

## LE VENT : IMPORTANCE, MESURES, MODÉLISATION ET TRIBULATIONS

Pierre CARREGA

### Résumé

Acteur majeur de notre vie comme du climat, le vent relève de causes différentes qu'il est nécessaire d'identifier si l'on recherche l'opérationnalité. Sa mesure, délicate en surface, devient difficile en altitude, et les erreurs n'épargnent pas les appareils les plus sophistiqués. La cartographie d'un champ de vent est un exercice périlleux qui demande une réflexion poussée sur la méthode et les outils. Ceux-ci sont souvent incapables de réaliser ce qui leur est demandé, ou bien l'échelle d'utilisation, inadaptée, entraîne des erreurs graves, en particulier dans les directions.

### Mots-clés

Vent, mesure, cartographie, modélisation

### Abstract

*Wind is a major actor of our life as of climate. It is due to different causes that must be identified in order to be operational. Wind measurement is difficult, specially in altitude, and mistakes are frequent even for most sophisticated devices. Wind area mapping is a dangerous exercise which need high level reflexion concerning method and tools. Those ones are often unable to do properly what they are asked, or used scale that is non adapted, provokes grave errors, particulary on wind directions.*

### Keywords

*Wind, measure, cartography, modelisation*

## INTRODUCTION

Variable météorologique et climatologique essentielle, le vent est une source d'énergie dite « renouvelable », mais aussi de dommages, ainsi qu'une composante majeure des bilans énergétiques dont le calcul est indispensable pour modéliser l'atmosphère, et il intervient dans d'innombrables phénomènes physiques ou activités humaines.

Acteur de la perception du temps et du climat, il agit physiologiquement sur le corps de l'homme et des animaux à sang chaud, d'où les indices de « Wind Chill » très utiles en hiver pour indiquer la température ressentie. Au-delà du confort, il semble également capable d'interférer sur l'état mental humain, puisque dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, la rumeur prétend que des cours de justice du Sud-Ouest de la France ont accordé des circonstances atténuantes pour des meurtres commis pendant des épisodes de Foehn de sud lié aux Pyrénées, et de même en Bavière ...

Identifier la cause du vent, et mieux, le rattacher à un « type », permet d'anticiper, au moins grossièrement, son comportement, ce qui a sauvé la vie de pompiers sur le terrain.

Par leurs travaux majoritairement effectués à fine échelle spatiale (grande échelle au sens exact du terme), les climatologues géographes sont très souvent confrontés à la mesure du vent (vitesse, direction), qu'elle soit opérée par eux, ou au sein de réseaux dédiés. S'investir dans cette tâche aboutit rapidement à une prise de conscience aigüe de plusieurs familles de problèmes.

D'abord, trouver l'instrument capable de réaliser les mesures demandées, à l'échelle de temps nécessaire, ce qui n'est pas toujours évident au sol, mais devient bien plus problématique en altitude, ne fut-ce qu'à 200m au-dessus du sol. Ensuite, l'examen minutieux des mesures, montre rapidement que certaines lois ou relations considérées comme acquises et exactes ne le sont pas tant que cela, et que l'on observe en fait bien d'autres configurations que celles annoncées par la théorie. Enfin, l'exercice le plus difficile est bien de représenter un champ de vent pertinent, c'est-à-dire de construire des cartes du vent moyen ou instantané, sur une période passée ou pour une prévision, sachant que le mode d'approche, qu'il soit stochastique ou qu'il soit déterministe, ne donnera jamais entière satisfaction, pour des raisons spécifiques à chaque méthodologie.

## I. OMNIPRÉSENCE DU VENT DANS NOTRE VIE, SES CAUSES

### A. La définition du vent

Le vent est un déplacement d'air, dont, comme pour tout fluide, les molécules ne sont pas solidaires les unes des autres, ce qui va compliquer la prévision des trajectoires mais va permettre à l'air de s'adapter aux configurations topographiques qui ne manqueront pas d'influencer son écoulement.

Il est décrit par sa vitesse et sa direction (sa provenance), cette dernière n'étant pas une grandeur : les descripteurs que sont les angles du cercle (de 0° et 360° pour le nord en passant par 180° pour le sud) ou les termes de N pour nord, de ENE pour l'est-nord-est quand on découpe le cercle en 16 parts de 22,5° chacune, ne se prêtent pas au calcul. En effet, la moyenne de deux vents de nord séparés de 2° de direction (359° et 1°), donc similaires, est de 180°, le plein sud !

Pour sortir de cette impasse, on transforme le vecteur vent en deux composantes sur des axes orthonormés X et Y dont l'unité est la vitesse. Soit, sur un tableur, la cellule B7 la direction en degrés du vent, et C7 sa vitesse en m/s, la conversion se fait selon les formules suivantes :

Composante E =  $\text{SIN}(B7/180 * \text{PI}()) * C7$ . Si le vent provient de la moitié ouest (exemple NW ou SSW), la composante sera alors négative.

Composante N =  $\text{COS}(B7/180 * \text{PI}()) * C7$ . Si le vent provient de la moitié sud, la composante sera également négative.

La figure 1 donne l'exemple de deux mesures de vent ainsi décomposées : la première correspond à un vent de NNE (22,5°) et 0,4 m/s (flèche pleine).

Les coordonnées sont 0,15 m/s en X (composante E) et 0,37 m/s en Y (composante N). La seconde mesure est un vent d'ENE (67,5°), 1 m/s (flèche pointillée) ; et les coordonnées sont respectivement 0,92 m/s, et 0,38 m/s pour la composante E et la composante N.

Il devient alors possible de calculer des moyennes, des variabilités, etc, sur chacune des composantes et il est

en plus possible de faire de même sur un troisième axe : la composante verticale Z généralement notée W. Cela permet, si l'on dispose d'anémomètre travaillant dans les trois dimensions, d'étudier les mouvements subsidants et ascendants de l'air.

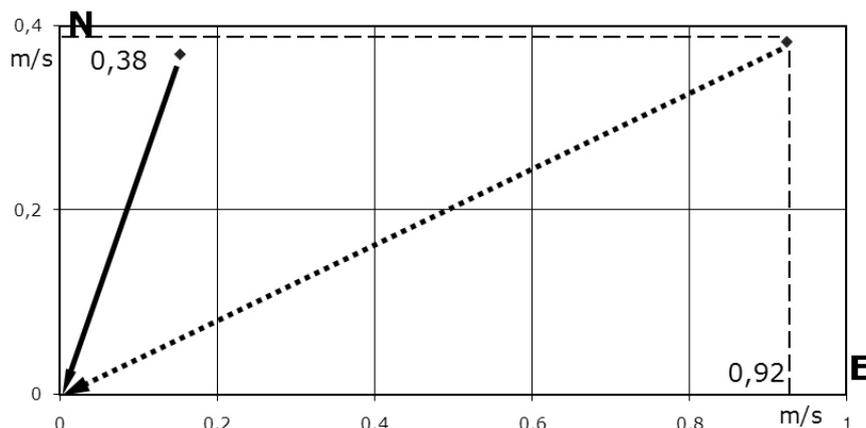
### B. Le vent omniprésent

On peut tenter une différenciation des multiples interventions et interactions du vent en terme de *mode d'action* du vent : action d'exercer une pression mécanique (dont la puissance est de l'ordre du carré de la vitesse du vent) ou action de déplacer et transporter.

- Le vent déloge, arrache, érode : c'est le fondement de l'érosion éolienne, et cette capacité de mettre en mouvement a fait du vent une source d'énergie cinétique convertible en électricité. Ces mouvements de molécules interférant sur des êtres vivants immobiles comme les plantes, les obligent à s'adapter par anémomorphisme (Cantat *et al.*, 2008) et aussi par la lutte contre la transpiration que favorise le vent : la lande est une formation végétale naturelle des littoraux ventés. L'apport plus rapide de frigories à partir de certains seuils thermiques explique que l'on ait combiné vent et température pour décrire au mieux le ressenti physiologique (en fait un taux de perte de calories des corps à sang chaud).

- Le vent charrie avec lui des poussières et polluants de toutes sortes, et il exerce une fonction aux effets contraires dans le temps : lorsque le vent « se lève », il remet en suspension la poussière déposée sur le sol, ce qui se traduit par une augmentation des concentrations de particules PM10 ou 2,5 avant que la dispersion prend le dessus, et que les taux diminuent. Ainsi la notion de position « au » et « sous » le vent d'un « réservoir » de poussière prend toute son importance lorsque le vent se lève (Figure 2).

Le vent est seul capable d'opérer des transferts d'eau à la surface du globe dans les sens horizontaux et verticaux, donc en « 3D », sous forme de vapeur, de gouttes ou de cristaux de glace, qu'il advecte sur des distances très variables, et de même en altitude : c'est le principe de la convection, et des deux autres moteurs d'ascendances (l'orographie et le cyclonisme).



**Figure 1.** Décomposition de deux mesures de vent : NNE 0,4 m/s, et ENE 1m/s. Chaque vecteur est caractérisé par une double projection sur l'axe des vitesses X (composante E), et sur l'axe des vitesses Y (composante N)

Il en est de même pour la chaleur, latente ou sensible, qui est ainsi advectée et intervient dans les processus d'équilibre thermique (Ercpicum, 2004) tout en conservant la masse. Et c'est dans ce processus que l'échelle géographique pèse lourd : les vagues de froid ou de chaleur empêchent que tous les 15 février (et tous les autres jours de l'année !) se ressemblent, alors que l'apport solaire est le même... Mais les transferts d'air liés aux brises sont aussi importants, localement, là où vivent les gens. Et l'un des risques majeurs du littoral méditerranéen, le risque d'incendies de forêt, est directement lié à la vitesse du vent qui, simultanément, stimule la combustion en apportant de l'oxygène et en couchant les flammes, ce qui les allonge et les fait préchauffer la végétation avant combustion, par rayonnement et advection d'air brûlant.

