

LE CLIMAT URBAIN DE NICE EN MILIEU GÉOGRAPHIQUE CONTRASTÉ : SYNTHÈSE PAR APPROCHE INDUCTIVE

Pierre CARREGA

Université de Nice-Sophia Antipolis

Equipe GVE-UMR ESPACE

98 bd E. Herriot

06204 Nice cedex 3 – France

carrega@unice.fr

Résumé

Synthèse de 30 années de mesures diverses (surface, air à 2 m sur sol, air au-dessus de la ville) dans une approche inductive débouchant sur une modélisation statistique, cet article montre à quel point le climat urbain de la ville de Nice est conditionné par les mécanismes topoclimatiques, liés à la ville, mais aussi au relief et au contact terre-mer. Le régime de brises thermiques, presque tyrannique, contrôle les variables climatiques et influence donc fortement la vie des citoyens niçois, en dessinant des contrastes climatiques spatiaux à l'intérieur de la ville.

Mots-clés : Nice, climat urbain, îlot de chaleur urbain, topoclimatologie, ventilation, mesures, modèle statistique.

Abstract

**The urban climate of Nice (France) in a context of contrasted topography:
synthesis using an inductive approach**

As a 30 years various measurements synthesis (ground surface, air at 2m high, airflow above the town) this paper is related with an inductive approach, leading into a statistical modeling. It shows that the urban climate of Nice is conditioned by topoclimatic mechanisms, linked to the town but also to relief and sea-land interface. The thermal breezes regime, almost tyrannical, controls climatic variables, and therefore influences strongly urban people life, drawing spatial climatic contrasts inside the town.

Keywords: Nice, urban climate, urban heat island, ventilation, measurements, statistical model.

Introduction

Fortement étudiée, en particulier à partir des expériences nord-américaines, dans les années soixante à quatre-vingt, la climatologie urbaine un moment délaissée revient à la mode, pour différentes raisons : le constat d'abord que le rapport population urbaine/population rurale ne cesse de croître partout dans le monde et que le cadre de vie de plusieurs milliards d'habitants de notre planète est désormais urbain. Or les conditions de vie en ville, très artificialisées, diffèrent sensiblement de celles du milieu rural, d'autant plus que la taille des agglomérations augmente. Par rapport à la campagne, le climat urbain offre souvent plus de possibilités de s'affranchir d'une situation météorologique contraignante, mais parfois, c'est exactement l'inverse, comme l'ont montré divers épisodes caniculaires en Europe de l'ouest, et la vulnérabilité de la ville est amplifiée par la densité de population. Malgré son intérêt certain, le climat urbain mesuré (difficilement) en ville à l'extérieur ne doit pas être confondu avec celui d'un appartement, d'un bureau ou d'un magasin, c'est-à-dire celui que supportent ses habitants la plupart de leur temps... Ainsi, lors de vagues de chaleur, du fait de l'inertie thermique des bâtiments, la température d'un appartement continue de monter même si ce n'est plus le cas à l'extérieur.

Tous les scénarios des climats futurs insistent avant tout sur une hausse des températures qui sera probablement la variable la plus préoccupante à laquelle devront s'adapter de nombreuses villes en été. Malgré l'incertitude inhérente aux sorties de modèles climatiques, à laquelle s'ajoute celle liée à la descente d'échelle spatiale nécessaire aux décideurs, ces derniers sont de plus en plus soumis à l'obligation de réflexion sinon de prises de mesures dans les domaines de l'aménagement et de l'environnement : réseaux, choix énergétiques, types de constructions nouvelles, surveillance et essai de maîtrise des phénomènes thermiques, hydriques et hydrologiques... Si l'intérêt de modéliser physiquement, suivant une logique déterministe, le climat (ou la météorologie) d'un espace donné n'est plus à démontrer, il n'en reste pas moins que mesurer, observer est absolument obligatoire, et il est évident que pour valider un modèle, on ne peut se passer de mesures.

Qu'il s'agisse de modélisation ou de mesures, essayer de représenter le climat d'une ville à fine échelle spatiale permet de mettre en valeur les différences parfois importantes existant entre divers quartiers d'une ville. Ainsi observe-t-on parfois des écarts thermiques supérieurs à 4°C pour l'air, ou des différences d'hygrométrie dépassant 20 %, à l'intérieur de l'agglomération niçoise. Ces écarts dessinent une hétérogénéité du climat urbain, souvent nettement ressentie par l'homme de la rue, et sont partie prenante de son « vécu » quotidien, de son cadre de vie, ce qui milite pour une caractérisation et une cartographie détaillées des variables climatiques, à l'échelle du citoyen et tout simplement de l'homme.

Il y a donc non pas un climat, mais des climats urbains qu'il faut saisir et cartographier, avec la question immédiate du choix de la méthode de spatialisation. Ici, le parti a été pris de se fonder sur la mesure ponctuelle des variables à cartographier, comme source de spatialisation, et non sur la mise en œuvre d'un modèle climatique régional. Les cartes produites, et donc les méthodes de spatialisation sont fondées sur les observations, le problème consistant alors à « remplir » les espaces non documentés. La difficulté de ce type d'approche est de résoudre la question capitale qui se pose toujours dès qu'une agglomération s'est installée dans un cadre géographique qui n'est pas totalement isotrope et homogène : la variation spatiale climatique est-elle liée à l'urbanisation ou au relief, à l'intervention de tel ou tel facteur (végétation, fleuve, mer, etc.) ? En bref, il s'agit d'essayer de séparer ce qui relève de la topographie de ce qui relève de la ville, de même que l'on doit éliminer les effets de site pour comparer des villes ou simplement apprécier un gradient régional. Par exemple, comparer les températures « officielles » diffusées par les médias, de Marseille et Nice (réseau de Météo France), revient à associer une mesure faite au bord de la mer à Nice à une mesure réalisée à 30 kilomètres de la mer (Marseille, aéroport de Marignane), pour se borner au simple effet de site.

Cet article a deux ambitions : d'une part apporter des informations quantifiées et faire une synthèse sur le climat urbain niçois à partir de 30 années de mesures et observations, avec une densité spatiale suffisante pour différencier des parties de la ville, en insistant sur les deux thèmes majeurs que sont l'îlot de chaleur urbain (ICU) et la ventilation ; d'autre part, insister sur l'approche inductive, la mesure, les techniques à utiliser avec les précautions à prendre, sans se priver de la possibilité de modéliser selon une logique statistique, grâce aux analyses multivariées.

1. Objectifs et méthodes de l'étude

1.1. Le cadre

Notre étude du climat niçois s'est étalée sur trois décennies à partir de 1982, en étapes inégales. Ainsi, au-delà d'un aspect monographique inévitable, cet article constitue une synthèse à la fois dans le domaine des résultats, mais aussi dans celui des méthodes et

techniques employées, particulièrement dans le domaine des mesures (approche inductive). Les contextes administratifs et financiers sont variés : tout d'abord, thèse de doctorat d'état (Carrega 1992, publiée en 1994), puis contrats divers avec la Ville de Nice (2000, 2001) et avec le Conseil Général des Alpes-Maritimes (2008), sans oublier diverses études à la périphérie plus ou moins immédiate de la ville. Enfin, le vécu quotidien, les nombreuses mesures sporadiques et ponctuelles à fins personnelles ou pédagogiques ne sont pas à négliger, car elles ont également contribué à l'accumulation d'observations, de connaissances et, finalement, à la constitution d'une expertise. Cette dernière peut (et doit selon nous) être validée, comme c'est la règle pour tout modèle, par la « prévision » de la valeur que prendra en temps réel ou dans les heures à venir une variable climatique (température, par exemple) à tel endroit, quand on connaît le type de temps et que l'on dispose d'une ou deux valeurs servant de « repère ». Cette logique est assez comparable à celle d'une régression « environnementale » dont l'équation de type $\text{Température} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$ comporte une constante a_0 représentant une sorte de « fond » régional qui va être modulé par les régresseurs. Ces derniers sont des variables descriptives de l'environnement (a_1 = altitude, a_2 = distance à la mer, etc.), ce qui donne indirectement un sens physique à l'approche. Ainsi, quand on connaît la température T d'un lieu, on induit celle d'un autre en tenant compte des gradients induits par les changements de milieu entre les deux points.

Bien que dans le détail, les différentes études qui constituent cette synthèse aient pu avoir des buts quelque peu différents, un objectif double se dégage très clairement de ce travail. D'une part apprécier, pour la ville de Nice, l'intensité de l'ICU ainsi que la sécheresse de l'air urbain, en moyenne ou dans diverses situations météorologiques, à différents moments du jour et de la nuit, en tentant de déterminer ce qui revient à l'urbain et ce qui revient à la topographie dans les différences spatiales observées : un îlot de chaleur (IC) est-il forcément urbain (ICU) ? D'autre part, on s'est efforcé de caractériser la ventilation de la ville, au niveau de la rue, mais aussi au-dessus des toits, afin de préciser le potentiel de diffusion ou d'accumulation des polluants atmosphériques, mais aussi le niveau de confort dans cet espace fortement peuplé.

D'inévitables questions annexes sont apparues, comme celle de la représentativité des stations urbaines qui est une fréquente obsession des maires, cherchant naturellement à montrer la face la plus séduisante possible de leur commune, ou comme celle des journalistes demandant « combien y a-t-il de microclimats à Nice ? ». La réponse étant évidemment qu'il y en a une infinité ou autant que l'on voudra, selon l'échelle spatiale choisie, exactement comme dans un arbre de classification ascendante où l'on détermine au choix le nombre de classes voulues selon le niveau d'arborescence auquel l'on « coupe ». Au-delà des intérêts politiques et économiques, la représentativité des stations de mesure en ville, et la comparaison entre elles, sont un casse-tête scientifique car il est quasiment impossible de respecter les normes (OMM) d'installation d'un poste à cause, avant tout, du manque chronique de dégagement périphérique, qui pousse parfois à utiliser les toits d'immeubles...

1.2. Une ville à l'écart des grands flux synoptiques, soumise aux brises thermiques

En terme de situation, donc à l'échelle régionale, les flux zonaux perturbés tendent à passer plus au nord, du fait de la latitude (43°N) tandis que la région est relativement protégée des coulées froides par une succession de massifs montagneux isolant la Méditerranée occidentale des contrées septentrionales, avec d'ouest en est : les Pyrénées, le Massif Central, les Alpes, l'Appennin Ligure (figure 1).

La différence entre Nice et d'autres villes comme Marseille ou Montpellier, est qu'il n'y a pas pour Nice de communication directe avec les plaines du nord, fonction exercée par le seuil du Lauragais ou la vallée du Rhône, qui génèrent un renforcement des flux par effet

En 1998, le vent étudié toutes les trois heures à Nice-aéroport, montre une prédominance écrasante de la brise de terre pendant la nuit (Carrega, 2001) : on ne dénombre que 15 nuits sur 365, au cours desquelles seul un vent synoptique a soufflé (11 vents d'ouest, 3 de sud-ouest et 1 d'est). On compte 13 cas sur les 350 restants où la brise de terre n'a pas été permanente, alternant avec du vent synoptique, tandis que les 337 autres nuits (soit 92 %) étaient soumises à la seule brise de terre de NNW. Pendant la journée, le vent synoptique s'exprime plus facilement, mais encore 187 jours à brise de mer ont été dénombrés, et encore 28 de brise de terre (généralement en hiver, temps pluvieux). La faible fréquence des vents synoptiques forts laisse donc la place aux brises thermiques locales, d'autant que la fréquente position en marge des flux perturbés provoque une forte présence de ciels clairs, donc des conditions radiatives. Ces ciels clairs sont, surtout en hiver, renforcés par la subsidence qui accompagne généralement les flux de secteur ouest à nord-est en altitude (Foehn).

Au total, le nombre élevé de situations à ciel clair ou peu nuageux et le calme synoptique engendrent des conditions favorables aux contrastes thermiques et donc aux régimes de brises cycliques alternées nuit et jour : brise de terre/brise de mer, brise de montagne/brise de vallée, brises de pentes catabatiques/brises de pentes ascendantes (anabatiques). On peut estimer à plus de 80 % la fréquence totale de ces brises toutes heures confondues, et plus de 95 % leur fréquence nocturne à Nice aéroport. Cette dominance de la brise pendant la nuit est favorisée par son origine lointaine : montagnes à plusieurs dizaines de kilomètres l'alimentant en air froid et sec formant un matelas d'air dense superficiel qui, avant de parvenir sur le littoral, est capable de rejeter le vent synoptique à plusieurs centaines de mètres en altitude, comme l'ont montré de multiples trajectoires de ballons (Carrega et Ruffieux, 1986 ; Carrega 1988, 1992 ; et autres mesures non publiées). Ces cisaillements typiques (vent de N surmonté de vent d'E) posent parfois problème à la navigation aérienne. Dans ces conditions, le climat de Nice, et d'autres villes méditerranéennes bordées de reliefs, relève de l'imbrication des jeux de l'espace urbain et de l'environnement complexe et contrasté, sans qu'il soit aisé de faire la part de chacun.

