

Analyse du climat aux échelles locales dans le contexte du changement climatique

Climate analysis at local scale in the context of climate change

Hervé QUÉNOL⁽¹⁾

Résumé

Les nombreuses interrogations posées par le changement climatique engendrent une multitude de questions sur le fonctionnement des géosystèmes aux échelles locales. Un changement global du climat aura obligatoirement des répercussions sur le climat local. Dans ce contexte, les impacts attendus du changement climatique posent un certain nombre de questions, ne serait-ce que pour améliorer l'adaptation. Les approches de ces phénomènes à partir des modèles de circulation générale (MCG) ne sont pas adaptées aux échelles locales et, de ce fait, apportent des résultats trop approximatifs. Même si de réels progrès ont été réalisés ces dernières années au niveau de la modélisation climatique régionale, aucun modèle utilisé dans un cadre opérationnel ne permet de faire une simulation du climat aux échelles locales (quelques dizaines de mètres). L'analyse du climat aux échelles fines dans une démarche systémique et multiscalaire met en évidence une très forte variabilité spatiale du climat sur des espaces restreints. L'Homme, de par ses activités (agriculture...) et sa "qualité de vie" (confort thermique en ville...), s'adapte à cette variabilité spatiale.

Mots-clés

Changement climatique, échelles fines, pluridisciplinarité, mesures, modélisation.

Abstract

Issues related to climate change increasingly concern the functioning of local scale geo-systems. A global change will necessarily affect local climates. In this context, the potential impacts of climate change lead to numerous interrogations concerning adaptation. Despite numerous studies on the impact of projected global warming on different regions, global atmospheric models (GCM) are not adapted to local scales and, as a result, impacts at local scales are still approximate. Although real progress in meso-scale atmospheric modeling was realized over the past years, no operative model is in use yet to simulate climate at local scales (ten or so meters).

Keywords

Climate change, fine scales, multidisciplinary, measurements, modeling.

Introduction

Depuis la fin des années 1980, la communauté scientifique internationale s'intéresse au changement climatique global et s'interroge sur ses impacts futurs à l'échelle planétaire. Les différents rapports du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) ont alerté la communauté internationale sur une augmentation de la température ainsi que la fréquence et l'intensité des aléas climatiques au niveau mondial [IPCC, 2007]. Même s'il existe de nombreuses incertitudes quant à l'intensité du changement climatique et ses conséquences, l'amélioration de la fiabilité des Modèles de Circulation Générale du climat

(MCG), la corrélation positive entre les rejets de Gaz à Effet de Serre (GES) et l'augmentation des températures de ces dernières décennies font apparaître que le réchauffement global sera compris entre 2 et 6 °C (selon les scénarios et les modèles) à l'horizon 2050-2100 [Pachauri et Reisinger, 2007]. Les impacts sur l'Homme ou les territoires, aux échelles globales et régionales, estimés à partir des modèles de circulation globale (MCG) indiquent une augmentation des calamités climatiques, sécheresses, fréquence et intensité des vagues de chaleur, etc. [Redelsperger *et al.*, 2006]. Ces évolutions pourront avoir de lourdes conséquences sur les écosystèmes et les sociétés, notamment en matière de sécurité alimentaire, de

(1) Chargé de Recherches CNRS, Laboratoire LETG-Rennes-COSTEL, UMR 6554 LETG, université Rennes 2, Place du Recteur Henri le Moal 35043 Rennes Cedex. herve.quenol@uhb.fr

malnutrition et de qualité de vie [Lebel *et al.*, 2006 ; Besancenot, 2007 ; Schröter *et al.*, 2005]. Les premiers résultats de ces programmes de recherche ont été obtenus principalement par modélisation numérique à travers des collaborations internationales entre physiciens de l'atmosphère, géophysiciens et sciences de l'environnement.

Même si les simulations climatiques relèvent d'échelles relativement larges, de réels progrès ont été réalisés au niveau de la résolution des sorties des modèles. Comme l'indique Le Treut [2010] « *malgré la convergence des modèles vers des résultats largement partagés et qui semblent signifiants à grande échelle, deux types d'incertitudes demeurent, correspondant à la fois à l'amplitude et à la localisation (dans le temps ou dans l'espace) des effets attendus. Il est encore impossible de répondre à des questions précises telles que : quels seront les impacts locaux les plus importants et comment s'en protéger ? [...] Une meilleure prévision des évolutions climatiques locales constitue donc un enjeu essentiel pour lutter et nous adapter à des évolutions dont une part est inévitable* ».

Dans le contexte du changement climatique, de nombreuses incertitudes demeurent concernant la précision temporelle et spatiale des simulations futures et par conséquent les méthodes d'adaptation à préconiser. Même si le réchauffement climatique contemporain se caractérise par une augmentation plus intense des températures ces dernières décennies, le climat a toujours connu des variations à plus ou moins longue échéance. L'analyse des climats locaux à l'interface nature/société peut permettre de proposer des méthodes d'adaptation au climat actuel puis au climat futur en fonction de la variabilité climatique locale. L'analyse du climat actuel aux échelles fines met en évidence une forte variabilité du climat sur des espaces restreints. Cette variabilité est liée à l'influence de caractéristiques locales comme la topographie ou divers obstacles composant le milieu. Une analyse systémique du climat local prenant en compte l'imbrication des échelles spatiales permet d'observer et de modéliser la forte variabilité du climat aux échelles fines.

Dans l'optique d'étudier l'impact du changement climatique aux échelles locales, que ce soit au niveau des mesures ou de la modélisation, la démarche scientifique consiste à analyser la variabilité spatiale et temporelle du climat afin d'étudier les climats locaux en relation avec les activités humaines concernées et en fournissant des données à échelles locales qui permettront de participer à l'amélioration de la résolution spatiale des modèles notamment par l'intermédiaire de la validation des données.