Sa capacité de transport déjà évoquée fait enfin du vent un phénomène pouvant être dangereux sinon mortel, en particulier dans les pays dits « en voie de développement », aux constructions et habitations peu solides (toits en tôles ondulées, etc). Par exemple dans les régions tropicales, le nombre de morts est plus dépendant de la vulnérabilité des hommes que de la force des cyclones. Plus subtilement, en poussant l'eau de mer vers le littoral lors de tempêtes ou ouragans, le vent aggrave les inondations, en empêchant ainsi l'évacuation des eaux de fleuves alimentées par les fortes pluies...

### C. Le vent : son origine

Le vent est un flux lié au gradient de pression atmosphérique, suivant un parcours d'autant plus simple que l'on s'élève dans l'air libre, car le relief et les inégalités de la surface du sol créent des obstacles perturbant l'écoulement.

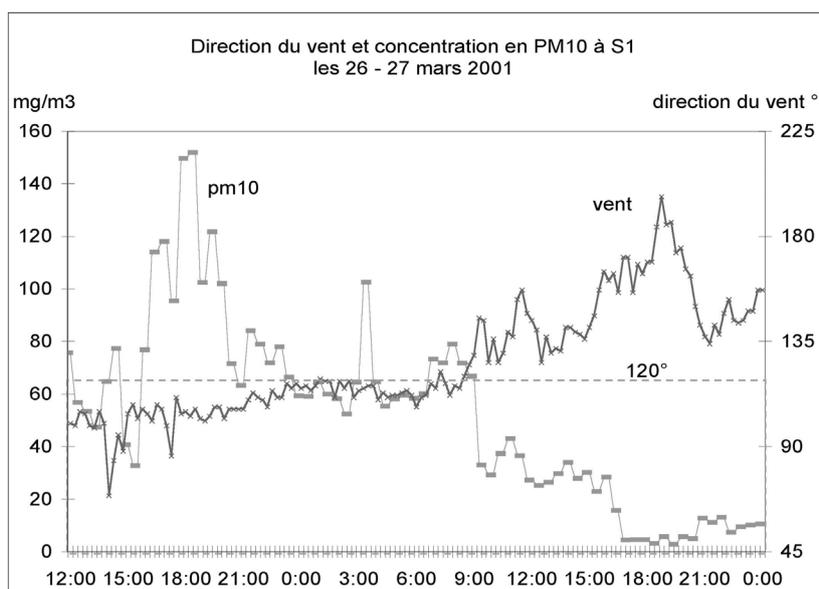
C'est à cause de cette rugosité que la loi de Coriolis s'applique avec moins d'efficacité en surface : aux latitudes moyennes le vent souffle avec un angle de l'ordre de  $45^\circ$  par rapport aux isobares, alors que cet angle est nul en altitude (vent géostrophique). En l'absence de rotation de la terre (vision théorique), le vent serait perpendiculaire aux isobares, donc parallèle au gradient. Associé à un déséquilibre de pression, le vent augmente théoriquement de vitesse en fonction de ce gradient de pression. Exprimant l'advection à la surface du sol, en plus du bilan radiatif et des flux de conduction et de chaleur latente, le vent est aussi un facteur essentiel du bilan énergétique en un lieu donné.

### D. La nécessaire identification du type de vent : des enjeux

Le déséquilibre de pression à l'origine du vent est lui-même dû à deux grands types de facteurs, agissant à une échelle spatiale et temporelle différente :

- Le vent synoptique lié aux grands centres d'action anticycloniques ou dépressionnaires est relativement durable, souffle sur de grandes étendues, parfois avec violence. Bref, ce flux - parfois obligé de se conformer aux vicissitudes des reliefs locaux - est engendré par des phénomènes d'échelle continentale sinon planétaire, et obéit à la circulation générale.

- Exprimant une circulation d'échelle locale (quelques dizaines de kilomètres, tout au plus), les brises thermiques sont engendrées par des inégalités de température à fort gradient spatial : contrastes de substrat géographique : terre - mer, montagne - vallée, campagne - ville, parfois. Les différences instantanées de température sont dues à des bilans énergétiques inégaux : la chaleur

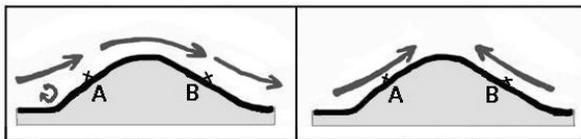


Source : Étude d'impact, P. Carrega.

**Figure 2.** Effet de la direction du vent sur la concentration en particules de poussières (PM10) d'un capteur « S1 » situé près d'une cimenterie. Lorsque le vent tourne au-delà de  $120^\circ$  (vers le sud-est et le sud), hors de la « fenêtre d'émission » de l'usine, la pollution diminue immédiatement au capteur n'étant plus sous le vent

spécifique de l'eau (nettement supérieure à celle de la terre) y provoque un double effet de retard et d'amortissement des extrêmes, concernant la température. Les écarts thermiques seront d'origine autre pour les autres milieux : effet de gravité (l'air froid est plus lourd) et de masque au rayonnement solaire dans les reliefs ; ou de stockage différentiel de la chaleur pour les bâtiments urbains...

Distinguer l'origine du vent est obligatoire pour anticiper son comportement très variable à fine échelle spatiale dans l'espace selon son type. Comme l'indique la figure 3, d'après le vent mesuré en A (d'ouest par convention), on devra s'attendre à un vent semblable ou complètement opposé en B selon le cas. Le vent synoptique monte et descend la montagne de gauche, avec plus ou moins de facilité selon la stabilité verticale de l'air, et avec parfois des rotors à axe horizontal sur les ruptures de pente.



**Figure 3.** Différences de comportement du vent en deux postes A et B, selon le type de flux (synoptique à gauche, et thermique à droite)

Au contraire, à droite, le vent vient de l'est sur le flanc droit, et ne fait que remonter les pentes car c'est une brise thermique. Certes, il y aura des inégalités de vitesse selon l'insolation des versants, mais le comportement général sera celui d'une cheminée ascendante centrée sur le sommet et recherchée par les planeurs, aspirant l'air sur les pentes, qui convergera vers le sommet.

En bref, pour le vent synoptique, le relief n'est qu'un obstacle, une perturbation gênant son écoulement, alors que pour les brises thermiques, il est le moteur !

Certes la différenciation des deux types de vent appelle quelques commentaires : d'abord, une brise thermique « pure » n'existe probablement pas, ou est très rare, car il y a presque toujours un gradient synoptique, même léger, pouvant influencer sur quelques degrés ou même dizaines de degrés de direction, l'orientation du flux thermique, en particulier sur un littoral. Ensuite, deux conditions sont obligatoires pour l'établissement de ces brises :

- que le ciel soit clair ou peu nuageux afin que les différences de températures entre les milieux soient exacerbées : le réchauffement de la terre en journée, et son refroidissement nocturne seront ainsi maximum, par rapport à la mer ou au lac... Il y a néanmoins des exceptions : par exemple une brise de terre hivernale se prolonge volontiers en journée si le temps se couvre ou qu'il pleut, ce qui empêche la terre de devenir plus chaude que la mer ;

- que le vent synoptique soit suffisamment faible (les marais barométriques ou les anticyclones sont donc idéaux) pour laisser s'exprimer ces brises, et ne pas gommer leurs effets. Bien entendu des combinaisons, des cisaillements, des oppositions entre flux différents

peuvent se produire, mais l'importance de la distinction de principe demeure, qui peut sauver la vie de pompiers, par exemple, occupés à éteindre un incendie de forêt, et leur éviter - en l'absence de mesure disponible en B - de tomber dans un piège.

Cette démarche d'identification peut alimenter des systèmes d'aide à la décision dès qu'elle est relativement automatisée (Carrega, 1997) par une formalisation de règles de comportement : *si* telle condition + telle condition + ... sont simultanément remplies, *alors* on est dans tel type, comme l'indique la figure 4.

Les conditions sont des règles (vent compris entre telle et telle vitesse et direction, à tel capteur du réseau) validées sur une période autre que celle d'apprentissage. Dans la figure 4, la validation réalisée sur 62 jours a montré 5 cas avec vent synoptique non reconnu dans un seul poste, 2 dans 2 postes, 1 dans 3 postes simultanément, tous les autres cas étant « justes ». Le type « M » (brise diurne) est identifié si les conditions énoncées sont remplies. Cette logique peut permettre de préciser les comportements attendus (vitesse, direction) ailleurs, dès lors qu'ils ont été énoncés au préalable, par l'expérience (et aussi, il est vrai, à l'aide de la théorie).