1.3. Méthode de suivie et techniques utilisées

De nombreuses techniques différentes de mesures ont été utilisées, en fonction des objectifs poursuivis et donc des méthodes adoptées. La méthode générale suivie est inductive, et a donc consisté pour l'essentiel à partir des données observées pour chercher des lois structurant les valeurs entre elles, ce qui revient à une modélisation statistique, donc empirique. Etant donné la rareté des informations et mesures disponibles à partir de stations existantes, appartenant à un réseau officiel, lorsqu'il s'agit d'une ville, il a fallu recourir systématiquement à des mesures réalisées expressément dans ce but. Selon le type de mesure effectuée, les données récoltées ont servi soit à une caractérisation descriptive, importante malgré sa simplicité, car fournissant des informations inconnues jusque là ; soit à une modélisation par les outils de l'analyse de données, en particulier les analyses multivariées : ACP, classification automatique hiérarchique ascendante, et surtout, régression multiple pour la cartographie.

1.3.1. Les mesures radiométriques infrarouges

Les données ont été obtenues soit à partir d'images satellitales (Landsat TM), soit à partir d'un radiomètre utilisé à bord d'un avion spécialement affrété (deux missions), ou au sol. La résolution de Landsat TM était de 120 m dans l'infrarouge thermique, affectée d'un inconvénient majeur : l'heure de passage au-dessus de la ville (11h50 locales, soit 10h20 solaires...). Dans un souci de raffinement de l'échelle et surtout d'une meilleure adéquation de l'heure de mesure, nous avons eu recours à deux missions aériennes au-dessus de la ville, en

utilisant simultanément une caméra vidéo couplée à un radiomètre 'Heimann GMBH KT24' mesurant une surface élémentaire circulaire d'environ 2000 m² au sol (25 m de rayon), étant donné l'altitude minimale légale de 500 m pour survoler la ville (figures 3 et 4).

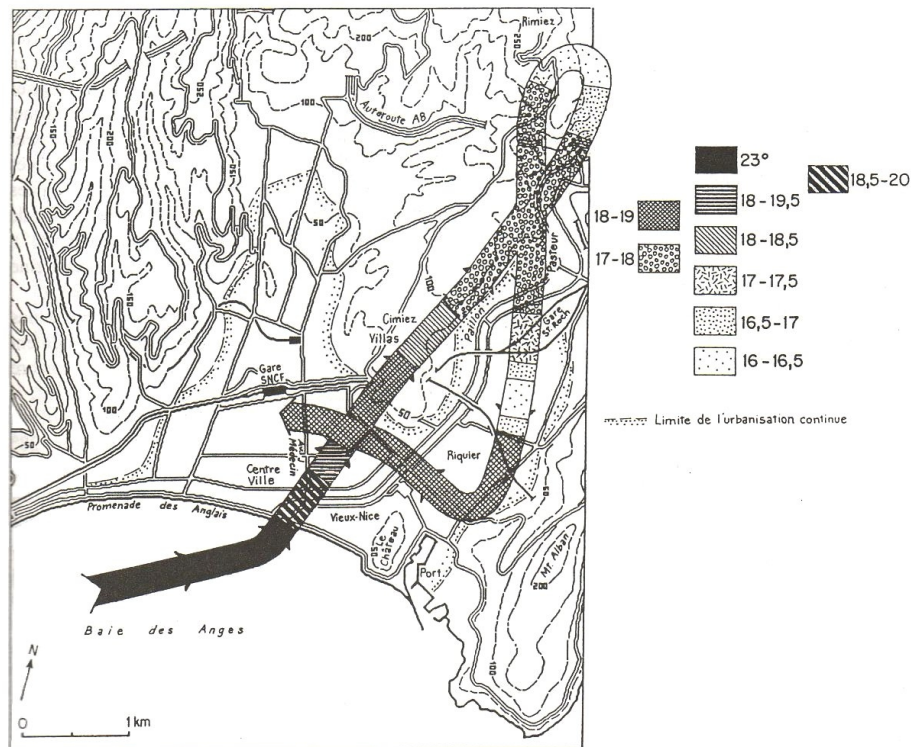


Figure 3 : Température de surface à Nice le 8 octobre 1990 à 7h10 (5h40 solaires). *Surface temperature at Nice on 8 October 1990 at 7:10 am (5:40 solar time).*

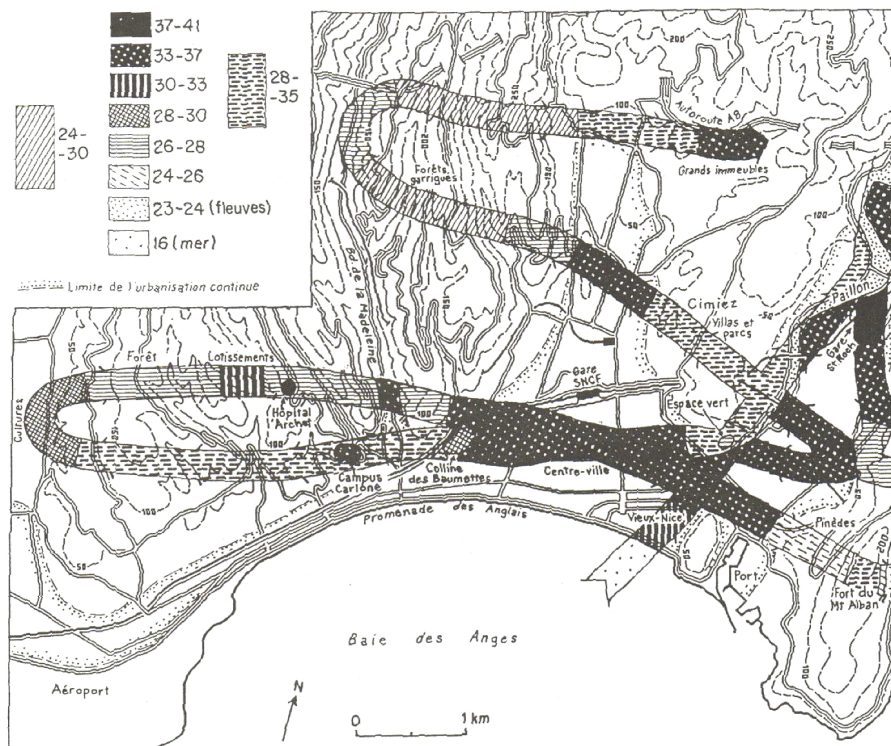


Figure 4 : Température de surface à Nice le 7 mai 1992 à 16h00 (14h30 solaires). *Surface temperature at Nice on 7 May 1992 at 16:00 (14:30 solar time).*

1.3.2. Les mesures de l'air en ville : vers une normalisation, malgré les difficultés ?

La mesure de la température et de l'humidité est normalement réalisée par des appareils installés en abri normalisé, ce dernier sis de manière à ce qu'un microclimat (construction, rocher, arbre trop proches, etc.) ne vienne pas influencer la mesure (Oke, 2004) ; de même pour le vent normalement mesuré à 10 m au-dessus du sol. Le problème est qu'en site urbain, les normes de l'OMM sont pratiquement inapplicables du fait de la densité de l'habitat, et de l'absence de dégagement, sans compter le vandalisme ou autres excès, ce qui explique la rareté sinon l'absence de postes en milieu urbain. Il faut donc accepter le principe qu'il n'est pas possible, en règle générale, de mesurer les variables climatiques habituelles (température, humidité, vent, rayonnement, etc.) selon ces normes. Les conséquences sont la difficulté de comparaison entre les sites ou même entre les villes, puisque chacun est amené à procéder à ses mesures de la manière qu'il estime la moins dommageable.

Compte-tenu des situations à éviter au maximum, on peut adopter les quelques règles suivantes :

- **La température et l'humidité** doivent être mesurées absolument à l'abri de la réflexion des rayons solaires ou de la « surémission » infrarouge issues d'une façade ou d'un mur surchauffé, perturbations maximales dans l'après-midi et en première partie de nuit. Cela revient à mesurer en façade nord d'un immeuble ou, si on ne peut l'éviter, à plus de 10 mètres (au minimum) d'une façade sud. Il faudra aussi éviter (sauf étude spéciale) les sites de végétation irriguée ou arrosée (arbres ou gazon) fréquents en ville l'été... et rechercher au maximum les sites ventilés (« rues – Venturi » ou carrefours) et à circulation modérée.

L'absence de poste permanent peut évidemment être momentanément comblée par une station provisoire, par des mesures effectuées manuellement à heure fixe par des piétons pendant une période donnée, ou par des mesures itinérantes répétitives. Dans le premier cas, la nécessaire ventilation des capteurs sera faite soit par un micro-ventilateur, soit par un mouvement de fronde durant la mesure (en retenant une valeur lorsqu'elle s'est stabilisée). Dans le cas des mesures itinérantes (figure 5), la vitesse assure la ventilation mais doit rester faible (20-25 km/h) pour ne pas dépasser la réactivité de la sonde. De plus, il faut absolument protéger le capteur du rayonnement solaire mais aussi de l'influence du véhicule porteur (sonde placée sur la moitié avant du véhicule, bien exposée au vent, et à au moins 20 cm de la carrosserie, et même plus par temps ensoleillé, surtout si le véhicule est de couleur foncée). Les mesures devront être annulées pour tout site où un arrêt supérieur à environ 5 secondes est imposé par la circulation (feu rouge, encombrement) ou si les hasards du trafic placent le véhicule sous l'influence des gaz d'échappement, en particulier derrière un camion ou un autobus.

On ne saurait trop insister sur l'absolue nécessité de disposer de métadonnées pour toute séquence, le mieux étant un enregistrement continu vocal de toute information susceptible d'intérêt, que l'enregistrement des données elles-mêmes soit automatique ou vocal lui aussi. Les mesures fournies par le meilleur système d'enregistrement possible sur un camion laboratoire ultramoderne, avec positionnement GPS, et autres raffinements, n'ont aucun intérêt sans ces métadonnées, car elles aboutiront à la création d'un ICU à la sortie du premier pot d'échappement venu ! Les mesures itinérantes étant habituellement faites pour obtenir une vision spatiale d'un endroit (urbain ou non), il faudra s'assurer que les écarts de température mesurés sont bien liés à l'espace, et non au temps. Cela suppose un circuit dont la durée n'excède pas la période durant laquelle température et humidité sont assez stables dans le temps, c'est-à-dire surtout la fin de nuit avant le lever du soleil (impérativement), parfois plus avant dans la nuit, selon les cas ; et en journée, peu après le passage du soleil au zénith (début d'après-midi). Cela revient à éliminer toute mesure itinérante en début ou fin de journée. Une

précaution pourra être prise en organisant le circuit de telle manière qu'il arrive au point de départ, avec théoriquement les mêmes valeurs !...

A Nice, nous avons utilisé les données de deux campagnes de mesures piétonnes, à 6 h du matin et 13 h TU, durant chacune 12 jours (janvier 1983 et mai 1983) et une autre campagne de 14 jours en mai 1986, uniquement en début de soirée (20 h). Sans compter d'autres mesures ponctuelles qui ont été réalisées de manière irrégulière, ce sont près de 100 trajets itinérants à travers la ville selon le circuit de la figure 5 qui ont été finalement retenus (sur plus de 200 réalisés) dont les $\frac{3}{4}$ entre 1985 et 1988.

