lourd dans les points bas). En se rapprochant du littoral de la Méditerranée les Tn « s'adoucissent » puisqu'elles bénéficient de la forte inertie thermique de cette grande masse d'eau toujours plus chaude que le continent durant la nuit. Les P10 des Tn de juillet sont comprises entre 15 et 16°C

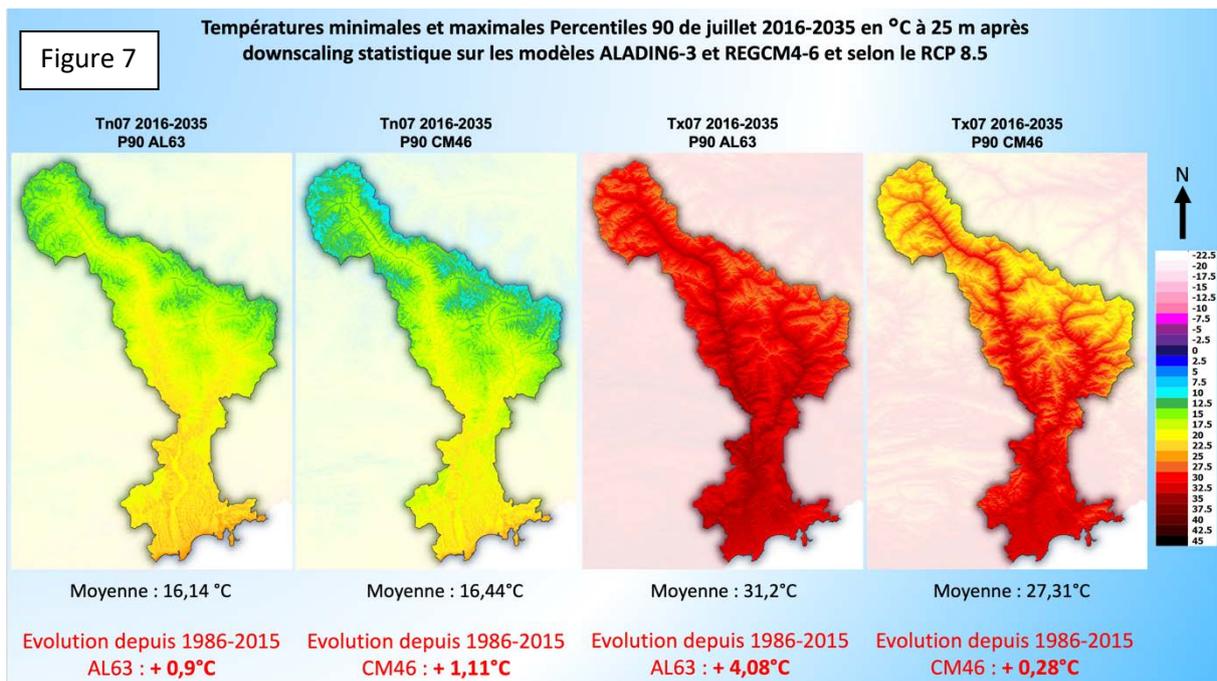
près du littoral, les moyennes de ces même Tn atteignent plutôt 18 à 20°C près de la mer alors que les P90 sont 2 à 3°C plus élevées avec 21 à 23 voire 24°C.

Quant aux Tx les espaces les plus chauds sont les sites les plus bas en altitude, encaissés plutôt orientés sud-ouest et loin du littoral où comme précédemment, mais cette fois-ci dans le sens inverse, l'inertie thermique de la mer, plus fraîche en journée que le continent, limite l'élévation des températures. Pour les P10 des Tx les valeurs sont comprises entre 24 et 25°C sur le littoral urbanisé, plutôt entre 27 et 28°C pour les moyennes et enfin sont de l'ordre de 29 à 31°C pour les P90. Dans les sites les plus chauds décrits plus haut ces P90 atteignent 33 à 34°C.

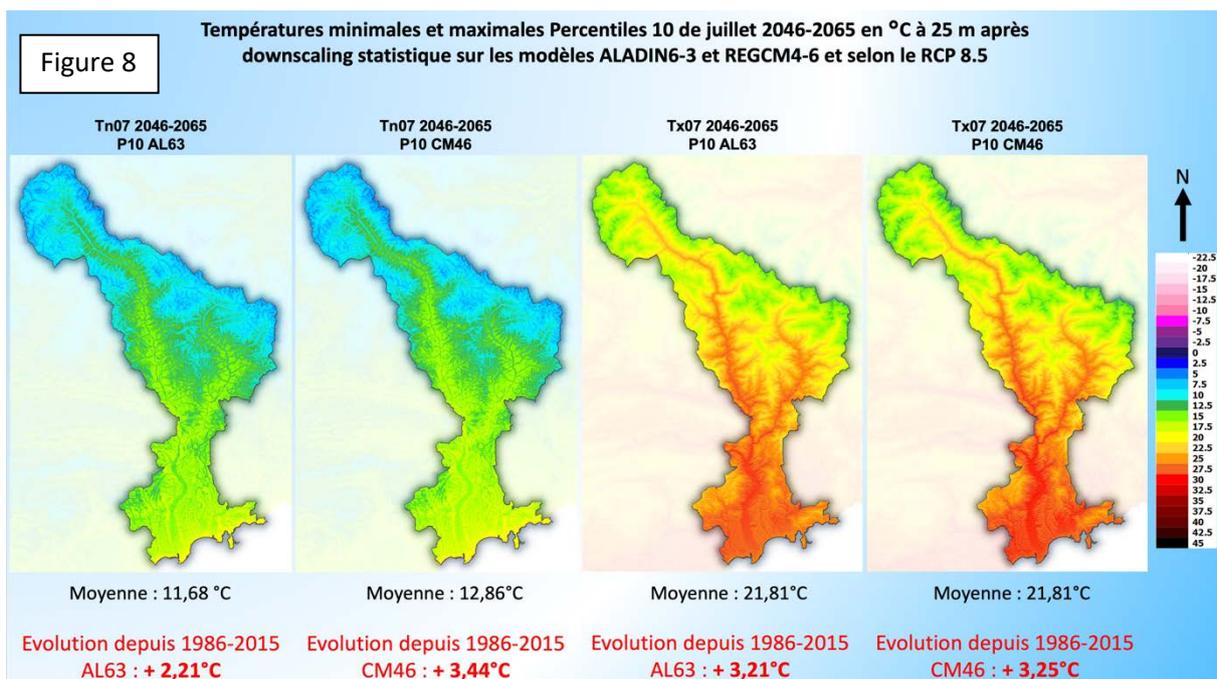


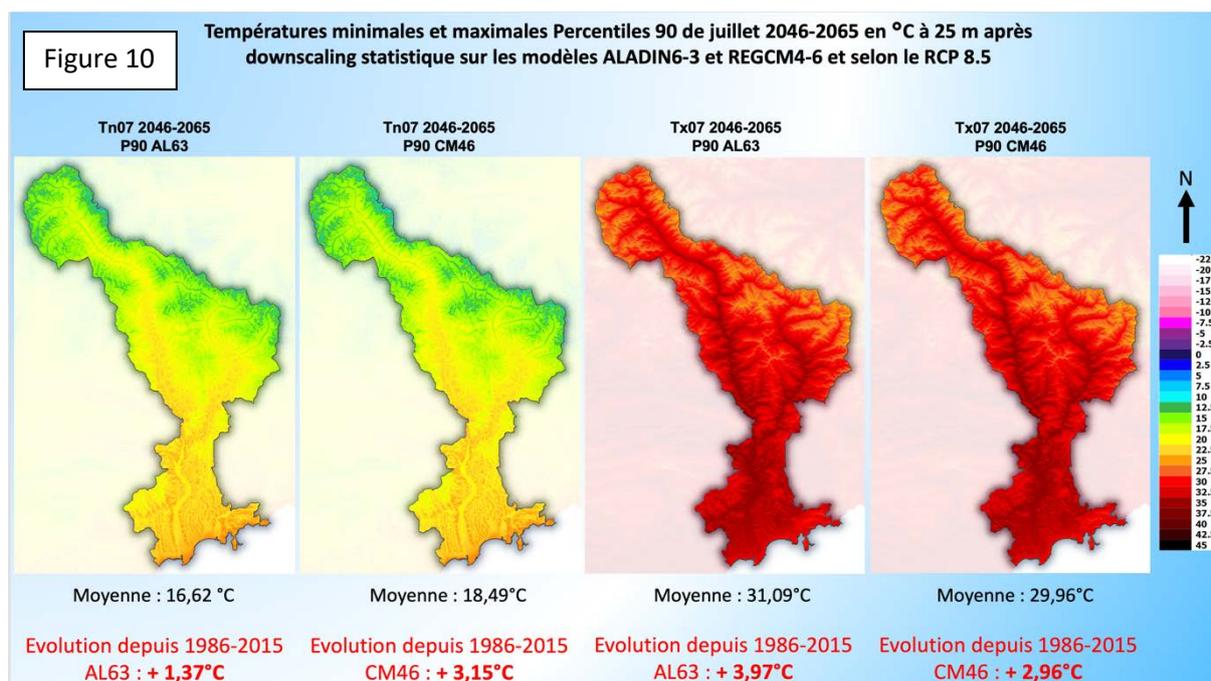
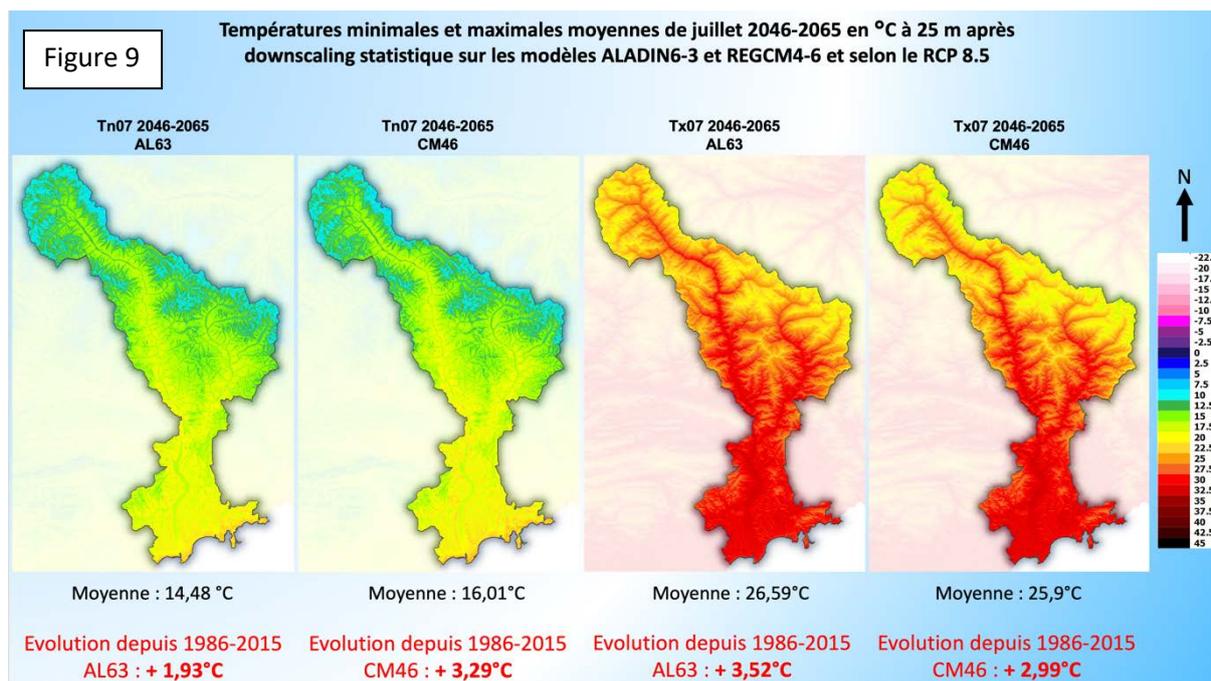
A court-terme pour la période climatique actuelle 2016-2035 (fig. 5 à 7) l'élévation de températures est déjà sensible (elle l'était aussi dans le passé entre les normales officielles de Météo-France de 1961-1990 et celles de 1981-2010, avec par exemple une Tn moyenne passée de 19,3 à 20,3°C à Nice aéroport en juillet). Les P10 des Tn et Tx de juillet gagnent en moyenne de 1,6 à près de 2°C selon le RCP 8.5. Les valeurs moyennes connaissent une évolution plus contrastée avec 1,1 à 1,4°C de hausse pour les Tn et de 0,9 à 3°C pour les Tx où les deux RCM ne donnent donc pas la même tendance. Ces constatations sont similaires pour les P90.





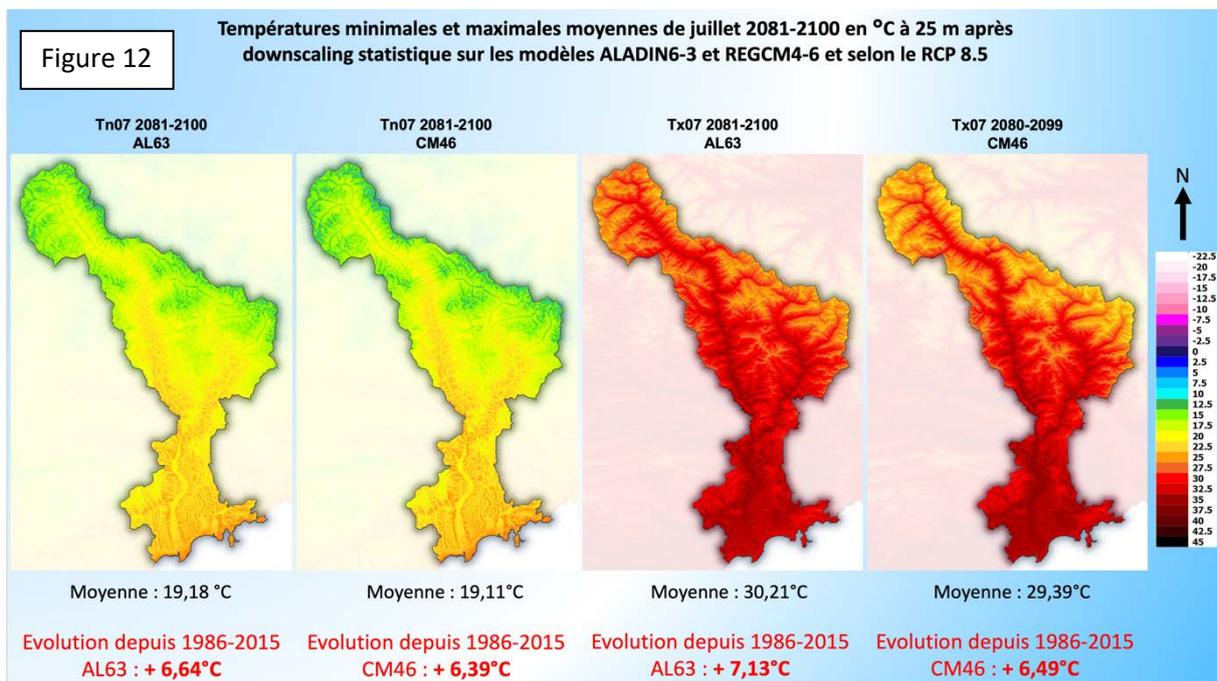
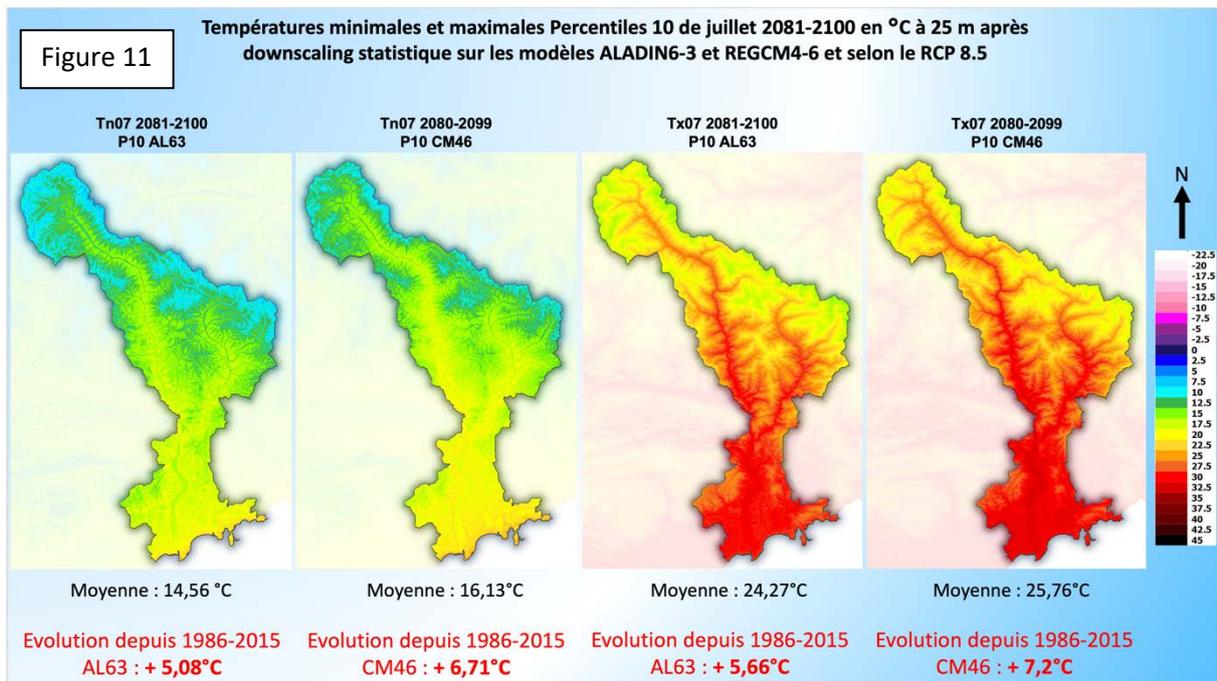
A moyen terme pour la période climatique 2046-2065 et toujours dans ce RCP 8.5 la hausse des Tn et des Tx s'accroît (fig. 8 à 10). Globalement quel que soit le paramètre statistique étudié et la température d'intérêt ce sont 2 à 4°C d'élévation modélisés par les deux RCM. Une sorte de translation s'opère entre les moyennes de 1986-2005 et les P10 de 2046-2065 mais également entre les P90 de 1986-2005 et les moyennes de 2046-2065. Cela signifie dans le premier cas que les températures du passé les plus fréquentes voient leur occurrence chuter tandis que dans le second cas les températures occasionnelles lors de vague de chaleur deviennent alors les plus fréquentes. Les Tn moyennes sont alors de 22 à 23°C sur le littoral et les P90 de ces Tn dépassent les 25°C, le confort thermique nocturne s'en verra fortement dégradé. Les Tx moyennes seront comprises entre 30 et 31°C sur le littoral et les P90 entre 32 et 33°C, quant aux sites les plus chauds leurs Tx dépasseront les 35 voire 36°C pour ces P90.