Une démarche scientifique systémique et multiscalaire

Aux échelles fines, les conditions atmosphériques au niveau de la couche limite sont tributaires des conditions de surface [Yoshino, 1975 ; Oke, 1987 ;

Carrega, 1994]. La morphologie, les aspérités et la nature de la surface définies par le relief, la végétation ou par diverses infrastructures humaines, modifient le comportement des variables météorologiques et caractérisent à terme le microclimat [Quénol, 2002]. Cela explique en partie l'importante variabilité spatiale du climat rencontrée sur des espaces relativement restreints, surtout dans des milieux avec une topographie accidentée ou de multiples obstacles. L'hétérogénéité de la surface engendrant une forte variabilité météorologique et climatique locale au niveau de la couche limite de l'atmosphère, la hiérarchisation des éléments « perturbateurs du climat » suivant l'emboîtement des échelles spatiales sont essentielles.

La hiérarchisation des différents éléments du milieu est réalisée suivant une démarche systémique. La figure 1 montre le fonctionnement du milieu suivant les différents éléments qui le composent : atmosphère, topographie, hydrologie, phytologie, obstacles et activités anthropiques... Chaque composante est interreliée avec les autres, c'est-à-dire que si une des composantes subit une modification, cela aura des répercussions sur les autres. Prenons l'exemple du gel printanier au moment de la reprise de croissance de la vigne ou des arbres fruitiers. À cette période, ces cultures sont très sensibles aux températures négatives. Au cours d'une nuit gélive de type radiatif (situation anticyclonique avec ciel clair et vent faible), la variabilité spatio-temporelle des températures est généralement très importante sur des espaces restreints : les températures les plus froides sont observées dans les dépressions ou en amont d'obstacles où l'air froid peut s'accumuler et stagner [Quénol et Beltrando, 2008]. Si les bourgeons, vulnérables aux basses températures, se situent dans les secteurs où les températures sont les plus froides, le risque de gel est très important. La combinaison entre la forte variabilité de l'aléa climatique et la vulnérabilité du végétal engendre une localisation très précise du risque gélif et des conséquences économiques que cela peut avoir avec la destruction d'une partie de la récolte. Par conséquent, certaines parcelles auront quasiment 100 % de dégâts alors qu'une parcelle voisine restera intacte. Généralement, l'agriculteur s'adapte, soit en plantant une variété peu sensible au gel, soit en installant un système de lutte antigel (ex : aspersion d'eau, tour à vent) [Quénol, 2002]. Ce fonctionnement systémique de la variabilité spatiale du climat aux échelles fines est le même dans d'autres domaines que l'agriculture. En climatologie urbaine, les températures sont très variables d'un quartier à l'autre selon la situation atmosphérique, la « position » de la ville (fond de vallée, proximité de la mer...), les caractéristiques du bâti (type de bâti, hauteur, nature des matériaux...), la proportion et la localisation d'espaces végétalisés et les activités humaines [Quénol *et al.*, 2010]. (cf. le plan climat de Paris et l'étude ÉPICEA, présentés dans ce numéro). Lors d'une vague de chaleur, l'exposition au risque sanitaire pour les populations vulnérables varie fortement suivant ces caractéristiques locales.

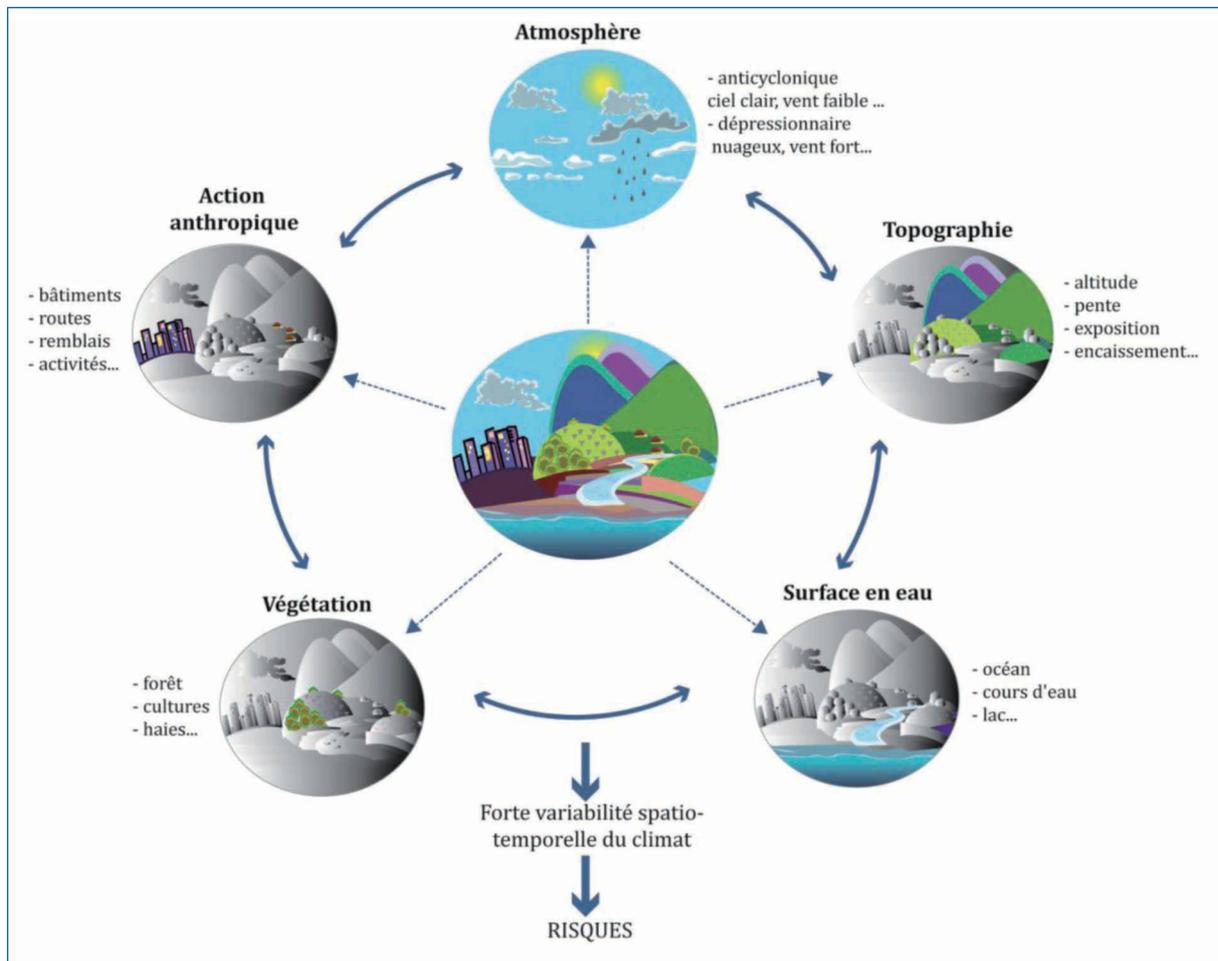


Figure 1.
Approche systémique de la variabilité climatique aux échelles locales.
Systemic approach of the climatic variability at local scales.