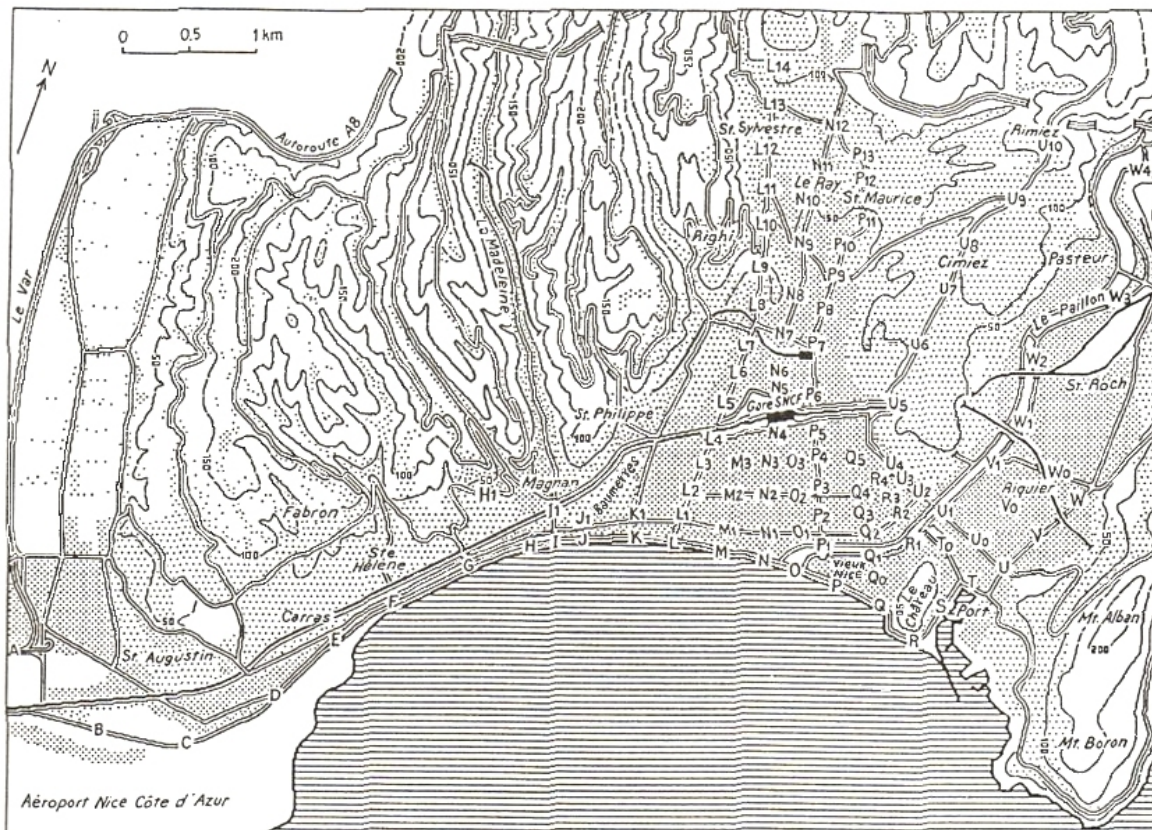


Figure 5 : Position des lieux de mesures retenus pendant les principales campagnes de mesures itinérantes dans la ville de Nice. La densité des points du figuré est proportionnelle à celle de l'urbanisation au moment des mesures. *Measurement points mapping concerning main moving measurements campaigns inside the city of Nice.*

Enfin nous avons installé une station Davis Monitor II pendant 7 mois en 2001 en bordure nord d'un collège en pleine ville, rue Vernier.

- **Le vent** ne peut en aucun cas être correctement mesuré dans une rue qui déforme vitesse et direction, sauf si l'on s'intéresse au site même de cette rue. La seule manière d'éviter cette influence tyrannique du bâti, hors grand espace vert ou rare surface dégagée, est d'installer anémomètre et girouette (ou anémomètre multidirectionnel) sur un toit d'immeuble bien dégagé, ou sur un pylône s'il en existe. Cette formule ne rend pas les vitesses comparables entre sites, mais permet d'approcher la direction du vent sur l'espace urbain, et d'étudier au moins le régime du vent en ville. Ce type de site permet aussi de mesurer un rayonnement (surtout solaire) moins perturbé que le long d'une rue. A Nice, outre Nice-aéroport, nous avons eu accès également au vent mesuré sur le toit de la mairie (installé par la Chambre de Commerce et d'Industrie), dans le Vieux-Nice, à quelques dizaines de mètres de la mer.

1.3.3. Les mesures aériennes

Très utiles pour la mesure de l'îlot de chaleur urbain en altitude au-dessus de la ville, et pour apprécier la ventilation, ces mesures sont malheureusement sous-utilisées. En dehors de matériels très coûteux comme les lidars ou profileurs comme celui de l'aéroport de Nice non accessibles en dehors de grosses structures de recherche, trois types principaux de mesures au-dessus de la ville peuvent être réalisés.

1) La mesure de l'écoulement de l'air par CLB (Constant Level Balloon). Contrairement à la pratique habituelle (eulérienne) consistant à observer les caractéristiques de l'air en un point donné, il s'agit ici de voyager avec lui et de suivre son parcours (approche Lagrangienne). Pour cela, le ballon en matière inextensible (mylar) pour ne pas changer de volume avec les variations de pression, est gonflé à l'hélium, puis équilibré pour un niveau de pression atmosphérique donné. Une fois atteint ce niveau, le ballon (90 cm de diamètre pour le modèle utilisé à Nice) va se comporter comme une bulle d'air et ses mouvements sont considérés comme ceux de l'air dans lequel il flotte, ce qui fait de lui un « traceur » dont les changements d'altitude sont ceux de l'air (et non les siens propres), donc d'origine thermique ou dynamique. Pour obtenir des données quantitatives, un suivi oculaire ne suffit pas, et il faut mesurer (toutes les 30 secondes convient bien pour des vents de vitesse inférieure à 4-5 m/s environ) la distance du ballon (par télémètre), son azimut (décalage par rapport au nord géographique) et son « élévation » (hauteur angulaire), ces deux derniers paramètres étant fournis par un théodolite. A notre connaissance, aucun télémètre laser du marché n'est à l'heure actuelle capable d'exécuter de telles mesures simultanément à lui seul : distances maximales trop faibles, ou grossissement insuffisant pour permettre la mesure du ballon au-delà de 300 m environ. Le recours aux habituels instruments optiques permet d'instrumenter un parcours de ballon entre 200 m et 4000 m environ. Le suivi par radar existe mais est réservé à des ballons beaucoup plus gros, équipés d'un réflecteur, et à des budgets autrement conséquents... A Nice, au moins 50 trajectoires de CLB ont été instrumentées, et plus d'une centaine ont été suivies à l'oeil uniquement.

2) Le radiosondage à ballon perdu, émettant les données mesurées pendant sa traversée de l'atmosphère. Il est suivi soit automatiquement par un radar soit là encore par instruments optiques, ce qui informe sur la direction et la vitesse du vent à différentes altitudes. L'équipement requis est plus coûteux puisqu'il inclut une valise radio enregistrant les données des sondes (température, hygrométrie, pression). Environ 10 radiosondages complets ont été effectués entre 1985 et 1988 à Nice. Une version très légère et simpliste consiste à n'envoyer qu'un petit ballon dont les mouvements renseigneront à vue sur la situation d'altitude, celle-ci étant connue approximativement puisque la vitesse d'ascendance peut être maîtrisée (taux de gonflage pour un modèle donné, en caoutchouc). Nous avons utilisé au moins 200 fois ce type de ballon.

3) Le sondage par ballon captif : ici un ou plusieurs ballons sont retenus par un filin auquel sont accrochés un ou plusieurs capteurs. Le plus simple est d'accrocher des capteurs à intervalle régulier qui mesurent simultanément température et humidité, mais la multiplication des capteurs alourdit l'ensemble et oblige à accroître le volume du ballon. Une autre solution consiste à n'utiliser qu'un capteur qui va monter progressivement aux altitudes souhaitées en y faisant une pause suffisante pour mettre la sonde en équilibre avec l'air (2-3 minutes par étape). Le principal défaut du ballon captif est qu'il est très difficile à employer avec un vent dépassant 3-4 m/s qui couche le ballon. Peu coûteux avec une seule sonde légère (modèle Kistock de KIMO utilisé à Nice), il est limité à un filin (fil de pêche) d'environ 250-300 mètres au maximum que peuvent emmener trois ballons en mylar de 90 cm de diamètre et 45 cm d'épaisseur. Par ailleurs, son utilisation peut être soumise à autorisation. Nous avons

utilisé ce système une dizaine de fois en périphérie de la ville, dont 8 en fin de nuit, pour quantifier des inversions thermiques locales en fond de vallon, dans un lac d'air froid.

2. Ecart de température et d'humidité en ville, et entre ville et 'campagne' niçoise

Dès lors qu'une ville est située en milieu topographiquement contrasté, comme Nice, se pose en permanence la question d'attribuer au relief ou à la ville toute variation spatiale de la température et de l'humidité en particulier. Avant de modéliser cet aspect, on peut insister sur l'observation et la mesure.

2.1. Les facteurs des contrastes thermiques

Trois facteurs d'importance s'imposent pour différencier le comportement temporel des températures en un lieu donné : la saison, la période de la journée (nuit ou jour) et le type de temps (et non pas de circulation atmosphérique). Ainsi, les écarts thermiques entre littoral et intérieur de la ville sont la plupart du temps positifs : nuit et jour en hiver, et nuit seulement en été. C'est à partir du début mars, en moyenne, que le continent, plus que la ville, devient plus chaud que la mer en journée (seulement), situation qui dure (hors jours de pluie) jusqu'au début décembre environ, avec les implications sur le régime de brises thermiques. La mer atteint son minimum thermique d'environ 12°C vers février. Le type de temps intervient par ses conséquences radiatives : la nébulosité et le vent sont facteurs d'homogénéisation des températures et humidités relatives, puisque la première minimise les contrastes thermiques de nuit comme de jour, et le second favorise les mélanges par brassage.

2.2. Suivi saisonnier de l'écart ville-campagne (6 mois)

Une station (Davis Monitor II) a été installée entre janvier et juin 2001, en pleine ville (rue Vernier) au nord immédiat de la gare SNCF (Carrega et Rosa, 2005). Le site est un petit jardinet, à 3 m environ de la face Nord d'un collège, donnant directement sur une rue large de 17 m. Comme il n'existe pas de poste en site « rural », Vernier est comparé au poste de Nice-aéroport situé au bord du fleuve Var, tout près de la mer, en site non urbanisé, soumis à l'air marin en journée, et à un flux continental rural (brise de terre) la nuit, mais légèrement en partie influencé par une semi-urbanisation croissante au nord (figure 6). Préalablement, la station Davis avait été installée à côté du poste officiel de l'aéroport durant 10 jours, par types de temps variés, avec un écart-type des différences entre postes inférieur à 0,1°C.

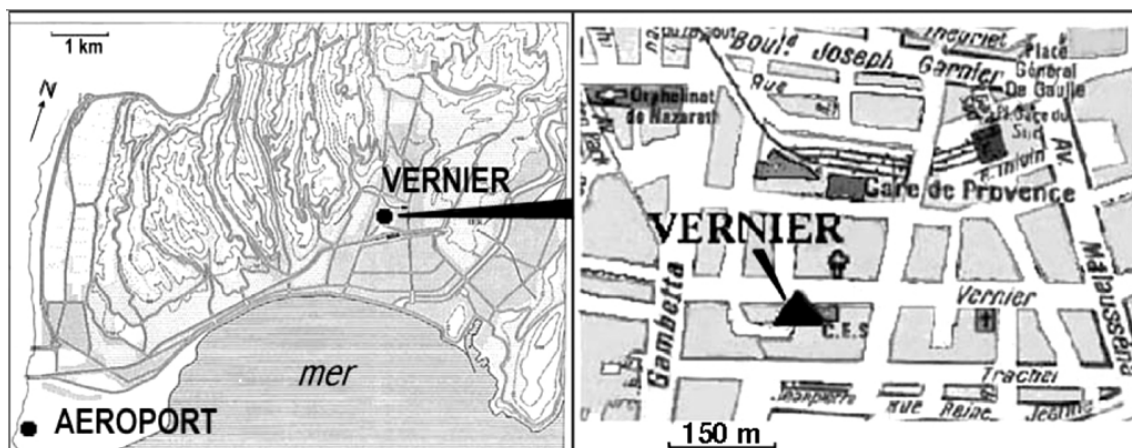


Figure 6 : Situation des postes de l'aéroport et de la rue Vernier. *Situation of Airport, and Vernier street stations.*

Durant ces 6 mois, le site urbain est en moyenne plus chaud (de $+0,82^{\circ}\text{C}$) et plus sec (point de rosée inférieur de $0,60^{\circ}$) que celui de l'aéroport. L'écart de température est maximal en janvier et diminue régulièrement vers l'été, alors que c'est l'inverse pour l'humidité : en janvier, la ville est plus humide en valeur absolue (point de rosée $>$ de $0,4^{\circ}$) du fait de la sécheresse du flux dominant de brise de terre venu des sommets alpins (ce qui en fait une brise de montagne). Dès février, en allant vers l'été, la ville devient nettement plus sèche, et le reste jusqu'à l'été, au moins.

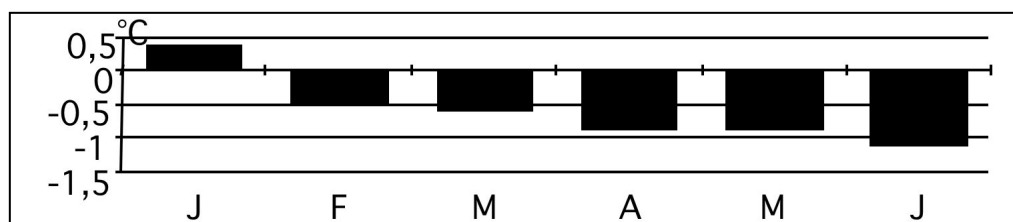


Figure 7 : Ecart mensuel de température du point de rosée (td) entre Vernier et aéroport (2001). *Monthly difference of dew point temperature (td) between Vernier and Airport (2001).*

Le diagramme de la figure 8 croise l'information à l'échelle horaire et mensuelle : l'IC est maximum et de durée maximale en janvier, dû à la chaleur urbaine, mais aussi à l'advection froide attachée à la brise de terre soufflant puissamment et durablement à l'aéroport. Il est alors minimum en fin de matinée et en début d'après-midi. Mais sa durée diminue en allant vers l'été et il s'inverse même tôt en matinée, devenant négatif.