## II. LA TECHNIQUE POUR LA MESURE, LES SURPRISES...

### A. La mesure

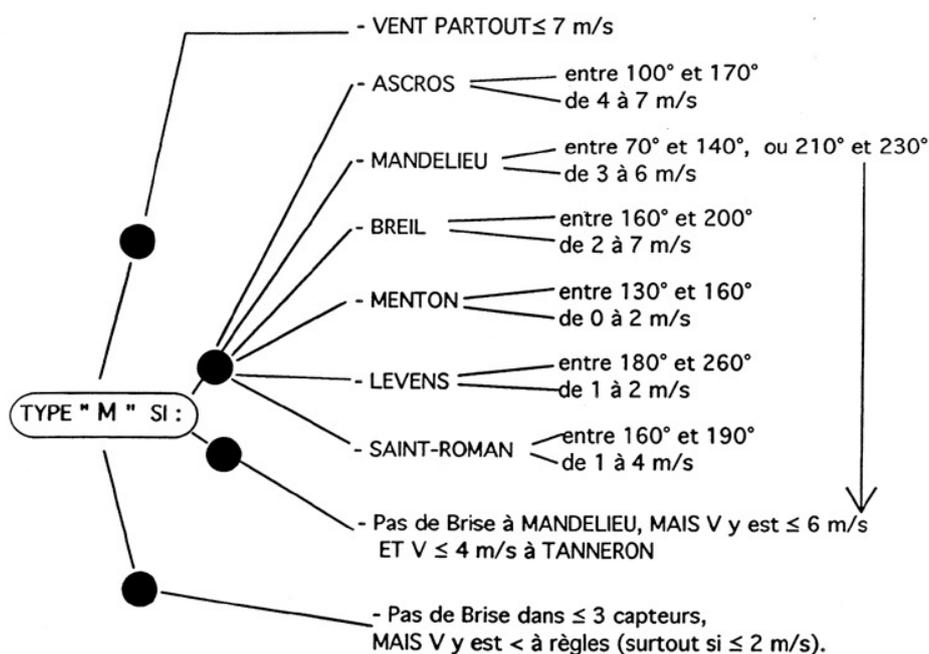
Mesurer le vent, c'est soit placer un objet dans le flux, et en déduire la vitesse et la direction, en suivant ainsi une logique Eulérienne, soit suivre la particule d'air en mouvement, celui du fluide, selon une logique Lagrangienne, et l'on aura tendance à privilégier la première démarche au sol, et la seconde en l'air.

#### 1. Les mesures au sol

Les inconvénients classiques de l'anémomètre à coupelles (axe vertical) pour la vitesse, associé à une girouette pour la direction sont, d'une part le seuil de démarrage parfois trop élevé, et d'autre part la non synchronisation anémomètre-girouette, réductrice pour travailler à fine échelle temporelle. Les anémo-girouettes à hélice et axe horizontal, en forme de poisson (hélice en tête et girouette en queue) ne pallient que le second inconvénient.

Avec le même principe mécanique, le double anémomètre à deux hélices à axe horizontal calées à 90°, permet de décomposer le vecteur-vent habituellement caractérisé par sa vitesse et sa direction, en deux autres valeurs qui sont la composante Est-Ouest notée « U », et la composante Nord-Sud notée « V ». Par exemple, un vent de N fera tourner l'hélice V, mais l'hélice U demeurera immobile. Un vent de NE les fera tourner toutes deux à même vitesse. Cela revient à projeter sur un système d'axes X-Y la position de la tête de la flèche du vecteur vent.

L'avantage de ce système est la bonne synchronisation



**Figure 4.** Arbre des règles d'identification d'un régime de brise diurne estivale, pour un système d'aide à la décision. Stations automatiques du sud du département des Alpes-Maritimes (France). Le type « M » signifie qu'il y a bien brise de mer - et de vallée - sur la région littorale

vitesse-direction, par définition ; alors que des hélices légères à très basse vitesse de démarrage existent, et qu'une troisième hélice, à axe vertical, autorise en plus la mesure des vitesses verticales, donc une véritable mesure 3 D. L'inconvénient des systèmes mécaniques est leur plus ou moins grande sensibilité au gel humide, qui a fait croire à certains naïfs qu'en montagne, il n'y a pas ou peu de vent en hiver !

D'autres méthodes de mesures, existent, comme l'anémomètre à fil chaud (le refroidissement du fil est fonction de la vitesse du vent), dont l'interprétation est difficile, tellement sa sensibilité et sa réactivité sont grandes, en particulier avec la turbulence. Mais l'appareil qui s'impose de plus en plus avec la baisse des coûts est le sonique avec l'avantage de l'absence de mécanique : l'appareil comporte une paire d'émetteur-récepteur d'ultrasons par direction, et envoie des ondes dont la fréquence est d'autant plus décalée par effet Doppler que le vent est fort.

## 2. Les mesures en altitude

Il s'agit ici de mesures à basse altitude, quelques dizaines ou centaines de mètres au-dessus du sol, et à moins de pouvoir disposer d'une grande antenne radio de 200 m de haut, par exemple comme support, elles sont beaucoup plus difficiles à réaliser.

Les mesures par télédétection, par exemple à l'aide de lidars, profileurs, permettent l'obtention d'un profil vertical du vent au-dessus d'un point. Ces appareils émettant des ondes électro-magnétiques sont performants, mais sensibles à leur environnement, et pas toujours capables de restituer finement le vent des couches les plus basses

(voir ci-dessous B.1). De plus, le coût de tels instruments interdit leur utilisation en dehors de campagnes financièrement bien dotées (projets internationaux le plus souvent), ce qui oblige à se résoudre à l'utilisation de ballons.

Ces ballons seront soit captifs, ce qui interdit les mesures par vents moyens ou forts (au-delà de 3-4 m/s environ), soit libres, et dans ce dernier cas, deux options sont possibles.

La première consiste à effectuer un sondage vertical de l'air (avec sondes thermo-hygrométriques et télé-transmission, éventuellement) à l'aide d'un ballon déformable (latex...) léger, gonflé à l'hélium (non explosif), qui sera suivi par télémètre optique avec un théodolite. Avec radar aussi, système beaucoup plus coûteux et démesuré pour ne travailler que sur quelques centaines de mètres... Une autre possibilité réside dans un suivi au télémètre laser, certains de ces appareils étant dotés des fonctions azimut et hauteur angulaire, permettant de situer le ballon dans l'espace à tout moment.

La seconde, avec un objectif différent, va être de suivre un ballon qui n'a plus pour mission de traverser les couches d'air qui le surmontent et de rendre « visible » le vent horizontal de chaque niveau, mais de se comporter comme une molécule d'air. Le ballon est conçu pour être en équilibre de pression avec l'air environnant, ce qui revient à le gonfler à l'hélium puis à le lester (ou plus économiquement, à lui insuffler de l'hélium puis de l'air) pour lui donner l'équilibre voulu (en général à quelques dizaines de mètres ou 200-300 mètres au-dessus du sol) pour qu'il flotte au niveau de pression choisi. Ceci demande de l'expérience, quelques grammes de différences se traduisant par quelques dizaines de mètres d'altitude...

Le ballon ne peut être « équilibré », ou « plafonnant », donc rester à un niveau de pression atmosphérique constant (d'où le terme américain CLB pour Constant Level Balloon), que si son enveloppe est indéformable, de manière à conserver un volume constant, contrairement aux ballons en latex qui ne cessent de grossir en montant (puisque la pression extérieure diminue) jusqu'à éclater. Un matériau capable de forte résistance à l'étirement (donc à la déformation) est le mylar, avec le meilleur albedo possible (proscrire les couleurs sombres qui réchaufferaient le ballon au soleil).

Cet outil peu coûteux présente vraiment un excellent rapport entre résultats obtenus et investissement, car il permet d'illustrer en 3 D, très précisément, la trajectoire de l'air sur plusieurs kilomètres de distance, à condition que des appareils de suivi soient utilisés. À partir de la distance séparant l'observateur de l'objet poursuivi, de la valeur des angles d'azimut (par rapport au Nord) et d'inclinaison par rapport à l'horizontale, valeurs mesurées par exemple toutes les 30 secondes, il est possible de tracer la trajectoire suivie par le ballon équilibré (donc par l'air), et de la représenter en plan comme en coupe (Figure 5).

La figure 6 présente un exemple de trajectoire de CLB dans l'arrière-pays niçois, en régime de brise diurne estivale : la brise de mer remonte la vallée depuis l'aval, et le parcours du vent est « reconstitué » par le ballon. On note le tracé assez rectiligne et le profil, tendu dans un premier temps, suivi par une ascendance bien davantage due au forçage orographique exercé par le flanc ouest de la montagne de Peille, qu'à la convection thermique (Figure 7).

De plus l'intervalle de temps entre chaque mesure (30 secondes) permet de calculer les vitesses de déplacement (horizontale et verticale). L'expérience montre que d'autres lâchers de CLB quelques minutes ou dizaines de minutes plus tard ou plus tôt aboutiraient à des comportements assez voisins, et que ce raisonnement peut

s'appliquer également à de nombreuses autres après-midi en régime de brise, d'où le côté exemplaire et reproductible de cette mesure. Mais certains profils sont parfois difficiles à interpréter (causes des ascendances ou des subsidences, etc).

## B. LES SURPRISES ET LES INTERROGATIONS

### 1. Les erreurs récurrentes d'appareils pourtant sophistiqués

Les mesures par des appareils relativement simples, réservent, on l'a vu, des difficultés liées aux capacités des appareils, sans compter le problème non abordé, de leur représentativité : du tourbillon local au vent général, il y a beaucoup d'étapes. Les appareils très sophistiqués ne sont pas non plus à l'abri de dysfonctionnements, systématiques. Un bon exemple est donné par le profileur de vent installé à l'extrémité ouest de l'aéroport de Nice (MétéoFrance), dont les données sont accessibles sur le site du MetOffice. Cet appareil complexe et coûteux est de manière récurrente incapable de noter la présence pourtant systématique de la brise de terre et de la brise de montagne nocturne qui descend la vallée du Var à l'embouchure de laquelle il se trouve. Ce flux qui atteint en surface (à 10 m/sol) des vitesses de 10, 15 et même 20 noeuds en fin de nuit l'hiver, et qui n'est pas pelliculaire puisqu'il intéresse des épaisseurs de plusieurs centaines de mètres, n'est pourtant pas vu par le profileur qui travaille jusqu'à des altitudes supérieures à 4 km. L'exemple de la figure 8 en est un parmi des centaines d'autres : la brise mesurée à l'aéroport (Tableau 1) est totalement absente des données du profileur.