Dans cette logique de hiérarchisation des composantes du milieu, une étude de climatologie aux échelles fines nécessite la mise en place d'une méthodologie de mesures et de modélisation prenant en compte l'imbrication des échelles spatiales et temporelles.

Un protocole de mesures « terrain » adapté aux échelles fines

L'observation du climat aux échelles fines implique une méthode d'acquisition des données météorologiques adaptée (cf. la notion de services climatiques présentée dans ce numéro). À l'échelle « régionale » où la localisation des stations obéit à des normes officielles permettant de limiter l'impact des perturbations locales, les données (validées et homogénéisées) des réseaux nationaux sont utilisées. Aux échelles plus fines où l'objectif est de déterminer l'influence du milieu sur les variables météorologiques, l'emplacement des postes de mesures ne peut pas être défini en fonction des normes standard mais suivant l'emboîtement des échelles spatiales auxquelles les différents éléments de la surface sont susceptibles de modifier le climat local. Les stations météorologiques des réseaux natio-

naux permettent d'obtenir des informations en continu et simultanément sur plusieurs points de l'espace, mais ce réseau est peu adapté aux expérimentations climatiques aux échelles fines. La densité du réseau météorologique est trop lâche pour mettre en évidence la variabilité spatiale du climat aux échelles fines, et l'emplacement des stations météorologiques n'est pas déterminé spécifiquement suivant la problématique des expérimentations. L'observation de la variabilité des paramètres météorologiques aux échelles fines passe donc par la mise en place d'un réseau de mesures adaptées à la configuration du milieu et aux problématiques d'études de climatologie appliquée.

Suivant cette démarche, deux types de données météorologiques issues de réseaux météorologiques imbriqués sont utilisés :

(1) Les données des réseaux météorologiques nationaux ou régionaux. Ces données permettent d'étudier la variabilité spatio-temporelle du climat à l'échelle régionale mais également d'analyser les évolutions dans le temps afin de déterminer des ruptures statistiques des données météorologiques dans le contexte du changement climatique (lorsque les séries sont suffisamment longues).

(2) Les données de réseaux fixes de stations ou de capteurs météorologiques installés spécifiquement dans le cadre d'études climatiques appliquées aux échelles fines. Contrairement aux réseaux météorologiques nationaux ou régionaux où la localisation des stations météorologiques doit éviter au maximum les obstacles, la répartition des appareils de mesures est réalisée en fonction des facteurs locaux (topographie...). Il s'agit d'installer de nombreux postes de mesures pour quadriller au mieux le terrain d'étude. Les données sont obtenues soit simultanément sur divers points du site avec des stations et capteurs météorologiques enregistrant les données suivant un pas de temps défini, soit ponctuellement par l'intermédiaire de mesures itinérantes.

Par exemple, dans le cadre du programme GICC-TERADCLIM sur l'impact du changement climatique

à l'échelle des terroirs viticoles, plusieurs vignobles ont été équipés de capteurs météorologiques afin d'étudier la variabilité spatiale des températures. En Argentine, l'analyse des températures minimales et maximales moyennes annuelles de la station météorologique de l'aéroport de Mendoza entre 1960 et 2010 (cf. (1) ci-dessus), montre une augmentation moyenne de 1,7 °C pour les maximales et 0,6 °C pour les minimales (figure 2a et b). La moyenne des températures minimales (figure 2c) et maximales (figure 2d) enregistrées entre juin et novembre 2012 sur divers points de l'exploitation viticole Atamisque (Province de Mendoza) montre des écarts thermiques proches de 1 °C, alors que les différents points sont séparés de quelques dizaines de mètres (cf. (2) ci-dessus). Ce sont des facteurs locaux (pente, exposition...) qui engendrent cette variabilité spatiale.