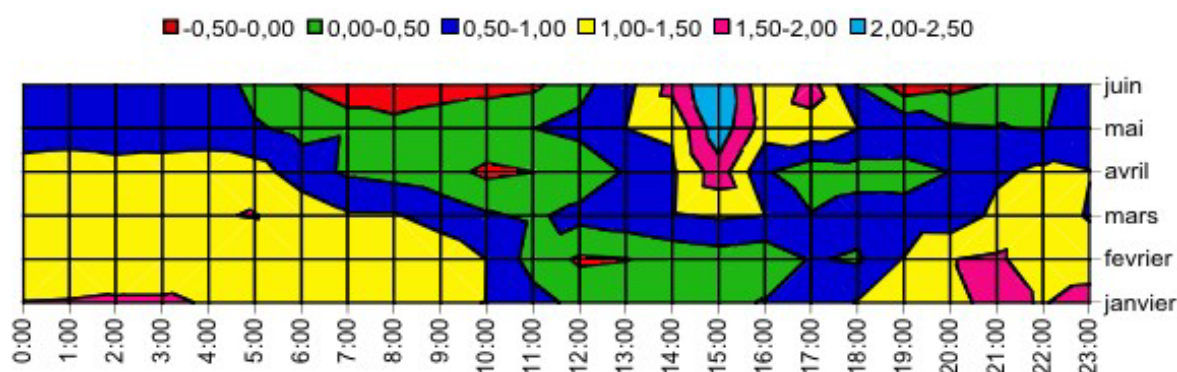


Figure 8 : Combinaison horaire et saisonnière des écarts thermiques entre la rue Vernier et l'aéroport. *Hourly and seasonal combination of thermal differences between Vernier and Airport.*

Un trait particulier se manifeste l'après-midi à Vernier à partir du printemps avec l'apparition d'une pointe de chaleur l'après-midi, liée à un suréchauffement local momentané (exposition au rayonnement solaire du mur nord et d'un recoin exposé à l'ouest, de l'enceinte du collège). Ce phénomène, loin d'être anecdotique, pose la question de leur représentativité pour certains sites urbains, qui montrent peut-être davantage un effet de paroi locale qu'un effet de chaleur de la ville en général (voir plus loin figure 14). Le déficit de vapeur d'eau (fonctionnellement reliée à la température du point de rosée) excède 1°C l'après-midi jusque vers minuit à partir de février et surtout mars, écart qui se traduit par une humidité relative plus basse de 10 à 15 % en ville l'après-midi.

2.3. Un îlot de chaleur 'mobile'

Il n'est malheureusement pas possible de disposer en permanence d'informations denses d'un point de vue spatial en ville, donc pour travailler sur l'ICU, ou simplement sur les températures (et humidités), on est obligé de faire un choix, donc on recourt :

- **soit à des mesures à pas de temps court**, rapproché, grâce à une (ou quelques) station(s) automatique(s), offrant donc une couverture déficiente de la ville, mais permettant un suivi dense dans le temps (cf. 2.1.2.) ;

- **soit à des mesures spatialement très denses**, avec de nombreux points de mesure, mais sur une courte période (campagne de mesures), ce qui permet de mieux spatialiser l'IC, urbain ou non, mais n'autorise pas un suivi de son évolution saisonnière. Les situations radiatives, favorables à l'ICU, sont très fréquentes à Nice (cf. 1.2.), ce qui favorise les contrastes spatiaux.

2.3.1. Mesures d'hiver

Durant les 12 jours de la campagne de mesures piétonnes sur 31 points, en janvier 1983, on constate une moyenne de 4°C d'écart entre le littoral urbain et la plaine du Var (considérée comme « rurale » à l'époque) en début de matinée (figure 9). Une petite partie de la ville est un peu plus chaude (excepté un jardin public < 7°), mais la chaleur de la ville compte en fait moins que celle de la mer (environ 13-14°), et les advections froides de la brise de terre-montagne font nettement baisser la température au débouché des fleuves (Var à l'ouest et Paillon à l'est) mais aussi des petits vallons (tel le Magnan qui repousse en mer l'isotherme +7°C).

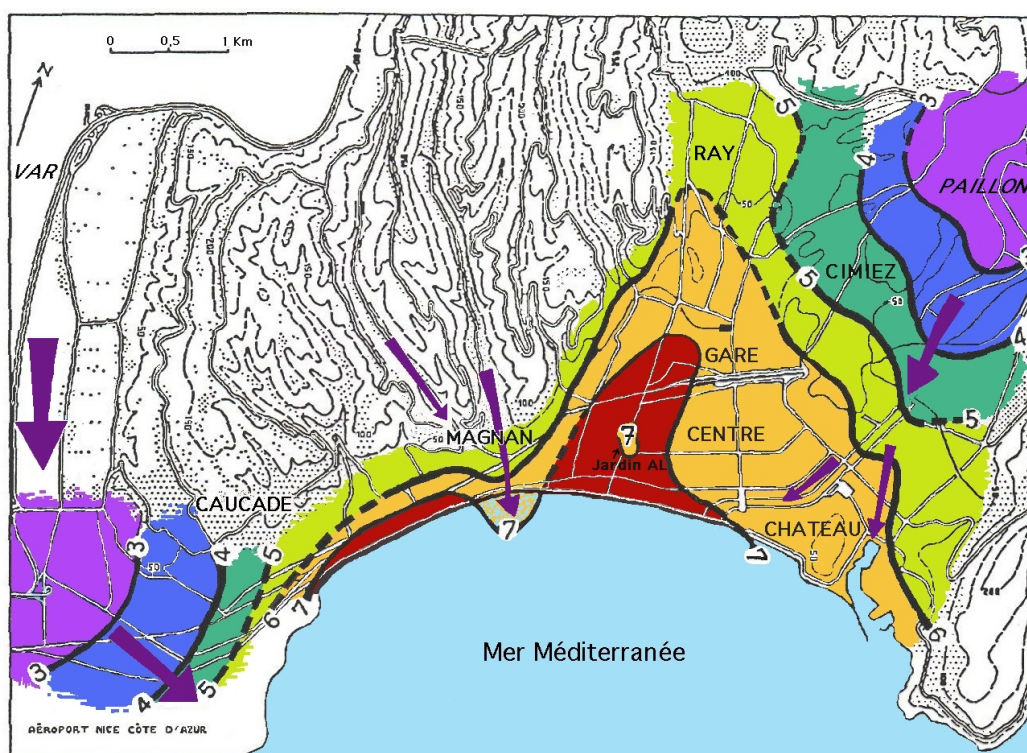


Figure 9 : Moyenne des températures mesurées à 7h30 locales entre le 10 et le 21 janvier 1983. Les flèches indiquent les principales advections froides (brise de montagne). *Average value of temperatures measured at 7:30 am (local time) between 10 and 21 January 1983. The arrows show main cold air advections (mountain breeze).*

Le flux froid nocturne de la vallée du Var est plus puissant que son homologue du Paillon (il atteint fréquemment 10 m/s en hiver à Nice-aéroport), ce qui rapproche davantage du littoral ouest de la ville, l'isotherme +3°C (en gris clair sur la figure 9). Mais il est surtout nettement plus sec : à la même température de +3°C est associée à l'ouest une température du point de rosée (td) de -5°C (60 % d'humidité relative), contre un td de 0° à l'est (80 %)

comme le montre la figure 10. L'explication réside dans l'origine des flux nocturnes : celui du Var provient de sommets élevés, baignant dans de l'air sec, alors que celui du Paillon, à l'est, vient de beaucoup plus près et de moins haut. Ce constat plusieurs fois renouvelé est important, car il permet d'opposer la partie est de Nice plus humide la nuit, à celle de l'ouest, ce qui a des conséquences sur le climat objectif et ressenti.

En journée, l'écart thermique ville-campagne se restreint en moyenne à moins de 2°C à 13h30, et les points les plus chauds concernent deux localisations : une étroite bande littorale et la pente sud-sud-ouest de la colline de Cimiez à urbanisation assez lâche. « L'IC » fractionné en deux n'est donc pas urbain, et relève de la logique terre/mer et de la meilleure efficacité radiative d'un adret.

2.3.2. Au printemps (mai 1983 et mai 1986)

L'écart matinal maximal moyen est plus réduit, avec 2,2°C à 7h30 locales, mais cette fois, le point le plus chaud n'est plus en bord de mer (plus chaud de 0,5°C par rapport à la ville) mais dans la partie nord de la ville de Nice, en pente exposée au sud (+1°). La mer devient relativement fraîche par inertie thermique, caractère encore plus marqué à 13h30 lorsque la ville exposée au sud (adret de la colline de Cimiez) est la plus chaude, et le littoral urbain niçois le plus froid (2°C d'écart en moyenne) et en même temps le plus humide (> 75 %, contre 60-65 % pour le reste de la ville).

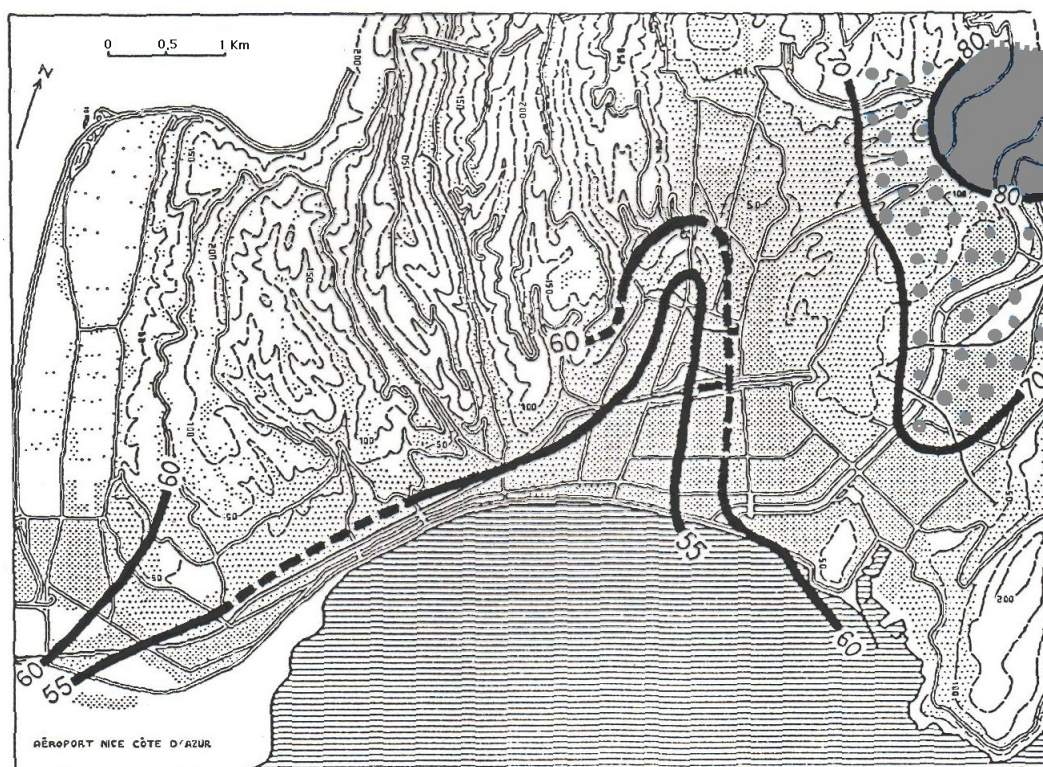
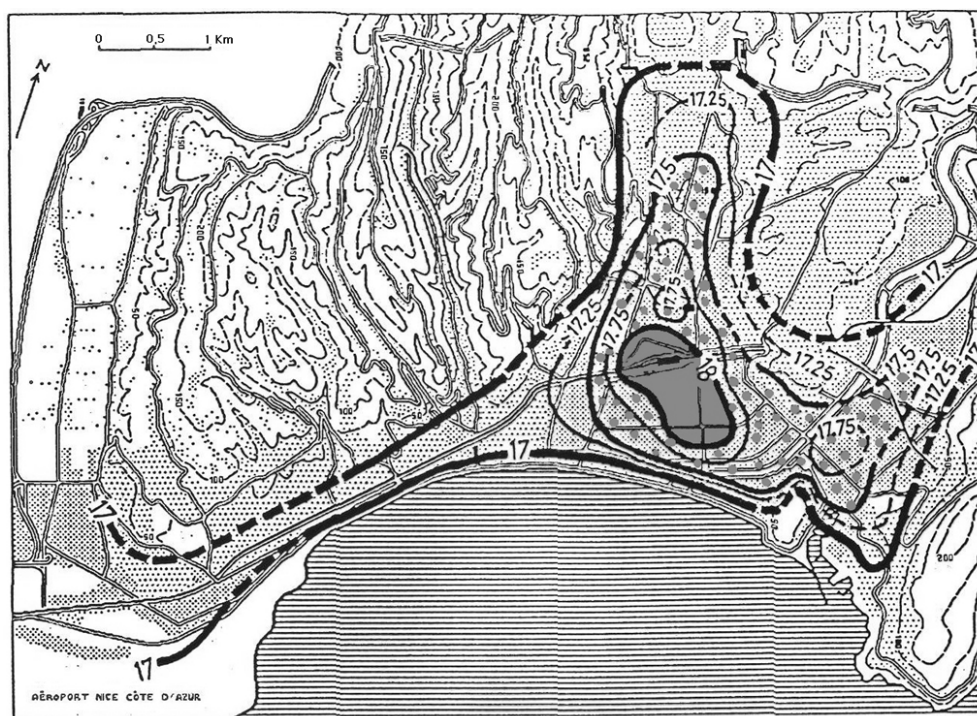