### 2. Les profils verticaux de vent : les lois logarithmiques ou autres, oui mais lesquelles ?

La vitesse du vent est par définition nulle au contact du sol et augmente au fur et à mesure que l'on s'élève

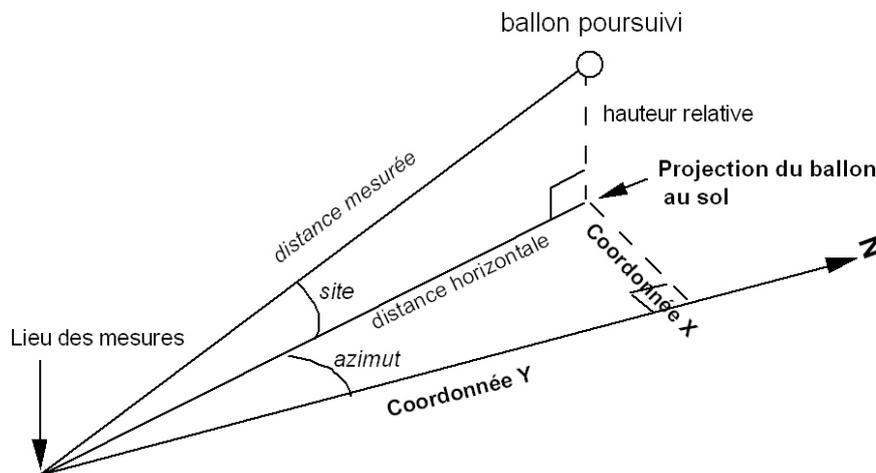


Figure 5. Principe de localisation du ballon dans l'espace, à partir de trois variables mesurées

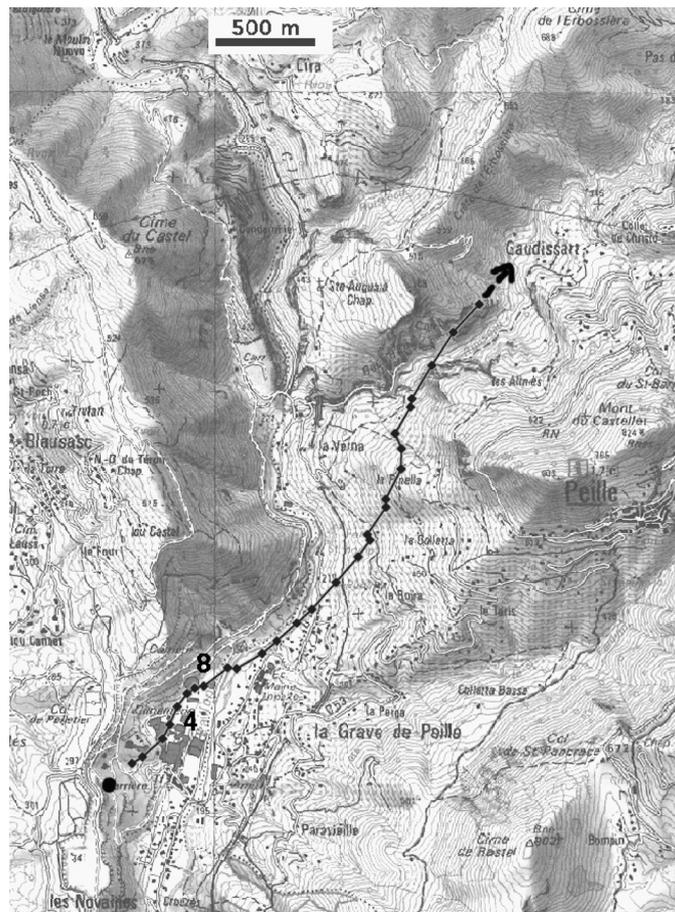


Figure 6. Trajectoire (en plan) de ballon équilibré dans la vallée du Paillon vers la Grave de Peille, 27 août 2004 à 17h00

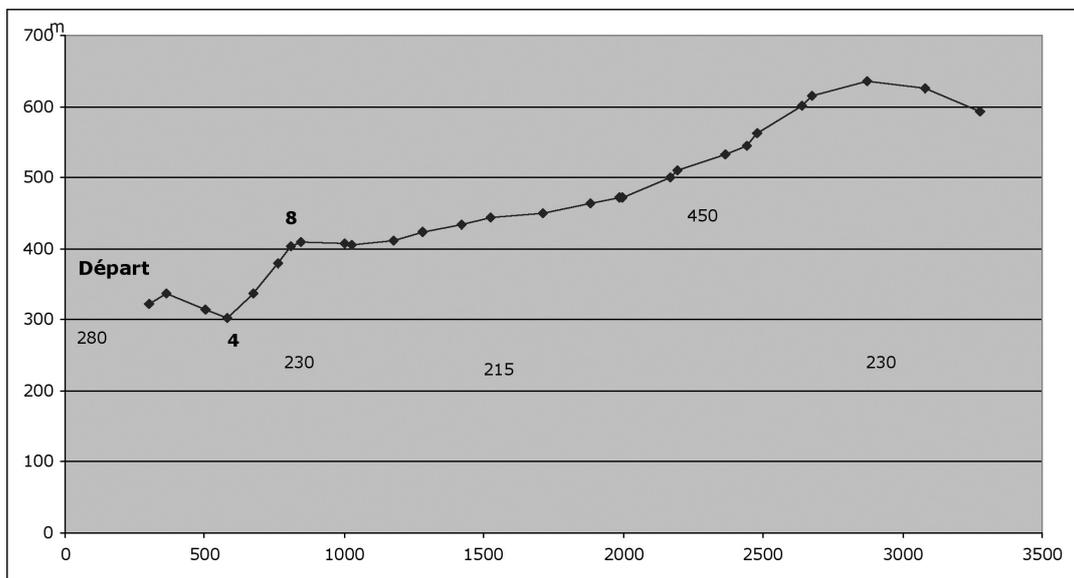
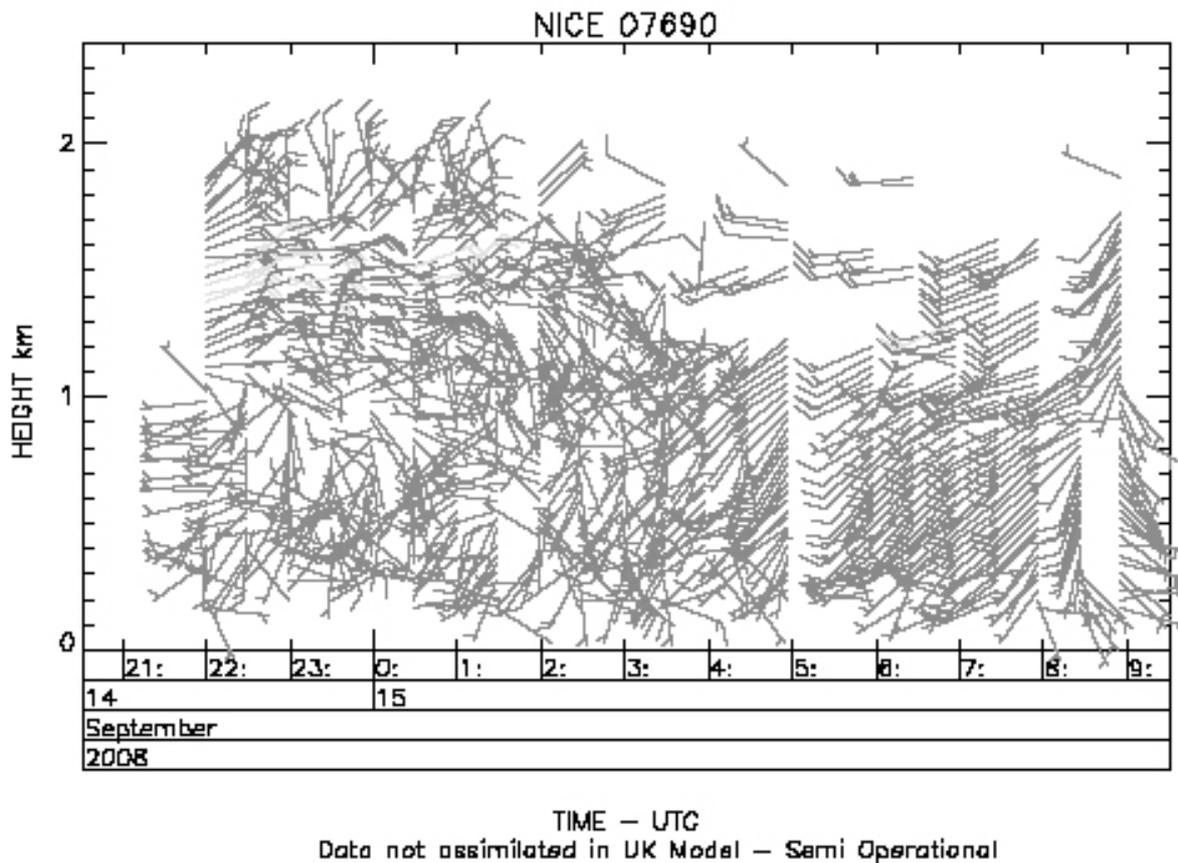


Figure 7. Profil de ballon équilibré dans la vallée du Paillon vers la Grave de Peille, 27 août 2004 à 17h00

Tableau 1. Vent réel mesuré en miles/h à 10 m/sol à la station de Nice aéroport, de 22h UTC le 14 septembre, à 7 h UTC le 15 septembre 2008

22h	23h	00h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h
NNW	NW	NW							
7	10	9	12	12	12	8	13	10	9

Source : NOAA , [http://weather.noaa.gov/weather/FR\\_cc.html](http://weather.noaa.gov/weather/FR_cc.html)



Source : Met'Office.

**Figure 8.** Sondage par profileur (MétéoFrance) montrant les vitesse et direction du vent toutes les 1/2 heures au-dessus de l'aéroport de Nice, dans la nuit du 14 au 15 septembre 2008

au-dessus du sol, en suivant une courbe dont les lois exponentielles ou logarithmiques réalisent en principe le meilleur ajustement : l'accroissement de vitesse du vent, non linéaire, est très fort dans les premiers mètres, puis devient de moins en moins intense.