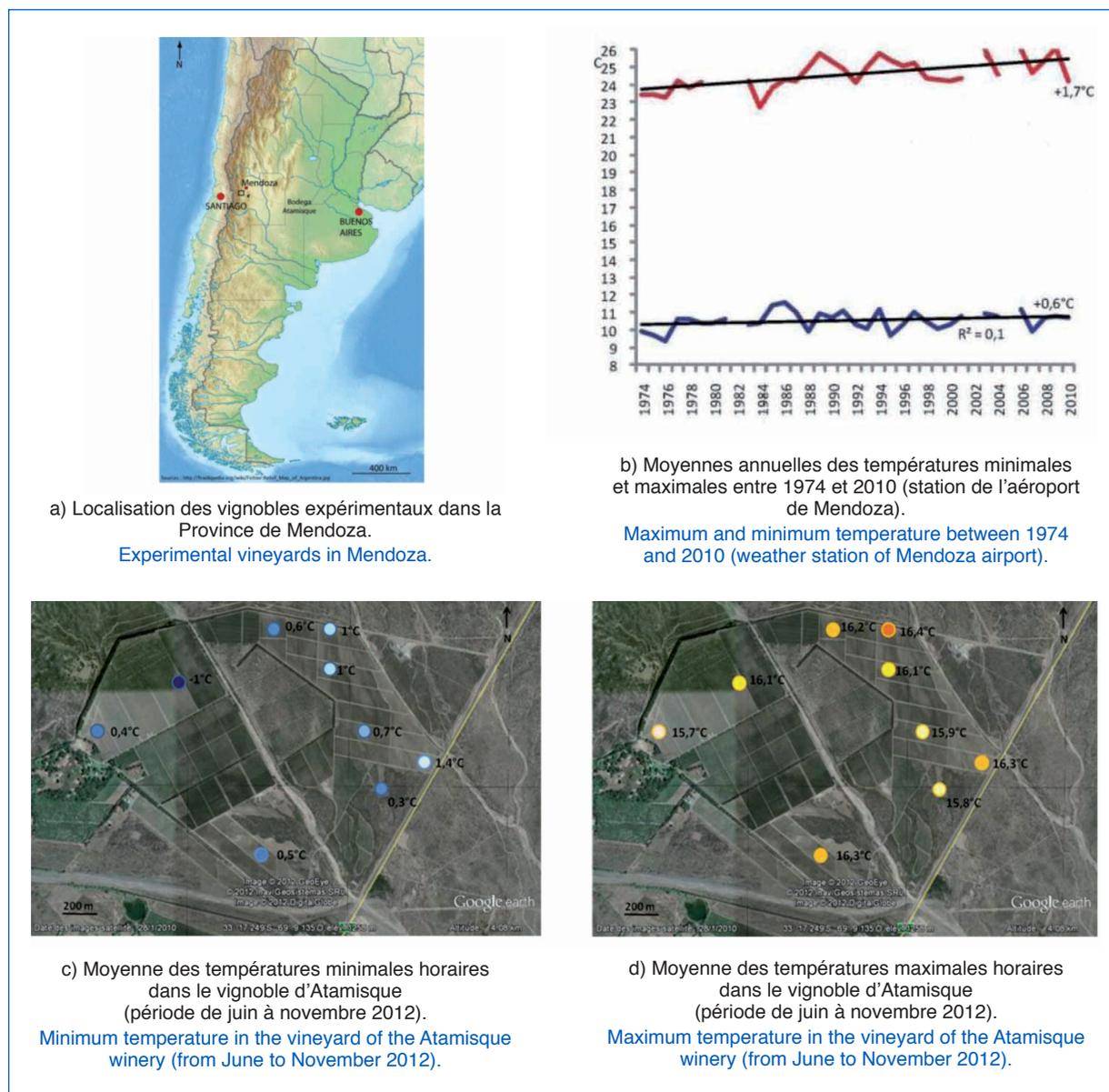


Figure 2.

Variabilité temporelle (b) et spatiale (c et d) de la température de l'air dans la province de Mendoza (Argentine).
Temporal (b) and spatial variability (c and d) of the temperature in Mendoza (Argentina).

En milieu urbain, les études multiscalaires sur l'îlot de chaleur urbain mettent également en évidence une forte variabilité spatiale des températures, d'une part entre la ville et sa périphérie, et d'autre part, à l'intérieur de la ville en fonction de la nature et des aspérités de la surface (*cf.* article de C. Greuillet). Dans les secteurs où le bâti est dense, l'ICU est généralement beaucoup plus intense que dans les secteurs plus végétalisés avec des bâtiments plus épars. Par exemple, cette démarche d'analyse spatiale du climat urbain à échelle fine est actuellement développée à Rennes et dans sa périphérie (figure 3). L'agglomération rennaise est équipée d'un réseau de 21 stations météorologiques et d'une trentaine de *data logger* enregistrant la température de l'air sous abri. Initialement disposé dans le cadre d'une étude d'impact urbain sur la biodiversité (programme ECO-RURB), ce réseau est actuellement utilisé pour étudier la variabilité spatiale des températures à échelle fine afin d'évaluer les secteurs où l'ICU est le moins intense et donc plus favorable pour la population, notamment en cas de fortes chaleurs, en particulier dans le contexte du changement climatique [Foissard *et al.*, 2013].

Les résultats des mesures de réseaux adaptés aux échelles locales mettent en évidence une forte

variabilité spatiale du climat sur des espaces très restreints. Dans une perspective d'adaptation au changement climatique, les résultats issus des mesures effectuées à ces échelles doivent permettre de prendre en compte l'évolution du climat dans une perspective systémique, notamment par l'intermédiaire de la modélisation.

Spatialisation et modélisation adaptées aux échelles fines

Dans une démarche similaire à celle de l'acquisition des données, les techniques de modélisation spatiale doivent prendre en compte l'influence de ces paramètres locaux sachant qu'ils agissent sur les variables météorologiques à différentes échelles spatiales imbriquées. Il convient donc d'utiliser des méthodes permettant d'établir les relations entre les caractéristiques de surface (topographie, occupation du sol) et les variables météorologiques.

La modélisation géostatistique

Les méthodes statistiques constituent des outils essentiels pour résumer un grand nombre de données