Figure 10 : Moyenne des humidités relatives à 7h30 locales, du 10 au 21 janvier 1983. *The average value of relative humidity at 7:30 am (local time), from 10 to 21 January 1983.*

En mai 1986, durant une troisième campagne piétonne, mais à 20 h locales cette fois, c'est sans ambiguïté le centre-ville surtout au sud de la gare SNCF, à topographie plane qui est le plus chaud, à la fois par rapport à la plaine du Var (de 1,5°C), et par rapport au littoral urbain de Nice (de plus de 2°). Parmi les trois horaires de mesures piétonnes (7h30, 13h30 et 20 h), seul ce dernier permet d'observer sans ambiguïté un réel îlot de chaleur urbain, en moyenne, d'intensité variable selon le type de temps. Celui-ci se double d'ailleurs d'un îlot de

sécheresse, avec une humidité relative $< 74\%$ au centre ville contre plus de 80% sur le littoral et les secteurs non urbanisés (figure 11).



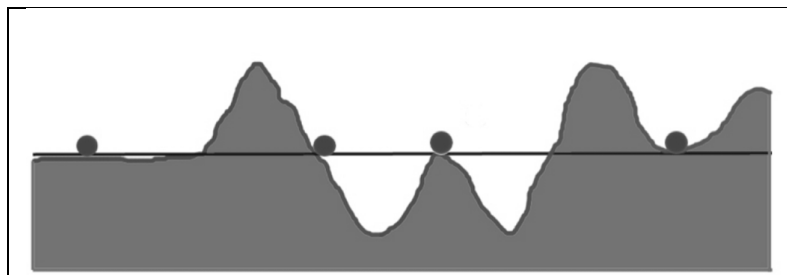
2.4. La modélisation statistique par régressions multiples ‘environnementales’

En se cantonnant à une modélisation inductive de la température, il est classique aujourd’hui de « reconstituer » un champ thermique par des descripteurs qui ont un sens physique : l’altitude est en fait liée à la pression, l’exposition au rayonnement solaire, la distance à la mer à la probabilité d’advection d’air marin (relativement chaud en hiver et frais en été), etc. Ces descripteurs sont les régresseurs (variables explicatives) d’une équation de régression linéaire multiple, dans laquelle la délinéarisation passe par l’anamorphose de certaines variables (par exemple la distance à la mer est exprimée par son logarithme ou sa racine carrée, de manière à donner plus de poids aux premiers kilomètres à partir du trait de côte). Pour ce faire, on peut adopter deux approches, compte-tenu de la complexité : ne considérer que les facteurs de l’environnement non anthropique, comme le relief et ses dérivés ; ou bien inversement, ne prendre en compte que les facteurs urbains.

2.4.1. L’environnement topographique

De nombreux auteurs ont travaillé dans ce sens depuis plus de 30 ans sur les températures (Carrega 1982, 1994 ; Joly *et al.*, 1996, 2009 ; Madelin, 2004 ; Lhotellier, 2005 ; Martin, 2012 ; Charfi, 2012, etc.). Rappelons juste qu’à altitude égale, plusieurs sites très différents se rencontrent (figure 13), ce qui donne lieu à des régimes thermiques également différents : il fera beaucoup plus froid la nuit sur le plateau de gauche et dans la vallée de droite, ainsi qu’en journée sur le sommet...

Figure 13 : Sites comparés de quatre stations d’altitude similaire.
Comparison of different positions for stations set at same altitude.



Une équation de régression « environnementale » de la température T construite à partir des mesures piétonnes de janvier 1983 en fin de nuit (cf. 2.3.1.) donne :

$$T = 5,89^{\circ} - 0,0011 A + 0,0237 NB + 0,0048 E - 0,0010 C$$

Où A est l’altitude en m, NB le niveau de base en m (élévation relative par rapport à tous les points à 100 m à la ronde pour donner l’encaissement, favorable aux inversions nocturnes), E l’exposition en degrés (0° au N, 180° au sud, 90° à l’E et à l’W), C la continentalité en m à la puissance 0,5 (distance à la côte).

Le coefficient de détermination multiple R^2 du modèle est 0,58, et l’erreur-type (écart-type des résidus de régression) $1,08^{\circ}$ (l’écart-type de l’échantillon étant de $1,54^{\circ}$). Cette approche permet de montrer que des différences spatiales importantes existent sur le site de la ville de Nice, préalablement à l’installation de la ville, uniquement liées au contact terre–mer et à la topographie.

2.4.2. L’environnement urbain

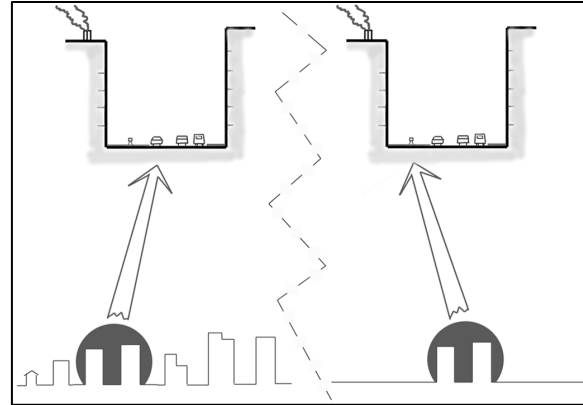
À côté de cette approche « rurale » au sens où elle n’intègre pas l’occupation urbaine du sol, on peut à l’inverse ne considérer que l’aspect urbain, en ne prenant en compte que l’artificialisation du milieu, et en n’utilisant que des descripteurs de la ville qui soient quantifiables. On obtient alors :

$$T = 5,43^{\circ} + 0,0078 \text{ DP} - 0,0143 \text{ DM} - 0,0006 \text{ DCV}$$

Où DP est la densité de population calculée par district urbain, DM la distance mur, en m, séparant un point de la façade (d'une construction) la plus proche, plafonnée à 50 m, et DCV la distance centre-ville, à la puissance 0,5, en mètres, entre un point et le centre le plus densément bâti.

La figure 14 montre qu'un point situé à même distance d'une façade (« distance mur ») peut être dans une situation très différente d'un autre : dans le schéma de gauche, il est proche d'un centre-ville, alors que dans celui de droite, il est dans un village-rue...

Figure 14 : Effet de masse urbaine conjugué à l'effet de paroi à gauche. Paroi seule à droite. *Effect of urban mass added to wall effect (on left). Wall only (on the right).*



Le coefficient de détermination multiple du modèle exclusivement urbain est de 0,67, et l'erreur-type $0,92^{\circ}$, soit un score à peine supérieur au précédent.

Une ville étant à l'évidence installée dans un site donné, il est logique de combiner les deux approches, et l'on obtient :

$$T = 6,52^{\circ} - 0,007 \text{ A} + 0,04 \text{ NB} - 0,0005 \text{ C} + 0,0049 \text{ DP} - 0,0005 \text{ DM} - 0,0004 \text{ DCV}$$

Cette fois, la valeur du R^2 dépasse 0,88, et l'erreur-type a baissé à $0,58^{\circ}$.

3. La ventilation à Nice

Les sources d'information sont peu satisfaisantes bien que multiples : mesures piétonnes, station provisoire de Vernier, aéroport et toit de la mairie.

3.1. Comparaison entre le Vieux-Nice (mairie) et l'aéroport

La confrontation entre les données anémométriques de l'aéroport et du toit de la mairie (figure 15) montre les points capitaux pour les différences de ventilation entre l'ouest et l'est de la ville (figure 2). Même si l'environnement immédiat du toit de la mairie est plus « encombré », on peut estimer à moins d'1 m/s son handicap (effet de site ralentissant les flux), d'autant que le capteur est situé à 15 m au-dessus du sol, à 1,5 m au-dessus du toit.

3.1.1. En hiver (janvier 2001)

La différence des vitesses est réelle, et l'embouchure du Var est à toutes heures nettement plus ventilée en moyenne, que l'est de la ville (figure 15) au débouché du Paillon. La renverse de brise est visible par la baisse de vitesse matinale, plus tardive à l'ouest (11 h) qu'à l'est (10 h), et vespérale encore plus marquée et plus précoce à l'ouest (18 h).

Débutant plus tôt en soirée, et se prolongeant plus tard, le régime de brise de terre-montagne est donc plus durable dans la vallée du Var qu'au débouché du Paillon, à l'est.

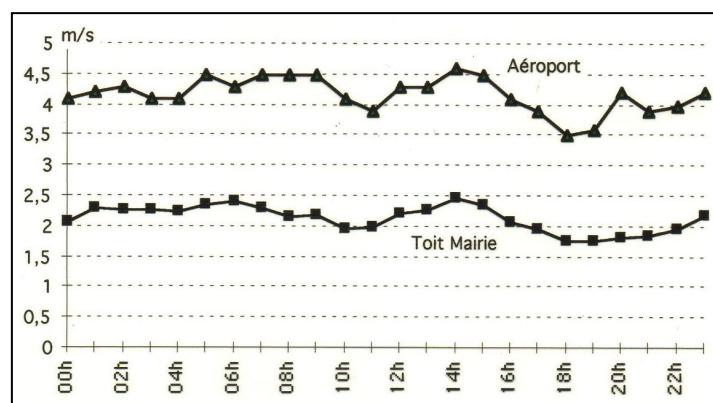


Figure 15 : Vitesses moyennes horaires du vent à l'ouest de Nice (aéroport) et à l'est (toit de la mairie) en janvier 2001 (heures T.U.). *Mean hourly wind speed at the west part of Nice (Airport) and at the east part (roof of town hall) on January 2001 (UTC).*

Cela se vérifie avec les directions (figure 16) : toute la nuit, le régime de brise est immuable, de NNW ou NW à l'ouest, et de NW à NNE à l'est de la ville (l'absence de vent de N est due à un obstacle sur un toit voisin).

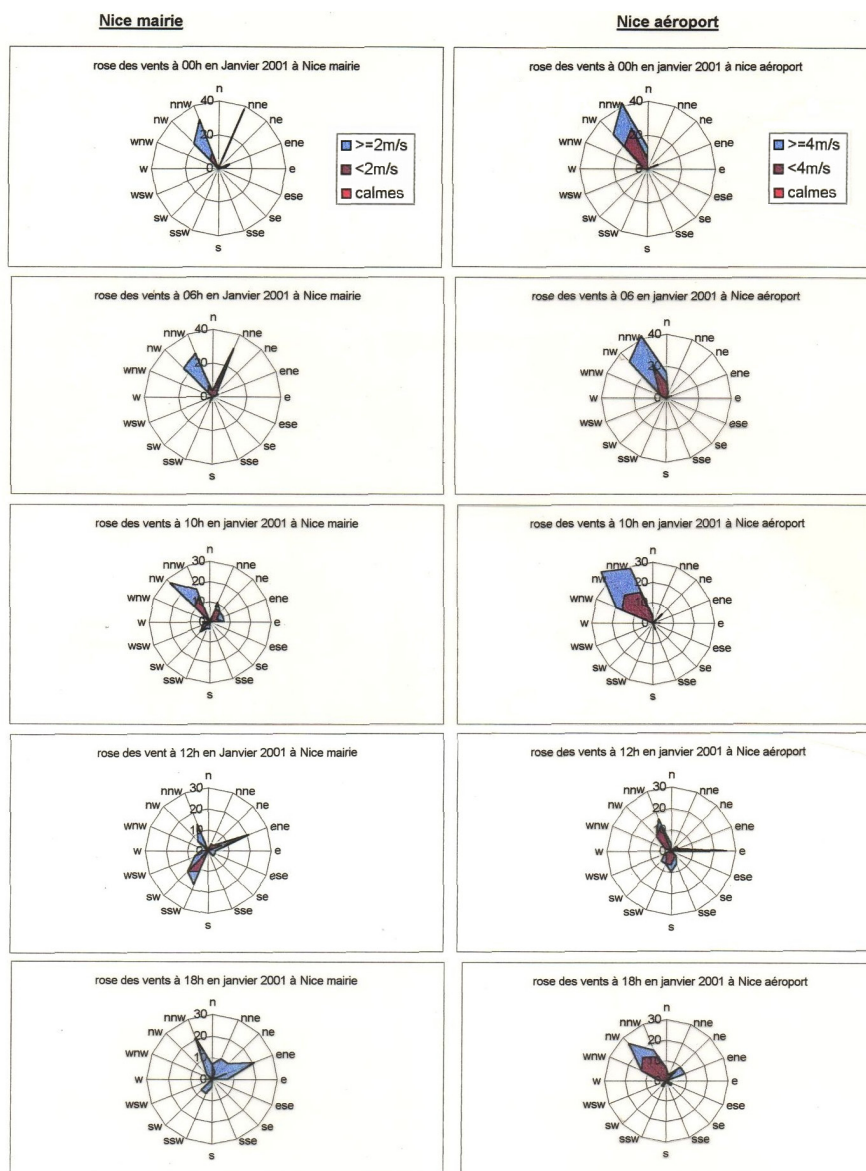


Figure 16 : Roses des vents comparées à l'est et à l'ouest de la ville en janvier 2001 (horaires-clés). *Compared wind roses at the east and the west part of the town on January 2001 (main hours).*

Ce n'est qu'à 10 h que l'on détecte des incursions synoptiques ou de brise de mer en ville, alors que le flux continental persiste sur le Var. De 11 h à 15 h, le flux est majoritairement maritime de secteur S ou E, avec cependant une fréquence non négligeable de brise de terre à l'aéroport surtout, liée aux temps couverts ou pluvieux diurnes, qui maintiennent la terre plus froide que la mer.