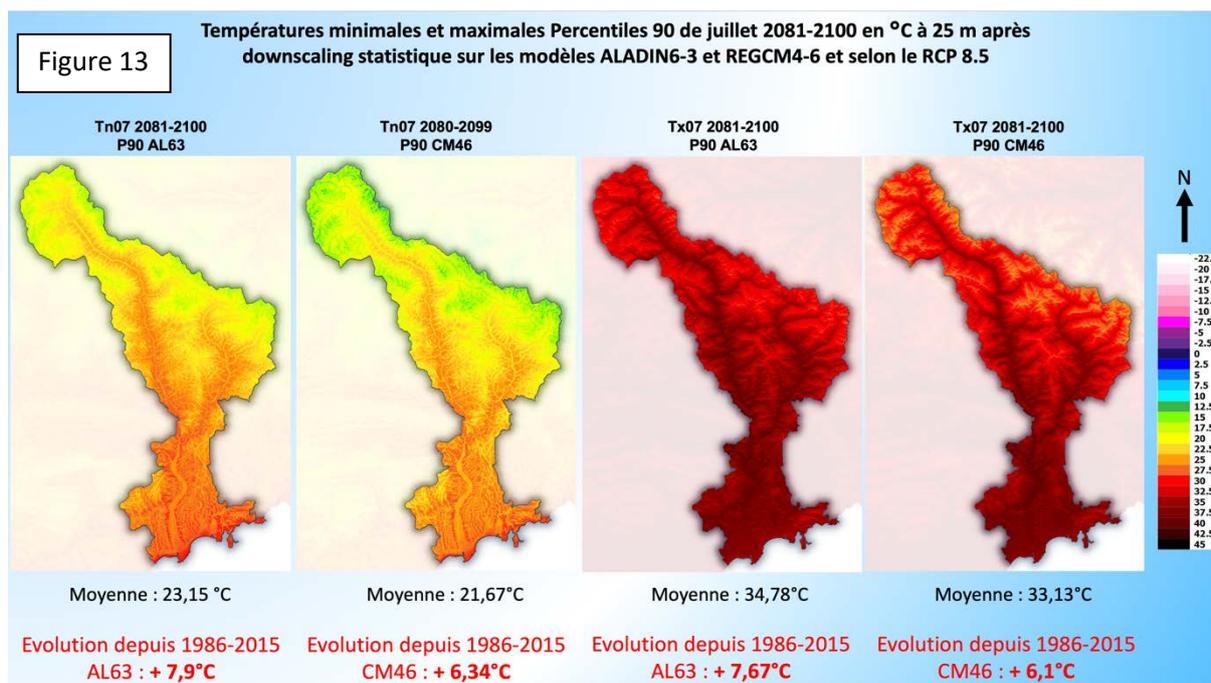


Enfin pour le long terme, la période climatique 2081-2100 et pour le RCP 8.5 les modélisations prédisent un climat très différent du climat actuel dans la métropole NCA : les hausses des Tn et Tx sont très fortes, de 5 à 8°C, et dépassent l'écart séparant la moyenne de température mondiale entre une période glaciaire, où le niveau de la mer est 120 mètres plus bas, et une période interglaciaire (fig. 11 à 13). Les conséquences de tout ordre seront donc majeures si un tel scénario se réalisait ; les températures atteintes dans le sud de la métropole seraient celles présentes actuellement dans l'intérieur des terres au Maghreb voire aux abords septentrionaux du Sahara : 32 à 34°C en moyenne sur le littoral pour les Tx, 35 à 36°C dans les lieux les plus chauds ; pour les P90 des Tx, c'est-à-dire pour rappel la température statistiquement observée 1 jour sur 10, la frange littorale sera concernée par des valeurs comprises entre 35 et 37°C et les sites encaissés à basse altitude loin de la mer connaîtront des

valeurs supérieures à 40°C. Le haut pays de la métropole ne sera pas épargné puisque les 30°C seront atteints sur la plupart des sommets. Concernant les Tn elles avoisineront les 25 à 26°C dans les zones urbaines côtières pour les moyennes et atteindront 28 à 29°C un jour sur 10.



Outre ce RCP 8.5 et ses conséquences probablement dramatiques à de multiples égards (sanitaires et environnementaux), les deux autres RCP, surtout le 2.6, ne dépeignent pas du tout la même évolution des températures pour le mois de juillet et plus largement pour la période estivale. C'est donc ce que la partie suivante s'attache à décrire en balayant le plus largement possible l'évolution des Tx et des Tn sur l'ensemble du territoire de la métropole, selon les différents scénarios et selon les 12 mois de l'année.



2.3. Évolution des températures minimales et maximales pour les 12 mois de l'année, pour chaque période et pour chaque scénario selon les modèles ALADIN et REGCM4.

Afin de ne pas transformer ce rapport en atlas climatique et pour rendre synthétiques les résultats de cette étude, ces derniers sont maintenant présentés graphiquement. Les 12 mois peuvent ainsi être comparés. Par ailleurs pour mieux caractériser l'actuel et les futurs climatiques potentiels de la métropole NCA le territoire a été subdivisé en deux parties fort différentes (frontière quasi latitudinale fixée arbitrairement dans les environs de la confluence du Var et de la Vésubie où la distance est-ouest entre les bordures de ce territoire est la plus faible, annexe 1) :

- Le sud, en partie littoral, est plutôt marqué par des altitudes relativement modérées.
- Le nord au relief contrasté mêle espaces très encaissés et sommets, le tout dans un environnement plus continental.

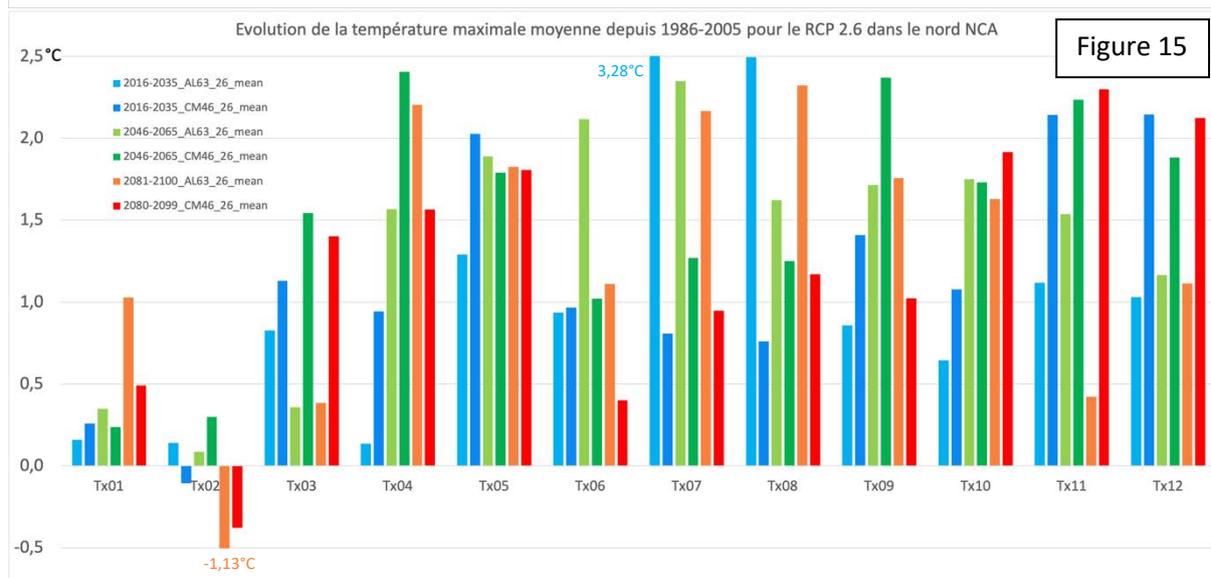
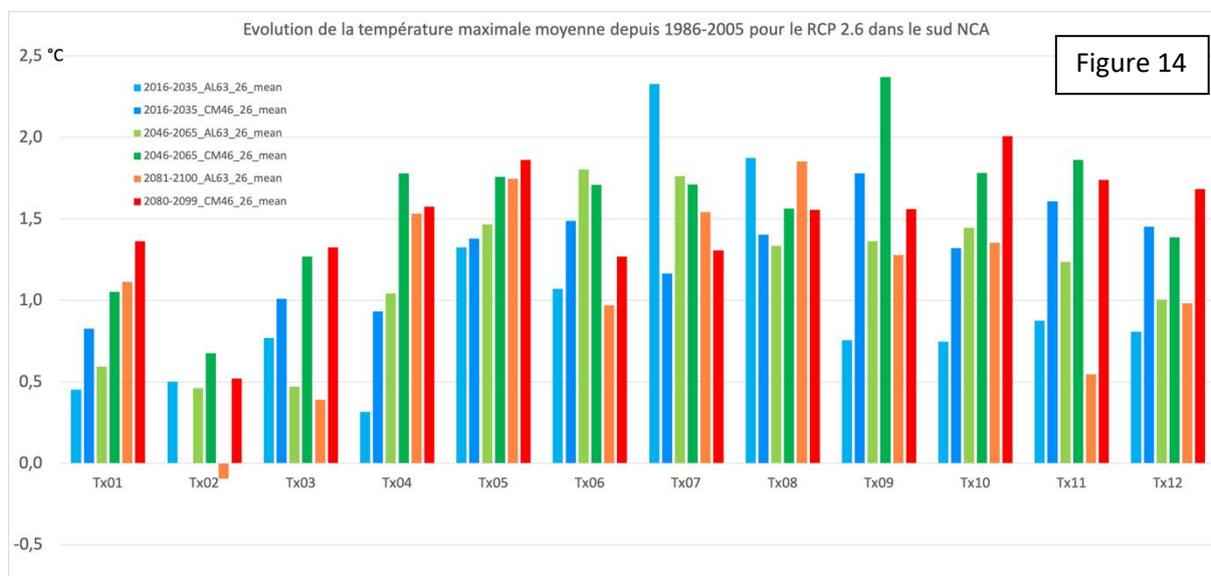
Les résultats les plus discutés dans ce rapport sont ceux pour les RCP 2.6 et 8.5, d'une part parce qu'ils fixent les limites basses et hautes aux champs des possibles, et d'autre part car les deux modèles climatiques régionaux ont fourni des sorties pour ces deux RCP (ce qui n'est pas le cas pour le RCP 4.5, résultats présentés en annexe 2 et 3). Ainsi les tendances dégagées pourront être qualifiées de plus robustes dans les cas où les résultats du downscaling statistique issus des deux modèles régionaux, et pour les mêmes RCP, seront proches.

2.3.1. Évolution des températures maximales moyennes et extrêmes depuis 1986-2005.

L'intégralité des modélisations relatives au RCP 2.6 indiquent des hausses de températures relativement contenues quel que soit le mois concerné et la zone géographique (fig. 14 et 15) :

- Le temps qui passe n'est pas synonyme d'aggravation du réchauffement, au contraire parfois. La hausse des Tx plafonnera probablement à la moitié du siècle pour décliner ensuite sachant qu'une grande partie de cette évolution est déjà accomplie aujourd'hui.
- L'intensité maximale des hausses de Tx s'établit à 2°C environ avec une intensité plus forte dans le nord.

- Le cœur de l'hiver (janvier et février) est moins concerné par la hausse des Tx notamment dans le nord montagneux où le réchauffement se limite à moins de 0,5°C généralement (avec même un refroidissement en février pour la fin du siècle).
- Les résultats du downscaling statistique issus des deux modèles régionaux sont plutôt concordants.



Par contre l'ensemble des résultats des simulations pour le RCP 8.5 annonce une forte évolution des Tx dans l'ensemble du territoire de la métropole (fig. 16 et 17) :

- Le temps qui passe est ici synonyme d'aggravation du réchauffement ; déjà présent dans la période climatique actuelle 2016-2035, il s'amplifie à la moitié du siècle et son intensité pourrait même être multipliée par 2 entre 2046-2065 et 2081-2100 : respectivement pour 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100 l'évolution est d'environ 1°C puis 1,5 à 3°C et enfin 3 à 6 voire 7°C en fonction des mois.
- Le nord du territoire se réchauffe un peu plus que le sud mais les différences sont de l'ordre de quelques dixièmes de degré et très rarement de plus d'1°C (juin, juillet et août pour AL63).

- La variabilité inter mensuelle de la hausse des Tx est marquée avec des étés bien plus chauds de 6 à 7 °C plus les décennies s'écouleront tandis que les hivers ne connaîtront « que » des hausses de 3 à 4°C.
- Les résultats du downscaling statistique issus des deux modèles régionaux sont plutôt concordants.

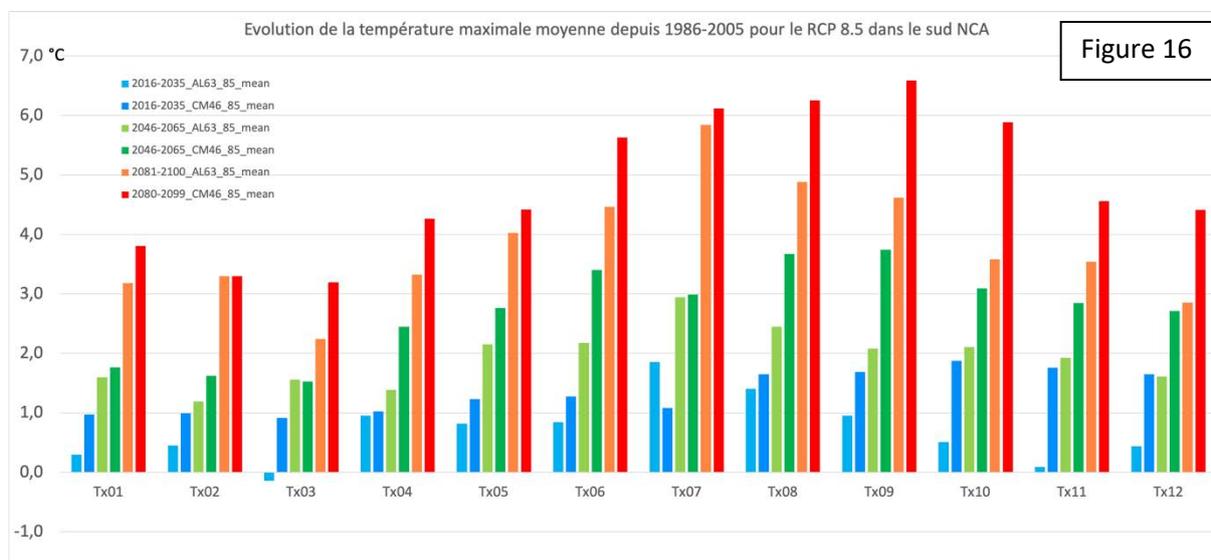


Figure 16

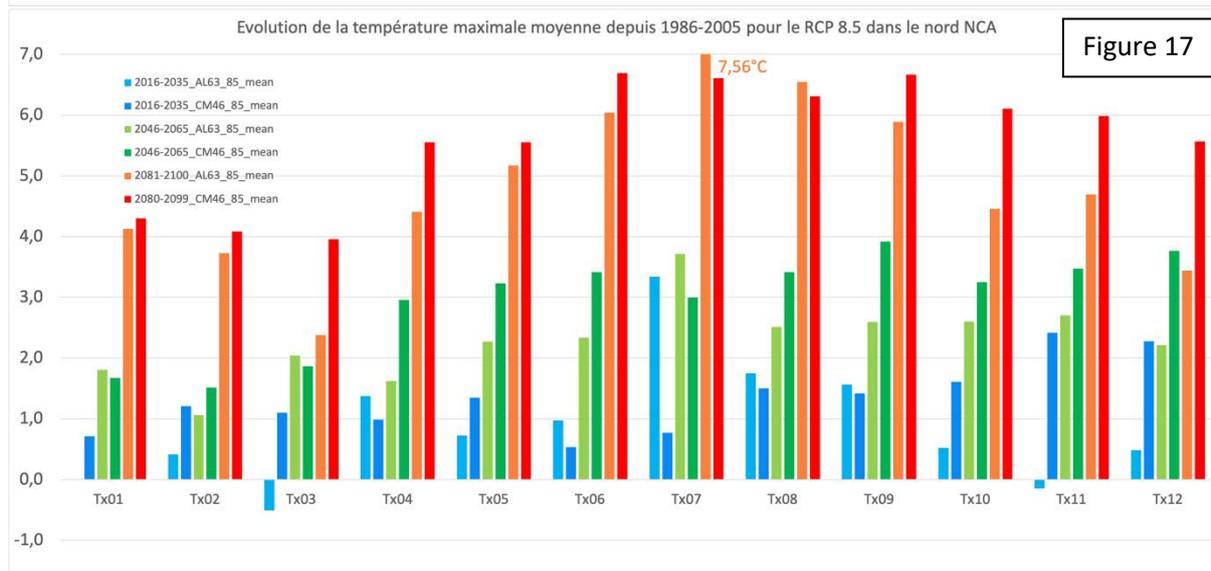


Figure 17

Pour le RCP 4.5 l'évolution des Tx suit globalement la logique constatée dans le RCP 8.5 mais avec des intensités moins fortes et avec des progressions déjà largement effectives en 2046-2065 ; pour la fin du siècle les hausses sont de l'ordre de 2 à 4°C (annexe 2).