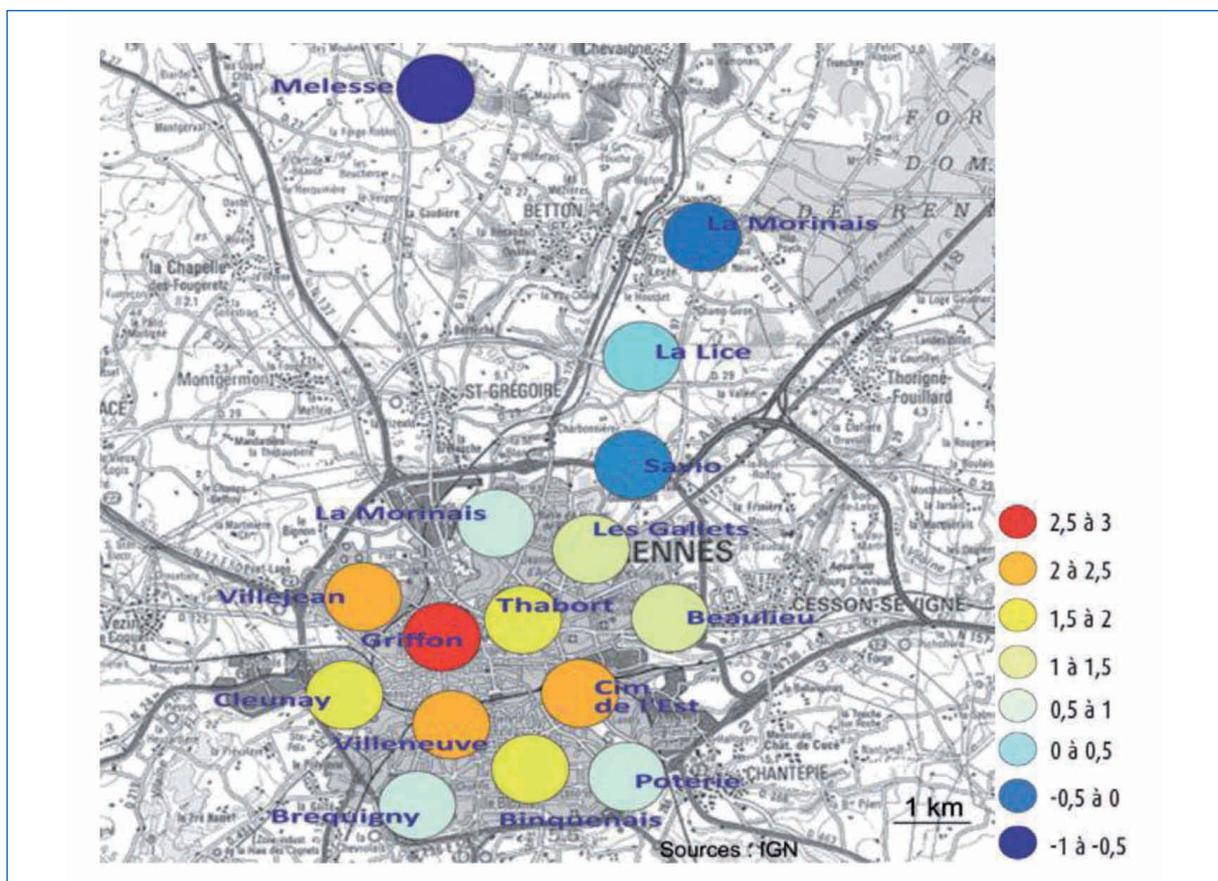


Figure 3.

Variabilité spatiale des températures minimales (avril 2005) à l'échelle ville/périphérie et à l'échelle intra-urbaine dans l'agglomération rennaise [d'après Quénol *et al.*, 2010].

Spatial variability of minimum temperatures (April 2005) at urban/rural scale and intra-urban scale in Rennes City [Quénol *et al.*, 2010].

à traiter, pour identifier d'éventuelles structures ou récurrences dans le temps et dans l'espace, en somme pour dégager l'information contenue dans les bases de données. Outre leur apport dans l'étude de la variabilité d'un phénomène, les méthodes statistiques permettent également de tester des hypothèses sur les relations entre plusieurs phénomènes [Madelin, 2004]. Les méthodes statistiques utilisées couramment pour l'interpolation des données météorologiques issues des réseaux climatologiques classiques sont inadaptées aux échelles fines. Il convient donc d'utiliser des méthodes permettant d'établir les relations entre les caractéristiques de surface (morphologie, occupation du sol) et les variables météorologiques. « *Les méthodes les plus prometteuses de cartographie à échelle fine (...) reposent sur une interpolation supervisée des mesures localisées, utilisant des relations statistiques (généralement des régressions multiples) entre les paramètres climatologiques mesurés et des descripteurs quantifiés* » de l'état de la surface [Kergomard, 2002]. Spatialiser un élément météorologique ou climatique revient à déterminer, à partir des valeurs mesurées de ce paramètre pour quelques postes météorologiques irrégulièrement répartis, sa valeur en tout point non instrumenté de l'espace [Merlier, 2001].

Dans ce type d'étude, l'existence d'un lien entre les éléments climatiques et différents facteurs (topographie, occupation du sol...) est testée. Afin de spa-

tialiser les données ponctuelles des mesures sur le terrain, nous cherchons donc à déterminer quels sont les facteurs géographiques, environnementaux et topographiques influençant de manière significative la distribution spatiale des mesures observées. Ainsi, dans une démarche hypothético-déductive, il s'agit de quantifier leur rôle en testant et en mesurant les effets respectifs de chaque facteur sur les paramètres météorologiques, et de construire *in fine* des modèles statistiques à partir de régressions multiples. L'équation de cette régression est alors utilisée pour spatialiser, par l'intermédiaire d'un Système d'Information Géographique (SIG), le phénomène en tout point de l'espace (en fonction des paramètres locaux) (figure 4).

Avec l'amélioration des fonctionnalités des SIG et l'augmentation des capacités de calcul des ordinateurs, la spatialisation avec les méthodes statistiques multicritères a été utilisée dans de nombreuses études de climatologie appliquée [Laughlin et Kalma, 1987 ; Blennow et Persson, 1998 ; Bradley *et al.*, 2002 ; Chapman et Thornes, 2006 ; Stahl *et al.*, 2006 ; Joly, 2007].

L'application de cette démarche de spatialisation du climat aux échelles fines par méthodes statistiques et SIG nécessite entre autres des données de bases possédant une résolution fine (ex : modèles numériques de terrains, occupation du sol, données météorologiques...).