3.1.2. Au printemps (21 mai au 4 juin 2001)

L'écart de vitesse se réduit fortement entre les deux postes, à cause d'une part, de la baisse de vitesse généralisée à l'embouchure du Var surtout liée à l'affaiblissement du flux de nord nocturne (la différence thermique terre-mer s'amenuise), et d'autre part, à l'accroissement du vent l'après-midi à l'est de la ville, entre 16 h et 19 h (figure 17).

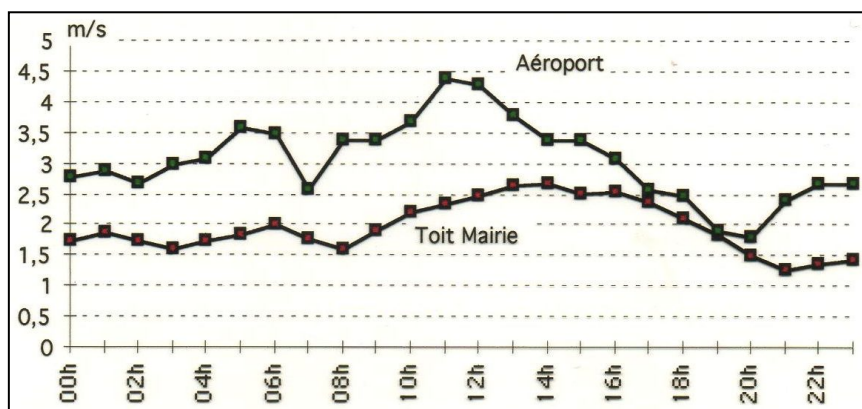


Figure 17 : Vitesse moyennes horaires du vent à l'ouest de Nice (aéroport) et à l'est (toit de la mairie) en mai-juin 2001 (heures T.U.). *Mean hourly wind speed at the west part of Nice (Airport), and at the east part (roof of town hall) on May-June 2001 (UTC).*

Les roses des vents printanières montrent qu'en pleine nuit cette fois, un flux autre que de brise peut (rarement) se manifester. Paradoxalement, la brise nocturne persiste plus tardivement cette fois à l'est de la ville (8 h) pour faire place à la brise de mer à deux directions prédominantes, SE et S-SSW, plus soutenue à l'est de la ville qu'à l'embouchure du Var en fin d'après-midi (figures 17 et 18). Il est difficile de dire si cette hausse relative du vent en ville est liée à la brise de mer relayée par la brise de vallée du Paillon, ou si c'est un cas de brise de campagne associée au renforcement concomitant de l'îlot de chaleur urbain.

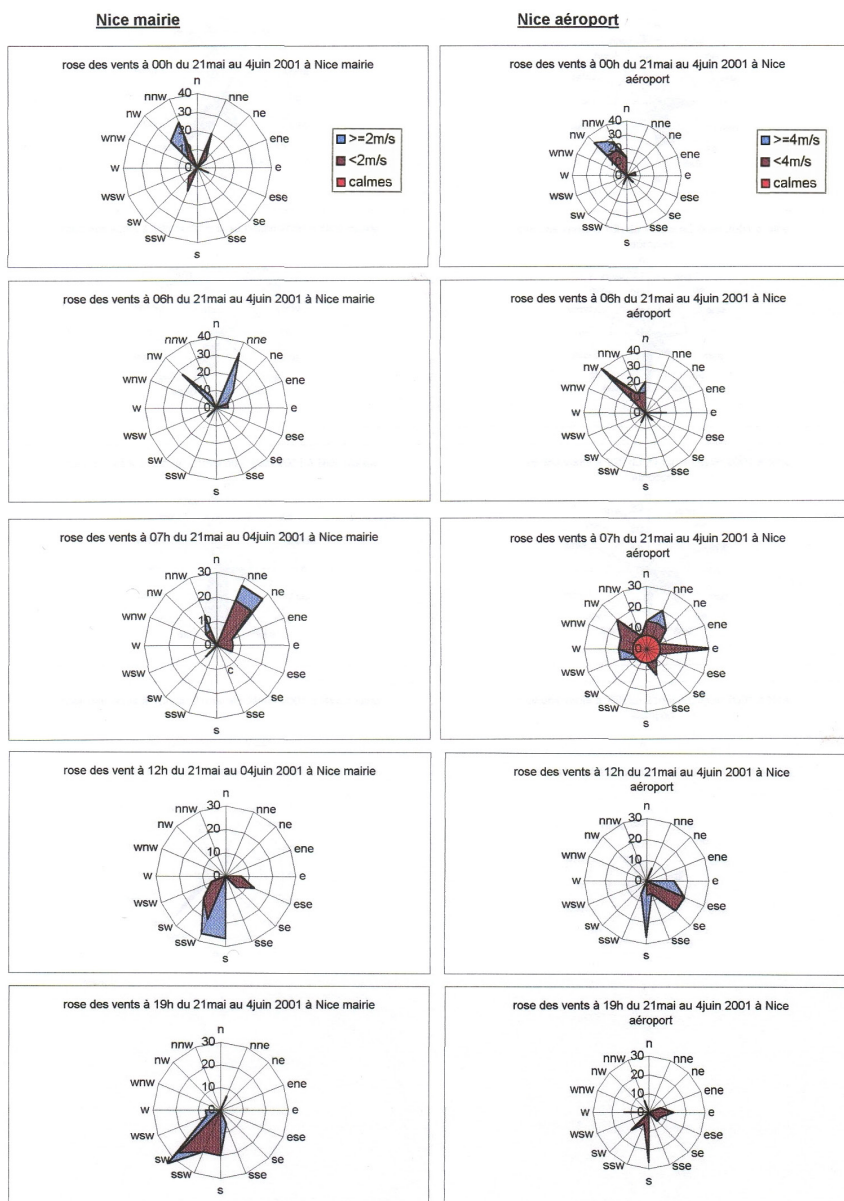
3.2. Les traits principaux de la répartition spatiale du vent en ville (+2 à +10 m/sol)

3.2.1. La nuit

Déjà mise en évidence avec les advections froides nocturnes (cf. 2.3.), la topographie joue un rôle majeur sur la ventilation en général. Nice est une ville prise en tenailles entre deux vallées apportant de l'air continental la nuit, et aspirant l'air marin le jour, avec des nuances. La vallée du Paillon débouche sur l'amphithéâtre niçois au sud-est de la colline de Cimiez, à l'ouest et au sud-ouest de laquelle s'est développé l'essentiel de la ville. Cette dernière reçoit donc la nuit, selon les lieux, un flux de NE de brise de montagne du Paillon canalisé à environ 2-4 m/s (à l'est de la ville) ou, plus au centre, un flux de brise de terre de N plus lent, de 1-2 m/s, descendant les gradins qui ceinturent la ville au nord. C'est dans ce flux que baignait la station provisoire de Vernier, dont les données de vent à +2 m/sol ne sont pas comparables, d'autant que la turbulence très accrue en ville inverse les directions ! A l'ouest, le schéma est plus complexe : contrairement au Paillon, le Var ne débouche pas sur la cuvette niçoise car il en est séparé par les collines qui touchent la mer à Carras et jouent un rôle d'interfluve. A

l'ouest de Carras, c'est bien le flux du Var puissant (jusqu'à 10 m/s en hiver à l'embouchure) et sec qui règne, tandis qu'à l'est, donc à l'entrée de la cuvette, se retrouve le flux de N précité. Il existe donc une limite de confluence nocturne de la brise thermique à Carras fluctuant selon les jours sur environ 1 km de longitude (selon la capacité de la brise du Var à déborder des collines, vers l'est).

Figure 18 : Roses des vents comparées à l'est et à l'ouest de la ville en mai-juin 2001 (horaires-clés). *Compared wind roses at the east and the west part of the town on May-June 2001 (main hours).*



3.2.2. Le jour

En journée, la ligne de confluence nocturne se transforme en ligne de diffuence située à peu près au même endroit ou un peu plus à l'ouest, matérialisant la séparation de l'aspiration par la vallée du Paillon (1-3 m/s) et par la vallée du Var. Dans la cuvette de Nice, au nord-ouest de Cimiez, l'air se dirige vers le nord, en brise de pente ascendante, souvent canalisée par les rue à axe sud-nord qui forment l'axe urbain principal à Nice. Un facteur supplémentaire intervient avec l'accélération de la brise de mer (effet de contournement d'obstacle) au Cap de Nice se poursuivant vers le port, et sur la moitié est de la ville. De ce fait, le littoral est en moyenne un peu plus venté, y compris le « Vieux-Nice » (mairie) à l'est de la ville (3-3,5 m/s) contre 2-3 m/s.

3.3. La circulation de l'air à faible altitude au-dessus de la ville

Les ballons utilisés comme sondeurs ou comme CLB sont des outils précieux pour obtenir des mesures de l'air et éventuellement, de la température au-dessus de la ville.

3.3.1. En fin de nuit

Tous les radiosondages effectués en fin de nuit ont montré l'existence d'une inversion de température au-dessus de la ville, d'environ 300 m d'épaisseur, été comme hiver, par temps clair. Cette forte stabilité de l'air se retrouve dans les parcours de CLB, comme celui du 3 août 1985 qui traverse toute la ville du nord au sud, à 3 m/s de vitesse moyenne, en perdant de l'altitude, sans qu'aucun ICU ne se manifeste (figure 19).

