

LE CLIMAT AUX ECHELLES FINES

PIERRE CARREGA

*Equipe GVE UMR Espace
Université de Nice - Sophia Antipolis
98 bd Herriot F - 06204 Nice cedex 3
carrega@unice.fr*

Cette conférence d'ouverture du XV^e colloque international de l'A.I.C. centré sur les échelles fines du climat n'est pas un compte-rendu de recherches, mais une sorte d'état des lieux concernant cette thématique qui donne lieu à de multiples travaux et applications, dont le nombre est en fort accroissement, alors qu'elle reste paradoxalement méconnue du grand public. En effet, depuis plusieurs années l'on ressent (à tort ou à raison) une « présence forte » du climat, largement mise en avant par les médias, et ce, dans le plus grand désordre. Ce poids des éléments climatiques n'apparaît le plus souvent pour l'homme de la rue que comme la manifestation locale d'un phénomène commandé à l'échelle de la planète, masquant ainsi les fortes variations spatiales qui se produisent parfois en topographies et conditions géographiques contrastées. Or les phénomènes météorologiques et climatiques résultent de la combinaison de variables à des échelles spatiales et temporelles différentes, et, dans l'ensemble, les efforts des physiciens de l'atmosphère et des météorologues se sont davantage portés sur les grands espaces que sur les phénomènes locaux, plus étudiés par les climatologues agronomes ou géographes, entre autres.

L'échelle étant un rapport entre deux distances (celle de la carte et celle de la réalité), il est clair qu'une grande échelle (1/25 000^e) ne peut s'appliquer qu'à un petit espace, du fait de sa grande précision, et qu'inversement, une petite échelle (1/1000 000^e) concerne une portion de continent. Cette conception adoptée presque exclusivement par les Géographes, est ailleurs généralement remplacée par la vision « littéraire » de l'échelle qui est alors assimilée à une étendue. Pour éviter toute ambiguïté, les termes de « grande » et « petite » échelle seront ici remplacés par « micro » et « macro », suffisamment explicites pour ne pas prêter à confusion (fig. 1). C'est ici des échelles fines, supérieures à l'échelle micro, qu'il sera question, c'est-à-dire celles désignant des espaces de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres, objet d'étude de la topo-climatologie.

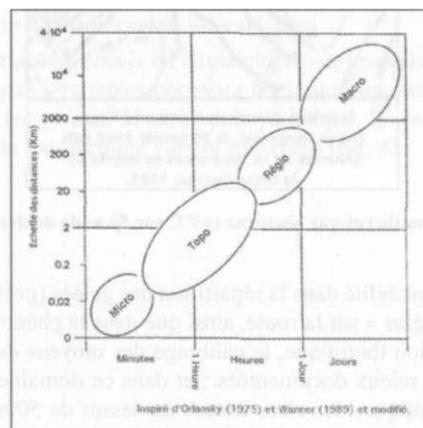


Figure 1 : Relations entre les échelles spatio-temporelles.

Après avoir insisté sur l'intérêt de cette échelle, nous évoquerons les outils utilisés pour la mesure et le traitement des données, pour nous interroger sur l'éventuelle originalité des mécanismes climatiques à cette échelle. La question se pose en effet de montrer comment, localement, la topographie et l'environnement en général, plus que de n'être qu'un obstacle perturbant les mécanismes d'échelle supérieure, engendrent eux-mêmes des phénomènes spécifiques.

1. Place et intérêt des échelles fines

1.1. Applications et domaines variés

Une très grande part des phénomènes climatiques, même non extrêmes, se produisent à une échelle assez locale, à l'opposé du « global » tellement cité, ce qui signifie une forte variation spatiale du phénomène décrit, et les domaines d'applications sont très variés. Cette sous-valorisation des échelles fines souvent traitées comme des « parents pauvres » est assez surprenante, compte-tenu de leur omni-présence.

Il en est en particulier ainsi pour tout ce qui est des températures : il suffira d'un faible déplacement pour constater de fortes variations thermiques, et même franchir un seuil, comme passer d'une température positive à une température négative et vice-versa, avec les conséquences que l'on imagine (fig. 2).