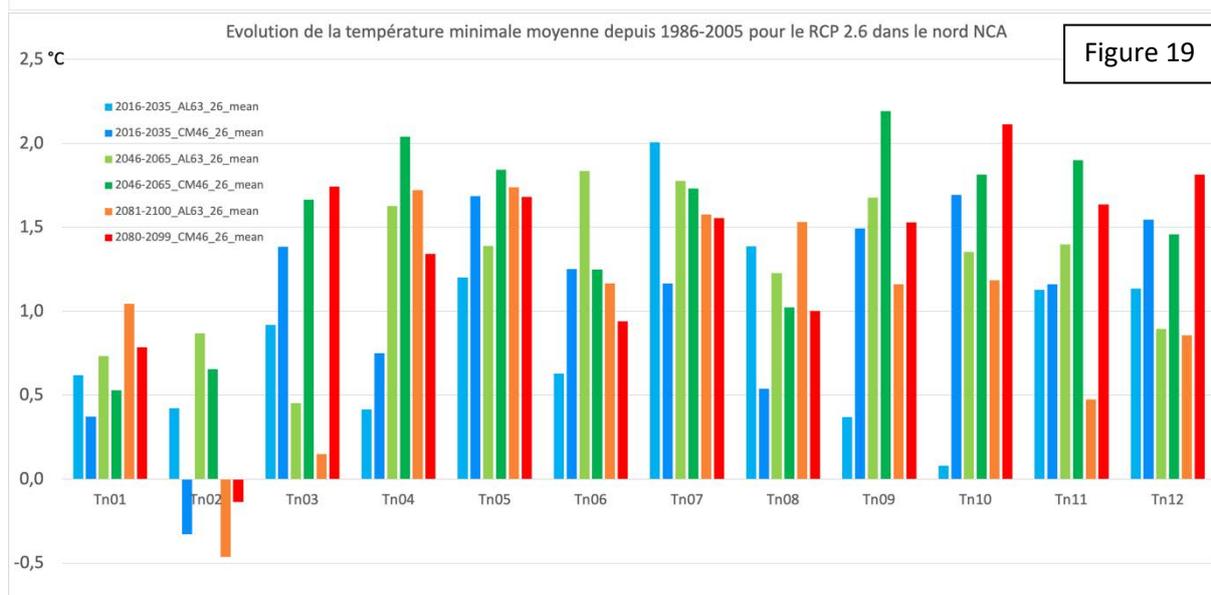
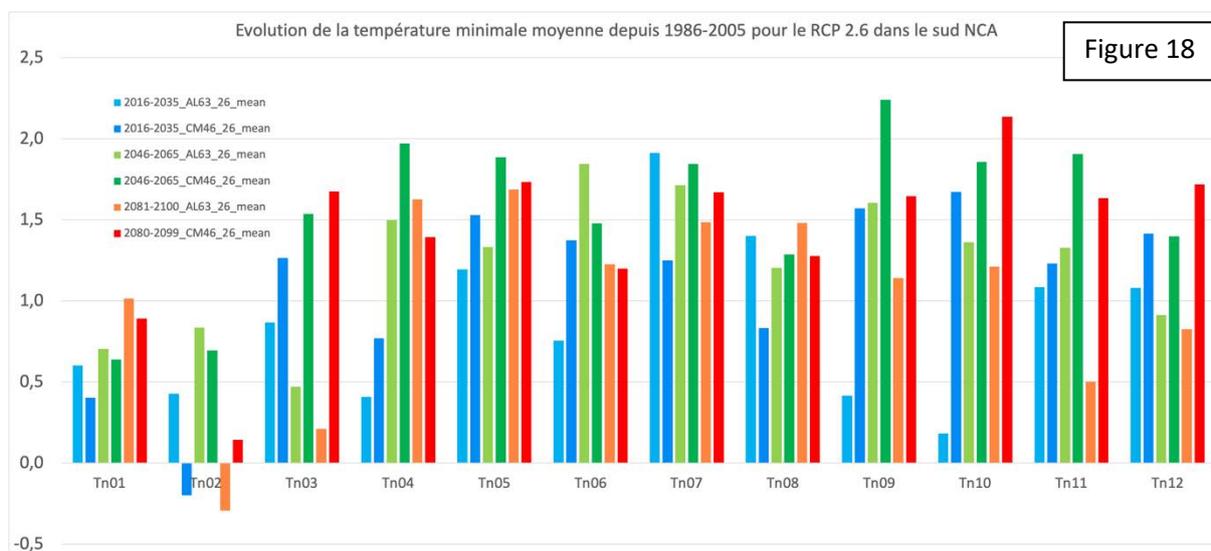
Concernant les P10 et les P90 les évolutions sont globalement similaires sauf pour le RCP 8.5 où la hausse de ces paramètres statistiques est encore plus rapide que pour la moyenne.

2.3.2. Évolution des températures minimales moyennes et extrêmes depuis 1986-2005.

Les constations et les intensités de hausses énoncées pour les Tx sont également vraies pour les Tn, et cela pour les deux RCP 2.6 et 8.5 (fig. 18 à 21) :

- Bien entendu le RCP 2.6 est bien plus favorable à une moindre élévation des Tn.
- Dans le RCP 2.6 le temps qui passe n'est pas un « ennemi » contrairement au RCP 8.5.

- L'hiver se réchauffe moins que le reste de l'année, et surtout que l'été dans le RCP 8.5 où à nouveau les niveaux de hausse atteignent 6 à 7°C.
- Les résultats du downscaling statistique issus des deux modèles régionaux sont plutôt concordants.



Pour le RCP 4.5 l'évolution des Tn suit globalement la logique constatée dans le RCP 8.5 mais avec des intensités moins fortes et avec des progressions déjà largement effectives en 2046-2065 ; pour la fin du siècle les hausses sont de l'ordre de 1,5 à 3°C (annexe 3).

Concernant les P10 et les P90 les évolutions sont globalement similaires sauf pour le RCP 8.5 où la hausse de ces paramètres statistiques est encore plus rapide que pour la moyenne.

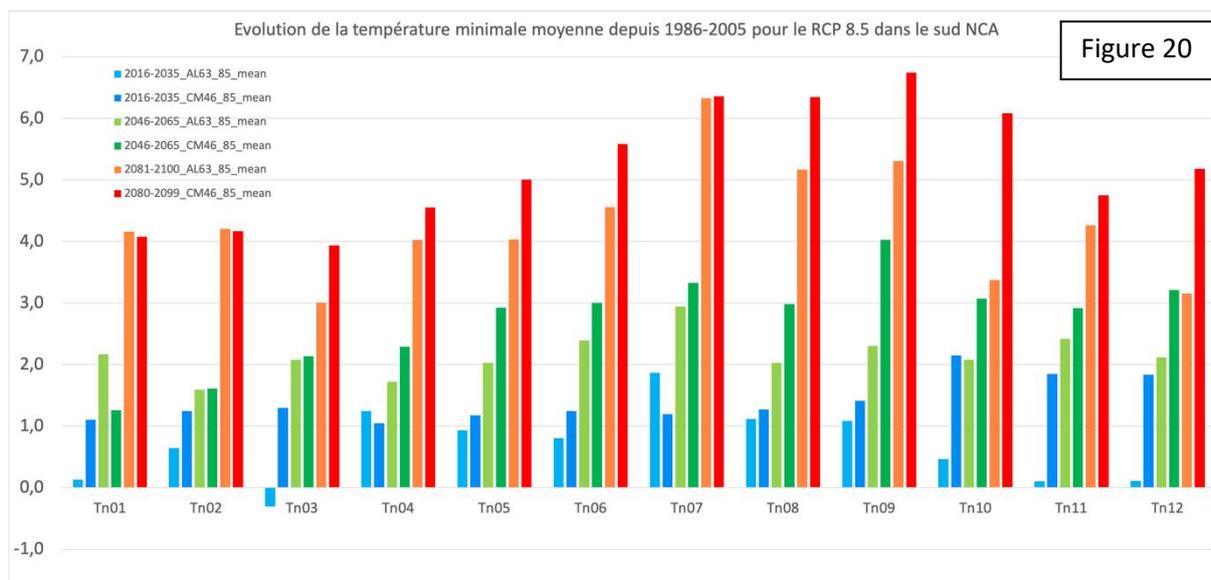


Figure 20

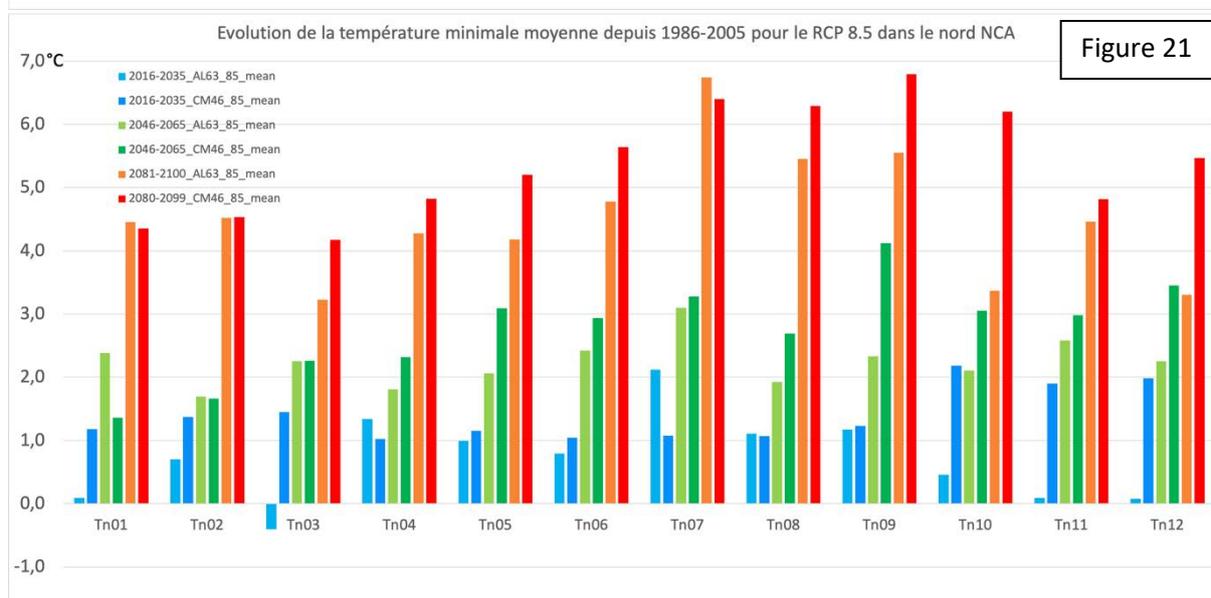


Figure 21

2.3.3. Évolution des températures maximales et minimales moyennes et extrêmes à Nice aéroport et à Isola 2000.

Afin de mieux se représenter l'ampleur des changements en cours et à venir, bien plus qu'une élévation de température en moyenne sur un territoire, les valeurs absolues relevées puis modélisées ponctuellement pour des stations météorologiques de Météo-France (MF) sont révélatrices. La station de Nice-aéroport, très littorale, et celle d'Isola 2000, située dans le vallon de Chastillon à 1900 m d'altitude dans une cuvette topographique, ont été choisies pour éclairer les lecteurs sur l'évolution des températures dans deux espaces totalement différents, et cela pour les températures minimales (Tn) et maximales (Tx) moyennes pour janvier (01) et juillet (07) (tab. 2). Les P10 et P90 sont disponibles en annexe 4.

Alors que pour la période de référence 1986-2005 les Tn à Nice aéroport étaient de 5,5°C en janvier et de 20°C en juillet, elles sont actuellement, et respectivement, de 5,9 à 6,8°C et de 20,6 à 21,6°C selon les modèles et les scénarios. Pour 2046-2065 ces Tn atteindront 6,5 à 7,8°C en janvier et 21,5 à 23,1°C en juillet. Ce n'est que pour la période 2081-2100 que des différences très notables s'établiront entre les projections selon les scénarios : de 6,9 à 10°C en janvier (Tn

du mois d'avril 1986-2005), donc 3°C d'écart entre le RCP 2.6 et le RCP 8.5, et de 21,2 à 25,9°C pour juillet, soit 4,7°C d'amplitude entre le meilleur et le pire des scénarios.

Concernant les Tx à Nice aéroport, elles ont déjà progressé de quelques dixièmes de degré depuis 1986-2005 en janvier, et bien plus en juillet puisqu'elles s'échelonnent entre 27,8 et 28,7°C selon les modèles et scénarios ; d'ici 30 ans elles gagneront à nouveau plusieurs dixièmes à 1°C en janvier, la hausse sera à nouveau plus prononcée l'été avec 28,4 à 30,2°C en moyenne l'après-midi à Nice aéroport. Enfin les 20 dernières années du XXIe siècle connaîtront des Tx de janvier dignes d'un mois de mars ou avril dans le RCP 8.5 en fonction des modèles avec 15,4°C ou 16,5°C ; pour juillet la progression sera de près de 5°C toujours dans le RCP le plus pessimiste avec 31,8 à 33,1°C selon ALADIN-Climat ou le REGCM4 respectivement.

Le site de la station météorologique d'Isola 2000 enregistre des Tn particulièrement basses d'une part du fait de son altitude mais également du fait de son encaissement. Topoclimatologiquement ce site en cuvette favorise l'accumulation d'air froid durant la nuit. Si d'autres observations étaient réalisées ailleurs à Isola 2000, dans un autre contexte topographique et même à une altitude un peu plus élevée, alors les Tn ne seraient pas si basses, hiver comme été. Ceci dit la hausse de l'effet de serre aura les mêmes conséquences sur les températures qu'ailleurs dans la métropole NCA : élévation de 4 à 5°C des Tn et Tx de janvier dans le RCP 8.5 à la fin du siècle atteignant donc -3,65°C le matin et 4,75°C l'après-midi en moyennant les projections très proches des deux modèles. En juillet la progression des Tn et des Tx sera encore plus marquée avec autour de 13°C le matin et près de 25,5°C l'après-midi.

Tableau 2. Températures maximales (Tx) et minimales (Tn) pour les mois de janvier et juillet dans deux stations de Météo-France pour les périodes climatiques de référence 1986-2005, court-terme 2016-2035, moyen-terme 2046-2065 et long terme 2081-2100 pour les RCP 2.6, 4.5 et 8.5 et selon les deux RCM ALADIN 6.3 (AL63) et REGCM4 6 (CM46).

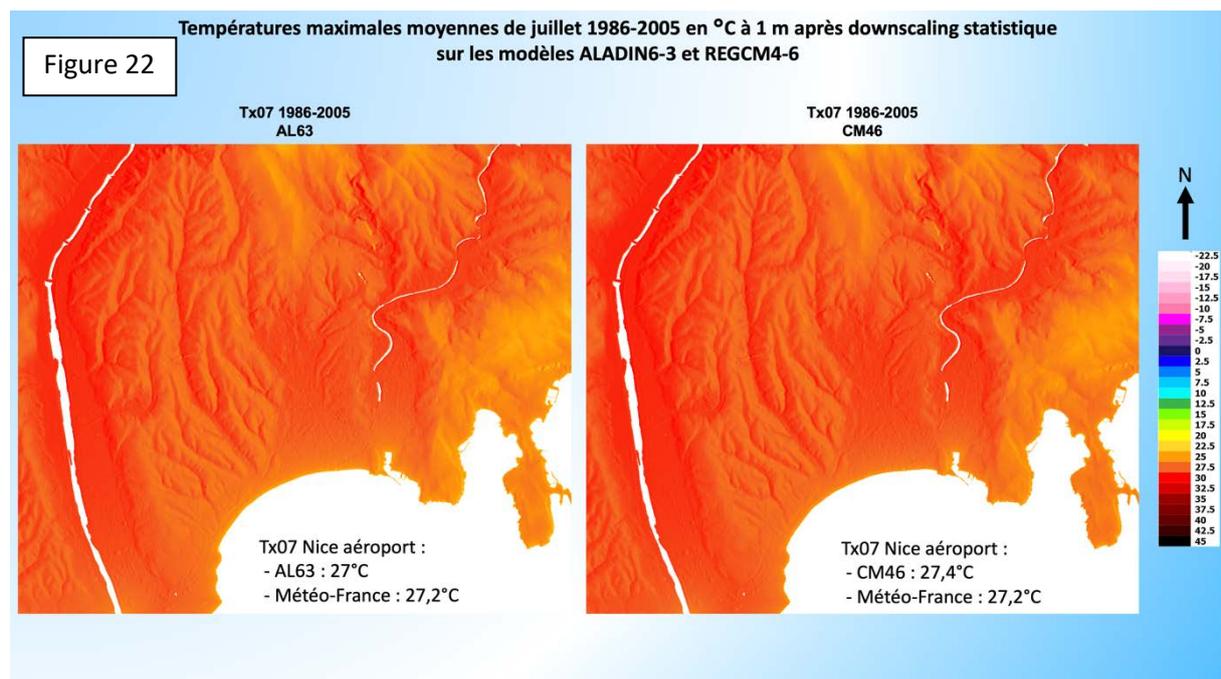
Période	Modèle – Scénario	Nice aéroport				Isola 2000			
		Tn01	Tx01	Tn07	Tx07	Tn01	Tx01	Tn07	Tx07
1986-2005	Obs -MF	5,5	13,3	20,0	27,2	-8,6	0,6	7,3	18,5
	ALADIN	5,5	12,5	19,7	27,0	-8,7	0,3	6,4	18,2
	REGCM	5,7	12,7	19,8	27,4	-8,6	0,1	6,3	18,0
2016-2035	AL63_26	6,3	12,9	21,6	28,7	-8,1	0,4	8,5	21,7
	CM46_26	6,3	13,7	21,2	28,6	-8,2	0,3	7,4	18,9
	AL63_45	5,9	12,6	20,6	27,8	-8,7	-0,2	7,1	20,0
	AL63_85	6,0	12,8	21,5	28,2	-8,8	0,2	8,8	22,1
	CM46_85	6,8	13,7	21,2	28,3	-7,4	0,8	7,3	18,7
2046-2065	AL63_26	6,5	13,1	21,5	28,4	-7,9	0,6	8,2	20,8
	CM46_26	6,6	13,9	21,8	29,1	-8,2	0,2	8,0	19,2
	AL63_45	7,4	13,7	22,4	29,3	-6,5	2,0	9,5	22,8
	AL63_85	7,8	14,0	22,5	29,4	-6,0	2,2	9,6	22,2
	CM46_85	7,4	14,5	23,1	30,2	-7,1	1,8	9,6	21,0
2081-2100	AL63_26	6,9	13,6	21,2	28,1	-7,6	1,3	8,1	20,6
	CM46_26	6,9	14,3	21,7	28,8	-8,0	0,4	7,8	18,8
	AL63_45	8,3	14,3	22,5	29,7	-5,6	2,7	9,1	22,4
	AL63_85	9,8	15,4	25,5	31,8	-3,6	4,7	13,4	26,1
	CM46_85	10,0	16,5	25,9	33,1	-3,7	4,8	12,7	24,8

2.4. Cartes des températures maximales et de l'humidex à 1 m de résolution spatiale durant les mois d'été Juin-Juillet-Août : quel confort thermique à Nice pour demain ?