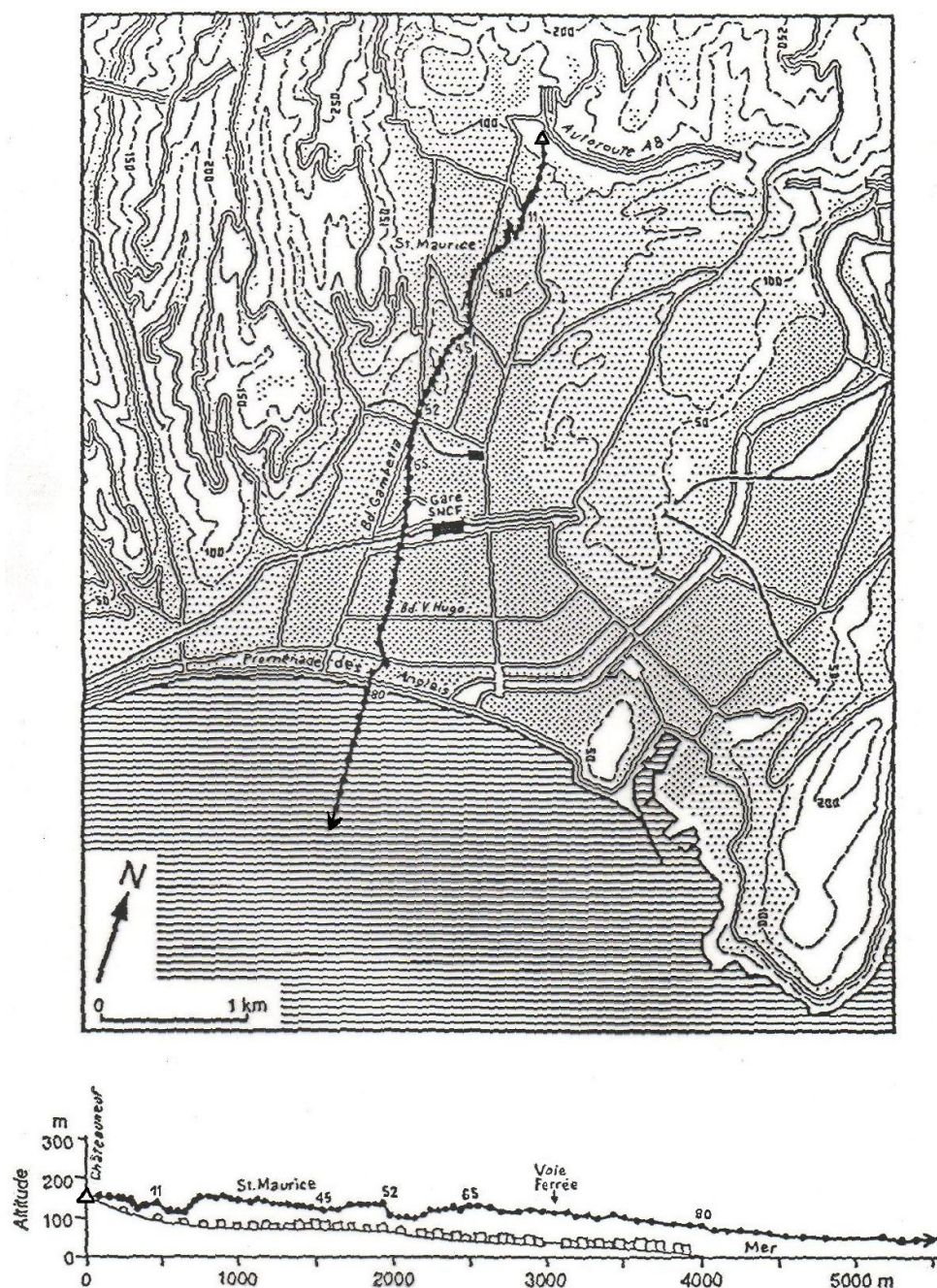
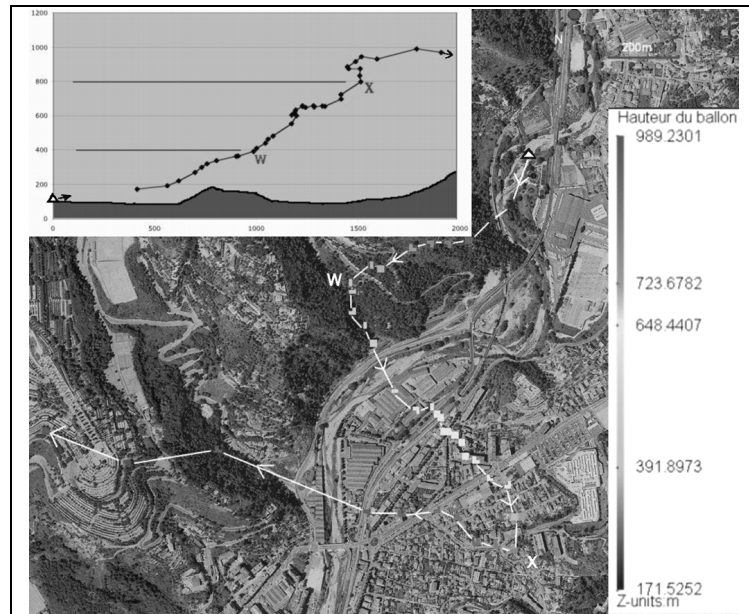


Figure 19 : Trajectoire et profil vertical du CLB lâché à 6h55 le 3 août 1985 depuis le nord de Nice. Point de lâcher : petit triangle blanc. La flèche à l'autre extrémité indique la direction du ballon et le point de perte de suivi. *Trajectory and vertical profile of the CLB dropped at 6:55 am on 3rd August 1985, from the north of Nice.*

Cette absence d'îlot de chaleur à plusieurs dizaines de mètres au-dessus des toits dure probablement toute la nuit, et elle est liée à la surpuissance de la brise de terre, froide et subsidente, qui écrase toute velléité d'ascendance thermique urbaine, celle-ci étant bloquée au sein de la ville. Le parcours d'un autre CLB lâché par brise de montagne du Paillon, en banlieue au NE de Nice, en début de matinée hivernale, confirme l'épaisseur du flux thermique, mais aussi sa complexité (figure 20).

Figure 20 : Trajectoire et profil vertical d'un CLB lâché à 9h04, le 11 février 2008 en banlieue nord-est de Nice, dans la vallée du Paillon. *Trajectory and vertical profile of the CLB dropped at 9:04 am on 11 February 1985, at the north-west suburbs of Nice, in the Paillon valley.*

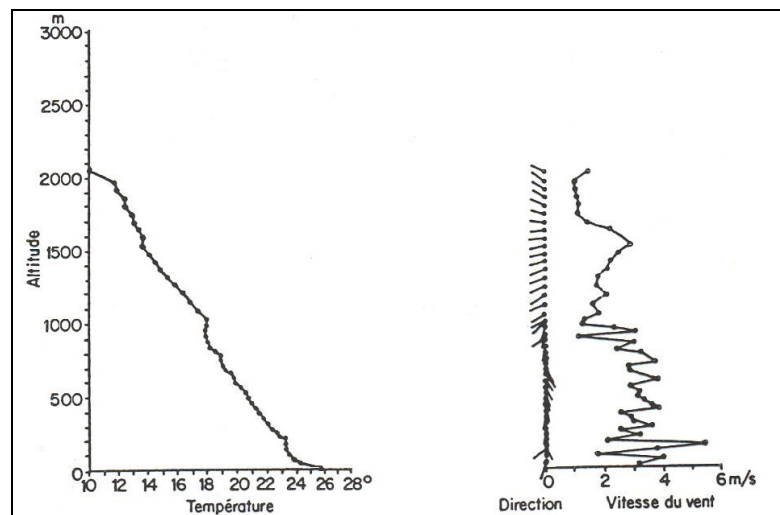


Une couche de brise de montagne encadrée par la vallée avec une vitesse moyenne de 4 m/s, provenant du NE, est surmontée à partir de 400 m d'altitude par une couche de brise de terre de NNW (non guidée par la topographie sous-jacente et plus lente, avec 1 m/s) jusqu'à 800 m d'altitude, au-dessus de laquelle souffle un vent synoptique d'E à 4 m/s. Le ballon rapidement soumis à une ascendance orographique a ainsi un tracé en trois étapes séparées sur la figure par les lettres W et X, respectivement à 400 et 800 m d'altitude.

3.3.2. En journée

Les radiosondages effectués en journée par temps clair et calme (brise de mer), y compris un exemple hivernal, montrent tous un profil hyperadiabatique sur les premières dizaines de mètres, avec une perte de 2 à 3,5°C sur les cent premiers mètres (figure 21).

Figure 21 : Profil thermique diurne estival. Radiosondage du 21 juillet 1986 à 14h30, Promenade des Anglais. *Diurnal thermal vertical profile in summer. Radiosounding on 21 July 1986, at 14:30, at Promenade des Anglais.*



Au-dessus règne une couche de brise marine identifiable par la direction du vent et sa température, proche de l'isothermie sur 250 à 400 m d'épaisseur, cette dernière plus mince au bord de mer, mais plus marquée. Vers l'intérieur, le profil thermique s'incline, en même temps que les bulles convectives issues de la surface se mélangent à cette couche limite dont l'épaisseur s'accroît.

Les dizaines de CLB instrumentés, surtout en été, n'ont pas montré d'ICU détectable sous forme d'un parcours ascendant non lié à l'orographie, suivi d'une redescente du ballon, parvenu de l'autre côté de l'ICU. Plusieurs auteurs citent des courbes de profil en cloche atteignant aisément 500 à 800 m (Ruffieux, 1986 ; Fallot et Alcoforado, 1988), même à Fribourg, ville suisse de seulement 50 000 habitants à l'époque. Rien de cela ici, avec une exception, celle du 22 juin 2001 à 15h40 où un CLB prouve l'existence d'un dôme chaud d'environ 200 m d'épaisseur, centré au sud de la gare (figure 22). Après son ascendance d'origine thermique, à partir du point 6, il redescend (3,5 m/s en moyenne) et se stabilise à son niveau d'équilibre (point 12), avant de remonter, cette fois pour des raisons orographiques (collines). Ce cas est le seul exemple d'ICU détecté dans la couche urbaine de surface (Oke, 1982) sur plus de 50 parcours...

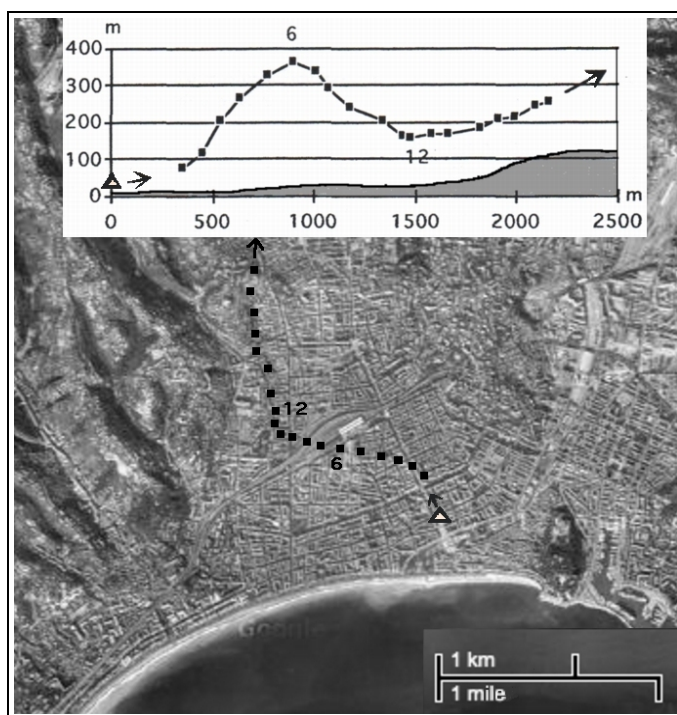


Figure 22 : Trajectoire et profil vertical d'un CLB lâché à 15h40, le 22 juin 2001 depuis le toit d'un immeuble au centre-ville.
Trajectory and vertical profile of the CLB dropped at 15:40 on 22 June 2001, from the roof of a building at the center of the town.

On constate en journée l'existence d'une couche de sillage turbulent entourant et coiffant les immeubles urbains, au sein de laquelle l'air est effectivement très turbulent, avec des mouvements désordonnés sinon chaotiques des CLB, turbulence qui, dès leur lâcher, retarde la prise d'altitude les emmenant à leur équilibre de pression. Mais au-dessus, même par régime de brise pourtant moins rapide que les vents synoptiques, l'existence d'un ICU au-dessus de la couche de sillage turbulent qui coiffe la ville semble peu probable ou rare, quel que soit le moment de la journée. Là encore, la relative stabilité ou l'isothermie de la brise de mer gêne ou bloque les ascendances thermiques. Par vent synoptique (majoritairement d'est, ou d'ouest), les quelques CLB lâchés jusqu'à 6-8 m/s montrent évidemment l'absence de tout ICU, les seules ascendances après un parcours horizontal sur la ville étant dues à l'effet dynamique du relief.

Au total, la couche limite urbaine de surface est en fait rabattue et surmontée d'une couche

« rurale » qui est d'origine continentale la nuit et en début de journée (sinon tout le jour en hiver) et d'origine marine en journée. Dans les deux cas, l'air est plutôt stable, surtout la nuit, voire subsident. Les ascendances de l'air souvent observées en bordure de ville sur des centaines de mètres ne sont donc pas d'origine thermique, mais causées par l'effet dynamique d'obstacle créé par les reliefs qui entourent la ville, obligeant l'air à se soulever.

Au sein de ces couches de brise diurne ou nocturne, la vitesse du flux est remarquablement constante, comprise entre 2,5 et 4 m/s (3 m/s en moyenne), mais elle est localement accélérée en basses couches, dans les vallées par canalisation, et peut alors dépasser aisément 5-6 m/s, et même atteindre parfois 10 m/s en brise de terre dans la vallée du Var. Mais, en dehors de ces derniers cas, locaux, la ventilation est donc mal assurée.

Conclusion

Comme pour les autres villes, le climat de Nice relève à la fois de la ville et de son environnement topographique, mais ce dernier, très marqué à Nice, exerce une influence particulièrement lourde, capable d'atténuer fortement les processus relevant de l'urbain. Une carte de synthèse très simplifiée présente les principaux types climatiques, construits à partir d'une classification ascendante hiérarchique reposant sur la température et l'humidité relevées par l'ensemble des campagnes de mesures piétonnes et itinérantes (figure 23).