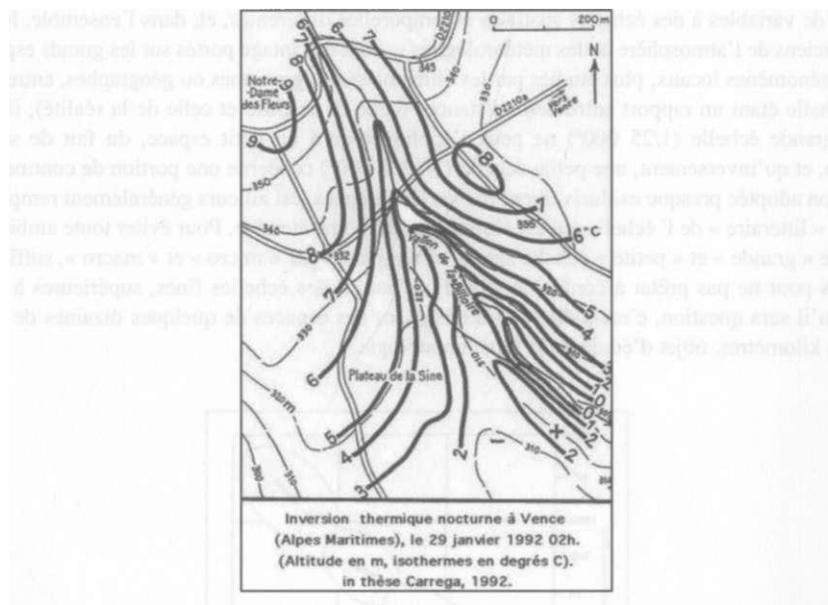
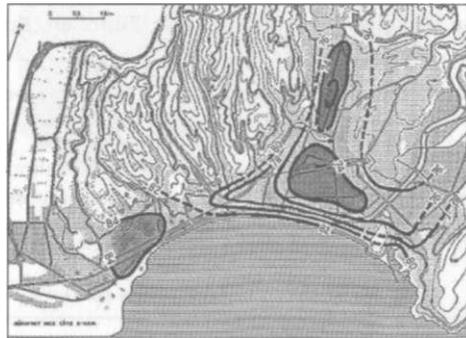


Figure 2 : Forte inversion thermique nocturne (>9°C sur 50 m de dénivellation) dans un vallon.

On constate bien cette sensibilité dans la répartition des gelées (présence - absence) et dans leur intensité, dans celle du « verglas » sur la route, ainsi que dans la phénologie et l'agriculture. Toutes les normes régissant l'isolation thermique, le calibrage des moyens de chauffage ou de climatisation gagneraient ainsi à être mieux documentées ; et dans ce domaine il est frappant de constater que dans certains Atlas climatiques, les aires situées au dessus de 500m d'altitude sont laissées en blanc... La localisation du brouillard au sol obéit le plus souvent elle aussi à des logiques spatiales d'échelle fine.

Moins facile d'accès à l'observateur, même si une approche qualitative en est parfois permise grâce à sa visualisation par la fumée, l'écoulement de l'air est bien obligé de s'adapter à la topographie (quand ce n'est pas elle qui le génère). Certains tourbillons, depuis le « diable » de 2 m de diamètre naissant sur le sol surchauffé du désert ou des terres labourées andalouses, jusqu'à la trombe marine ou la tornade du Kansas, sont vraiment l'illustration d'une échelle « micro » ou « topo » du vent. A moins fine échelle, il en est de même pour les parcours d'orages, la répartition spatiale de leurs précipitations et les épices de très fortes pluies.

Les travaux de climatologie urbaine montrent bien la spécificité des comportements des surfaces construites et de leurs structures, dans les domaines radiatifs, thermiques, hygrométriques (fig. 3), mais aussi dans la ventilation et ses conséquences sur la pollution atmosphérique, et peut-être aussi dans la pluviométrie.



Carte de l'humidité relative moyenne (%) dans la ville de Nice du 28 avril au 11 mai 1986, à 20h. in thèse de P. Carrega, 1992.

Figure 3 : îlot de sécheresse de l'air urbain en soirée, à Nice (Alpes-Maritimes).

A une époque où 80 % de la population des pays développés est urbaine, ce thème ne peut laisser indifférent, et montre aussi la nécessité de considérer non seulement les mesures objectives, mais encore la perception qu'ont les gens de leur environnement climatique ainsi que les effets sanitaires du climat.

1.2. Classification des pas de distances selon les variables

L'un des paramètres pourtant essentiels en climatologie sur lesquels peu d'auteurs ont insisté, est le pas de distance des principales variables décrivant le climat : un transect avec mesure des températures montre bien que par temps clair et sans vent synoptique, les températures du sol ou de l'air sus-jacent, le long d'une route par exemple varient fortement (fig. 4).