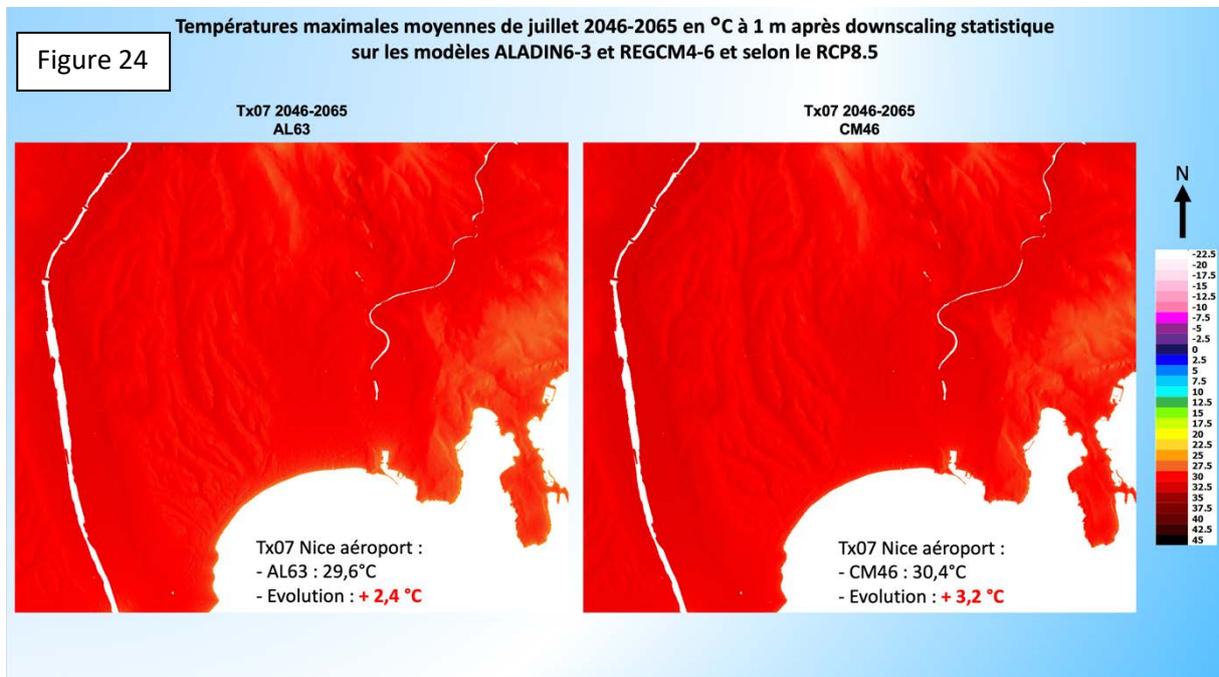
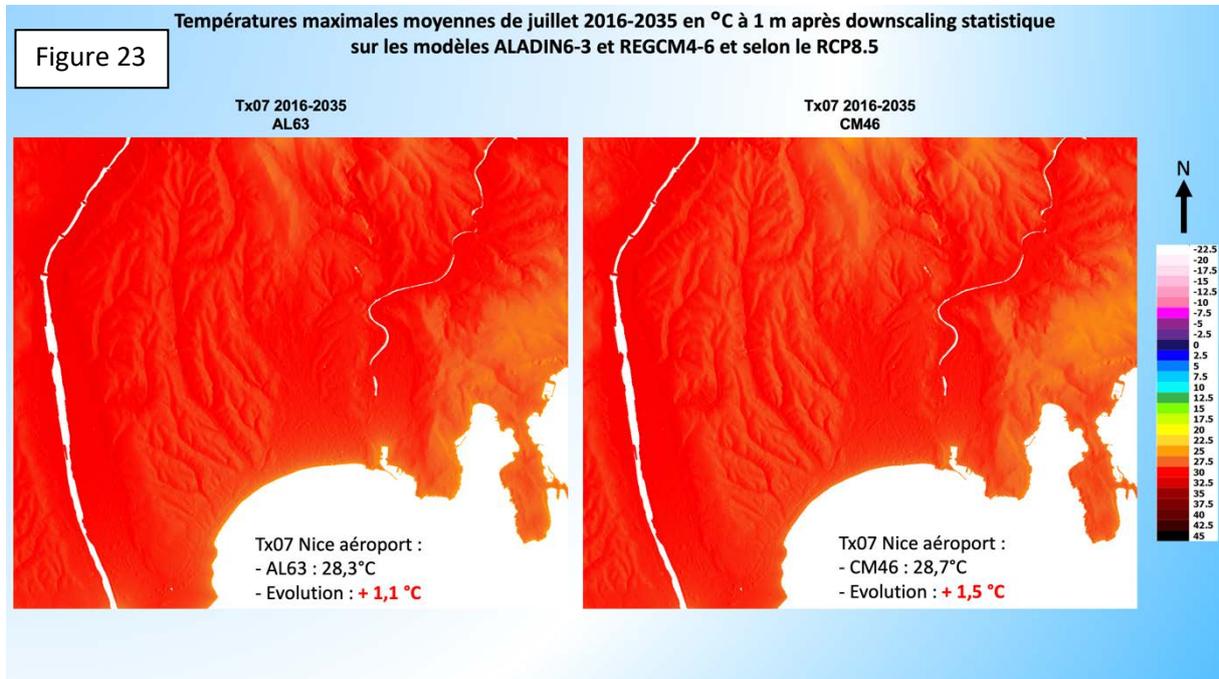
Au cours de l'été 2015 des mesures itinérantes de températures ont été effectuées dans la commune de Nice lors de 54 après-midi. La base de données constituées (46 jours retenus) a permis de mieux comprendre l'influence de la topographie et de la morphologie urbaine sur les températures maximales (Martin, 2018). Pour établir la cartographie des Tx à très fine échelle spatiale durant les mois de juin, juillet et août, certains prédicteurs topographiques utilisés pour construire les cartes à 25 m ont été remplacés par d'autres dont les résultats de l'étude de 2015 ont prouvé leur plus forte corrélation avec les Tx (annexe 5). Ainsi l'exposition nord-sud des versants est remplacée par l'exposition est-ouest, et l'encaissement à 20 km par celui à 3 km.

Il est important de préciser ici que Nice est une ville littorale. A ce titre Nice bénéficie d'une brise de mer très fréquente notamment l'été. Ce facteur ne permet pas à un îlot de chaleur urbain (centre-ville ou certains quartiers plus chauds que la périphérie/campagne environnante) de se former en journée (situation différente la nuit) à la différence d'autres grandes villes en France ou à l'étranger situées dans l'intérieur des terres ; les mesures itinérantes de 2015 l'ont montré (cf. annexe 5), et donc les cartographies réalisées à 1 m de résolution ne représentent pas ce phénomène absent à Nice l'été en journée.

Les figures 22 à 25 représentent les Tx moyennes à Nice en juillet de 1986-2005, de 2016-2035, de 2046-2065 et de 2081-2100 respectivement, pour le RCP 8.5. Les sites les plus encaissés, orientés ouest et situés loin du littoral sont les plus chauds. La différence entre un versant exposé ouest et un autre exposé est s'élève parfois à 2°C à altitude similaire ; cet écart est aussi constaté entre un espace très littoral et un autre situé à plusieurs kilomètres du trait de côte. Les vallées du Var et du Paillon ainsi que le vallon de la Madeleine, par définition encaissés, sont les espaces les plus chauds, tout comme l'amphithéâtre niçois en aval des collines de Cimiez, Gairaut et Pessicart. La Promenade des Anglais, les hauts de versants exposés à l'est et les collines les plus élevées sont les lieux les moins chauds.

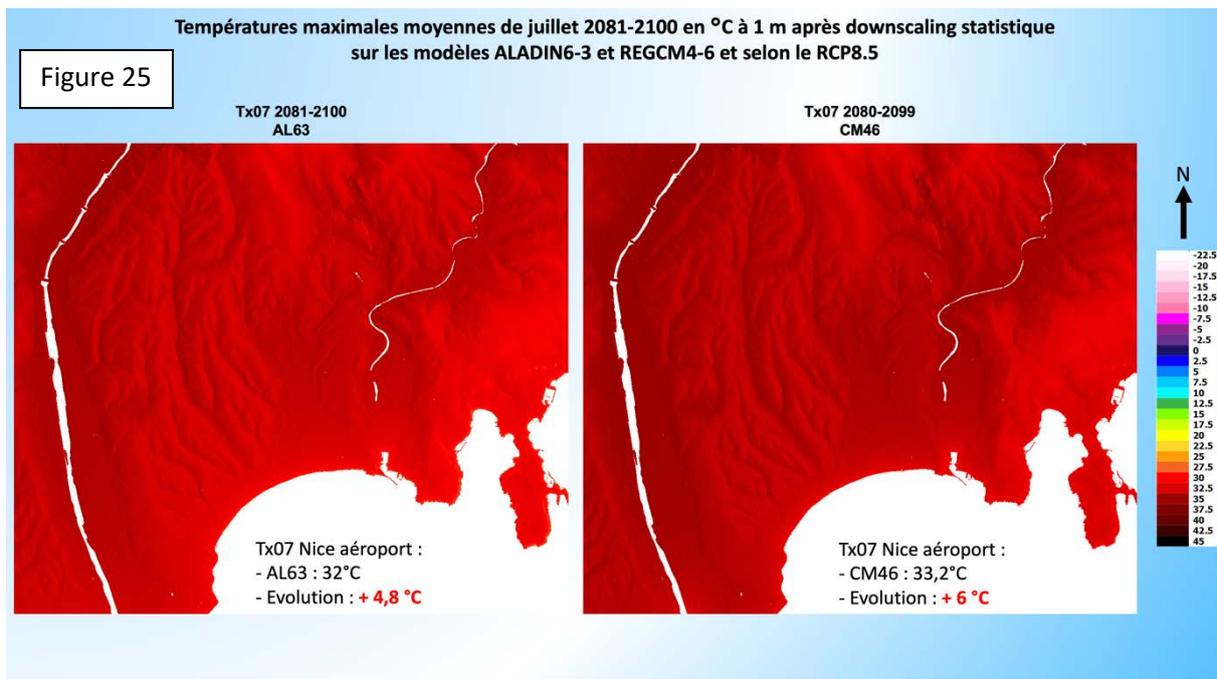


A l'échelle de ce territoire l'élévation des températures maximales dans le futur immédiat et plus lointain risque d'être fortement préjudiciable au confort thermique : l'augmentation actuelle de plus d'1°C (fig. 23) promet d'atteindre 2,5 à 3°C en 2046-2065 (fig. 24) puis 5 à 6°C pour la fin du siècle dans le RCP 8.5 (fig. 25). Ces chiffres seront fortement revus à la baisse dans l'hypothèse où le RCP 2.6 serait suivi, et la hausse des Tx serait plus mesurée, mais marquée (+2°C vers 2050 et + 2,5°C en 2090), en cas de réalisation du RCP 4.5 (cf. tab.2).



La notion de confort thermique dépasse la simple mesure des températures. Ce confort thermique est une appréciation souvent subjective qui dépend de la résistance de chacun d'entre nous à la chaleur « lourde » en fonction des vêtements portés, de la corpulence et de l'activité physique effectuée. L'un des indices permettant de rationaliser partiellement cette impression est l'humidex mis au point par Environnement Canada (annexe 6), dont plusieurs régions sont

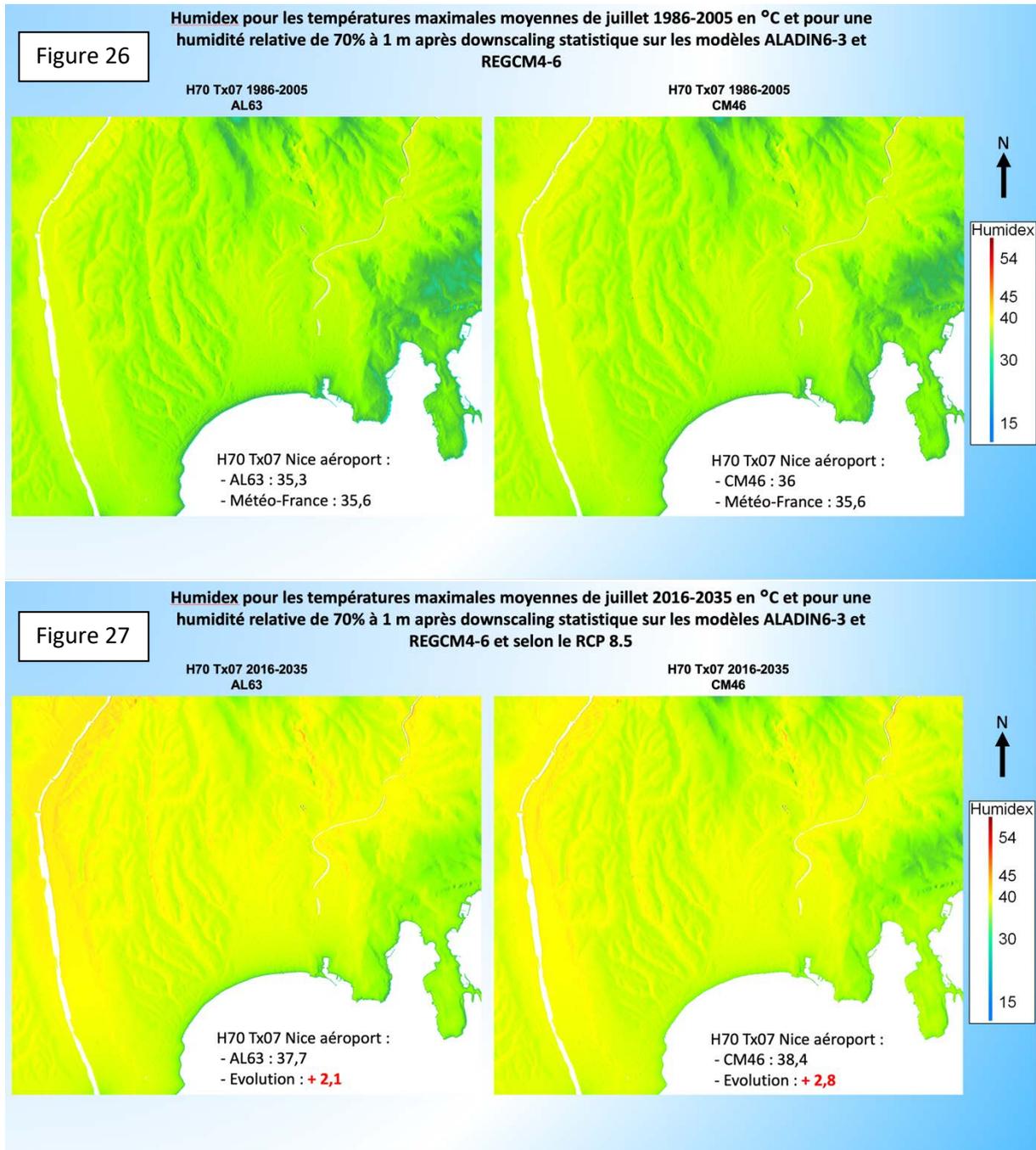
concernées l'été par une chaleur très humide comme sur le littoral azuréen. Cet indice combine donc la température mesurée ainsi que le degré d'humidité de la masse d'air, c'est-à-dire la quantité de vapeur d'eau (molécule H₂O sous forme de gaz, totalement incolore donc invisible) présent dans l'atmosphère en basse couche. Plus l'air contient de vapeur d'eau et plus la sensation de lourdeur croît (la transpiration ne s'évapore pas aussi bien et ne contribue donc pas au rafraîchissement de la surface de la peau). Ainsi à une température de 30°C et à une humidité relative de 90% correspond une valeur d'humidex de 45, parfois qualifié de 45°C de chaleur ressentie. En admettant que la température grimpe à 42°C, niveau digne du cœur du Sahara, mais que dans le même temps l'humidité relative chute à 8%, alors l'indice humidex serait exactement le même, 45. Il est donc très aisé de comprendre que le niveau d'humidité de la masse d'air est un facteur tout aussi important que la température pour caractériser le degré de confort thermique.