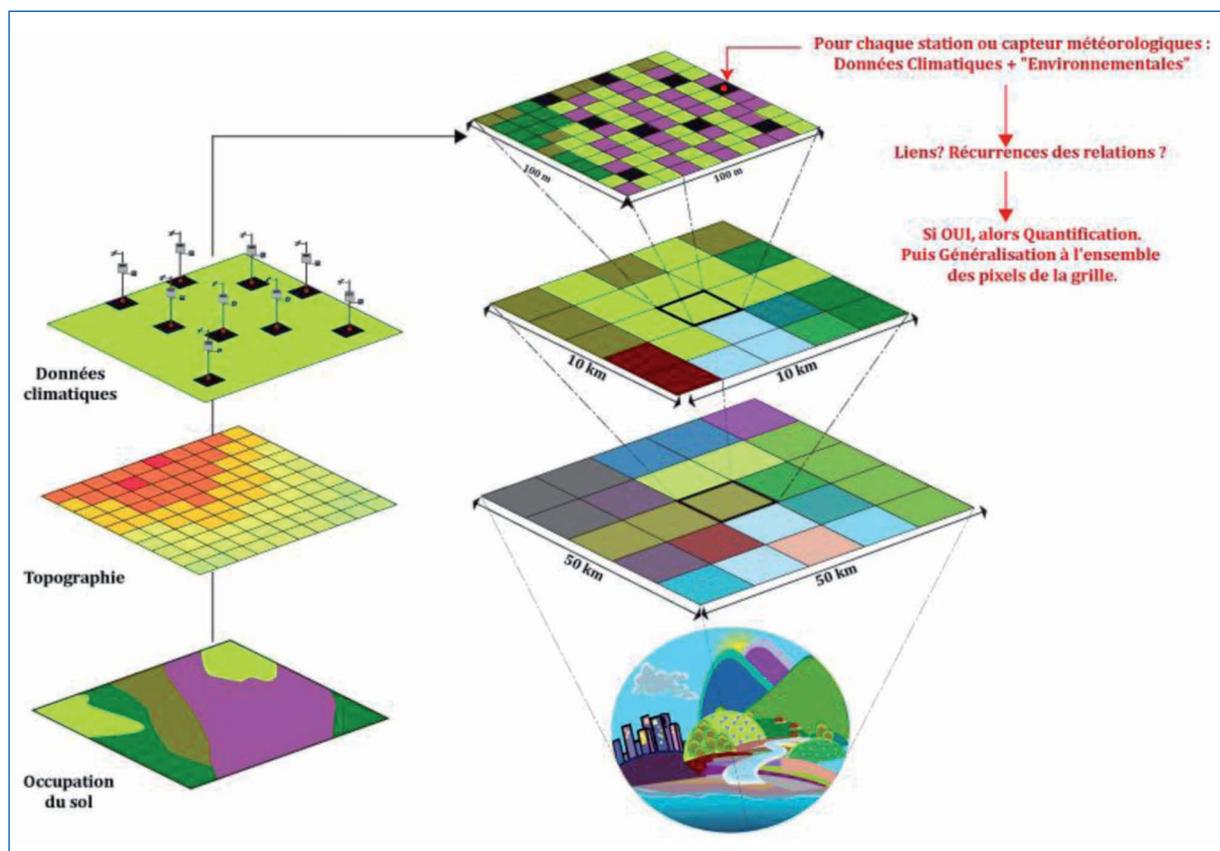


Figure 4.

Principes de la modélisation statistique multicritères appliquée aux échelles fines (adapté de M. Madelin).
 Multicriteria statistical modeling (M. Madelin).

L'explication apportée par le modèle de la régression multiple, centré sur les facteurs géographiques et environnementaux, reste partielle et ne prend pas en compte d'autres facteurs tels que la circulation atmosphérique.

La modélisation numérique à méso-échelles

Les modèles atmosphériques à méso-échelles permettent d'appréhender la complexité du milieu (transferts sol/atmosphère), difficilement prise en compte par le type de modélisation précédent (géostatistique). « *L'intérêt du modèle atmosphérique méso-échelles est qu'il tient compte des propriétés de surface (relief, occupation du sol) tout en adaptant la description à la maille de la simulation* » [Bonney et al., 2009]. La résolution adaptée aux échelles fines dépend de la qualité des données d'entrée (modèle

sol/végétation...) et de la capacité en temps de calcul. De nombreuses modélisations climatiques régionales ont été réalisées et ont montré les capacités de ces modèles à reproduire la variabilité climatique à des résolutions d'une dizaine de kilomètres [Klemp et al., 2006]. Mais ces dernières années, avec le développement des modèles régionaux dans le cadre d'études climatiques appliquées notamment en relation avec le changement climatique, avec l'amélioration de la résolution de l'état de surface (sol, végétation et topographie) grâce notamment à la télédétection haute résolution et avec l'augmentation de la capacité de calcul des ordinateurs, ces modèles sont utilisés de plus en plus à des échelles spatiales plus fines. Bonnardot et Cautenet [2009] ont utilisé le modèle RAMS pour réaliser une modélisation climatique dans le vignoble de la Province occidentale du Cap en Afrique du Sud. Des simulations à 200 m de résolution