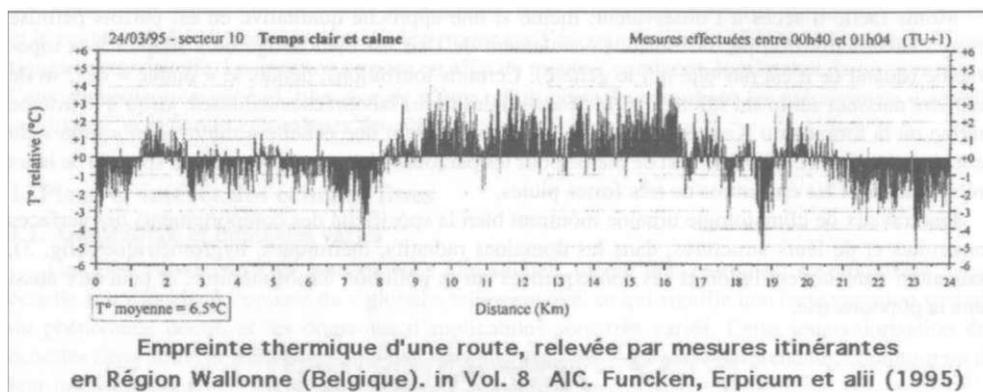


Figure 4 : Changement de température le long d'une route.

En généralisant l'analyse, la température de l'air mesurée en conditions standard varie sur de très faibles distances le jour (maximales), mais dans d'assez modestes proportions (faible amplitude) par rapport aux températures nocturnes (en général minimales) qui par contre sont moins changeantes sur une même distance (fig. 5).

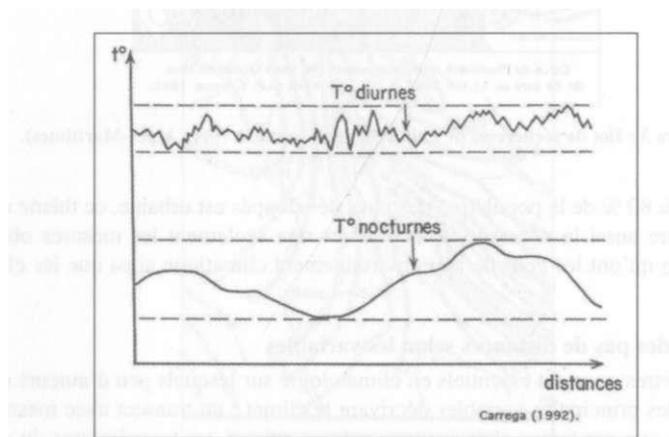


Figure 5 : Variation spatiale de l'amplitude thermique nocturne et diurne.

En considérant les autres variables climatiques, il apparaît que la plus sensible au déplacement horizontal de l'instrument qui la mesure est l'ensemble des rayonnements (solaires absorbé et réfléchi, terrestre, atmosphérique) et donc le bilan radiatif en général, lui-même très lié à la nature et la morphologie du sol et de sa couverture par l'intermédiaire de ses principales caractéristiques physiques. Les vicissitudes de l'écoulement de l'air et de la turbulence montrent aussi une extraordinaire complexité, tandis que la distribution spatiale des précipitations ou de la grêle obéit à des échelles moins fines, bien que du domaine de la topoclimatologie (fig. 6).

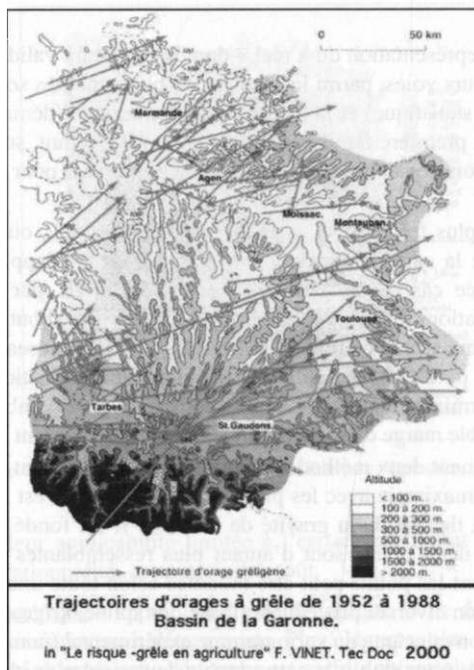


Figure 6 : Couloirs préférentiels d'orages à grêle.