Durant l'été à Nice l'humidité relative est constamment comprise entre 60 et 80% en journée et atteint même parfois 90% la nuit, cette variable étant homogène sur la commune de Nice. Seuls les cas de foehn minoritaires en fréquence, jours où un fort vent d'ouest sec est présent, connaissent des taux d'humidité relative bien plus bas entre 10 et 30% qui améliorent nettement le confort thermique (cependant ces situations météorologiques font fortement augmenter le risque d'incendie). Ainsi afin d'établir les cartes d'humidex à 1 m de résolution spatiale plusieurs hypothèses peuvent être faites quant au niveau du taux d'humidité relative : 60%, 70% ou 80% pour la journée. Dans ce rapport c'est un taux intermédiaire de 70% qui a été retenu.

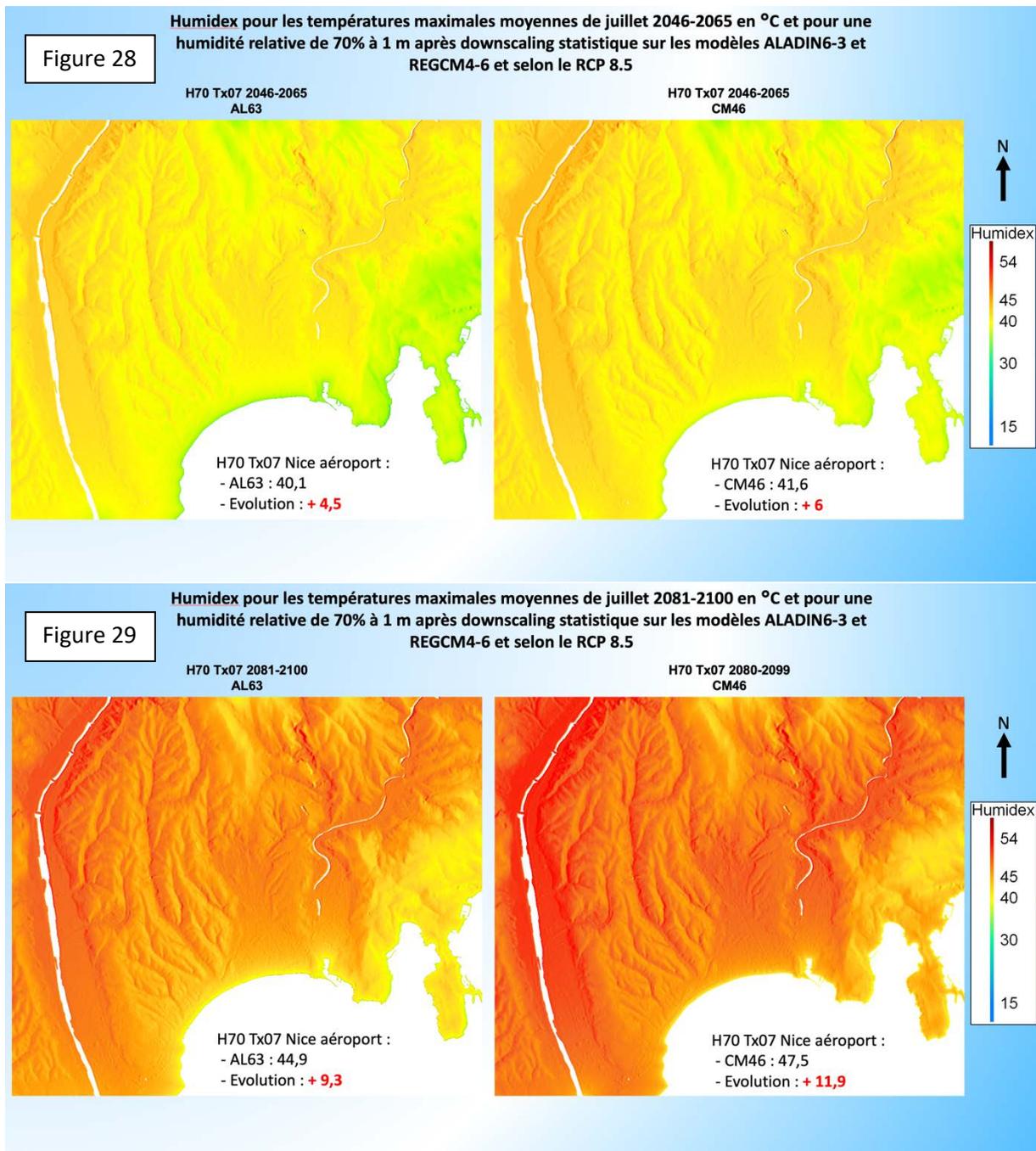
En journée et pour la période 1986-2005 en juillet l'humidex moyen (H70 Tx07) est compris entre 30 et 40 (fig. 26), synonyme donc d'un certain inconfort selon Environnement Canada. Ce sont les espaces les plus chauds précédemment décrits qui sont affectés d'humidex les plus élevés. Pour les mois de juillet 2016-2035 et le RCP 8.5 cet indice progresse pour atteindre et dépasser 40 au maximum avec des valeurs de 42-43 (fig. 27) ; les niçois ressentent donc aujourd'hui beaucoup d'inconfort pendant la période estivale. Dans quelques décennies la hausse de cet indice se poursuivra avec le réchauffement : il dépassera 40 dans beaucoup d'espaces à Nice (excepté la frange littorale et le sommet des collines les plus élevées, fig. 28).

Les plus fortes valeurs flirteront avec 45, synonyme de danger pour la santé. Enfin toujours dans le RCP 8.5 et pour la fin du siècle l'humidex explosera, avec très peu d'espaces où l'indice sera inférieur à 45, seulement le littoral et les premières centaines de mètres derrière le trait de côte (fig. 29). Ainsi l'ensemble de la population niçoise sera exposé à un danger pour sa santé durant un été « moyen » puisqu'il s'agit ici du calcul de l'humidex en fonction de la température maximale moyenne de juillet.



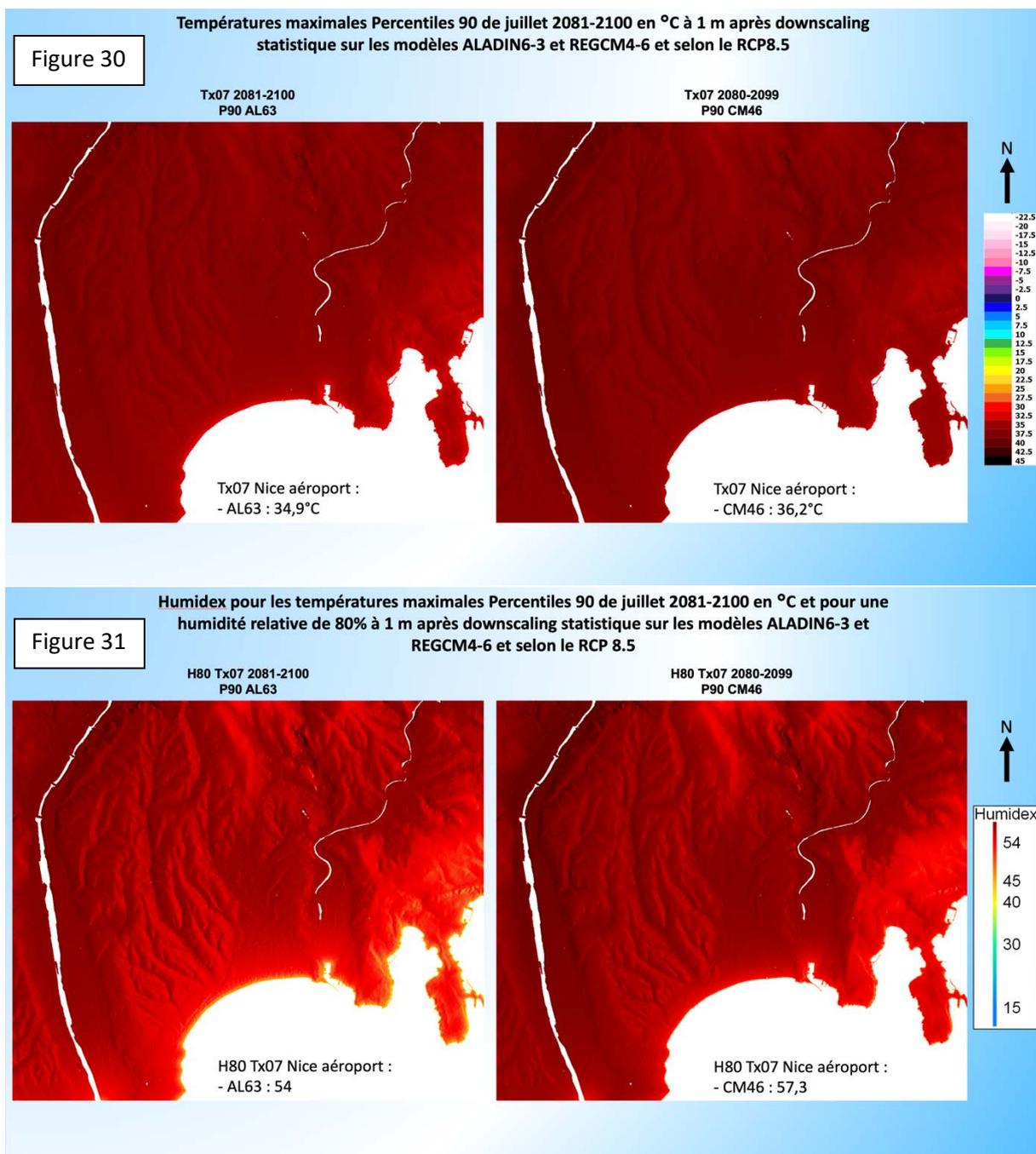
Les périodes caniculaires seront donc encore plus défavorables pour le confort thermique et les impacts sanitaires s'amplifieront. La pire des hypothèses a permis de construire la figure 31 où pour le percentile 90 des Tx de juillet en 2081-2100 et pour le RCP 8.5 (fig. 30) l'humidité relative de 80% a été retenue (situation probablement très rare voire théorique). Alors que les températures dépassent largement les 35°C sur toute la commune de Nice avec des maximums

de près de 38 à 39°C dans les sites encaissés en bas de versants exposés ouest et loin du littoral, les niveaux d'humidex dépassent presque partout les 54 avec des valeurs maximales largement au-dessus de 60. Le coup de chaleur est imminent dans cette configuration.

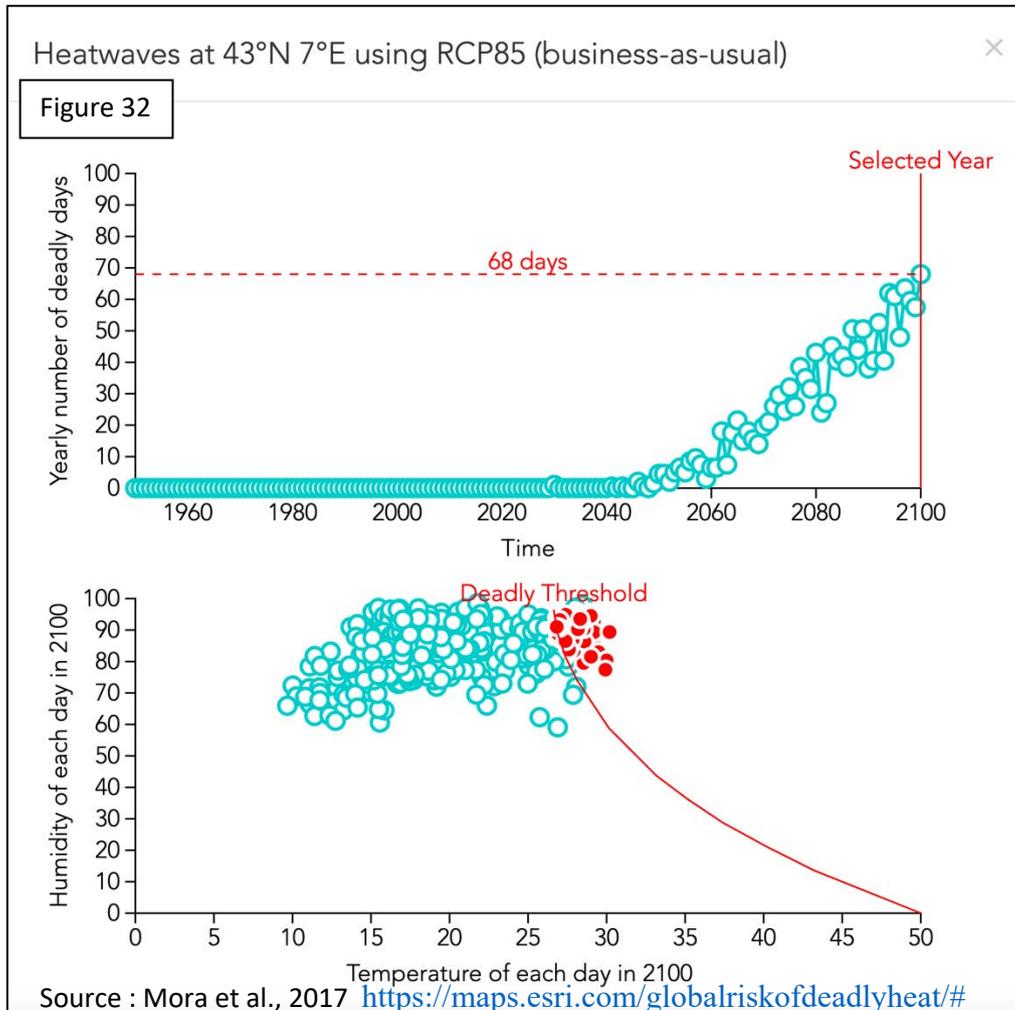


Si le pire des scénarios se concrétise pour l'avenir alors l'été deviendrait véritablement invivable au sens propre du terme sur la Côte d'Azur, les cas de décès induit à cause de cette chaleur humide se multiplieraient même pour des personnes en bonne santé. Une application en ligne découlant d'une publication scientifique faite par des chercheurs de l'Université d'Hawaï alerte sur les impacts sanitaires mortels des vagues de chaleur attendues dans l'avenir (<https://maps.esri.com/globalriskofdeadlyheat/#>). Cette étude a regroupé des données météorologiques et sanitaires de 783 cas de vagues de chaleur dans 164 villes disséminées dans 36 pays (Mora et al., 2017). Réalisées à l'aide des 20 modèles climatiques globaux de type

« Earth System Model » utilisés dans le 5^e rapport du GIEC en 2013 (dont les 2 présentés à la page 5 de ce rapport qui alimentent les modèles climatiques régionaux utilisés dans cette étude), les cartographies ont des résolutions spatiales grossières avec des pixels d'environ 150 km de côté. Elles ne permettent pas d'obtenir des informations pertinentes pour les Alpes-Maritimes où les variations très rapides d'altitude ne sont pas représentées dans ces modèles globaux (d'où l'intérêt du downscaling statistique dans ce contexte topographique). Cependant, à partir de la température journalière moyenne (moyenne des Tx et des Tn) et de l'humidité relative, cette application permet de connaître pour une échéance temporelle et pour un scénario, le nombre de jours par an où des conditions météorologiques potentiellement mortelles sont envisagées. Aujourd'hui environ 30% de la population mondiale est exposée au moins 20 jours par an à ce type de conditions ; en 2100 ce pourcentage monterait respectivement à 48% et 74% de la population mondiale selon la réalisation du RCP 2.6 ou 8.5 (Mora et al., 2017).



En cliquant sur le pixel immédiatement au sud des Alpes-Maritimes (43°N et 7°E), plus représentatif des conditions présentes sur la Côte d'Azur que le pixel recouvrant le département beaucoup plus « montagneux » dans ces pixels de 150 km, 68 jours en 2100 se situeraient au-dessus du seuil de mortalité selon le RCP 8.5 (fig. 32). Dès 2040 des « jours mortels » se produiront et leur nombre ne cessera de croître dans le temps. Ces chiffres sont bien plus modérés pour le RCP 4.5 avec seulement 4 jours de ce type en 2100 et 0 jour pour le RCP 2.6.



Les résultats de l'Université d'Hawaï ne tiennent pas seulement compte des Tx mais aussi des Tn, à la différence des cartes d'humidex présentées plus haut. En effet le confort thermique affecte également notre bien-être durant la nuit, période pendant laquelle nos organismes récupèrent des efforts accomplis la veille. Si les températures baissent par rapport à la journée les taux d'humidité augmentent souvent, modulant donc l'amélioration du confort thermique ; de plus la température extérieure importe à ce moment-là moins que celle à l'intérieur des habitations : les bâtiments mal isolés ont accumulé de la chaleur en journée et tardent à se rafraîchir durant la nuit. Les niveaux d'humidex sont alors bien plus importants à l'intérieur qu'à l'extérieur. Seule la rénovation thermique systématique des bâtiments sur la Côte d'Azur pourrait atténuer, voire supprimer, la dégradation du confort thermique nocturne futur.

En reprenant les chiffres du tableau 2 concernant les Tx et Tn moyennes à Nice aéroport en juillet pour 2081-2100 et le RCP 8.5, alors la températures moyenne journalière de ce mois

serait d'environ 29°C (en moyennant les 2 résultats issus des 2 modèles régionaux), chiffre un peu plus élevé encore en août avec 29,3°C, et plus bas en juin avec 25,5°C. Or en observant la courbe rouge « seuil de mortalité » de la figure 32 et pour une température moyenne journalière de 29°C, dès lors que l'humidité relative dépasserait 70%, la situation sanitaire deviendrait critique pour la station météorologique Nice aéroport, qui rappelons le, fait partie des lieux les plus « frais » des cartographies des températures dans la commune de Nice. Les mois de juillet et août, en moyenne (il n'est pas question ici des plus fortes valeurs des percentiles 90), en 2081-2100 et pour le pire des scénarios deviendraient véritablement invivables.