Un problème réside non pas tant dans le type de fonction décrivant les vitesses, que dans la valeur quantifiée de ces fonctions, leur équation, qui appliquée de manière un peu trop standardisée ne restitue pas du tout les valeurs données par les mesures. Le maximum de vitesse dans la couche limite peut être atteint à 5 m sur sol (fréquent en brise de pente catabatique), à 120 m sur sol (valeur habituelle d'une brise de mer), ou à 1 500 m (flux synoptique). Trop de modélisateurs adoptent en routine des valeurs collant mal à la réalité, ce qui se traduit par des inexactitudes flagrantes dans les champs de vent restitués, après confrontation aux mesures et observations sur le terrain.

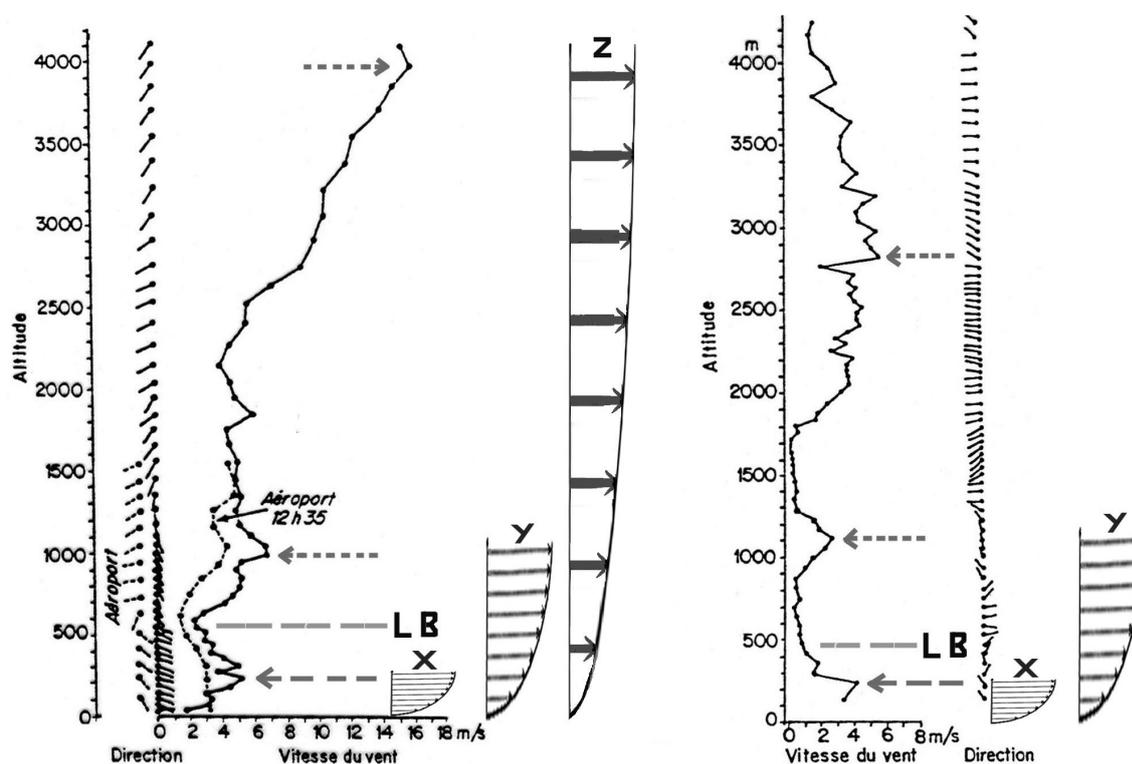
Les deux radiosondages ci-dessous (Figure 9) ont été réalisés avec l'équipe de Fribourg en 1985 et 1998 en milieu urbain. La situation synoptique, comme c'est le plus fréquemment le cas dans la région niçoise, permet l'expression de brises thermiques.

Brise diurne d'abord, donc brise de mer, le 3 août 1985 vers 16h20 locales, dont le sondage montre la superposition d'une couche de brise de mer de Sud-Est sur environ 500 m d'épaisseur (on est à 1 km du littoral)

et d'un flux synoptique de SSE à SW. Sur la figure ont été ajoutées les données issues du ballon pilote lâché par MétéoFrance à l'aéroport de Nice (à 7,5 km au SW) environ 2h30 auparavant. Ce sondage montre que la vitesse maximale est atteinte vers 200m d'altitude (5 m/s) vitesse demeurant la plus élevée jusqu'à 1 000m où l'on est en plein flux synoptique à 6 m/s. C'est à partir de 2 200 m environ, que la vitesse du vent augmente franchement pour atteindre 15 m/s environ en limite de sondage à 4 000m d'altitude.

Sur quelle épaisseur ajuster une loi régissant le profil vertical du vent ? 200 m (profil X), 1 000 m (profil Y), 4 000 m (profil Z) ? Selon le choix opéré, le profil interpolé des vitesses, quand on ne dispose pas de mesures, donnera évidemment des résultats très différents.

L'examen du radiosondage de droite (Figure 9) réalisé cette fois en hiver (2 janvier 1988), en fin de situation nocturne (régime de brise de terre), est conforme à l'exemple précédent, en plus complexe. Un flux de brise de terre d'environ 500 m d'épaisseur (NNW à NNE) dans lequel la vitesse maximale mesurée - 4 m/s - est à environ 250 m d'altitude (soit 150 m sur sol), surmonté d'une couche presque calme. On retrouve un relatif maximum vers 1 100 m. Là encore, l'application d'un profil logarithmique ou d'une loi exponentielle doit-elle se faire avec un maximum à 250 m (profil X), 1 100 m (profil Y), ou plus haut ?



Source : D'après Carrega, 1992.

**Figure 9.** Champ de vent vertical à la gare de Nice le 3 août 1985 à 16h20 locales, et le 2 janvier 1988 à 9h locales. Mesures par radiosondage

### 3. Les « retours de brise » désespérément absents

Le fameux « retour de brise » d'altitude, théoriquement présent pour conserver la masse, est indiscutablement absent dans de très nombreux sondages et surtout lâchers de CLB que nous avons réalisés. Il faut donc croire que la masse est conservée par des apports latéraux et subsidents issus du flux synoptique, puisque la belle boucle à axe horizontal présente dans les manuels n'est pas souvent rencontrée. D'ailleurs on ne le retrouve pas non plus dans la figure 9.

## III. CARTOGRAPHIE ET MODÉLISATION

### A. Les logiques de représentations spatiales

Comme toute variable, la représentation spatiale du vent est évidemment très utile. Notons que l'on acceptera de nommer « restitution d'un champ », c'est-à-dire d'une surface, ce qui n'est en fait qu'une somme de points disposés de manière géométrique au sein d'une grille à mailles carrées en général (parfois en losanges), d'autant plus denses que la « résolution » est fine. Il existe deux logiques principales permettant de « couvrir » un espace, donc de représenter un champ, une surface, quelle que soit l'échelle.

- Une logique « inductive », fondée sur l'expérience, la mesure, partant de données issues d'un réseau de capteurs : on essaye de trouver une relation statistique

reliant les données à des variables, ce qui permettra de « combler les vides » et d'énoncer quelles sont les valeurs non mesurées les plus probables.

- Il est également possible de suivre une démarche radicalement différente sur le principe : elle est déductive, fondée sur les lois de la physique. Dans ce cas, plusieurs approches sont utilisables, qui, toutes à divers degrés, s'appuient sur la thermodynamique, la mécanique des fluides, etc, et non sur des stations, utilisées ici seulement pour validation.

### B. La logique statistique

Deux axes principaux existent dans le domaine.

#### 1. L'autocorrélation spatiale

Dans ce premier cas, on cherche une relation entre les points eux-mêmes en posant, selon la théorie de Newton, que chaque capteur sur le terrain exerce une « influence » sur ses voisins, d'autant plus forte qu'ils sont proches. Dans le détail, il existe de nombreuses techniques comme l'IDW (Inverse Distance Weight), les fonctions Spline, les krigeages, etc, qui ont été utilisées en particulier pour l'interpolation des températures (Carrega, 1992), et des pluies (Laborde, 1984) ou de l'humidité (Napoli, 1995). La figure 10 représente une interpolation du vent par cette logique, et l'on voit assez nettement certaines aires d'influence se dégager. Cette logique est applica-

ble si le semi-variogramme expérimental prouve que la portée, c'est-à-dire la distance moyenne d'influence des postes, est supérieure à la distance existant entre eux. Plus radicalement, il faudrait surtout être en terrain plat (ce qui n'est pas le cas de la région), car le relief n'existe pas dans cette démarche. Ceci la rend difficilement applicable en dehors de l'établissement très prudent de cartes de ventilation fondées sur des moyennes (et non des situations instantanées).

Cependant, certains modèles diagnostiques tel NUAT-MOS, procèdent à une interpolation de ce type pour créer un champ de vent « virtuel » dans un premier temps, avant de le déformer dans un second temps, en le projetant sur le relief d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) en appliquant cette fois les lois de l'écoulement (Ross, 1988). En suivant cette piste, il est possible, par l'intermédiaire de règles comportementales du vent préalablement énoncées, et applicables dès lors que le rattachement du vent instantané à un type connu a été établi, de créer des « capteurs virtuels » supplémentaires qui viendront ajouter de l'information rendant plus fiable l'interpolation (Guarnieri *et al.*, 1995 ; Carrega, 1997).