Il apparaît que c'est en définitive surtout l'échelle de la morphométrie du relief (forme et taille des vallées par exemple) qui guide l'échelle de la climatologie (et aussi d'autres paramètres comme la couverture du sol, etc).

2. Les outils

2.1. Mesures

La micro et la topoclimatologie obligent souvent à effectuer des mesures spécifiques car même s'il en existe sur le lieu étudié, elles ne sont généralement pas adaptées à l'échelle désirée, et en nombre insuffisant. Ainsi, on peut définir trois principaux niveaux altitudinaux (ou types de milieu) pour les mesures, entraînant ainsi le recours à un cortège d'appareils et de protocoles associés :

- Mesures de surface (du sol, de la mer, etc) : valeurs de l'albédo, de la température (à partir du flux radiatif infra-rouge terrestre)... opérées par avion, satellite, ou même de quelques mètres de hauteur à partir d'appareils portatifs, mesure de la température au sol (utilité pour le risque de verglas routier). Cas particulier des précipitations qui, contrairement à la philosophie, ne sont pas mesurées au niveau du sol pour éviter des effets secondaires parasites liés à la rugosité du sol ou au splash - (pluviomètres, tables à neige) ;
- Mesures dans l'air sur les premiers mètres ou décimètres au dessus du sol (selon les besoins) : indice actinométrique, température et humidité relative sous abri, flux composant le bilan radiatif, vitesse et direction du vent ;
- Mesures dans l'air libre, au-delà des premiers mètres au dessus du sol, soit par une série de capteurs disposés le long d'un pylône, soit par diverses techniques comme le sondage par ballon perdu (radiosondage) ou ballon captif, comme les ballons plafonnants (dits aussi « équilibrés ») révélant l'écoulement de l'air dont ils sont partie intégrante, dans les trois dimensions, comme aussi les divers radars et profileurs traversant l'air depuis le sol ou à partir de satellites ou d'avions.

2.2. La modélisation

Etant une tentative de représentation du « réel » dont la meilleure validation est une bonne prévision, elle peut suivre plusieurs voies, parmi lesquelles, les plus typiques sont : la modélisation empirique (démarche inductive, statistique) et la modélisation numérique (démarche déterministe, déductive). On peut rattacher à la première famille le travail en modèle réduit, sur maquette (raisonnement par analogie), même si les lois de la physique sont largement utilisées pour reconstituer des situations vraisemblables.

- L'un des recours les plus fréquents à la modélisation statistique, outre l'évolution temporelle d'un phénomène, concerne la cartographie d'une variable, champ d'application géographique par excellence. On part dans ce cas d'une base de données mesurées, par exemple la pluviométrie mesurée par un réseau de stations automatiques ou manuelles, et l'on aboutit également à une base de données de même nature, mais plus complète, puisqu'il s'agit d'un réseau de points (intersections d'une grille) ou de tous les pixels d'une maille d'un Système d'Information géographique ! Le problème consiste donc à déterminer la méthode la plus pertinente pour combler le vide d'informations d'un espace avec la plus faible marge d'erreur possible, tout en connaissant la valeur de cette dernière.

* Il existe schématiquement deux méthodes pour parvenir à ce résultat : la première consiste à se fonder sur la ressemblance maximale avec les plus proches voisins : c'est le principe de l'autocorrélation spatiale, dérivé de la théorie de la gravité de Newton. Il est fondé sur l'idée que les valeurs prises par une variable en deux points sont d'autant plus ressemblantes que ces deux points sont proches. La distance séparant les points peut être modulée selon toute une série de règles ou coefficients, et mise en œuvre selon diverses procédures (fonctions spline, krigeages), tout en étant justifiée par l'allure plus ou moins convaincante du variogramme expérimental (non pépétique de préférence !). Cette logique peut être suivie pour établir la cartographie de variables ne changeant pas beaucoup sur de très faibles distances, surtout en moyenne, comme les précipitations par exemple.