2.5. Cartes de précipitations et évolutions des cumuls de précipitations durant le XXI^e siècle.

La modélisation des précipitations revêt bien plus d'incertitudes que celle des températures. La représentation des nuages, et en aval des précipitations, dans les modèles climatiques pose un problème d'échelle spatiale : alors que la taille des pixels est supérieure à la dizaine de kilomètres pour les modèles régionaux les plus fins, les mécanismes générant la couverture nuageuse (condensation de la vapeur d'eau autour de noyaux de condensation, convection atmosphérique etc.) s'opèrent à micro-échelle. Ainsi la physique des nuages n'est que très partiellement explicite dans les modèles climatiques, les résultats dépendent donc de la paramétrisation, c'est-à-dire de l'utilisation de coefficients d'ajustement pour calibrer les modèles, bien plus que de la réalité physique du phénomène. Par conséquent les cartes obtenues par downscaling statistique effectués sur les résultats des modèles climatiques régionaux ne peuvent que très partiellement corriger ce biais.

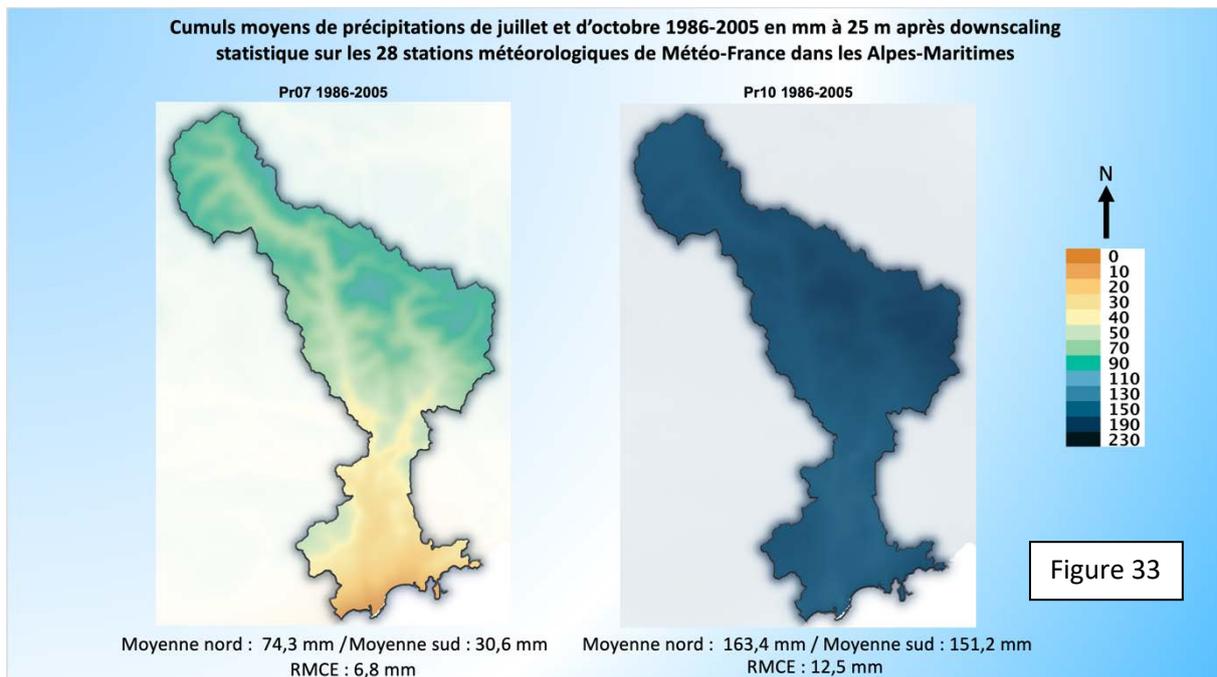
De fait le downscaling statistique ne s'est pas porté comme pour les températures sur les sorties des 2 modèles climatiques régionaux mais sur les 28 stations météorologiques de Météo-France implantées dans les Alpes-Maritimes. Il est bien plus prudent de partir des données observées que de résultats de modélisation très incertains. Les cartes mensuelles des cumuls de précipitation ont donc été construites ainsi pour la période 1986-2005. La validation de ces résultats est très satisfaisante puisque la comparaison des données observées par Météo-France et des pixels à 25 m ne donne jamais des écarts supérieurs à 15% du cumul mensuel pour le mois concerné excepté juillet avec 17,7% d'erreur entre modélisation et observation (tab. 3). Ce pourcentage le plus élevé s'explique en partie par le faible cumul moyen relevé sur les Alpes-Maritimes ce mois-là, même de faibles écarts se traduisent alors par un pourcentage plus important.

Tableau 3. Valeurs de RMCE moyennes et cumuls moyens pour l'ensemble des 28 stations météorologiques des Alpes-Maritimes pour les cumuls mensuels de précipitations sur la période de référence 1986-2005.

Mois	Pr01	Pr02	Pr03	Pr04	Pr05	Pr06	Pr07	Pr08	Pr09	Pr10	Pr11	Pr12
RMCE en mm	8,1	5,1	4,9	8,5	8,8	6,3	6,8	6	6,1	12,5	12,3	6,4
RMCE en % du cumul moyen des 28 stations	10,6	10,5	11,8	8,5	14,5	12,2	17,7	13,8	6,1	8,1	10,2	8,2
Cumuls moyens en mm sur les 28 stations	76,9	48,5	41,6	99,8	60,9	52,1	38,6	43,4	100,5	154,2	120,7	78,5

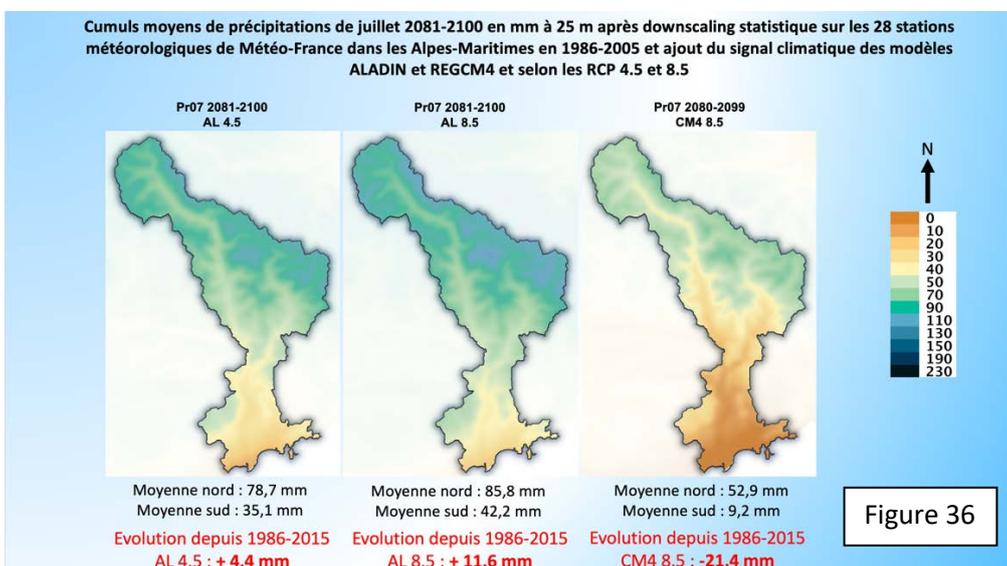
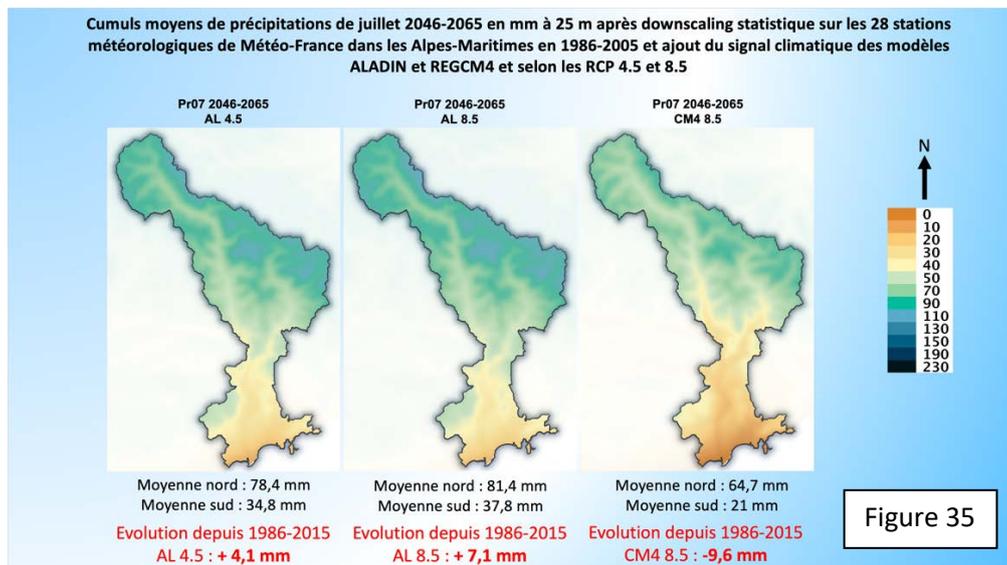
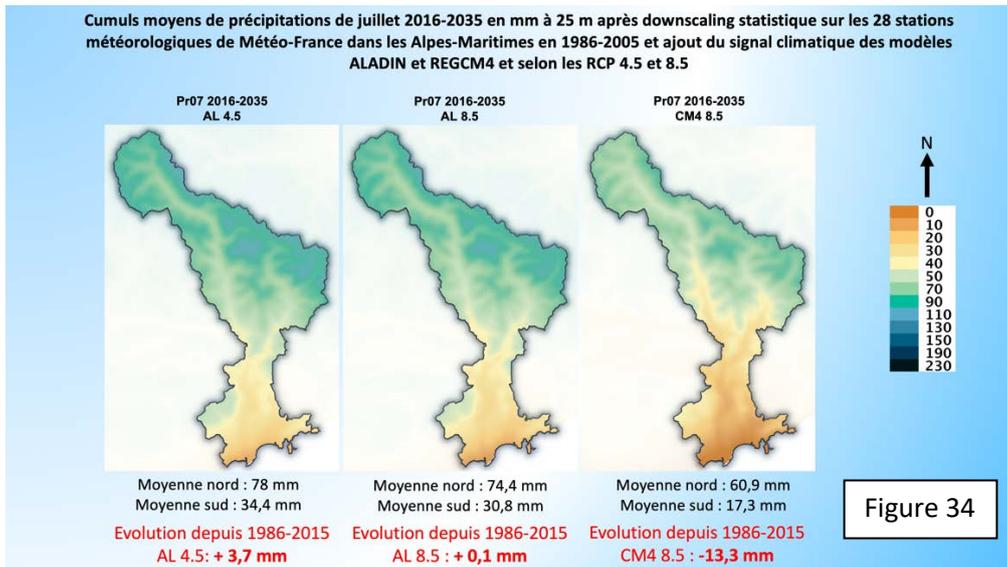
Les mois de juillet et d'octobre représentent les « extrêmes » mensuels avec d'un côté un mois très sec et de l'autre un mois très arrosé. Cette opposition s'explique par la variabilité climatique naturelle de la circulation atmosphérique générale dans notre région. L'été méditerranéen est marqué par la présence récurrente d'un anticyclone subtropical (celui des Açores) synonyme de beau temps, avec toutefois le développement d'orages assez fréquents en montagne. L'automne est à l'inverse la saison signant le retour des dépressions. Conjugué à une température élevée des eaux de surface de la Mer Méditerranée, ce cyclonisme associé aux invasions d'air froid en altitude provoque des précipitations abondantes à l'échelle mensuelle. Les auteurs tiennent à préciser qu'il n'est pas question ici de modéliser et de cartographier les précipitations des épisodes de précipitations extrêmes générées en quelques heures mais bien d'établir des cartes de cumuls mensuels moyens lissant nécessairement, sur une période de 20 ans, ces phénomènes très intenses.

Pour la période 1986-2005, et en juillet, le territoire de la métropole NCA est caractérisé par une partie sud très sèche avec seulement 30 mm en moyenne et un moyen et haut pays 2,5 fois plus humide avec 74 mm (fig. 33). La frange littorale ne reçoit qu'une quinzaine de mm tandis que les massifs les plus élevés bénéficient d'environ 80 à 100 mm. Cette dichotomie s'explique par la convection thermique plus forte en montagne, où les masses d'air surchauffées au-dessus des versants très ensoleillés sont rapidement ascendantes dès la mi-journée pour aboutir fréquemment à la formation de cumulonimbus générateurs de pluie. En octobre les mécanismes provoquant les précipitations ne sont pas aussi localisés qu'en été, et de fait les cumuls sont bien plus homogènes dans l'espace avec 150 à 180 mm sur l'ensemble de la métropole.

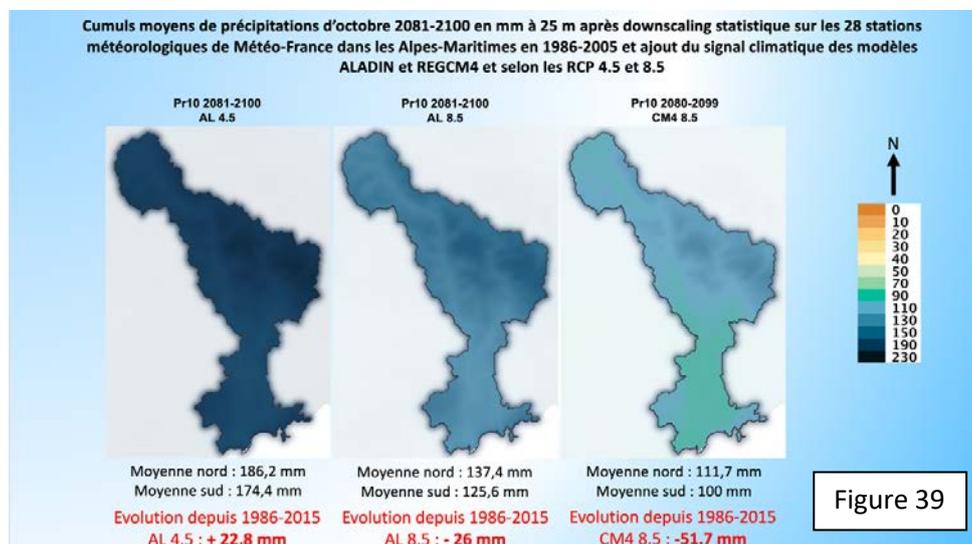
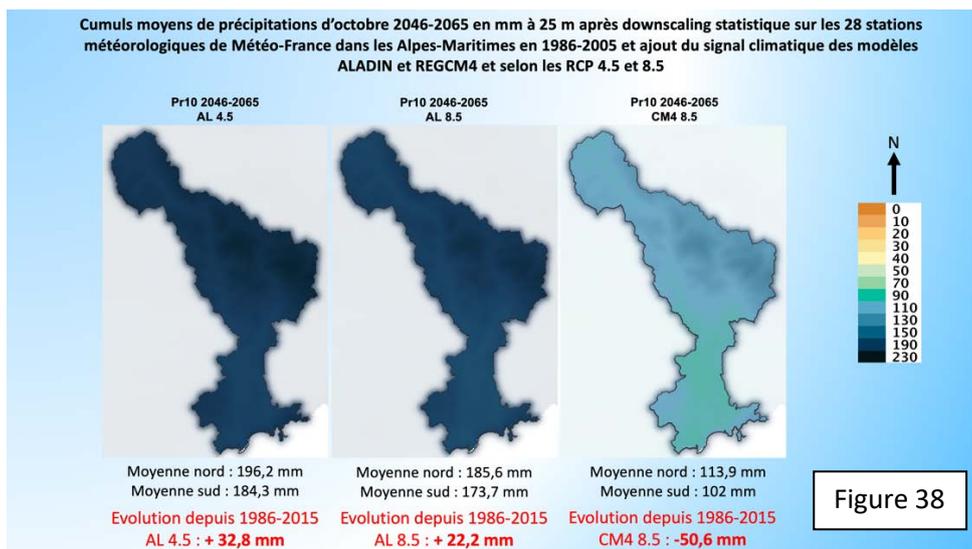
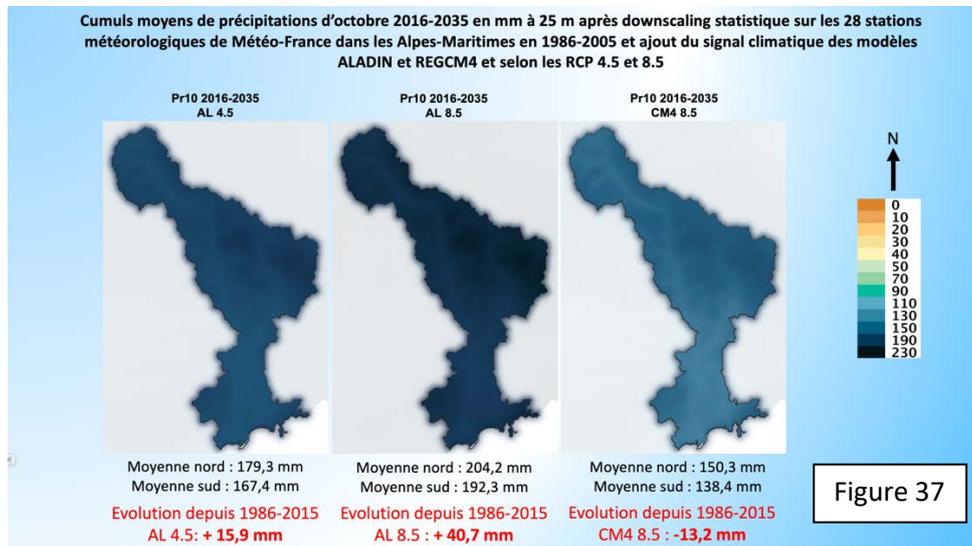