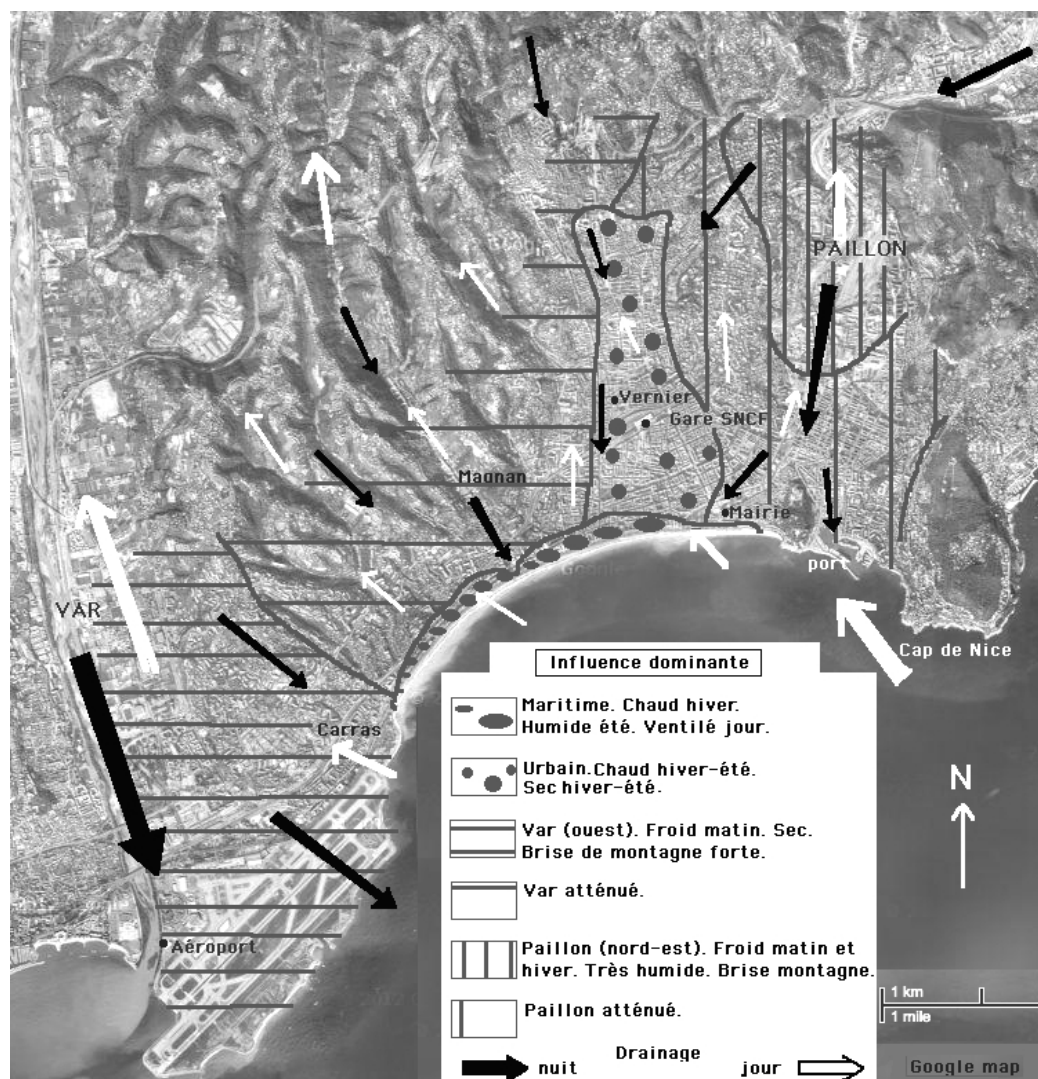


Figure 23 : Synthèse climatique de l'agglomération niçoise. *Climatic synthesis of Nice area.*

Les axes majeurs de drainage ont été rajoutés, et si le Var et, dans une moindre mesure, le Paillon, sont des axes majeurs de ventilation, il est clair qu'en pleine ville, les flux sont plus lents avec une alternance diurne-nocturne, ce qui pose le problème de la dispersion des polluants atmosphériques, dans un lieu où si l'industrie est quasiment absente, la circulation automobile est très présente. Plusieurs CLB ont illustré les rotors à axe horizontal existants au pied des collines encerclant Nice, en régime diurne comme nocturne, rotors qui ont entre autres effets celui de confiner l'air en le recyclant sur place et en gênant son renouvellement. Ces phénomènes de ventilation à échelle parfois très fine doivent être pris le plus possible en compte pour comprendre les concentrations de polluants dans l'air, qui ne sauraient dépendre majoritairement des cadastres d'émission.

Les modèles dynamiques (déterministes) ont encore du mal à bien restituer tous ces phénomènes, d'une part parce qu'il leur faut travailler à une résolution très fine, inférieure à 100 m d'un point de vue météorologique (donc encore plus fine pour le MNT, pour des raisons techniques), et d'autre part, à cause des choix à effectuer concernant de nombreux paramètres, fixés davantage grâce à la littérature qu'avec l'aide d'une vérité-terrain décidément absolument obligatoire, aussi bien pour caler les modèles que pour les valider.

Les modèles inductifs, reposant sur les relations statistiques qui, bien choisies, ont tout de même un parfum très physique, ont donc encore leur mot à dire, aussi bien pour le climat actuel que pour le climat futur car ils permettent, dans une logique « bottom up » de rajouter de l'information aux sorties de modèles dynamiques encore bien incapables actuellement de descendre à l'échelle attendue par les décideurs.

La ville de demain devra s'adapter aux changements climatiques dont celui qui semble avoir le plus d'impact est l'accroissement des températures. Tous les « plans-climat » insistent sur la notion de canicule par le biais des températures maximales diurnes, alors qu'il est possible que les minimales trop élevées auront encore plus d'effet sanitaire en empêchant la population citadine de « récupérer » la nuit. Les fameuses « coulées vertes » n'auront d'effet qu'arrosées, car dans une ville où il ne pleut pas l'été, il n'y a pas d'évapotranspiration, donc pas de fraîcheur. La ventilation sera probablement une clé majeure d'un confort minimal, puisqu'elle ne comporte pas les défauts énergétiques du froid artificiel ; mais demeure la question du comportement futur des vents, synoptiques ou thermiques.

Bibliographie

CARREGA P., 1981 : Quelques considérations sur le régime des vents à Nice. *Bull. de la Comm. météo. des A-M.*, 1981, 36-39.

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

CARREGA P., 1984 : Note sur les micro-climats urbains de Nice; l'importance du cadre géographique. *Rev. d'Analyse spatiale*, 17, 1-30.

CARREGA P. et RUFFIEUX D., 1986 : *Research into the urban heat island and the windflow above the city of Nice in summer, by vertical measurements and constant level balloons*. Intern. Symposium on Urban and Local Climatology, Freiburg (R.F.A.), 20-21 février 1986, 96-109.

CARREGA P., 1988 : *Climatology and air pollution in Nice (France)*. Proceedings of the symposium of the topoclimatological investigation and mapping studies group held in Christchurch, New-Zealand, 10-13 août 1988. Univ. of Canterbury, Christchurch (N.Z.), 193-204.

CARREGA P., 1989 : Vents et échelles de contraintes géographiques: exemples en région niçoise. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 2, 83-88.

CARREGA P., 1992 : *Topoclimatologie et habitat*. Thèse Doctorat d'Etat, ronéo, Nice, 475 p. + annexes. Publiée en 1994 dans la *Revue d'Analyse Spatiale*, Nice, n° 35 et 36, 408 p.

CARREGA P., 1993 : Les pluies azuréennes de septembre-octobre 1992. *Revue de Géographie de Lyon*, 63(2-3), 115-124.

CARREGA P., 1994 : Les tendances actuelles du climat de la Côte d'Azur (France). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 6, 173-182.

CARREGA P., 1995 : *Approches de la structure thermique et hygrométrique d'une brise de mer par mesures aéroportées*. In Mélanges en hommage à G. Escourrou, Actes du Colloque des 15-16 octobre 1994, Paris, 165-175.

CARREGA P., 1998 : *Les spécificités de l'îlot de chaleur urbain à Nice*. Colloque de climatologie urbaine, Rome, mars 1997, Nimbus n°13-14, Societa meteorologica subalpina, Torino, 33-41.

CARREGA P., 2001 : *Le climat urbain de Nice : mesures dans et au-dessus de la ville*. Rapport final, Mairie de Nice, 2001.

CARREGA P. et ROSA F., 2005 : Aspects du climat urbain de Nice : îlot de chaleur, îlot de fraîcheur, effets de paroi. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 18, 35-38.

ESCOURROU G., 1986 : *Les brises de campagne : un aspect essentiel du climat urbain*. Intern. Symposium on Urban and Local Climatology, Freiburg (R.F.A.), 20-21 février 1986, 87-95.

ESCOURROU G., 1991: *Le climat et la ville*. Coll. Géographie d'aujourd'hui, Nathan, 190 pages.

FALLOT J.-M., 1986 : *Mesures de l'îlot de chaleur urbain dans le cadre d'une petite ville à topographie tourmentée : le cas de Fribourg (Suisse)*. Intern. Symposium on Urban and Local Climatology, Freiburg (R.F.A.), 20-21 février 1986, 19-29.

FALLOT J.-M., 1992 : *Etude de la ventilation d'une grande vallée préalpine : la vallée de la Sarine en Gruyère*. Thèse doctorat sc. nat., n° 995, Univ. de Fribourg, 475 pages.

FALLOT J.-M., ROTEN M., RUFFIEUX D., 1983 : Le climat de Fribourg : démarches récentes. *UKPIK Cahiers de l'Inst. Géogr. Fribourg*, n° 1, 63-94.

FALLOT J.-M. et al., 1987 : *Etude des brises thermiques d'une grande vallée préalpine suisse : la vallée de la Sarine en Gruyère. Mesures in situ et modélisation des écoulements*. Actes des Journées de Climatologie, Mont-Rigi (Belgique), 5-7 novembre 1987, Presses universitaires de Liège, 75-96.

FALLOT J.-M. et ALCOFORADO M.-J., 1988 : *Mesures de l'influence de l'îlot de chaleur de Lisbonne sur les écoulements régionaux en été*. Actes des Journées de Climatologie, Mont-Rigi (Belgique), 5-7 novembre 1987, Presses universitaires de Liège, 57-74.

FALLOT J.-M., BAERISWYL P.-A., de BUMAN-RUFFIEUX A.-M., 1989 : Quelques aspects de la ventilation en milieu topographique complexe: la vallée de la Sarine en Gruyère (Suisse)". *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 2, 75-82.

GALZI L., TASSON A., BUBECK R., BASSET-TERRUSSE A., 1963 : *Climatologie de l'aérodrome de Nice-Côte d'Azur*. Monogr. Météo. Nat., n° 35, Paris, 28 pages.

- GARCIA E. et CARREGA P., 1999 : Topoclimatologie urbaine : l'exemple de la ville de Marseille. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 11, 424-432.
- JOLY D. et FURY R., 1996 : Modélisations à grande échelle de la variation spatiale des températures. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 9, 219-227.
- JOLY D., BOIS B., ZAKSEK K., 2009 : *Hiérarchie des facteurs topographiques qui commandent la variation spatiale des températures*. Actes de Journées de climatologie, Besançon, 12-13 mars 2009, 15-34.
- LHOTELLIER R., 2005 : *Spatialisation des températures en zone de montagne alpine*. Thèse doctorat, Grenoble 1, 352 pages.
- MADELIN M., 2004 : *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Thèse doctorat, Paris 7, 412 pages.
- METEO FRANCE, 1998 : Météo-Hebdo. Bulletin Hebdomadaire d'Etudes et de Renseignements.
- METEO FRANCE : Diverses données climatologiques pour l'aéroport de Nice.
- OKE T. R., 1978 : *Boundary layer climates*. Methuen & Co., London, 372 pages.
- OKE T. R., 1982 : The energetic basis of the urban heat island. *Quat. J. R. Meteorol. Soc.*, 108(455), 1-24.
- OKE T. R., 2004 : *Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites*. 27th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application, Banff, 25-29 October, 2004.
- PLANCHON O., 2000 : A study of the coastal climates in France using temperature and precipitation data (1961-1990). *Meteorol. Appl.*, 7, 217-228.
- RUFFIEUX D., 1983 : Utilisation de ballons stabilisés dans un milieu urbain à topographie tourmentée. *Hommes et Terres du Nord*, 3, 74-78.
- RUFFIEUX D., 1986 : *L'agglomération de Fribourg et son influence sur la ventilation*. Thèse de doctorat d'état, Ed. Univ. Fribourg, Suisse, 134 pages.
- WANNER H., 1984 : *Methods in applied topoclimatology*. Applied Climatology, Preprints of the 25th Int. Geogr. Congress, Symp. n° 18, Zurich, 21 August, 1984, 13 p.