## 2. Les relations avec l'environnement

Ici, on cherche une relation cette fois entre les postes et leur environnement, ce dernier étant censé agir sur la vitesse du vent, comme, par exemple l'altitude influence statistiquement la température (en fait c'est une expression indirecte de la relation physique entre température et pression atmosphérique). Cette manière de procéder est extrêmement efficace pour d'autres variables que le vent, mais ici les résultats changeront encore plus d'une situation instantanée à l'autre, selon la direction du vent, ou entre une journée donnée et une carte moyenne. Enfin, en dehors de quelques rares variables « explicatives » évidentes, il est difficile de quantifier le relief en varia-

bles permanentes par rapport au vent, qui seront ensuite utilisées par exemple dans des régressions multiples ou dans des règles d'apprentissage. La variabilité directionnelle du vent est très liée à la topographie, et c'est sans doute pourquoi cette direction de recherche n'a pas été suivie à notre connaissance.

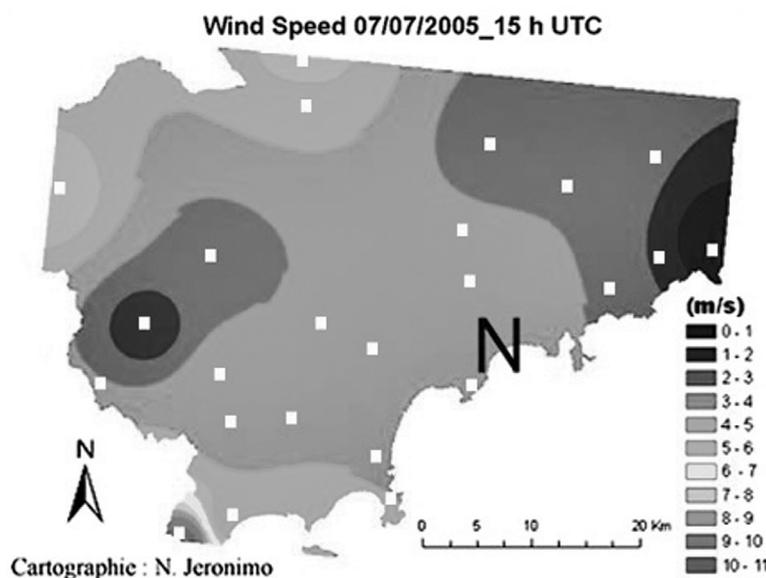
## C. La modélisation physique déterministe

Depuis longtemps, les physiciens se sont attachés à énoncer les lois qui rendent compte du comportement de l'atmosphère. Pour reconstituer un champ de vent, là encore il y aura plusieurs approches, sachant qu'en gros plus l'approche est complexe et prend en compte le maximum de variables, plus le modèle sera robuste et fiable, comme le montrent les deux cas suivants.

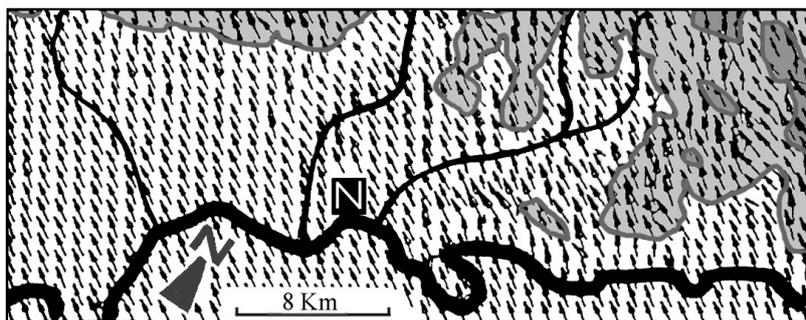
### 1. L'approche « mécanique des fluides » : exemple du modèle BLMLT3D

Ce type de modèle, simple, linéaire, hydrostatique, a l'avantage de « tourner » très vite, car beaucoup d'hypothèses sont simplificatrices (Nanni *et al.*, 1985) : le relief est considéré (avec un MNT) comme exerçant une action perturbatrice sur l'écoulement de l'air, des modifications vont donc s'ensuivre, tant en direction qu'en vitesse, dans les trois dimensions. Les lois de la mécanique des fluides permettent de bien appréhender ces phénomènes sur un plan théorique, et il faut alimenter le modèle avec, en entrée : un seul flux qui est un vent considéré comme « régional » (une direction et une vitesse uniques), (dont il faut connaître l'altitude pour établir un profil logarithmique) ; une hauteur de couche limite ; une fréquence de Brunt-Vaisala (paramètre de stabilité verticale de l'air) ; et une longueur de rugosité de surface (intensité du frottement et de la turbulence associée).

Par sa conception, ce type de modèle est condamné à



**Figure 10.** Interpolation par autocorrélation spatiale (IDW) de la vitesse du vent sur le sud des Alpes-Maritimes (N= Nice). Les carrés blancs représentent les postes du réseau utilisés (version couleur, p. 163).



Source : Projet Européen EV 5V CT 91 0015, P. Carrega et N. Glinsky-Olivier.

**Figure 11.** Champ de brise thermique diurne (brise d’aval) du 28 août 1992 à 15h TU sur la Côte d’Azur. Trait noir épais : littoral (mer au sud), traits noirs fins : fleuves. Plages grises: tranches d’altitude (0-500m, 500-1000 et > 1500m). « N » dans carré noir : Nice

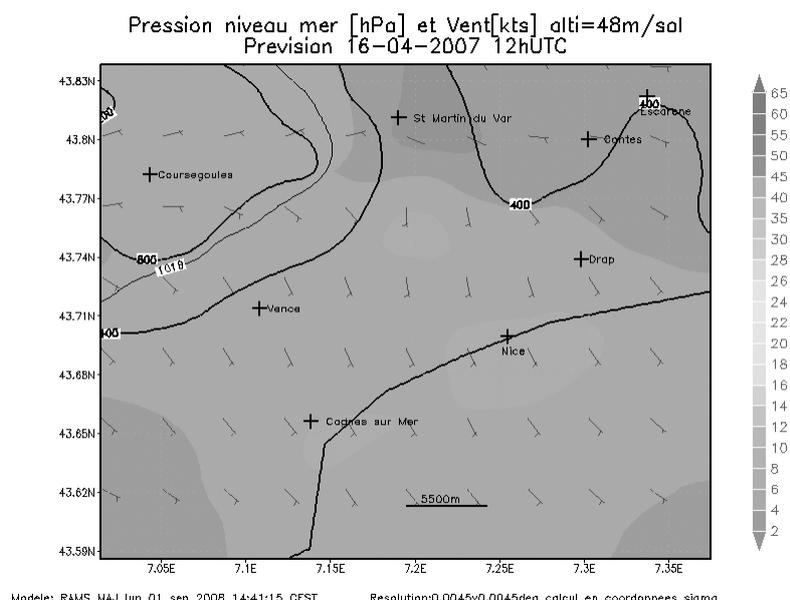
fonctionner uniquement par vent synoptique bien établi pour avoir une chance de restituer le vent avec un minimum de fiabilité ; mais surtout pas en régime de brise (Carrega *et al.*, 1997) ! Il est en effet incapable de « créer » un vent dont le relief est en réalité la source, au lieu de n’être qu’un obstacle comme le prouve la figure 11. Dans cette situation de brise de mer (vent de SE en entrée) le vent suit obstinément un parcours SE un peu modifié par le relief au lieu de remonter les vallées comme le fait en réalité la brise thermique. La correspondance vent-relief est bonne pour le fleuve de gauche (le Loup) qui a la bonne idée d’être orienté parallèlement au vent, mais l’invalidation est totale pour les cours inférieurs des autres fleuves plus à l’est (Var et Paillon) avec un écoulement recoupant à 90° le tracé de la vallée...

Malheureusement, certains bureaux d’études ont recours à ce type d’approche, sans prendre le recul obligatoire, en fournissant des champs de vent élaborés à partir d’un

vent « régional » qui n’est autre que celui de la station la plus proche ! Ce qui revient à déterminer le vent en B, en extrapolant systématiquement à partir de A (Figure 3)... Il faut donc être vigilant sur la tentation des logiciels « clés en main » générant des erreurs scandaleuses dans le domaine des risques liés au vent (feux de forêts, pollution de l’air, etc).

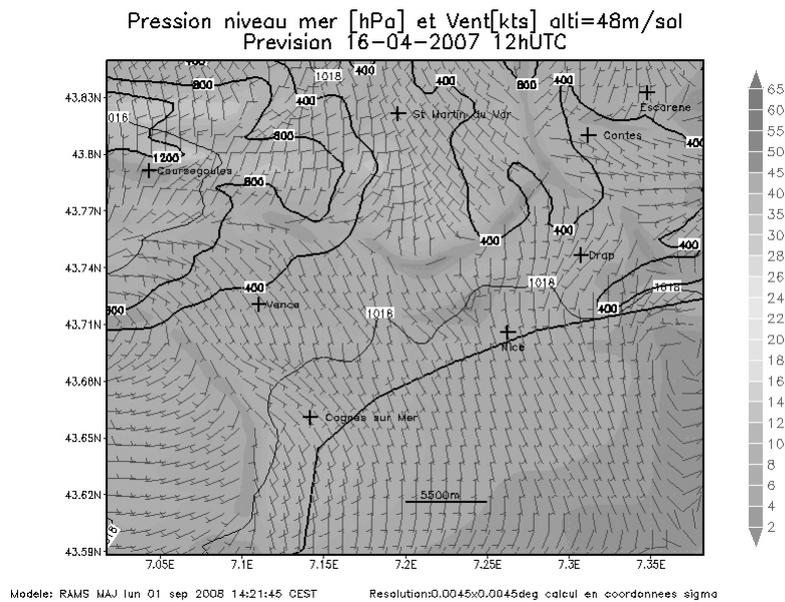
**2. L’approche globale non linéaire et non hydrostatique : RAMS**

Ce type de modèle, beaucoup plus complexe que le précédent, est capable de remonter à la source du vent puisqu’il calcule le champ de pression qui donne naissance à ce dernier. Prenant en compte les bilans énergétiques, il reconstitue des différences thermiques et le gradient de pression résultant, générant ainsi du vent. Conçu pour travailler à « méso-échelle » et fine échelle, il est nourri en entrée par les sorties issues de modèles plus globaux,



Source : Calculs et réalisation : C. Yohia.