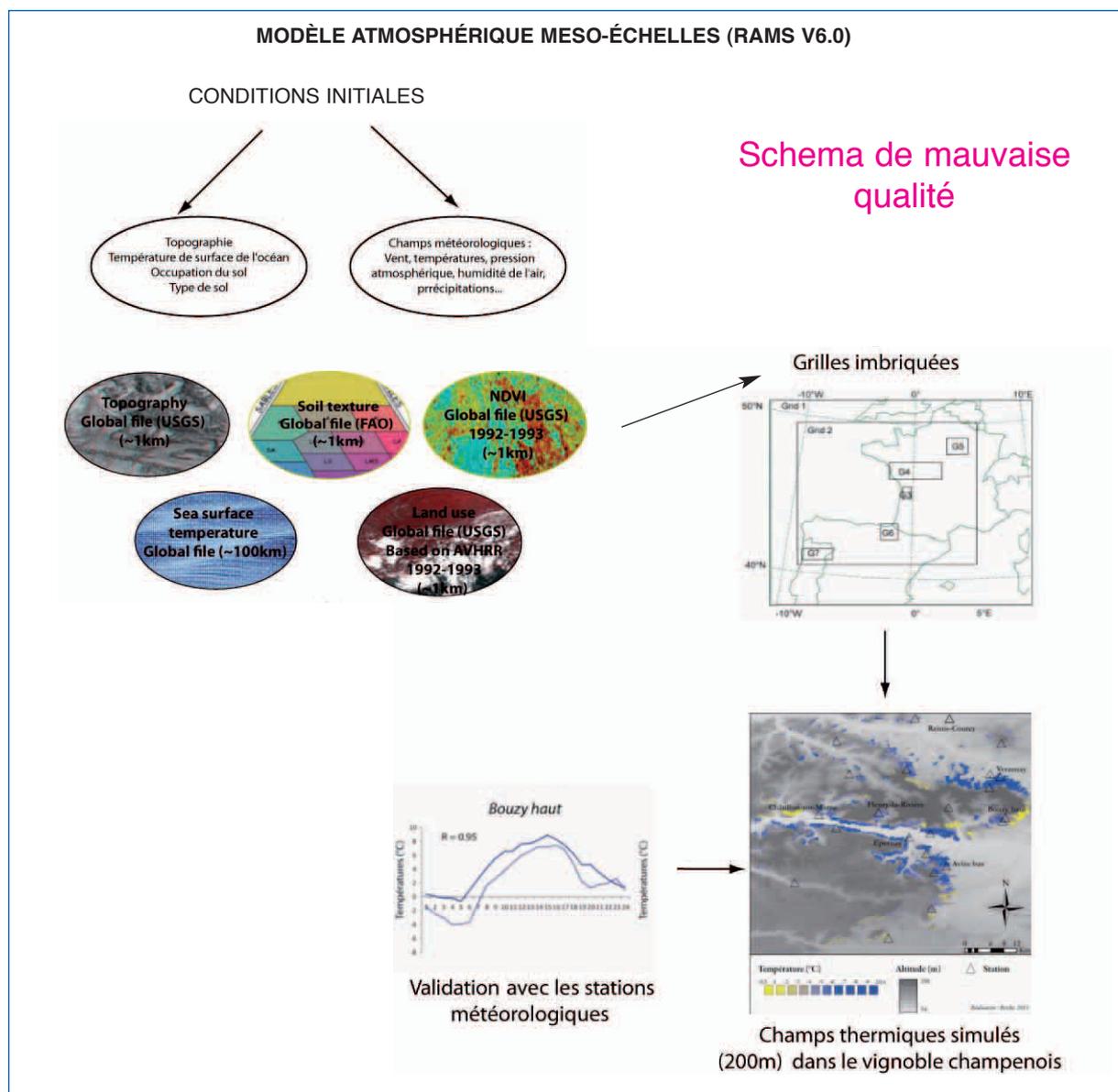


Figure 5.

Principes de la modélisation numérique à méso-échelles (adapté de V. Bonnardot).

Meso-scale atmospheric modeling (V. Bonnardot).

ont montré l'intérêt et l'apport de cette grille à haute résolution pour modéliser l'impact de la circulation atmosphérique locale sur la région viticole. La figure 5 présente les différentes étapes de la modélisation méso-échelles de la température dans le vignoble champenois avec une résolution de 200 m. Le modèle méso-échelles mis en place et les champs thermiques obtenus ont pu être comparés avec les données issues du modèle ARPEGE-Climat, notamment sur une période de référence (1991-2000), ce qui permet d'effectuer une validation avec les données mesurées [Briche, 2011 ; Bonnardot *et al.*, 2012].

Modélisation du climat à échelles fines dans le contexte du changement climatique

Concernant les simulations du changement climatique aux échelles régionales, « *Différentes méthodes de régionalisation (ou de « downscaling »), ont été développées au cours des 10-15 dernières années afin de raffiner l'information climatique issue des modèles globaux du climat (MGC) : les modèles régionaux du climat (MRC) ou les méthodes de downscaling statistique (SD), initialement développées pour les prévisions météorologiques, sont opérationnelles dans le monde* » [Gachon, 2009]. Bien que d'importants progrès aient été réalisés ces dernières années dans la régionalisation des données, les méthodes de descente d'échelles « restent un domaine sensible dans la mesure où elles conditionnent une étude plus réaliste des impacts et des actions d'adaptation » (appel à projets GICC, 2010). En effet, même si les MRC permettent de mieux prendre en compte l'influence de la topographie et des processus physiques d'échelle régionale que les MGC, ils ne résolvent pas toujours toutes les échelles spatiales et temporelles nécessaires au besoin des études d'impact et d'adaptation. Par conséquent, le développement et l'application du SD s'avèrent nécessaires. Comme l'indique Le Treut [2010], « *une meilleure prévision des évolutions climatiques locales constitue donc un enjeu essentiel pour lutter et nous adapter à des évolutions dont une part est inévitable... Des études concernant la vulnérabilité des différents territoires à l'évolution des paramètres climatiques sont nécessaires, car ce sont les seules études qui permettront de placer les changements à venir, anthropiques ou naturels, dans un contexte interdisciplinaire large, permettant d'associer des facteurs socio-économiques ou écologiques à l'étude physique du climat. La géographie en tant que discipline doit jouer un rôle clé dans cette perspective* ».

Les deux méthodes de modélisation présentées ci-dessus (statistique et numérique) sont complémentaires. Chaque méthode a sa spécificité, ses avantages et inconvénients. La modélisation numérique à méso-échelles permet de prendre en compte les conditions atmosphériques d'échelle synoptique ainsi que l'imbrication des échelles, mais elle est difficilement utilisable aux échelles fines, notamment à

cause des « temps de calcul » et de problèmes de paramétrisation. La modélisation statistique multicritères présente l'avantage d'être adaptée aux échelles locales, mais les résultats n'apportent qu'une explication partielle car le modèle est statique.

Conclusion et perspectives

Les simulations régionalisées du changement climatique en fonction des différents scénarios SRES permettent d'obtenir des estimations de l'évolution climatique future avec une résolution de quelques kilomètres. Les progrès réalisés au niveau de la modélisation atmosphérique montrent une convergence des modèles vers des résultats largement partagés et qui semblent significatifs à grande échelle [Le Treut, 2010]. Toutefois, la succession de phases d'incertitudes de la conception des modèles aux différents scénarios envisagés rend très difficile la mise en place de scénarios d'adaptation au changement climatique à plus ou moins long terme.

Afin de limiter ces incertitudes, l'analyse de la variabilité spatiale du climat aux échelles fines peut être un bon outil d'adaptation au changement climatique futur. La forte variabilité spatiale du climat sur des espaces très restreints engendrée par les aspérités (topographie...) et la nature de la surface (type d'occupation du sol...) est du même ordre, voire supérieure, à l'augmentation de températures simulée par les différents scénarios de l'IPCC. L'Homme s'adapte à cette variabilité spatiale du climat qui influence ses activités (agriculture) ou ses conditions de vie (îlots de chaleur et îlots de fraîcheur à l'échelle intra-urbaine). Dans le contexte du changement climatique, la connaissance préalable de la variabilité spatiale du climat aux échelles fines est un atout pour imaginer des possibilités d'adaptation à l'évolution temporelle du climat à plus ou moins long terme. La connaissance du climat actuel aux échelles locales permet à l'Homme d'adapter ses activités. Par exemple, un viticulteur ne plantera pas des cépages sensibles à la sécheresse sur une parcelle où le déficit hydrique est important. Cette connaissance climatique locale est un point de départ pour sensibiliser les acteurs à l'adaptation de leurs activités au changement climatique.