Le problème est que pour certaines variables comme le vent, le rayonnement, la température ou l'humidité relative par exemple, le pas de distance de variation spatiale de la variable est très faible, et en tous cas inférieur à la distance moyenne sur laquelle se fait ressentir l'influence de chaque point sur ses voisins (la « portée » du variogramme). Autrement dit, les stations du réseau de mesures sont trop éloignées les unes des autres pour qu'il soit raisonnable d'espérer construire un réseau de points pour chacun desquels on a calculé sa valeur à partir de ses plus proches voisins. De plus, dès que l'espace devient anisotrope, l'hétérogénéité du milieu enlève tout espoir de suivre efficacement cette voie : deux stations d'un réseau, bien que relativement proches (quelques kilomètres) peuvent être séparées par un interfluve dominant de plusieurs centaines de mètres ! d'autant qu'en montagne les stations sont plus fréquemment positionnées en vallées que sur les lignes de crêtes...

* Une alternative existe : la seconde méthode consiste à se fonder sur les relations entre chaque poste et son environnement pour induire des lois statistiques, à l'aide des techniques d'analyse multivariée, en particulier les régressions multiples. Les fonctions mathématiques résultantes permettent de reconstituer la valeur recherchée de tous les points dont on connaît les valeurs prises par les variables traduisant l'environnement : altitude, exposition, pente en amont, en aval, continentalité, etc.. à l'échelle topo-climatologique ; mais aussi, densité et stratification de la végétation, couleur de la roche ou du sol, etc .. ; à l'échelle micro-climatologique (fig. 7). Cette logique est applicable à condition de justifier d'une intensité de relation satisfaisante entre variable dépendante « à expliquer » et variables indépendantes (« explicatives »), intensité donnée par divers paramètres (coefficients de corrélation total ou partiels, erreur-type, significativité du modèle).

Ces modèles ont depuis longtemps fait leurs preuves et les exemples d'application ne se comptent plus : pluviométrie, températures moyennes ou extrêmes, probabilité de gelées, cartographie des degrés-jours, etc ...

On peut également rattacher à cette famille empirique de modèles les systèmes à bases de connaissances, les réseaux de neurones ... et tout ce qui relève de l'expertise en général ; tous ces modèles

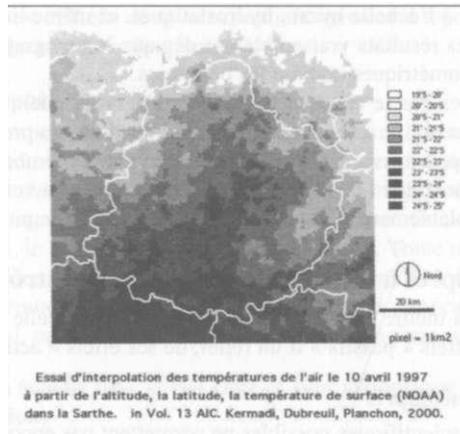


Figure 7 : Exemple d'interpolation spatiale par régression multiple.

ont pour point commun leur applicabilité limitée à l'espace où ils ont été construits (ou presque), souvent une certaine opérationnalité, et un moindre coût.

- La modélisation numérique s'appuie sur un autre logique, celle des mécanismes et processus physiques repris dans un enchaînement déterministe. Plus élégante, plus universelle et plus puissante - sur le principe - que la précédente, cette démarche est parfois obligatoire : c'est elle qui a fait accomplir les progrès indéniables de la prévision météorologique des 20 dernières années à méso échelle. Habituellement utilisés à l'échelle macro ou méso, ces modèles dont l'analyse de détail montre l'appartenance à des catégories très différentes peuvent parfois aisément s'appliquer aux échelles fines, mais au prix de temps de calcul importants, et de coûts élevés, dès lors que les hypothèses de départ ne sont pas trop simplistes. Ainsi, pour tout ce qui relève de la mécanique des fluides, donc l'écoulement du vent, les modèles non hydrostatiques les plus complexes sont de véritables « usines à gaz » qu'il n'est pas imaginable de lancer d'un simple clic (fig. 8). Il existe des modèles beaucoup

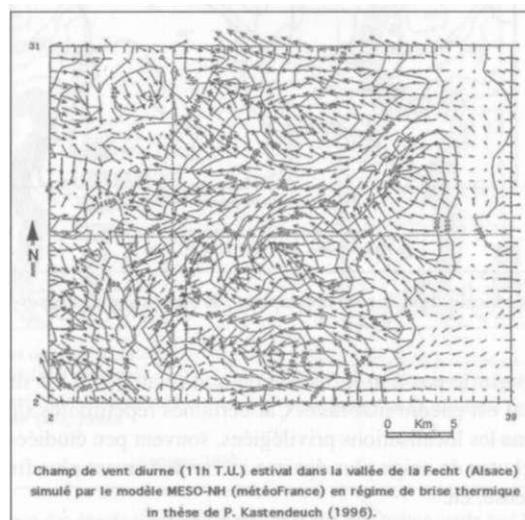


Figure 8 : Modélisation numérique du vent à fine échelle.

plus simples, plutôt adaptés à l'échelle micro, hydrostatiques, et même linéaires, mais qui sont rarement capables de donner des résultats vraisemblables dès que la topographie est plus complexe que quelques simples figures géométriques comme les bâtiments.