Pour les périodes futures seul le signal climatique des résultats des deux RCM (corrigé du biais constaté pour la période de référence entre observations et modélisations) a été ajouté aux cartographies établies pour la période de référence. La structure spatiale des cumuls mensuels est donc la même avec des mm en plus ou en moins selon l'évolution moyenne des précipitations projetées par les pixels des deux RCM recouvrant les Alpes-Maritimes. Globalement les projections du modèle ALADIN ne montrent pas de grandes évolutions pour juillet avec une tendance à une légère hausse des précipitations. Le modèle REGCM4 indique

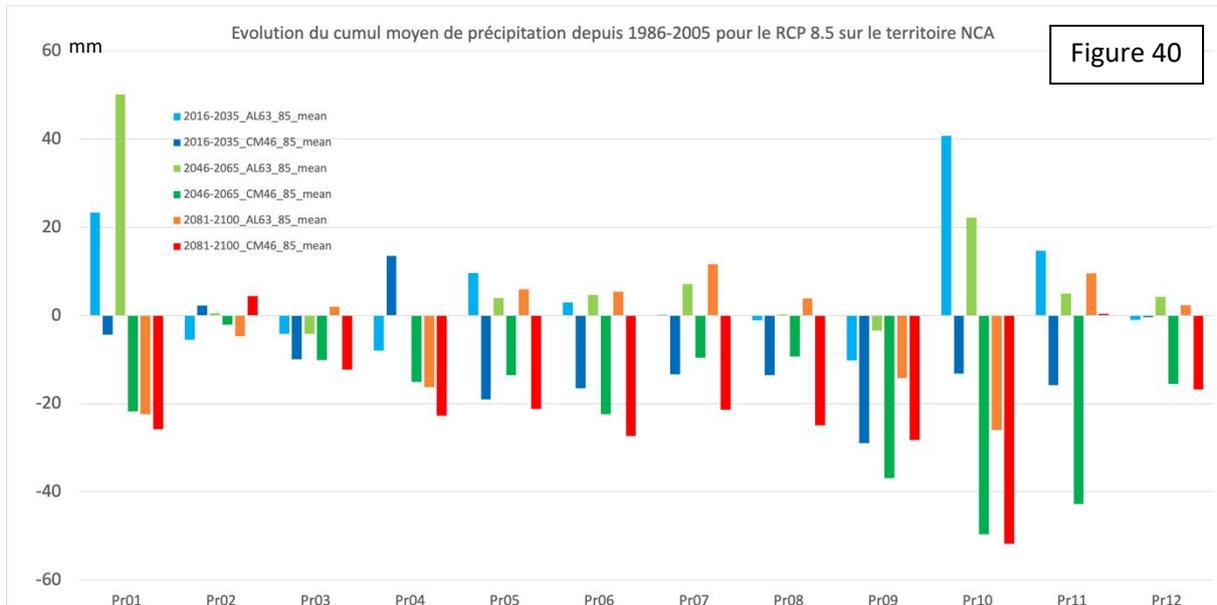
une tendance plus marquée à la diminution des précipitations pour ce mois et contraire à celle d'ALADIN (fig. 34 à 36).



Pour octobre les tendances sont plus affirmées sans qu'il y ait toutefois consensus entre les modèles : ALADIN envisage une hausse assez forte des cumuls, excepté en 2081-2100 pour le RCP 8.5, tandis que le REGCM4 prédit un assèchement parfois fort avec 50 mm en moins dès la moitié du siècle (fig. 37 à 39).



Plus généralement dans le RCP 8.5 à l'échelle des 12 mois l'évolution des précipitations serait stable ou en légère hausse (sauf janvier et octobre avec une hausse plus forte) selon ALADIN ; pour 2081-2100 toutefois ce modèle prévoit plutôt un fléchissement des cumuls. La tendance est plus franche selon le REGCM4 avec un assèchement quasi-généralisé sur toutes les périodes (fig. 40). Pour le RCP 4.5 ALADIN indique une stagnation des cumuls globalement avec toutefois des mois d'octobre et novembre plus humides (annexe 7).



CONCLUSION

La méthode de downscaling statistique, validée par l'observation, a permis de considérablement améliorer la représentation cartographique des deux modèles climatiques régionaux ALADIN-Climat et REGCM4. De larges pixels de 12 km de côté la résolution spatiale des cartes est passée à 25 m, voire à 1 m pour la ville de Nice, permettant à leurs observateurs de mieux appréhender les effets du changement climatique sur les températures minimales et maximales, sur le confort thermique et sur les cumuls de précipitation à l'échelle mensuelle.

Pour les températures les tendances sont très claires et significatives puisque les deux modèles climatiques régionaux vont dans le même sens et anticipent une même intensité d'évolution. Le climat se réchauffe actuellement plus vite durant l'été et l'automne que pendant l'hiver et le printemps. Cette tendance se poursuivra dans les futurs potentiels décrits par les différents RCP. La réalisation du RCP 2.6 signifierait que le climat évoluerait quelque peu encore dans les décennies à venir mais que la hausse des températures serait très limitée. Par contre si le monde suit les RCP 4.5 ou 8.5 alors le climat de la métropole NCA s'en verrait profondément affecté, avec dans le pire des cas un bouleversement plus important encore que lors d'une déglaciation. Plus le temps passera et plus l'été semblera long avec un glissement des profils thermiques estivaux vers le printemps et vers l'automne : les températures de juillet 1986-2005 s'observeront bientôt en juin puis en mai ; celles d'août 1986-2005 déborderont sur septembre puis octobre. Quant aux cœurs d'été de 2081-2100 dans le RCP 8.5, ils seront comparables au climat actuellement observé dans l'intérieur des terres sur la rive sud de la mer Méditerranée...Parallèlement l'hiver sera plus court même s'il est important de préciser à

nouveau que janvier et février seront les mois les moins affectés par le réchauffement climatique.

L'une des principales conséquences de cette évolution sera la forte dégradation du confort thermique estival, des impacts sanitaires forts engendrés par des vagues de chaleur sont à redouter : l'aménagement du territoire via notamment une politique volontariste portant sur l'isolation thermique des bâtiments doit prendre sa part de responsabilité afin de protéger la population. Autre question inquiétante, celle de l'eau et de sa disponibilité : en dépit des incertitudes fortes pesant sur la modélisation des précipitations (pour rappel aucune tendance significative ne se dégage des deux modèles climatiques régionaux), il serait illusoire de compter sur leur augmentation durant l'été alors même que les températures progresseront ; l'évaporation sera donc plus forte et les besoins en eau s'accroîtront : comment espérer refroidir les espaces urbanisés avec l'aménagement d'espaces verts qui en absence d'eau ne pourront assurer le mécanisme d'évapotranspiration, véritable climatiseur naturel ?

BIBLIOGRAPHIE :

AHMED K.F., WANG G., SLINADER J., WILSON A.M., ALLEN J.M., HORTON R. et ANYAH R., 2013: Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast. *Global and Planetary Change*, 100, 320-332.

BOE J., TERRAY L., HABETS F. et MARTIN E., 2007: Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, 27, 1643-1655.

CARREGA P., 1982 : *Les facteurs climatiques limitants dans le sud des Alpes Occidentales*. Thèse doctorat 3e cycle. Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée. Nice, n°13, 221 p.

CARREGA P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat*. Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée, Revue de Géographie du laboratoire d'analyse spatiale Raoul Blanchard, Thèse de doctorat, 408 pages.

CARREGA P., 1995: A method for the reconstruction of mountain air temperatures with automatic cartographic applications. *Theoretical and Applied Climatology*, 52, 69-84.

CHEN S-T., YU P-S. et TANG Y-H., 2010: Statistical downscaling of daily precipitation using support vector machines and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, 385, 13-22.

DEQUE M., 2012 : *Projet ANR-SCAMPEI Compte-rendu de fin de projet*, 20 pages.

DEQUE M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, Vol 57, 16-26.

GACHON P. et DIBIKE Y., 2007: Temperature change signals in northern Canada: convergence of statistical downscaling results using two driving GCMs. *International Journal of Climatology*, 27, 1623-1641.

GOYAL M. K. et OJHA C.S.P., 2011: PLS regression-based pan evaporation and minimum-maximum temperature projections for an arid lake basin in India. *Theoretical and Applied Climatology*, 105, 403-415.

GOYAL M. K. et OJHA C.S.P., 2012: Downscaling of surface temperature for lake catchment in an arid region in India using linear multiple regression and neural networks. *International Journal of Climatology*, 32, 552-566.

HENGL T., 2009: *A practical guide to geostatistical mapping*, 293 pages.

HAYLOCK M.R., CAWLEY G.C., HARPHAM C., WILBY R.L. et GOODESS C.M. 2006: Downscaling heavy precipitation over the United Kingdom: a comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios. *International Journal of Climatology*, 26, 1397-1415.

IPCC, 2007 : *Changements climatiques 2007 : Rapport de Synthèse*. 114 pages.

JOLY D., 1987 : L'interpolation supervisée. Une méthode de traitement destinée à la cartographie automatique présentée à l'aide d'un exemple de climatologie. Actes du Symposium intern. sur la topo-climatologie et ses applications. Liège (Belgique), mars 1985. pp. 135-148.

JOLY D., BROSSARD T., CARDOT H., CAVAIHLES J., HILAL M. et WAVRESKY P., 2011 : Temperature interpolation based on local information : the example of France. *International Journal of Climatology*, 31, 2141-2153.

KHALILI M., NGUYEN V.T.V. et GACHON P., 2013: A statistical approach to multi-site multivariate downscaling of daily extreme temperature series. *International Journal of Climatology*, 33, 15-32.

KHAN M.S., COULIBALY P. et DIBIKE Y., 2006: Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*, 319, 357-382.

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.

LIU W., FU G., LIU C. et CHARLES S.P., 2013: A comparison of three multi-site statistical downscaling models for daily rainfall in the North China Plain. *Theoretical and Applied Climatology*, 111, 585-600.

LIU Y. et FAN K., 2013: A new statistical downscaling model for autumn precipitation in China. *International Journal of Climatology*, 33, 1321-1336.

LUTZ K., JACOBET J., PHILIPP A., SEUBERT S., KUNSTMANN H. et LAUX P., 2012: Comparison and evaluation of statistical downscaling techniques for station-based precipitation in the Middle East. *International Journal of Climatology*, 32, 1579-1595.

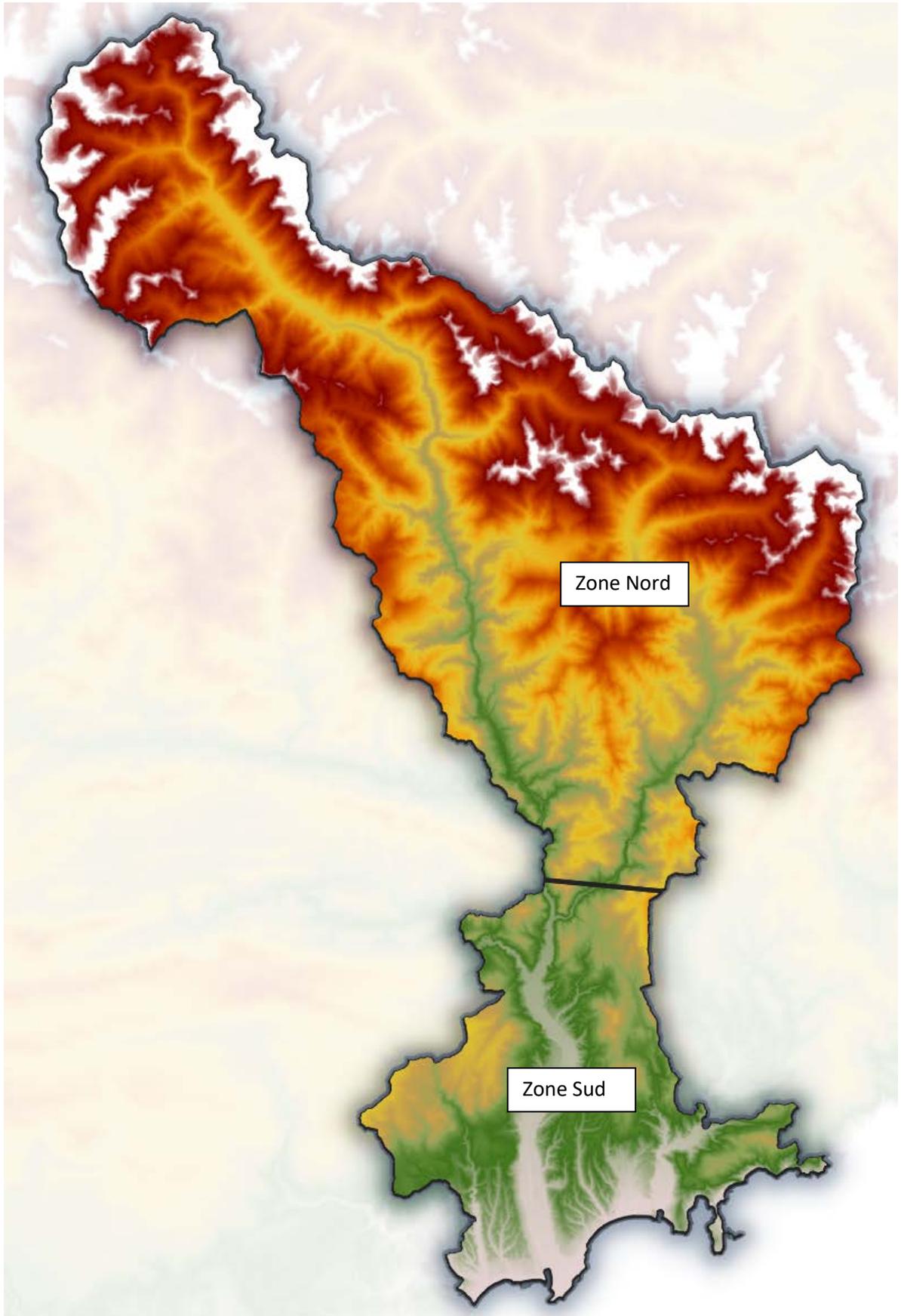
MADELIN M., 2004 : *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : Modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Thèse de doctorat, Paris, 353 pages

MARTIN Nicolas, CARREGA Pierre et ADNES Cyriel, 2013 : Downscaling à fine résolution spatiale des températures actuelles et futures par modélisation statistique des sorties ALADIN-Climat sur les Alpes-Maritimes (France), *Climatologie*, volume 10, pp 51-72.

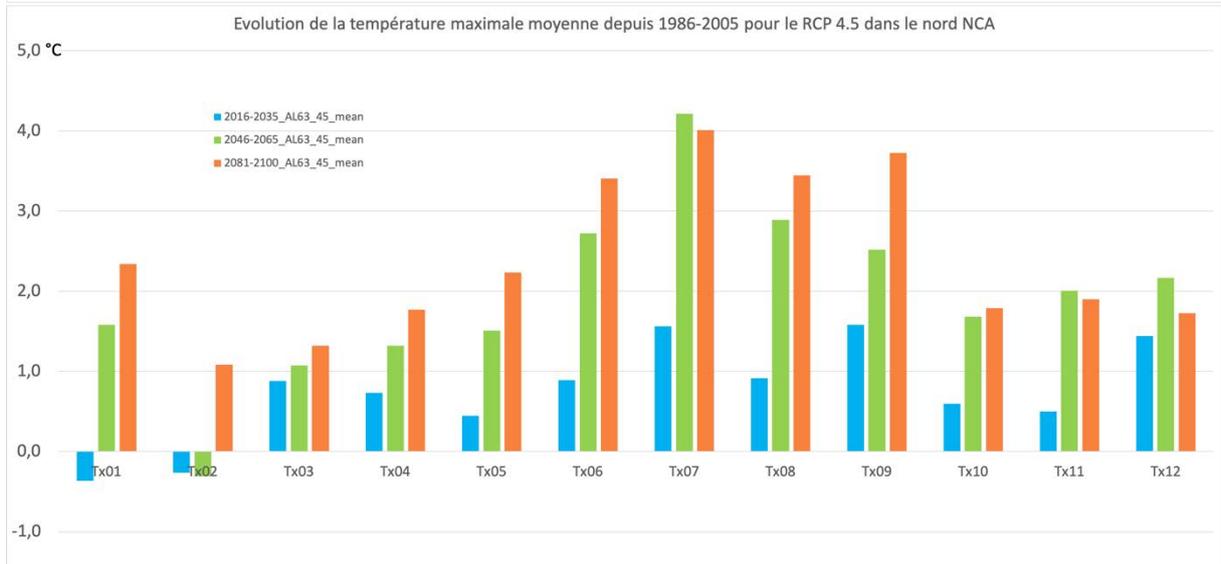
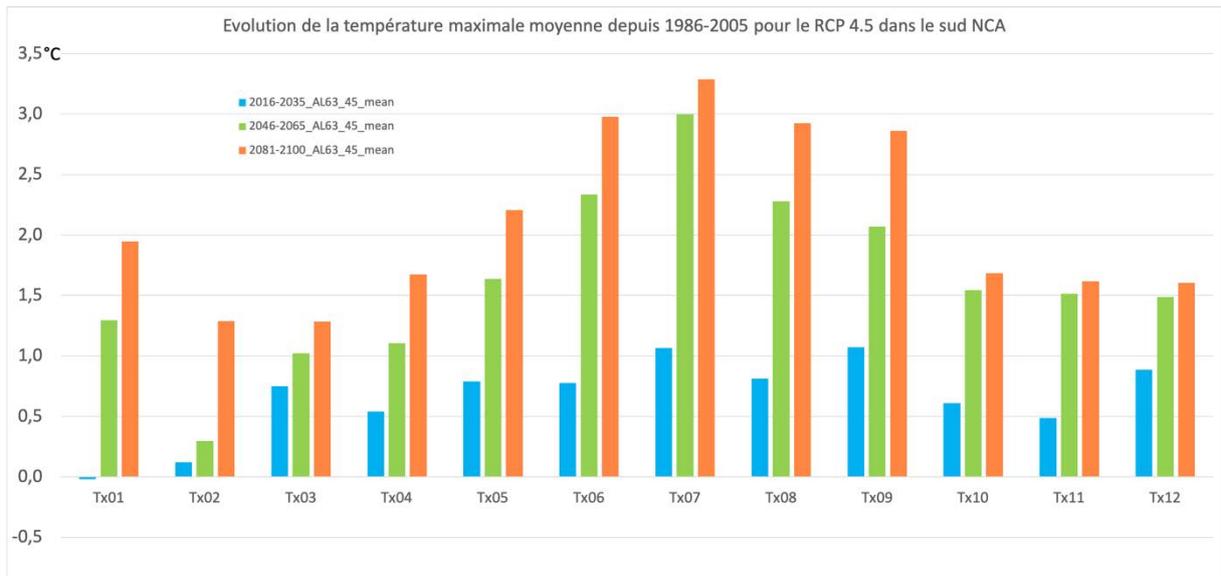
MARTIN Nicolas, 2018 : Variabilité spatiale des températures maximales à Nice entre mai et septembre 2015, *Actes du XXXIe colloque de l'AIC*, Nice juillet 2018, pp 26-31.