**Figure 12.** Champ de brise thermique diurne en avril sur le sud des Alpes-Maritimes. Le trait noir inférieur est le tracé du littoral, les autres sont les courbes de niveau 400 et 800 m. Le nord est en haut de la carte. Mailles de 2km pour le calcul, mailles de 4km pour l’affichage (version couleur, p. 163).



Source : Calculs et réalisation : C. Yohia.

**Figure 13.** Idem fig. 12, mais mailles de 500m pour le calcul, et mailles de 1km pour l'affichage (version couleur, p. 164).

comme l'américain GFS par exemple, (gratuitement disponible...). L'évolution de l'état de l'atmosphère est modélisée à l'échéance H+3, H+6, ..., H+n, chaque étape servant de base à la suivante, jusqu'au moment où le chaos déterministe fait trop diverger les résultats (quelques jours).

La figure 12 est un exemple de cartographie du champ de pression et du vent en régime de brise de mer en cours d'établissement à mi-journée, au printemps 2007 sur la Côte d'Azur et l'arrière-pays niçois. La maille adoptée est ici de 4 km, et l'on voit clairement le cheminement de la brise orientée au sud-est, pénétrant vers l'intérieur, et incurvant sa trajectoire vers l'ouest, au nord du domaine. Par contre, la brise ne remonte pas correctement la vallée du Paillon, à l'est de Nice, axée SW-NE, Nice-Drap-l'Escarène.

Dans la figure 13 où la maille de calcul a été affinée par 4 en passant de 2km à 500 m, de grandes différences s'affichent : cette fois le vent « voit » bien la vallée du Paillon, des différences locales d'écoulement apparaissent au sud-ouest du domaine (ouest de Cagnes sur mer), convergence liée à la vallée du Loup (non indiquée), et surtout apparaît au nord du domaine, venant du nord, un champ de vents contraires à la brise de sud et contredisant la carte précédente sur de nombreux points.

## CONCLUSION

De l'échelle planétaire, avec la circulation atmosphérique générale, jusqu'à l'échelle micro, celle que ressentent directement les humains, le vent est présent. Le comprendre, l'utiliser, le prévoir, tout ceci demande des efforts de mesure et de modélisation. De nos jours où

l'informatique a rendu possible la cartographie presse-bouton, il est encore plus nécessaire de se méfier des belles couleurs et de se poser les bonnes questions : cet outil est-il adapté à ma problématique ? Les paramètres fournis en entrée du modèle, d'autant plus nombreux et difficiles à obtenir que le modèle est sophistiqué, souvent estimés et non mesurés, sont-ils pertinents ? La résolution spatiale choisie permet-elle de calculer et de représenter correctement les écoulements que l'on cherche à mettre en évidence ? Toutes ces questions, et d'autres non formalisées, se posent d'autant plus que l'aire étudiée est topographiquement complexe. Car les enjeux sont immenses à une époque où l'on se focalise de plus en plus sur le cadre de vie des hommes. Est-il sensé d'utiliser un modèle chargé de représenter un panache de pollution menaçant une ville en relief tourmenté, en travaillant avec une maille de 4 ou 5 kilomètres ? Ou de prendre un vent régional comme référence de routine dans un environnement où la brise règne ? Ou encore de prendre la station la plus proche comme référence, alors qu'elle est en site totalement différent ? La liste de ce qu'il faudrait éviter, mais qui se pratique, est longue.

## BIBLIOGRAPHIE

- CANTAT O., SAVOURET E. & BRUNET L. 2008. Des anamorphoses à contresens des vents dominants : la délicate interprétation climatique des marqueurs végétaux. *Actes du XXI<sup>e</sup> colloque international de l'AIC*, Montpellier, pp. 165-171.
- CARREGA P. 1990. Vents et échelles de contraintes géographiques ; exemples en région niçoise. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 2, pp. 83-88.

- CARREGA P. 1992. *Topoclimatologie et habitat*. Thèse Doctorat d'État, ronéo, Nice, 475 p. Publiée en 1994 dans la *Revue d'Analyse Spatiale*, Nice, n° 35 et 36, 408 p.
- CARREGA P. 1997. Automatic and Instantaneous identification of wind regimes, for a forest fire decision support system. *International Journal of Wildland Fire*. Fairfield (USA), 7, n° 3, pp. 265-274.
- CARREGA P. & GLINSKY-OLIVIER N. 1997. Cartographie du vent à l'échelle locale : performances comparées de 2 modèles numériques. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 10, pp. 126-134.
- CARREGA P. 2000. Contes (Alpes-Maritimes françaises) : une vallée continentale et mal ventilée bien que proche de la mer. *Publications de l'A.I.C.*, 12, pp. 34-42.
- ERPICUM M. 2004. Discrimination des effets radiatifs et des effets advectifs à partir des observations de températures du réseau météo-routier de Wallonie. *Norwis*, 191(2), pp. 105-110.
- FALLOT J.-M. 1992. *Étude de la ventilation d'une grande vallée préalpine : la vallée de la Sarine en Gruyère*. Thèse doctorat sc. nat. n° 995. Université de Fribourg, 475 p.
- GUARNIERI F., CARREGA P., GLINSKY-OLIVIER N. & LARROUTUROU B. 1995. Expert knowledge and quantitative wind modelling for spatial decision support dedicated to wildland fire prevention. *Proceedings of The International Emergency Management and Engineering Conference*. May 9-12, Nice, pp. 171-176.
- JACOBSON M. 1999. *Fundamentals of Atmospheric modeling*. Cambridge University Press, 656 p.
- LABORDE J.-P. 1984. *Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie*. *Éléments d'hydrologie lorraine*. Thèse Doctorat ès Sciences, Nancy, 484 p.
- LONGHETTO A. 1971. Some improvements in the balanced pilot balloons technique. *Atmospheric Environment*, 5, pp. 327-331.
- MARTIN N. & CARREGA P. 2005. Modélisation du vent à échelle spatiale fine : utilisation du modèle diagnostique NUATMOS dans les Alpes-Maritimes. *Actes du XVIII<sup>e</sup> colloque international de l'AIC*, Gênes 7-11 sept., pp. 237-240.
- NANNI S.C. & TAMPPIERI F. 1985. A linear investigation on separation in laminar and turbulent boundary layers over low hills and valleys. *Nuovo Cimento*, 8 C, pp. 579-601.
- NAPOLI A. & CARREGA P. 1995. Un essai d'interpolation de l'humidité relative de l'air à l'aide du krigeage. *Rev. D'Anal. Spat. Quantit. Et Appliquée*, Nice, pp. 75-84.
- PIELKE R. 2002. *Mesoscale Meteorological Modeling*. Second Ed. Academic Press, 696 p.
- ROSS D.G. *and al.* 1988. Diagnostic wind field modeling : development and validation. NERDDP, project n° 1040. *Center for applied mathematical modelling*, Chishlom Institute of Technology, Australia.
- STULL R.B. 1988. *An introduction to boundary layer meteorology*. *Atmospheric Sciences Library*. Kluwer Academic Publishers.

Adresse de l'auteur :

Pierre CARREGA,  
 Professeur de Géographie physique (climatologie)  
 Université de Nice-Sophia Antipolis,  
 98, Boulevard Herriot  
 F-06204 Nice cedex  
 carrega@unice.fr