Les problèmes engendrés par le chaos déterministe limitent à quelques jours la projection des modèles dans le futur, ce qui oblige à les paramétrer et à introduire du probabilisme, donc à nuancer le déterminisme. Lourds et peu maniables, et demandant en entrée nombre d'informations généralement non disponibles, ils constituent néanmoins l'espoir des années à venir, même si certaines missions continueront vraisemblablement à être l'apanage des modèles empiriques.

3. Des mécanismes propres à cette échelle, mais sous contrôle

L'action la plus facile à mettre en évidence à fine échelle, est celle de la topographie, mais il convient de distinguer les effets « passifs » d'un relief, de ses effets « actifs ».

3.1. Effets locaux encore incompris

Les diverses approches scientifiques possibles ne permettent pas encore de comprendre la localisation ou le déplacement, dans le détail, de nombreux phénomènes aux échelles régionale et fines. Le parcours précis des noyaux dépressionnaires (tropicaux ou tempérés) ou des coulées froides ; et à plus fine échelle, les trajectoires de trombes ou d'épicentres de cellules orageuses, y compris leur déplacement ou stagnation sur place, appartiennent bien à ce type de problème (fig. 9).

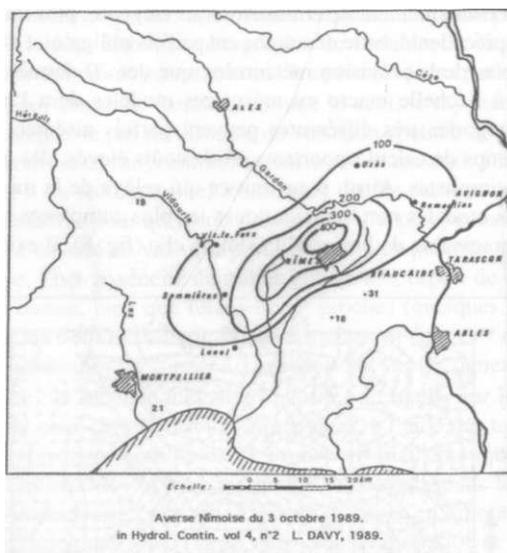


Figure 9 : Exemple de localisation encore incomprise : la stagnation des super-cellules orageuses.

Incompréhension ne signifie pas non-influence ou non-relation ; il est simplement probable que la prise en compte du local est encore mal faite. Car certaines répétitivités suggèrent que le déterminisme n'est pas absent dans les localisations privilégiées, souvent peu étudiées mais bien connues des habitants d'une région : chutes de neige plus épaisse ici ou là, versant plus froid, orage fréquent à tel endroit, brouillard plus dense, etc

Dans ces cas de figure il est difficile de savoir comment agissent la topographie et les phénomènes de plus fine échelle (sols, végétation, anthropisation).

3.2. Action passive de la topographie, prévisible

Ici, la topographie se comporte en fait comme un obstacle inerte, perturbant un écoulement, augmentant la rugosité du substrat. Un vent synoptique, d'échelle macro, va donc s'adapter à ce relief, ce qui fait bien entendu naître des particularités locales, d'échelle régionale comme le Mistral ou la Tramontane, ou encore la Bora, mais aussi d'échelle topoclimatique : dans toutes les vallées parallèles à l'écoulement, par exemple, le vent est accéléré par effet Venturi. Toute une série d'effets se produisent selon l'accord ou désaccord plus ou moins prononcé entre sens de l'écoulement et surface sous-jacente : canalisation, accélération, freinage, déviation, turbulence « mécanique »... mais aussi naissance de rotors à axe vertical, ou horizontal au pied des versants à forte rupture de pente.