- MORA C. et al., 2017: Global risk deadly heat. *Nature Climate Change*, Vol 7, July 2017, pp. 501-507.
- MULLAN D., FEALY R. et FAVIS-MORTLOCK D., 2012: Developing site-specific future temperature scenarios for Northern Ireland: addressing key issues employing a statistical downscaling approach. *International Journal of Climatology*, 32, 2007-2019.
- NOJAROV P., 2012: Bulgarian mountains air temperatures and precipitation-statistical downscaling of global climate models and some projections. *Theoretical and Applied Climatology*, 110, 631-644.
- SACHINDRA D.A., HUANG F., BARTON A. et PERERA B.J.C., 2013: Least square support vector and multi-linear regression for statistically downscaling general circulation model outputs to catchment streamflows. *International Journal of Climatology*, 33, 1087-1106.
- SOUVIGNET M., GAESE H., RIBBE L., KRETSCHMER N. et OYARZUN R., 2010: Statistical downscaling of precipitation and temperature in north-central Chile: an assessment of possible climate change impacts in an arid Andean watershed. *Hydrological Sciences Journal*, 55:1, 41-57.
- SOUVIGNET M., et HEINRICH J., 2011: Statistical downscaling in the arid central Andes: uncertainty analysis of multi-model simulated temperature and precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, 106, 229-244.
- VON STORCH H. 1995: Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research. *Meteorologische Zeitschrift*, 4, 72-80.
- VON STORCH H. 1999: On the use of "inflation" in statistical downscaling. *Journal of Climate*, 12, 3505-3506.
- WETTERHALL F., BARDOSSY A., CHEN D., HALLDIN S. et XU C.-Y., 2006: Daily precipitation-downscaling techniques in three Chinese regions. *Water Resources Research*, 42, W114223.
- WETTERHALL F., HALLDIN S. et XU C.-Y., 2007: Seasonality properties of four statistical-downscaling methods in central Sweden. *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 123-137.
- WILBY R.L. et WIGLEY T.M.L., 2000: Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships. *International Journal of Climatology*, 20, 641-661.
- WILBY R.L., CHARLES S.P., ZORITA E., TIMBAL B., WHETTON P. et MEARNES L.O., 2004: *Guidelines for use of the climate scenarios developed from statistical downscaling methods*. Published on-line, supporting material to the Intergovernmental Panel on Climate Change, 27.
- YIN C., LI Y., YE W., BORNMAN J-F. et YAN X., 2011: Statistical downscaling of regional daily precipitation over southeast Australia based on self-organizing maps. *Theoretical and Applied Climatology*, 105, 11-26.

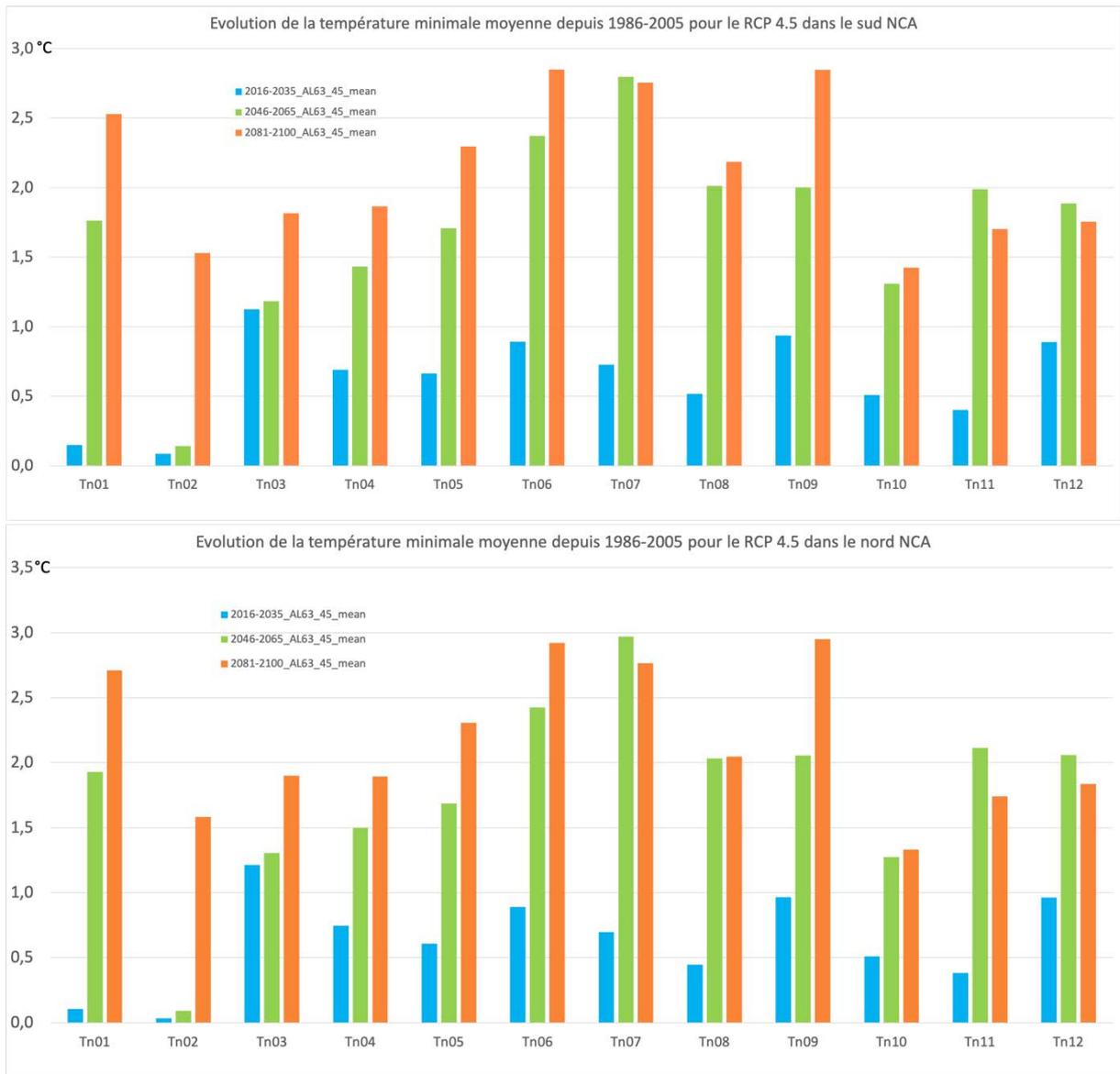
ANNEXE 1



ANNEXE 2



ANNEXE 3

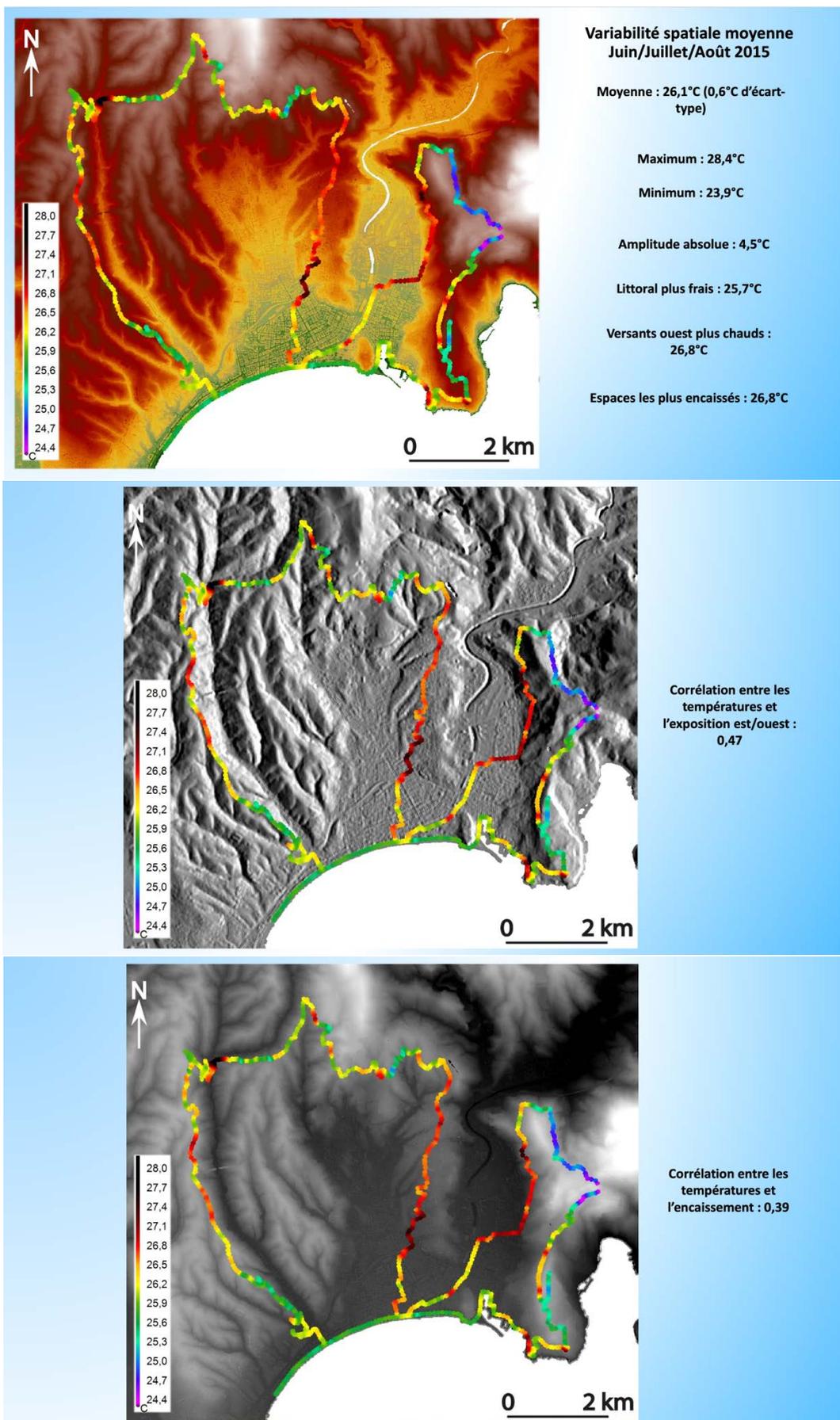


ANNEXE 4

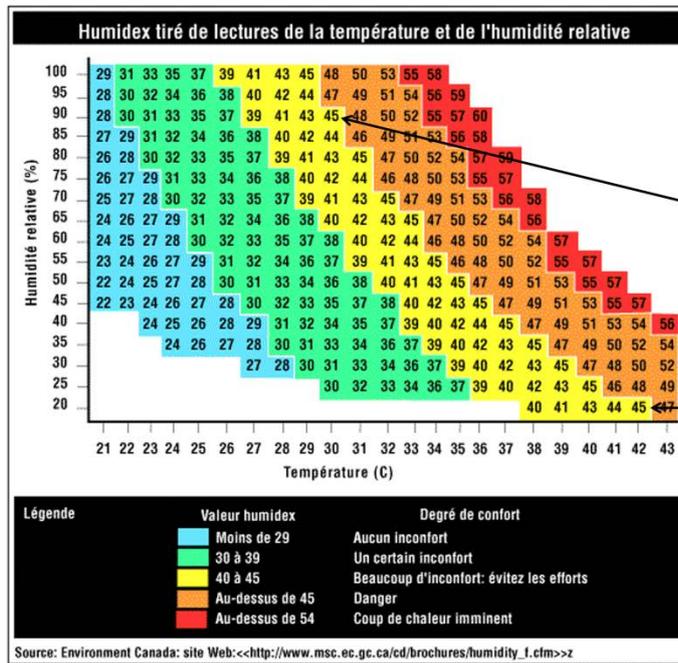
Période	Modèle - Scénario	Nice aéroport				Isola 2000			
		P90 Tn01	P90 Tx01	P90 Tn07	P90 Tx07	P90 Tn01	P90 Tx01	P90 Tn07	P90 Tx07
1986-2005	Observation Météo-France	8,4	15,9	22,7	29,8	-4,0	5,0	10,3	23,0
	ALADIN	8,7	16,6	22,6	29,1	-3,0	5,0	9,3	22,9
	REGCM	8,4	15,7	22,4	29,7	-2,5	5,0	9,1	23,1
2016-2035	AL63_26	9,6	15,9	25,1	31,4	-2,3	3,5	12,9	27,3
	CM46_26	9,1	17,1	23,6	30,9	-1,9	6,0	9,7	23,3
	AL63_45	9,2	15,6	23,9	30,5	-2,6	3,7	10,8	25,6
	AL63_85	8,7	15,6	24,8	30,8	-3,4	3,2	12,9	28,2
	CM46_85	9,5	17,1	23,7	31,0	-1,5	6,2	10,2	22,3
2046-2065	AL63_26	9,0	15,9	24,5	30,9	-3,0	3,3	11,7	25,8
	CM46_26	9,6	17,0	23,8	31,2	-1,6	4,8	10,3	23,5
	AL63_45	9,7	16,4	25,7	32,0	-2,0	4,2	13,7	29,3
	AL63_85	10,2	16,7	25,6	30,9	-1,4	5,4	12,9	27,5
	CM46_85	9,8	17,7	25,5	32,5	-1,3	7,1	12,4	25,8
2081-2100	AL63_26	9,5	16,4	24,0	30,6	-2,4	5,0	10,8	25,7
	CM46_26	9,4	15,4	24,0	31,2	-2,1	2,7	9,9	22,4
	AL63_45	11,2	16,9	25,8	32,9	0,0	6,0	12,3	26,9
	AL63_85	12,4	18,0	29,1	34,7	1,5	8,8	17,7	31,1
	CM46_85	12,4	19,4	28,4	36,1	1,9	11,2	15,2	28,7

Période	Modèle - Scénario	Nice aéroport				Isola 2000			
		P10 Tn01	P10 Tx01	P10 Tn07	P10 Tx07	P10 Tn01	P10 Tx01	P10 Tn07	P10 Tx07
1986-2005	Observation Météo-France	2,7	10,4	17,3	24,5	-14,0	-4,0	4,0	14,0
	ALADIN	2,8	10,2	17,5	24,4	-13,0	-4,6	3,6	13,9
	REGCM	3,0	10,3	17,2	24,5	-12,7	-5,0	3,6	13,9
2016-2035	AL63_26	3,3	10,7	18,9	25,9	-12,3	-3,8	5,0	16,9
	CM46_26	3,1	10,6	19,2	25,9	-12,3	-5,0	5,8	15,7
	AL63_45	3,0	10,4	17,6	24,7	-12,7	-4,5	3,4	14,9
	AL63_85	3,0	10,9	18,5	25,2	-12,8	-4,1	4,9	16,2
	CM46_85	3,7	10,3	18,9	25,9	-11,2	-5,0	5,2	16,0
2046-2065	AL63_26	3,9	11,4	18,6	25,7	-11,5	-3,4	4,6	15,6
	CM46_26	3,2	10,8	19,5	26,7	-12,5	-5,2	5,8	16,1
	AL63_45	5,2	12,1	19,7	26,6	-9,5	-1,8	6,0	17,3
	AL63_85	5,2	12,2	19,9	26,4	-9,8	-2,0	6,7	17,7
	CM46_85	4,7	12,0	20,6	27,5	-10,9	-3,3	7,0	17,3
2081-2100	AL63_26	4,0	11,7	18,6	25,4	-11,8	-3,1	4,9	15,7
	CM46_26	4,1	11,5	19,3	26,3	-11,6	-4,5	5,6	16,7
	AL63_45	6,2	12,9	19,6	26,8	-8,3	-1,1	5,6	17,5
	AL63_85	7,5	13,7	22,1	29,0	-6,6	0,2	8,7	20,1
	CM46_85	7,3	14,2	23,3	30,1	-7,8	-2,1	10,6	21,7

ANNEXE 5



ANNEXE 6



30°C et 90%
d'humidité
= humidex 45

42°C et 8%
d'humidité
= humidex 45

ANNEXE 7