## DOSSIER DE DOCUMENTS EN COULEURS

### Wind Speed 07/07/2005\_15 h UTC

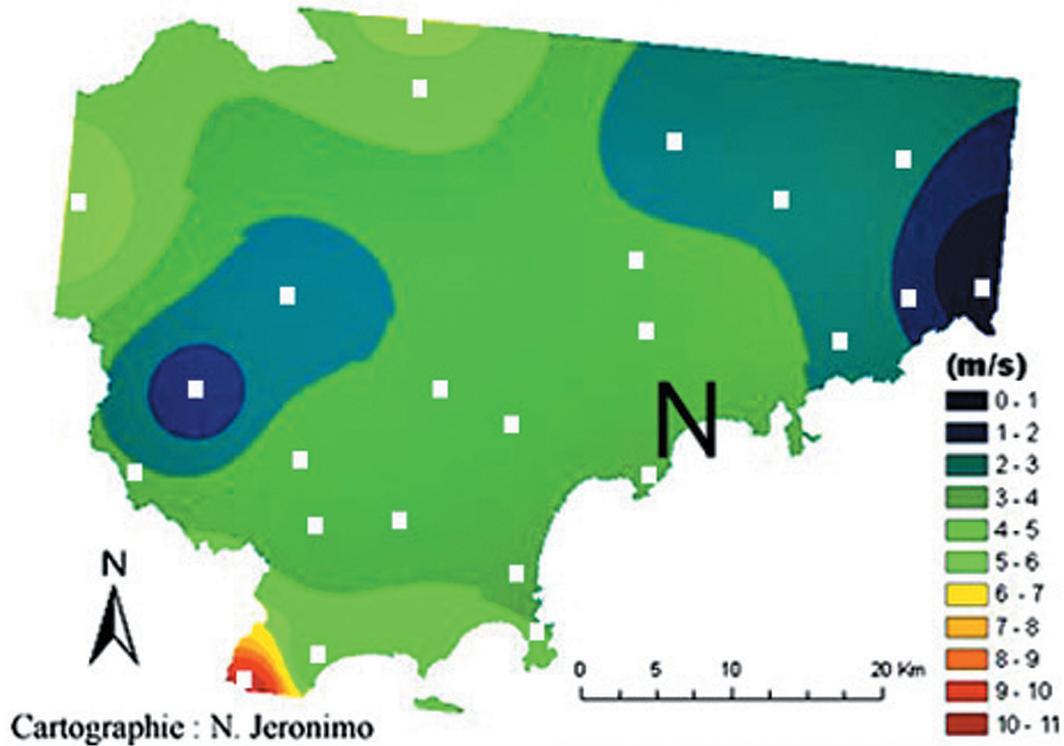
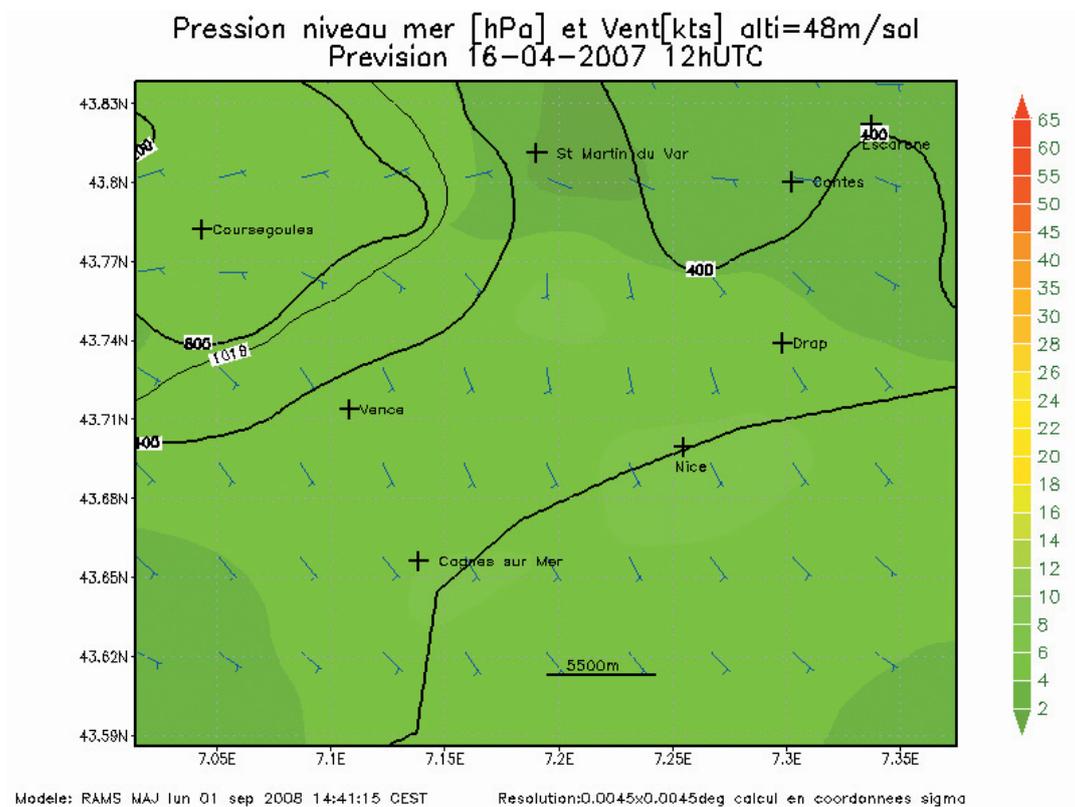
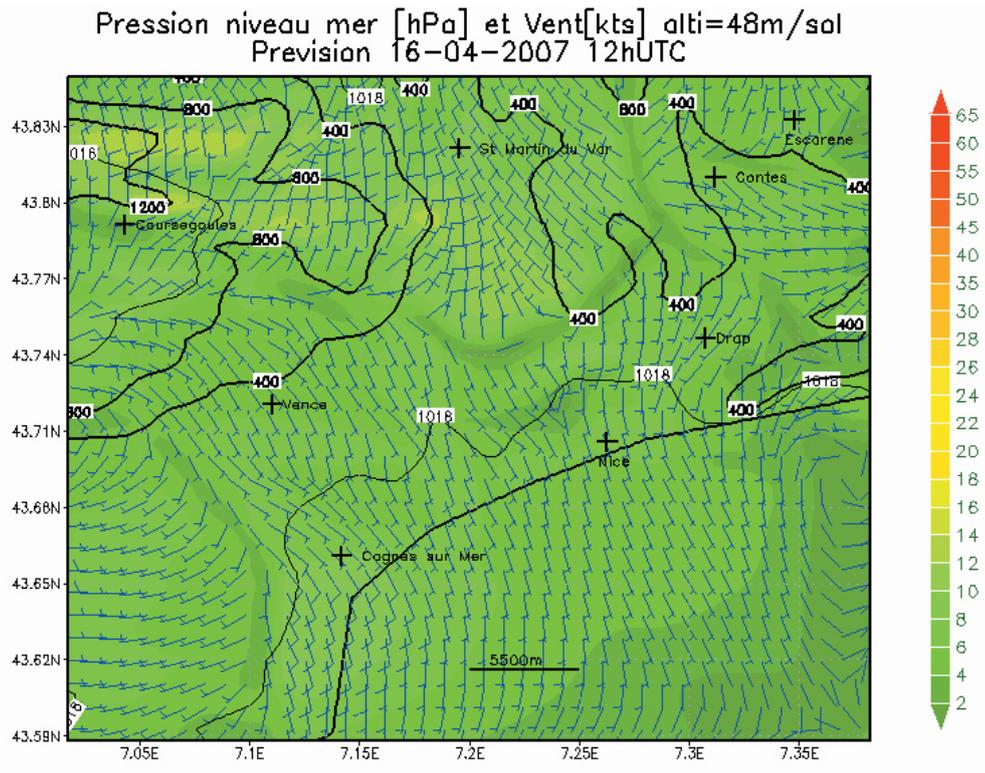


Figure 10. Interpolation par autocorrélation spatiale (IDW) de la vitesse du vent sur le sud des Alpes-Maritimes (N= Nice). Les carrés blancs représentent les postes du réseau utilisés (P. Carrega)



Source : Calculs et réalisation : C. Yohia.

Figure 12. Champ de brise thermique diurne en avril sur le sud des Alpes-Maritimes. Le trait noir inférieur est le tracé du littoral, les autres sont les courbes de niveau 400 et 800 m. Le nord est en haut de la carte. Mailles de 2km pour le calcul, mailles de 4km pour l'affichage (P. Carrega)



Source : Calculs et réalisation : C. Yohia.

Figure 13. Idem fig. 12, mais mailles de 500m pour le calcul, et mailles de 1km pour l'affichage (P. Carrega)

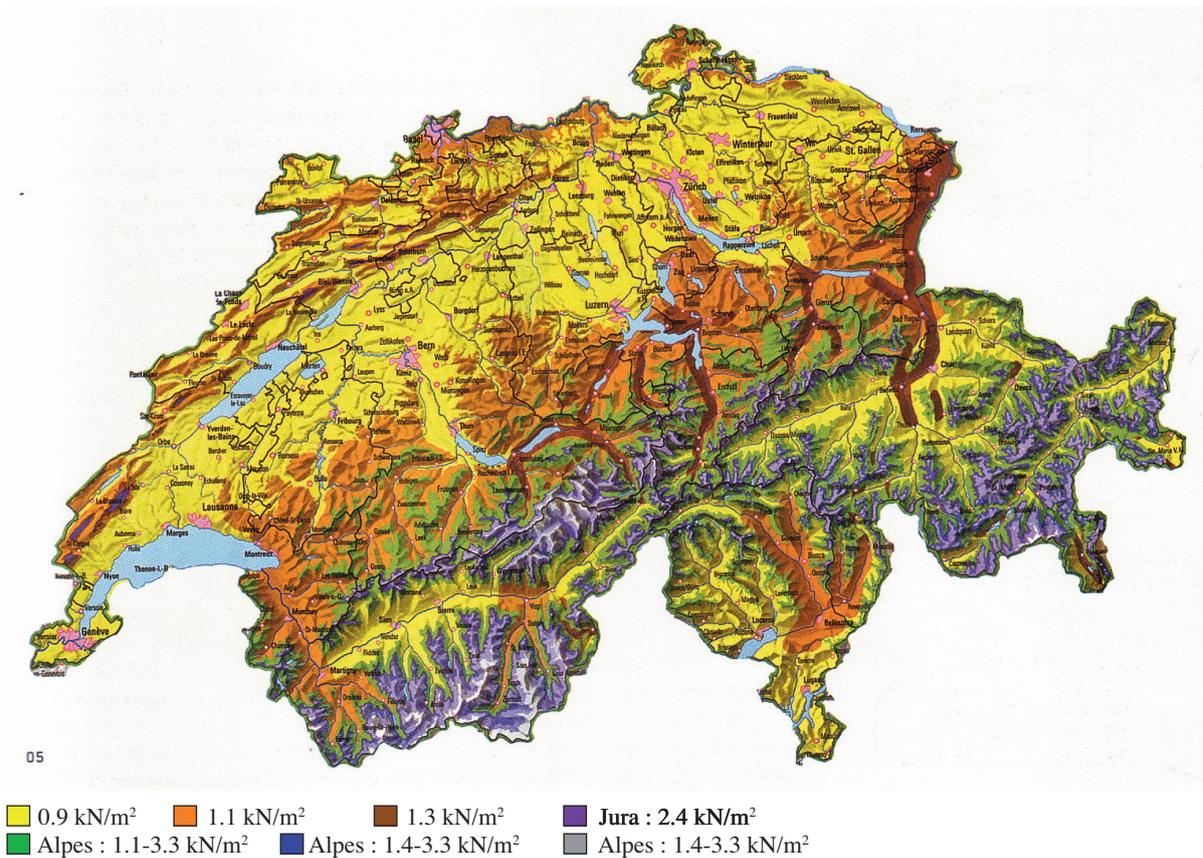


Figure 18. Carte des pressions dynamiques extrêmes en kN/m<sup>2</sup> calculées pour la Suisse (J.-M. Fallot)