3.3. Processus engendrés à échelle fine, si ciel clair et vent synoptique faible (rayonnement - advection)

Dans cette situation, le substrat, de passif, devient actif dans la mesure où il engendre lui-même des disparités climatiques. Le moteur est thermique : il réside dans les inégalités de bilan radiatif- et énergétique - dues aux différences de couleur, conductivité, chaleur spécifique des substrats, aux différences de couverture végétale et d'occupation du sol plus ou moins anthropisé (le cas extrême étant la ville), aux différences d'exposition par rapport au rayonnement solaire, à la pente, aux effets de

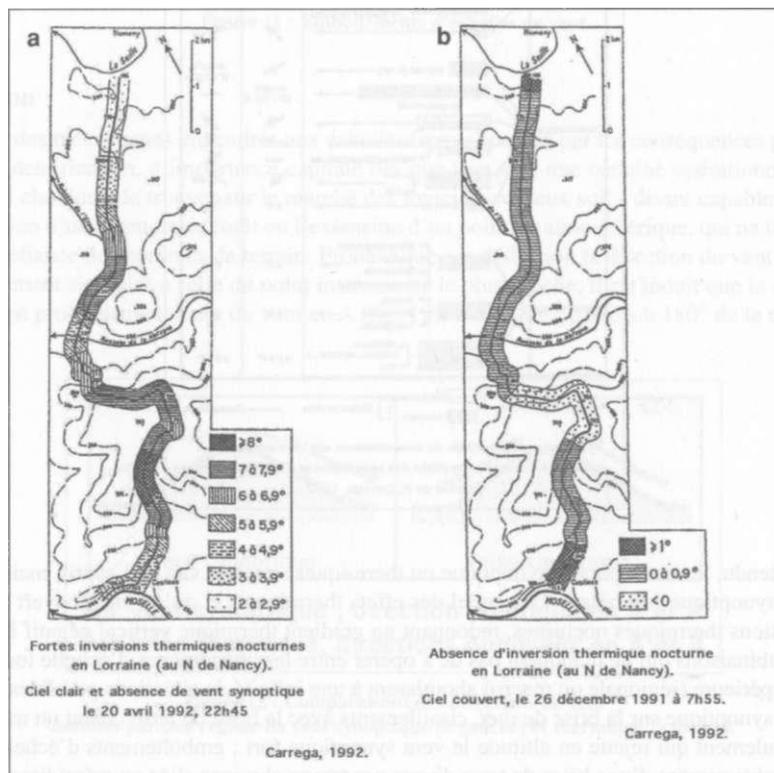


Figure 10 a et b : Comparaison des écarts thermiques spatiaux sur une même route par temps clair (a) et couvert(b).

masque, etc... Les contrastes thermiques résultants génèrent un gradient de pression lui-même à l'origine de la naissance d'écoulements : les brises thermiques (terre - mer, montagne - vallée, campagne - ville, pour l'essentiel). Les inversions thermiques parfois phénoménales constatées dans les vallées, avec constitutions de lacs d'air froid, les vents catabatiques relèvent également de cette famille de mécanismes, ainsi qu'à l'opposé, les ascendances et la turbulence thermiques.

Tous ces phénomènes à forte variabilité spatiale ne sont possibles qu'en conditions « radiatives », c'est à dire avec un ciel clair, ou peu nuageux ; avec une faible humidité de l'air ; et avec un faible vent synoptique. Le ciel clair entraîne et la sécheresse de l'air assurent une bonne transmission du rayonnement solaire direct (faible filtrage atmosphérique) et un faible effet de serre (favorisant le refroidissement nocturne).

L'absence de vent synoptique permet à ces écoulements thermiques de se manifester, et c'est en ce sens que cette échelle est bien sous contrôle des échelle supérieures.

Tableau 1 : Influence des phénomènes physiques sur la température à diverses échelles spatiales.

Echelle spatiale du critère	Paramètres intervenant pour un lieu donné	Effet sur la température	
		Nuit	Jour
Planétaire	Mois		
	Saison		
Synoptique (type de temps)	Pression	→ Humidité	→ Température
	Humidité	→	→
	Trouble de l'air	→	→
	Vitesse verticale	→	→
Topodimatique	Altitude (densité de l'air)	→	Jusqu'à -2° / 100 m
	Encasement (encasement)	→	Jusqu'à -10° / 100 m
	Pente en amont	→	→
	Exposition	→	→
	Mar	→	→
	Lac	→	→
	Brise	± 3°	→
Microclimatique	Micro-topographie	→	→
	Conductivité	→	→
	Chaleur spécifique	→	→
	Densité	→	→
	Stratification	→	→
Environnement artificiel	Matériaux (Maisons, asphalte...)	± 2 à 9°	± 2 à 9°
	Eau	→	→