Les améliorations au niveau de la compréhension du climat global au climat régional et l'augmentation des moyens de calcul font que les biais au niveau des sorties de modèles du changement climatique diminueront et que les différents phénomènes qui régissent le climat seront de mieux en mieux compris. L'adéquation entre l'amélioration des modèles (compréhension des mécanismes et résolution spatiale) et les observations/validations aux échelles locales fourniront des outils indispensables pour sensibiliser la société aux différentes méthodes d'adaptation au changement climatique.

Références

- Beltrando G. Les géographes-climatologues français et le changement climatique aux échelles régionales. *EchoGéo* 2010 ; 14.
URL : <http://echogeo.revues.org/11816> ; DOI : 10.4000/echogeo.11816
- Besancenot JP. *Notre santé à l'épreuve du changement climatique*. Delachaux et Niestlé, Coll. Changer d'Ere, 2007 : 221 p.
- Bigot S, Rome S. Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures. *EchoGéo* 2010 ; 14.
URL : <http://echogeo.revues.org/12160>
- Blennow K, Persson P. Modelling local-scale frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agricultural and forest Meteorology* 1998 ; 89 : 59-71.
- Bonnardot V, Carey V, Madelin M *et al.* Using atmospheric and statistical models to understand local climate and assess spatial temperature variability at fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *International Journal of Vine and Wine Sciences* 2012 ; 46(1): 1-13.
- Bonnardot V, Cautenet S, Cautenet G, QuénoI H. Apport de la modélisation climatique méso-échelle pour évaluer le changement climatique à l'échelle régionale : application viticole (2041-2050). *25^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Grenoble 2012 : 147-52.
- Bonnardot V, Cautenet S, Planchon O, QuénoI H. Simulations climatiques méso-échelles : comparaison de données observées et simulées en vue d'une intégration de scénarios de changement climatique. *Actes du XXIV^e colloque de l'AIC, Rovereto, Italie*, 2011 : 93-8.
- Bradley AV, Thornes JE, Chapman L *et al.* Modeling spatial and temporal road thermal climatology in rural and urban areas using a GIS. *Climate Research* 2002 ; 22 : 41-55.
- Chapman L, Thornes JE. The use of geographical information systems in climatology and meteorology, *Progress in physical geography*, 2006 ; 30 : 677-89.
- Foissard X, Cantat O, Dubreuil V *et al.* Climat urbain, changement climatique et types de temps dans le Grand Ouest de la France. Dans *Changement climatique dans l'Ouest*. Presses Universitaires de Rennes 2013 ; 73-92.
- IPCC. *Climate Change: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Contribution of the Working Group I to the Fourth Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 : 18 p.
- Joly D, Nilsen L, Fury R *et al.* Interpolation des températures à grande échelle. *Revue Internationale de Géomatique*, 1994 ; 4 (1) : 55-85.
- Kergomard C, Bigot S, Charabi Y, Leriche P. Climat urbain et qualité de l'air : approches géographiques et collaborations pluridisciplinaires. *Bulletin Association de Géographes Français* 2002 ; 4 : 462-73.
- Lamy C, Dubreuil V. Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique : cas du scénario A1B. *Actes du XXIV^e colloque de l'AIC, Rovereto, Italie*, 2011 : 357-62.
- Laughlin GP, Kalma JD. Frost hazard assessment from local weather and terrain data. *Agricultural and Forest Meteorology* 1987 ; 40(1) : 1-16.
- Le Treut H. Modèles climatiques : certitudes, incertitudes et impacts locaux. *Actes du 23^e colloque de l'AIC, dans Risques et changement climatique*, Dubreuil *et al.* (dir.), Rennes 2010, p. 7-10.
- Lebel T, Parker J, Flamant C *et al.* The AMMA field campaigns: multiscale and multidisciplinary observations in the West African region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 2009 ; 136(1) : 8-33.
- Madelin M. *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 de l'université Paris 7, 2004.
- Merlier C. Interpolation des données spatiales en climatologie et conception optimale des réseaux climatologiques. *Annexe du rapport de Météo-France concernant ses activités en rapport avec la Commission for Climatology (CCL) de l'OMM*, 2001 : 21 p.
- Oke TR. *Boundary Layer Climates*. Second Edition, London, 1987 : 372 p.
- Pachauri RK, Reisinger A. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland 2007 : p. 104.
- QuénoI H, Beltrando G. Impact of a new railway line embankment (Mediterranean TGV) on the frequency of spring frosts in a fruit-growing area of the Durance Valley (South of France). *Meteorological Applications* 2008 ; 15(3) : 389-98.
- QuénoI H. *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral*. Thèse de Doctorat USTL, Édition ANRT, 2002 : 283 p.

- Quénot H. *Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique*. Habilitation à Diriger des Recherches à l'Université de Haute Bretagne, 2011 ; 2 vol. : 298 p.
- Quénot H, Dubreuil V, Mimet A *et al.* Climat urbain et impact sur la phénologie végétale printanière. *La Météorologie* 2010 ; 88 : 50-7.
- Redelsperger *et al.* Amma, une étude multidisciplinaire de la mousson ouest-africaine. *La Météorologie* 2006 ; 54 : 22-32.
- Schröter D, Cramer W. Leemans R *et al.* Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. *Science*, 2005 ; 310 : 1333-7.
- Stahl K, Moore RD, Floyer J *et al.* Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density. *Agricultural and Forest Meteorology* 2006 ; 139 : 224-36.
- Yoshino M. *Climate in a small area: an introduction to local meteorology*. University of Tokyo Press 1975 : 549 p.