Formulation simplifiée de connaissances sur les paramètres
 mmandant la variation spatiale des températures à diverses échelle:
 in Thèse de P. Carrega, 1992

Bien entendu, les cas « purs », synoptique ou thermiques sont une vue de l'esprit, mais il est clair qu'un vent synoptique fort balaye l'essentiel des effets thermiques, et qu'un ciel couvert n'engendre pas d'inversions thermiques nocturnes, redonnant un gradient thermique vertical négatif à l'altitude.

Les combinaisons qui ne manquent pas de s'opérer entre les phénomènes d'échelle locale et ceux d'échelle supérieure (régionale ou macro) aboutissent à une infinité de situations possibles : influence du gradient synoptique sur la brise de mer, cisaillements avec la brise de terre créant un matelas froid à faible écoulement qui rejette en altitude le vent synoptique fort ; emboîtements d'échelles de vent (fig. 11) ; établissement d'une brise de terre diurne par temps pluvieux (liée au refroidissement causé par l'évaporation) ; etc.

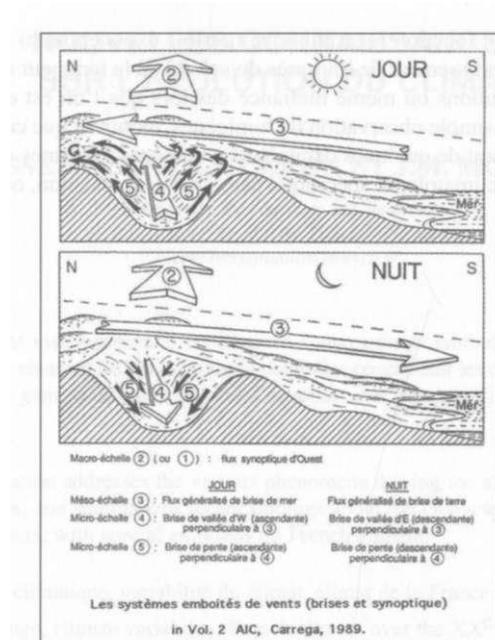


Figure 11 : Emboîtements d'échelles de vent.

Conclusion

Le rôle des mécanismes engendrés aux échelles fines s'impose par les conséquences possibles de leur non - identification, d'importance capitale dès que l'on vise une certaine opérationnalité. Il est aujourd'hui classique de trouver sur le marché des logiciels coûteux soit - disant capables de prévoir la propagation d'un incendie de forêt ou l'extension d'un polluant atmosphérique, qui ne font que renforcer la méfiance des hommes de terrain. Prônant que par définition la direction du vent en un point est sensiblement similaire à celle du point instrumenté le plus proche, il est induit que la direction du vent en B est probablement celle du vent en A (fig. 12), c'est à dire parfois à 180° de la réalité !

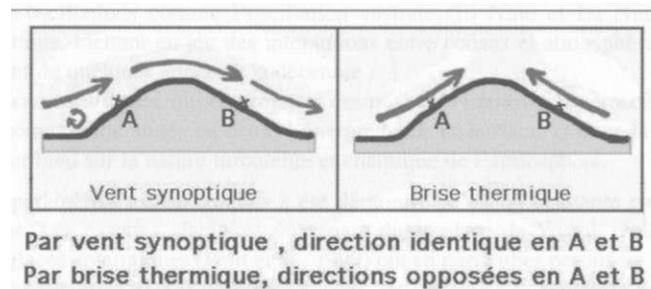


Figure 12 : Comparaisons des directions de vent induites par un régime de vent synoptique (à gauche) et thermique (à droite).

De plus, l'omniprésente fonction logarithmique (parfois exponentielle) utilisée dans les modèles pour rendre compte du ralentissement de l'air près du sol, dû de la longueur de rugosité, doit être examinée avec moultes précautions ou même méfiance dès lors que l'on est en système de brise. Des mesures de vitesse, ou une simple observation de fumigènes, montrent que ce type de profil peut s'appliquer à des hauteurs variant de quelques décimètres à quelques centaines de mètres...

Oui, il existe bien une climatologie spécifique des échelles fines ; non, on ne peut l'isoler de celle des échelles supérieures...